



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΔΕΚΑΕΤΙΑΣ 1970

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΑΝΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΟΥΜΟΥΣΗΣ ΒΛΑΣΙΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

ΑΘΗΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας έγινε για το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Την επίβλεψη της εργασίας είχε ο κ. Β. Κουμούσης, Καθηγητής Ε.Μ.Π. και Διευθυντής του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Εκφράζω τις ευχαριστίες μου προς το πρόσωπό του για την επιστημονική καθοδήγηση και αρωγή καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επιπλέον, θα πρέπει να τον ευχαριστήσω για την απόκτηση γνώσεων τόσο από την παρακολούθηση των μαθημάτων του στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα όσο και στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη συνεργασία, την επιστημονική και ηθική υποστήριξη κατά τις μεταπτυχιακές μου σπουδές και για τη διαρκή προθυμία και διαθεσιμότητά του να επιλύσει τις απορίες μου και να μου παρέχει χρήσιμες συμβουλές και κατευθύνσεις.

Τέλος, πρέπει να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, χάρη στη στήριξη της οποίας, διεκπεραίωσα τις σπουδές μου και συνέταξα την παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η αποτίμηση της συμπεριφοράς και επάρκειας υφιστάμενου κτιρίου, το οποίο είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και η πρόταση ενίσχυσής του. Η κατασκευή αποτελείται από δύο υπόγεια, τρεις ορόφους και έναν τελευταίο όροφο με δύο δώματα. Το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Η προσομοίωση του φορέα του υπό μελέτη κτιρίου υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα SAP2000. Γίνεται εφαρμογή της Δυναμικής Φασματικής Μεθόδου και της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης (Pushover Analysis), μίας ελαστικής και μίας ανελαστικής μεθόδου ανάλυσης αντίστοιχα. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους, αποτιμάται η φέρουσα ικανότητα του υφιστάμενου φορέα και η στατική και σεισμική του απόκριση. Τελικά προτείνεται η ενίσχυση της κατασκευής. Στη συνέχεια, ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση του περιεχομένου των Κεφαλαίων από τα οποία αποτελείται η παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται εν συντομία το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Επισημαίνονται αδυναμίες που χαρακτήριζαν τους κανονισμούς, βάσει των οποίων γινόταν ο σχεδιασμός κατασκευών όπως του υπό μελέτη κτιρίου και επισημαίνεται η διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση αποτίμησης κατασκευών.

Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται συνοπτικά θεμελιώδεις έννοιες του αντισεισμικού σχεδιασμού, απαραίτητες ως θεωρητικό υπόβαθρο για τη διενέργεια των αναλύσεων στη συνέχεια της εργασίας και για την κατανόηση εννοιών Δυναμικής των Κατασκευών, συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών αρθρώσεων και του αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική παρουσίαση τόσο του φορέα όσο και των δεδομένων της μελέτης της κατασκευής. Επίσης, παρουσιάζονται χωρικά προσομοιώματα για κάθε επίπεδο του φορέα του κτιρίου, ώστε να είναι εποπτική η εικόνα της υπό μελέτη κατασκευής.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται σταδιακά η διαδικασία προσομοίωσης του φορέα της υφιστάμενης κατασκευής στο πρόγραμμα SAP2000. Δίνονται πληροφορίες για επιμέρους θέματα που αφορούν την προσομοίωση, κατά την οποία καθορίζονται διαδοχικά οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, τα χαρακτηριστικά των επιμέρους διατομών των δομικών στοιχείων, οι φορτίσεις που επιβάλλονται στο φέροντα οργανισμό της κατασκευής και η προσομοίωση της θεμελίωσης.

Στο Κεφάλαιο 5 υλοποιείται η ιδιομορφική ανάλυση του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής. Διαδοχικά παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία, η διαδικασία εφαρμογής και, έπειτα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της Δυναμικής Φασματικής Ανάλυσης, της ελαστικής μεθόδου ανάλυσης που εφαρμόζεται με χρήση του φάσματος του Ευρωκώδικα 8.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται βασικά θεωρητικά θέματα τα οποία αφορούν τη Στατική Ανελαστική Ανάλυση (Pushover). Μεταξύ άλλων παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές της μεθόδου, η κατανομή των σεισμικών φορτίων και μία μέθοδος που αφορά τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας της κατασκευής.

Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η εφαρμογή της ανάλυσης Pushover στον υφιστάμενο φορέα της κατασκευής. Ακολούθως, παρατίθενται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τους δύο δυσμενέστερους συνδυασμούς φόρτισης που εφαρμόζονται στην υφιστάμενη κατασκευή και διαπιστώνεται η ανάγκη ενίσχυσής της.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η ενισχυμένη κατασκευή με τοποθέτηση δύο πυρήνων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε καίριες θέσεις του φορέα και ακολουθεί η μεθοδολογία προσομοίωσής της. Επιπρόσθετα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pushover για την ενισχυμένη κατασκευή από τα οποία τεκμαίρεται η σεισμική της επάρκεια.

Στο Κεφάλαιο 9 γίνεται αναφορά στα πιο σημαντικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη μεταπτυχιακή εργασία σχετικά με τη διερεύνηση επάρκειας του υφιστάμενου φορέα της υπό μελέτη κατασκευής και την πρόταση για ενίσχυσή του.

ABSTRACT

The aim of the present master thesis is to assess and investigate the static and seismic behavior of a four-storey reinforced concrete building with two basements. There is also a proposal for the strengthening of its bearing structure. The structure was designed and constructed in 1972 at East Attica, Greece. The design was based on the national code of reinforced concrete design (1954), as well as the one concerning earthquake resistant structures (1959). Modern structures designed and evaluated according to contemporary codes such as the Eurocodes and FEMA refer to a certain performance level concerning their expected behavior in future earthquakes. Spectral dynamic analysis and non-linear static analysis (known as pushover analysis) are the applied analysis methods in this thesis - the first being an elastic method and the second an inelastic one.

In the first chapter, a brief presentation of the subject of the present thesis is given. Moreover, disadvantages of older national codes and the importance of evaluating structures are illustrated. The structural model of the building is introduced to SAP 2000, a software for structural analysis that is preferred due to its 3D graphical modeling environment, its integrated design code features and, mainly, because of its main advantage to offer great user interface, while applying complex analysis methods.

In the second chapter, there is a description of the basic theoretical background regarding the design of earthquake resistant structures. Fundamental terms of dynamics of structures such as plasticity, plastic hinges, the performance levels of structures (immediate occupancy, life safety, structural stability), the capacity curve of a certain structure, the concept of target displacement and the definition of the performance point are highlighted. The explanation of the above subjects is needed for the comprehension of the results reached.

In the third chapter, the structure is described and the investigation of its features such as the geometry is presented. The level of knowledge concerning the basic characteristics of the building is classified as normal. There is a visual representation of the structure too. 3D models for each level of the existing building are provided in accordance with the procedure of

simulation of the bearing structure that will be presented in the next chapter.

In the fourth chapter, detailed information is presented regarding the simulation technique of the building, including the material properties, the design of frame and area sections of the concrete members (beams, columns, slabs, etc.), the distribution of dead and live loads and the simulation of the foundation. Its purpose is to provide a full guide of the simulation of the existing structure in SAP 2000.

In the fifth chapter, there is a presentation of modal analysis of the structure, followed by the dynamic spectral analysis that were used to simulate the seismic response of the structure. The methods applied are explained and the procedure of simulation in SAP 2000 is given step - by - step. The dynamic spectral analysis is a linear dynamic analysis method applied to measure the extent of contribution from natural modes and provide the possible maximum seismic response of the building. The response spectrum according to Eurocode 8 is introduced and the final results are presented.

In the sixth chapter, a presentation of non-linear static analysis is given. This type of analysis, known as Pushover analysis too, is a static non-linear method where a structure is subjected to both gravity loading and a monotonic displacement - controlled lateral load pattern. The load pattern increases through elastic as well as inelastic behavior and the process leads to an end when an ultimate condition is reached.

In the seventh chapter, there is a step - by - step description of the application of non-linear static analysis in structural software SAP 2000. The process of analysing a complicated frame structure like the bearing structure of the existing building includes the assignment of material nonlinearity to certain hinge locations. These plastic hinges are the locations where an occurrence of plastic rotation takes place. At this step, introduction of the reinforcement of the structural members is demanded and presented.

Output of the static non-linear analysis method in SAP2000 contains the generation of a static pushover curve that plots a strength - based parameter, such as base reaction against deflection. Results obtained visualise the ductile capacity of the structural system of the existing building. Mechanism of failure, load level as well as deflection at the point where failure occurs are also indicated through the given pushover curve. A picture of the plastic hinges that are developed at the performance point is given to make clear the structural condition of the building at each step of the analysis applied. The results from the analysis process are evaluated and the plastic hinges of several members are examined as well, in order to find their performance level. At last, the need for a retrofit of the structure is concluded.

In the eighth chapter, the proposal for the retrofit of the structure is described analytically. More specifically, there is a presentation of the new model that simulates the structure, as well as the technique used to incorporate changes in the existing model of SAP 2000. Its concept is taking into account both structural and practical problems of the existing building. Concrete walls are proposed to be constructed in two separate positions, in addition to the existing structural system of the building, in order to ameliorate its seismic behavior. Their places depict two certain areas where elevators could get introduced too.

The analysis results depict that for both distributions of lateral forces in both directions, the bearing structure of the building reaches a performance point, characterised as of «Life Safety» category. As a result, the structure is expected to suffer more damage in its members, without collapsing.

In the ninth chapter, the conclusions reached by the present study of the existing building using two structural analyses are mentioned. The retrofit of the bearing structure of the initial existing building is adequate for it to have sufficient ductility in case of a strong future earthquake.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	Σελ.
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xvii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντισεισμικός Κανονισμός της υπό μελέτη κατασκευής.....	1
1.2 Η απαίτηση για αποτίμηση κατασκευών	1
1.3 Αντικείμενο της Μεταπτυχιακής εργασίας	2
2. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	3
2.1 Γενικά στοιχεία.....	3
2.2 Πλαστιμότητα.....	3
2.3 Πλαστικές αρθρώσεις.....	5
2.4 Στάθμες επιτελεστικότητας.....	7
2.5 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής.....	8
2.6 Καμπύλη F-δ μέλους κατασκευής.....	8
2.7 Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής.....	11
2.8 Έλεγχος στοχευόμενης ικανότητας.....	12
2.9 Αποτίμηση σεισμικής επάρκειας κατασκευής.....	14
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	16
3.1 Παρουσίαση του υφιστάμενου κτιρίου.....	16
3.2 Προσομοίωση του φορέα του υφιστάμενου κτιρίου.....	17
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑ- ΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SAP2000	22
4.1 Ορισμός ιδιοτήτων των υλικών	22

4.2	Ορισμός διατομών δομικών στοιχείων του φορέα	23
4.2.1	Γραμμικά στοιχεία.....	23
4.2.1.1	Υποστυλώματα και δοκοί	23
4.2.1.2	Άκαμπτα άκρα υποστυλωμάτων και δοκών.....	25
4.2.1.3	Περιμετρικά στοιχεία τοιχωμάτων.....	26
4.2.1.4	Απομείωση δυσκαμψίας των φερόντων δομικών στοιχείων.....	26
4.2.2	Πλάκες	28
4.2.2.1	Λειτουργία διαφράγματος των πλακών του φορέα της κατασκευής	28
4.2.2.2	Εισαγωγή επιφανειακών στοιχείων πλάκας.....	28
4.3	Ορισμός φορτίσεων.....	32
4.3.1	Φορτία επί δοκών.....	32
4.3.2	Φορτία επί πλακών.....	33
4.3.3	Ορισμός μορφών φόρτισης.....	33
4.4	Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής.....	35
5.	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ.....	38
5.1	Γενικά για τις ελαστικές μεθόδους ανάλυσης	38
5.2	Γενικά για την Ιδιομορφική Φασματική μέθοδο ανάλυσης κατασκευών	38
5.3	Ιδιομορφική Ανάλυση.....	40
5.4	Εισαγωγή του φάσματος σχεδιασμού του EC8.....	46
5.5	Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης.....	47
5.6	Αποτελέσματα της Δυναμικής Φασματικής Μεθόδου.....	51
6.	ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER).....	53
6.1	Γενικά για τις ανελαστικές μεθόδους ανάλυσης.....	53
6.2	Ανελαστική Στατική Ανάλυση (Pushover).....	53
6.3	Βασικές παραδοχές της μεθόδου.....	54
6.4	Κατανομή των σεισμικών φορτίων.....	55
6.5	Εξιδανικευμένη καμπύλη δύναμης – μετακίνησης.....	55
6.6	Συνοπτική παρουσίαση κανονιστικών διατάξεων του ATC – 40 σχετικά με το φά-	

σφα ικανότητα.....	56
7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟ SAP2000 ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	64
7.1 Η μέθοδος Pushover στο SAP2000	64
7.1.1 Καθορισμός ανελαστικής συμπεριφοράς υλικών κατασκευής.....	65
7.1.2 Εισαγωγή οπλισμών στα μέλη του φορέα.....	66
7.1.3 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στις διατομές των μελών.....	67
7.1.4 Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης της ανάλυσης Pushover.....	70
7.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover για την κατασκευή.....	75
7.2.1 Ιδιομορφική κατανομή - Διεύθυνση X (Συνδυασμός: -X+0,3Y).....	76
7.2.2 Ιδιομορφική κατανομή – Διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X).....	81
7.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανελαστικής ανάλυσης.....	86
8. ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	87
8.1 Μέθοδοι για την ενίσχυση κατασκευών και κριτήρια επιλογής τους.....	87
8.2 Πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα κατά την ενίσχυση της κατασκευής.....	88
8.2.1 Δυνατότητα προσομοίωσης με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τοιχώ- ματος.....	91
8.2.2 Ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέ- ματος.....	95
8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover για την ενισχυμένη κατα- σκευή.....	101
8.3.1 Ιδιομορφική κατανομή - Διεύθυνση X (Συνδυασμός: -X+0,3Y).....	102
8.3.2 Ιδιομορφική κατανομή – Διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X).....	107
8.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover για την ενισχυμένη κατα- σκευή.....	112
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σελ.

Εικόνα 2.1 Πλάστιμο (αριστερά) και μη πλάστιμο (δεξιά) δομικό στοιχείο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.....	4
Εικόνα 2.2 Διάταξη συνδετήρων σύμφωνα με σημερινές διατάξεις (αριστερά) και όπως γινόνταν παλιότερα (δεξιά).....	5
Εικόνα 2.3 Ενδεχόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων σε δίστυλο πλαίσιο.....	6
Εικόνα 2.4 Πλαστικές αρθρώσεις και διαγράμματα ροπών.....	6
Εικόνα 2.5 Διάγραμμα έντασης - παραμόρφωσης.....	6
Εικόνα 2.6 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής με τριγωνική κατανομή καθ' ύψος των φορτίων	8
Εικόνα 2.7 Γωνία στροφής - χορδής θ.	9
Εικόνα 2.8 Ιδεατή μορφή διαγράμματος F-δ στοιχείων κατασκευής.	9
Εικόνα 2.9 Καμπτικός (αριστερά) και διατμητικός (δεξιά) τρόπος συμπεριφοράς καμπυλών F-δ μελών κατασκευής	10
Εικόνα 2.10 Προσδιορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη ικανότητας φορέα κατασκευής.....	12
Εικόνα 2.11 Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.....	13
Εικόνα 2.12 Σύγκριση της στοχευόμενης μετακίνησης και της αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας	13
Εικόνα 3.1 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του β' υπογείου σε SAP2000	18
Εικόνα 3.2 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του α' υπογείου σε SAP2000	19
Εικόνα 3.3 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του ισόγειου ή του α' ορόφου σε SAP2000	20
Εικόνα 3.4 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του β' και γ' ορόφου σε SAP2000.....	21
Εικόνα 4.1 Ορισμός ιδιοτήτων σκυροδέματος (concrete) C16/20 και χάλυβα οπλισμού	

(rebar) S400 στο SAP2000	22
Εικόνα 4.2 Ορισμός ιδιοτήτων (γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικού) διατομής ορθογωνικής δοκού (beam) B20/40B στο SAP2000	24
Εικόνα 4.3 Ορισμός ιδιοτήτων (γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικού) διατομής ορθογωνικού υποστυλώματος (column) C40/20B στο SAP2000.....	24
Εικόνα 4.4 Εισαγωγή άκαμπτων άκρων σε υποστυλώματα και δοκούς για εξασφάλιση επιβολής ενιαίων μετακινήσεων των σημείων εντός των κόμβων στο SAP2000.	25
Εικόνα 4.5 Προσομοίωση του περιμετρικού τοιχώματος των δύο υπογείων με άκαμπτες χιαστί ράβδους στο SAP2000.....	26
Εικόνα 4.6 Μειωτικοί συντελεστές δυσκαμψίας δοκού στο SAP2000.....	27
Εικόνα 4.7 Ορισμός διατομής πλάκας PLAKA/0,14 πάχους 0,14m στο SAP2000	30
Εικόνα 4.8 Διακριτοποίηση επιφανειακού στοιχείου πλάκας σε μικρότερα στο SAP2000.....	30
Εικόνα 4.9 Εμφάνιση διακριτοποίησης τετραέρειστης πλάκας σε μικρότερα (10x10) επιφανειακά στοιχεία στο SAP2000.....	31
Εικόνα 4.10 Παράδειγμα ανάθεσης ομοιόμορφα κατανεμημένου μόνιμου φορτίου (G) σε δοκό στο SAP2000.	33
Εικόνα 4.11 Παράδειγμα ανάθεσης ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου ωφέλιμου φορτίου (Q) σε πλάκα στο SAP2000.....	34
Εικόνα 4.12 Ορισμός μορφών φόρτισης (Load Patterns) στο SAP2000	35
Εικόνα 4.13 Συμβολισμός πάκτωσης σε βάση υποστυλώματος στο SAP2000.....	35
Εικόνα 4.14 Χωρικό προσομοίωμα υφιστάμενης κατασκευής στο SAP2000.....	36
Εικόνα 4.15 Χωρικό προσομοίωμα υφιστάμενης κατασκευής υπό διαφορετικές γωνίες στο SAP2000.....	37
Εικόνα 5.1 Υπολογισμός της μάζας του φορέα βάσει συνδυασμού $G+0,3Q$ στο SAP2000....	41
Εικόνα 5.2 Καρτέλα ιδιομορφικής ανάλυσης MODAL στο SAP2000.....	41
Εικόνα 5.3 Πρώτη ιδιομορφή με $T_1 = 0,745s$, $f_1=1,343$ (Μεταφορική κατά X).....	43
Εικόνα 5.4 Δεύτερη ιδιομορφή με $T_2 = 0,699s$, $f_2=1,431$ (Μεταφορική κατά Y).	44

Εικόνα 5.5 Τρίτη ιδιομορφή με $T_3 = 0,635s$, $f_3=1,574$ (Στροφική)	45
Εικόνα 5.6 Ορισμός Φάσματος Σχεδιασμού κατά EC8 οριζόντιας συνιστώσας στο SAP2000.....	47
Εικόνα 5.7 Ορισμός σεισμικής φόρτισης Fasma-X στην οριζόντια διεύθυνση X στο SAP2000.....	48
Εικόνα 5.8 Ορισμός στατικού συνδυασμού $D+G+0,3Q$ στο SAP2000.....	49
Εικόνα 5.9 Εισαγωγή συνδυασμού $D + G + 0.3Q + Ex + 0.3Ey$ στο SAP2000.....	50
Εικόνα 5.10 Ορισμός φορτίσεων για ανάλυση προσομοιώματος φορέα στο SAP2000.....	50
Εικόνα 6.1 Διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής.....	56
Εικόνα 6.2 Μετάβαση από ελαστικό φάσμα σχεδιασμού στη μορφή ADRS.....	57
Εικόνα 6.3 Κατασκευή καμπύλης ικανότητας της κατασκευής και φάσματος ικανότητας. ...	58
Εικόνα 6.4 Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.....	58
Εικόνα 6.5 Δημιουργία διγραμμικού φάσματος ικανότητας.....	59
Εικόνα 6.6 Υπολογισμός υστερητικής απόσβεσης κατά Chopra.....	60
Εικόνα 6.7 Απομειωμένο ελαστικό φάσμα απόκρισης	62
Εικόνα 7.1 Πρότυπα της ASCE 41-13 για τη γενική μορφή καμπύλης δύναμης – παραμόρφωσης και στάθμες επιτελεστικότητας επί αυτής	65
Εικόνα 7.2 Εισαγωγή οπλισμού S400 διατομής δοκού B20/60 <u>B</u> στο SAP2000. Ο δείκτης <u>B</u> αφορά 4φ12	66
Εικόνα 7.3 Εισαγωγή οπλισμού (4φ18) διατομής υποστυλώματος C24/55 στο SAP2000	67
Εικόνα 7.4 Πλαστικές αρθρώσεις στο 5% και 95% του μήκους δοκού στο SAP2000.....	68
Εικόνα 7.5 Ορισμός ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε στοιχείο δοκού στο SAP2000.....	68
Εικόνα 7.6 Πλαστικές αρθρώσεις στο 5% και 95% του μήκους υποστυλώματος στο SAP2000.....	69
Εικόνα 7.7 Ορισμός ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε στοιχείο υποστυλώματος στο SAP2000.....	69
Εικόνα 7.8 Ορισμός συνδυασμού φόρτισης $D+G+0.3Q_NONLINEAR$ για μόνιμα και κινη-	

τά φορτία στο SAP2000	71
Εικόνα 7.9 Ορισμός ομοιόμορφης κατανομής φόρτισης OMOIOMORFH_X+0.3Y κατά X στο SAP2000	72
Εικόνα 7.10 Ορισμός ιδιομορφικής κατανομής φόρτισης IDIOMORFIKH_X+0.3Y κατά X στο SAP2000	72
Εικόνα 7.11 Καθορισμός μη γραμμικών παραμέτρων ανάλυσης Pushover στο SAP2000	73
Εικόνα 7.12 Καθορισμός ελεγχόμενης μετακίνησης και πλήθους βημάτων ανάλυσης Pushover στο SAP2000	74
Εικόνα 7.13 Καμπύλη ικανότητας φορέα στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X+0,3Y) στο SAP2000	76
Εικόνα 7.14 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X+0,3Y) στο SAP2000	76
Εικόνα 7.15 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y)	78
Εικόνα 7.16 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο υποδεικνυόμενο με βέλος φάτνωμα (μπροστινή όψη κατά X) του φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y)	79
Εικόνα 7.17 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνυόμενο με βέλος κόμβο υποστυλώματος της προηγούμενης εικόνας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: X+0,3Y)	80
Εικόνα 7.18 Καμπύλη ικανότητας φορέα στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X) στο SAP2000	81
Εικόνα 7.19 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X) στο SAP2000	81
Εικόνα 7.20 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).	83
Εικόνα 7.21 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο κάθετο φάτνωμα με αυτό της Εικόνας 7.16 (μπροστινή όψη κατά Y) του φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X)	84
Εικόνα 7.22 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνυόμενο με βέλος κόμβο υποστυλώματος (σε διαφορετικό από το υποστυλώμα που είχε επισημανθεί στην Εικόνα 7.16) της προηγούμε-	

νης εικόνας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).....	85
Εικόνα 8.1 Χωρικό προσομοίωμα ενισχυμένης κατασκευής στο SAP2000.....	89
Εικόνα 8.2 Χωρικό προσομοίωμα ενισχυμένης κατασκευής υπό διαφορετικές γωνίες στο SAP2000.....	90
Εικόνα 8.3 Προσομοίωση των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέματος 4 επιπέδων (αριστερά) και 5 επιπέδων (δεξιά) με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στο SAP2000.....	91
Εικόνα 8.4 Διαδικασία διακριτοποίησης επιφανειακού στοιχείου που αναπαριστά τοίχωμα σε 4 στοιχεία οριζοντίως και σε 6 στοιχεία κατακορύφως στο SAP2000.....	92
Εικόνα 8.5 Ιδιότητες διατομής TOIXEIO/0,15 πάχους 0,15m επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων αναπαράστασης τοιχώματος στο SAP2000.....	93
Εικόνα 8.6 Ιδιότητες συνδετικού στοιχείου CONNECTION των επιφανειακών στοιχείων τοιχωμάτων με τις γειτονικές σε αυτά δοκούς στο SAP2000.....	94
Εικόνα 8.7 Μονολιθική σύνδεση δοκού με γραμμικά στοιχεία CONNECTION επί των πλευρών επιφανειακών στοιχείων τοιχωμάτων (κόμβος σύνδεσης δοκού - τοιχωμάτων) στο SAP2000.....	94
Εικόνα 8.8 Ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση τοιχώματος (αριστερά) για έναν όροφο με χρήση ενός ισοδύναμου στύλου και δύο οριζόντιων βοηθητικών στερεών βραχιόνων για κάθε όροφο (δεξιά).....	95
Εικόνα 8.9 Ορισμός ιδιοτήτων (γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικού) διατομής ισοδύναμου στύλου - κορμού τοιχώματος στο SAP2000.....	96
Εικόνα 8.10 Μειωτικοί συντελεστές δυσκαμψίας κορμού τοιχώματος στο SAP2000.....	97
Εικόνα 8.11 Ορισμός ιδιοτήτων διατομής στερεού βραχίονα στο SAP2000.....	97
Εικόνα 8.12 Προσομοίωση των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέματος 4 επιπέδων (αριστερά) και 5 επιπέδων (δεξιά) με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων (κατά αντιστοιχία με την Εικόνα 8.3) στο SAP2000.....	98
Εικόνα 8.13 Χωρικό προσομοίωμα (με τα αρχικά υποστυλώματα και δοκούς στις κόκκινες θέσεις) του φορέα της κατασκευής πριν την ενίσχυση (προβολή επιπέδου ισογείου).....	99

Εικόνα 8.14 Χωρικό προσομοίωμα (με γραμμικά στοιχεία για τους πυρήνες στις κόκκινες θέσεις) του φορέα της κατασκευής μετά την ενίσχυση (προβολή επιπέδου ισογείου).....	100
Εικόνα 8.15 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) ενισχυμένου φορέα στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: $-X+0,3Y$) στο SAP2000.....	102
Εικόνα 8.16 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).....	104
Εικόνα 8.17 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο ίδιο φάτνωμα (βλ. θέση στην Εικόνα 7.15) (μπροστινή όψη κατά X) του ενισχυμένου φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).....	105
Εικόνα 8.18 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνυόμενο με βέλος κόμβο δοκού της προηγούμενης εικόνας του ενισχυμένου φορέα (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).....	106
Εικόνα 8.19 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) ενισχυμένου φορέα στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: $Y-0,3X$) στο SAP2000.....	107
Εικόνα 8.20 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: $Y-0,3X$).....	109
Εικόνα 8.21 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο κάθετο φάτνωμα με αυτό της Εικόνας 7.16 (μπροστινή όψη κατά Y) του ενισχυμένου φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: $Y-0,3X$).....	110
Εικόνα 8.22 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνυόμενο με βέλος κόμβο υποστυλώματος της προηγούμενης εικόνας του ενισχυμένου φορέα (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: $Y-0,3X$)..	111

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα Ιδιομορφικής Ανάλυσης (Ιδιομορφές και ποσοστά ενεργοποιούμενων μαζών).	42
Πίνακας 5.2 Μέγιστα μεγέθη μετακινήσεων και στροφών - Διεύθυνση X	51
Πίνακας 5.3 Μέγιστα μεγέθη μετακινήσεων και στροφών - Διεύθυνση Y	51
Πίνακας 5.4 Μέγιστα εντατικά μεγέθη σε υποστυλώματα για διεύθυνση X.....	52
Πίνακας 5.5 Μέγιστα εντατικά μεγέθη σε υποστυλώματα για διεύθυνση Y.....	52
Πίνακας 6.1 Τύποι συμπεριφοράς κατασκευής και συντελεστές κ.....	60
Πίνακας 6.2 Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ ανάλογα με τον τύπο συμπεριφοράς.	61
Πίνακας 6.3 Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης SR_A και SR_V	62
Πίνακας 7.1 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).	77
Πίνακας 7.2 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).	77
Πίνακας 7.3 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: $Y-0,3X$).	82
Πίνακας 7.4 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: $Y-0,3X$).	82
Πίνακας 8.1 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) για τον ενισχυμένο φορέα στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).	102
Πίνακας 8.2 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).	103
Πίνακας 8.3 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) για τον ενισχυμένο φορέα στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: $Y-0,3X$).	107
Πίνακας 8.4 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: $Y-0,3X$).	108
Πίνακας 8.5 Πλήθος πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα της κατασκευής πριν και μετά την ενίσχυση.....	112

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντισεισμικός Κανονισμός της υπό μελέτη κατασκευής

Η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του υπό μελέτη κτιρίου έγινε σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό του 1959, όπου παρατηρείται η πρώτη εμφάνιση της απαίτησης σχεδιασμού για δυνάμεις οριζόντιες, ανάλογες της σεισμικότητας της περιοχής και της μάζας του φορέα.

Συνηθισμένο πρόβλημα σε κατασκευές πριν από το 1985 είναι η αδυναμία υπολογισμού και συχνά η μη εξασφάλιση της πλαισιακής λειτουργίας του φορέα της κατασκευής, καθώς οι θέσεις υποστυλωμάτων, δοκών και η χρήση ενισχυμένων ζωνών υπαγορεύονταν από τους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς. Επίσης, προστίθενται αδυναμίες όπως η μη εφαρμογή ικανοτικού σχεδιασμού, η όπλιση σε κόμβους είτε τοιχωμάτων - δοκών είτε υποστυλωμάτων - δοκών που κρίνεται μη επαρκής, τα μικρά ποσοστά σε εγκάρσιο και διαμήκη οπλισμό του φορέα, οι περιορισμένες αγκυρώσεις του διαμήκους οπλισμού, οι μικρές τιμές αντοχής των χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα) και η έλλειψη εξασφάλισης της τοπικής πλαστιμότητας των δομικών στοιχείων.

Η τελευταία, μάλιστα, για τέτοιας χρονολογίας κτίρια θεωρείται ότι λαμβάνει τιμές από 1,5 έως 2, επιδεινώνοντας με αυτό τον τρόπο τη σεισμική τους τρωτότητα. Η τοπική πλαστιμότητα μελών απουσίαζε από τον Κανονισμό του 1954, ο οποίος αφορούσε το σχεδιασμό φερόντων δομικών στοιχείων σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος και εξέταζε κατά βάση σχεδιασμό για την παραλαβή κατακόρυφων φορτίων.

1.2 Η απαίτηση για αποτίμηση κατασκευών

Ιδίως τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται όλο και περισσότερο η απαίτηση για αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών, ούτως ώστε να εξεταστεί το ενδεχόμενο ενίσχυσης για δεδομένη σεισμική επίδοση (με κριτήριο κάποια στάθμη

επιτελεστικότητας) με ελεγχόμενο κόστος, αλλά αξιοπιστία και επιτυχία. Η μεταλαστική συμπεριφορά και πλαστιμότητα, που εξασφαλίζουν ορθό και αποτελεσματικό τρόπο συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων σε μια κατασκευή, είχαν αγνοηθεί σε παλαιότερα δομήματα, με τα μέλη τους διαστασιολογημένα να έχουν ψαθυρή συμπεριφορά και με δεδομένη αδυναμία να απορροφήσουν την ενέργεια από τη σεισμική διέγερση με ικανοποιητικό τρόπο.

Κατά συνέπεια, κρίθηκε επιβεβλημένο να οριστούν κριτήρια όσον αφορά την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας κατασκευών. Βάσει των απαιτήσεων αυτών καθίσταται σαφής ο τρόπος με τον οποίο το υφιστάμενο κτίριο, προ της ενισχύσεως, αναμένεται να συμπεριφερθεί σε πιθανή ισχυρή μελλοντική σεισμική διέγερση και, αν τελικά, η ενίσχυσή του είναι αναγκαία. Σύγχρονες διατάξεις κανονισμών (π.χ. στον Ευρωκώδικα 8, στον Ελληνικό ΚΑΝ.ΕΠΕ. και στη FEMA) προσανατολίζουν τόσο το σχεδιασμό όσο και την αποτίμηση των κατασκευών με κριτήριο μια συγκεκριμένη στάθμη επιτελεστικότητας.

1.3 Αντικείμενο της Μεταπτυχιακής εργασίας

Το αντικείμενο μελέτης της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ελαστική (δυναμική φασματική ανάλυση) και ανελαστική μέθοδος ανάλυσης (ανελαστική στατική ανάλυση). Στη συνέχεια, προτείνεται τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου λόγω μη ικανοποιητικής επάρκειας της συμπεριφοράς του, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προηγήθηκαν και διενεργήθηκαν ακολουθώντας τις απαιτήσεις που υπαγορεύονται από τις διατάξεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής.

Το προσομοίωμα του φορέα υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα SAP2000 λόγω του συγκριτικού του πλεονεκτήματος να έχει ο χρήστης - μηχανικός την ευχέρεια να προσδιορίζει τις παραμέτρους προσομοίωσης του φορέα λεπτομερώς. Η ικανοποίηση υψηλών απαιτήσεων παραμετροποίησης αξιοποιείται για τις αναλύσεις της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και έχει καταστήσει το SAP ως ένα εργαλείο ανάλυσης ευρέως διαδεδομένο παγκοσμίως. Ειδικότερα, απουσιάζουν προεπιλεγμένες ρυθμίσεις υπό το πρίσμα επιλογής συγκεκριμένου κανονισμού μελέτης της κατασκευής σε εκτεταμένο βαθμό, οπότε επιτρέπεται να παρέμβουμε ενεργά, προσδιορίζοντας σταδιακά τις απαιτήσεις των ισχύοντων κανονιστικών διατάξεων καθώς και τις λεπτομέρειες του προσομοιώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

2.1 Γενικά στοιχεία

Η αρχή του προσδιορισμού αποδεκτού επιπέδου βλαβών, το οποίο ονομάζεται στάθμη επιτελεστικότητας βάσει της επιδιωκόμενης απαίτησης - στόχου σεισμικής ικανότητας είναι η βάση του αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας.

Αντίθετα προς την κατεύθυνση της κλασικής μεθοδολογίας όπου μελετούσαμε τη συμπεριφορά του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής έως το σημείο εμφάνισης πρώτων ζημιών - δηλαδή το πώς αποκρίνεται ελαστικά- χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη του τι συμβαίνει μετά, τώρα πλέον μελετάται ο πραγματικός τρόπος συμπεριφοράς της κατασκευής σε διάφορα επίπεδα έντασης του σεισμού και το αναμενόμενο επίπεδο ζημιών που αντιστοιχεί σε αυτά.

Η μεθοδολογία αυτή των σταθμών επιτελεστικότητας εφαρμόζεται για να ελεγχθεί μία κατασκευή που έχει διαστασιολογηθεί προηγουμένως, αλλά συνήθως για να ελεγχθεί και, έπειτα, να ενισχυθεί ένας υφιστάμενος φορέας. Πάνω σε αυτή, άλλωστε, βασίζονται οι κανονισμοί επεμβάσεων, όπως ο EC8-3 και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. Επισημαίνεται ότι για να εφαρμοστεί η μεθοδολογία, θα πρέπει να γνωρίζουμε το πώς συμπεριφέρεται ο φορέας της υπό μελέτη κατασκευής μετελαστικά, δηλαδή από το στάδιο που δημιουργούνται οι αρχικές ρωγμές έως και αυτό της οιονεί κατάρρευσης.

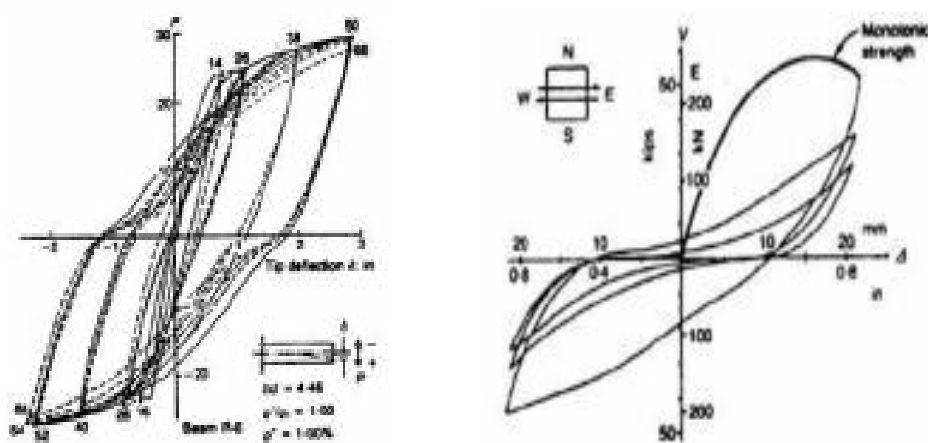
2.2 Πλαστιμότητα

Η πλαστιμότητα αφορά την ικανότητα που έχει ένας φορέας, στοιχείο ή υλικό να υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις άνευ μείωσης ή απώλειας της ικανότητας του να φέρει φορτία. Υλικά όπως το άοπλο σκυρόδεμα λέγονται ψαθυρά, δηλαδή έχουν μικρή πλαστιμότητα, ενώ υλικά όπως ο χάλυβας λέγονται όλκιμα, δηλαδή έχουν μεγάλη

πλαστιμότητα.

Στους κανονισμούς οι πιο πολλοί συντελεστές που χρησιμοποιούμε, βασίζονται στη θεώρηση ότι στην κατασκευή καταναλώνεται μέρος της σεισμικής ενέργειας ως έργο πλαστικών παραμορφώσεων. Κατά συνέπεια, από την πλαστιμότητα προσδιορίζεται η κατάρρευση ή η μη κατάρρευση μιας κατασκευής σε ένα δυνατό σεισμό. Έτσι η πλαστιμότητα αποκτά πολύ σπουδαίο ρόλο στην αντισεισμικότητα μιας κατασκευής.

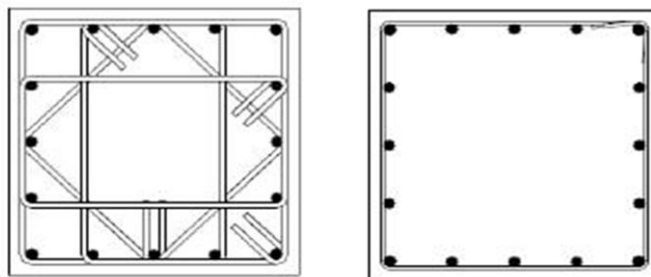
Στην πράξη βέβαια είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε ή να εκτιμήσουμε την πλαστιμότητα μιας υφιστάμενης κατασκευής, επειδή δεν υπεισέρχεται άμεσα ως φυσικό μέγεθος σε κανονισμούς ή μεθόδους που να έχουν επικρατήσει. Μια κατασκευή χαρακτηρίζεται ως πλάστιμη όταν τα στοιχεία τα οποία την αποτελούν συμπεριφέρονται πλάστιμα. Αυτά με τη σειρά τους λέμε ότι συμπεριφέρονται πλάστιμα όταν παρουσιάζουν αύξηση των παραμορφώσεων χωρίς μεγάλη μείωση της αντοχής τους για μονοτονική φόρτιση και όταν έχουν βρόγχους υστέρησης δύναμης - παραμόρφωσης περίπου σταθερούς σε πλάτος και μέγιστη δύναμη σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση για σταθερό εύρος κύκλων παραμόρφωσης. Στοιχεία κατασκευής δε συμπεριφέρονται πλάστιμα όταν εμφανίζουν μεγάλη μείωση δυσκαμψίας και αντοχής έπειτα από δύο ή τρεις κύκλους φόρτισης - επαναφόρτισης.



Εικόνα 2.1 Πλάστιμο (αριστερά) και μη πλάστιμο (δεξιά) δομικό στοιχείο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Αύξηση της πλαστιμότητας τμημάτων που αποτελούν τη διατομή δομικού στοιχείου προσφέρει πλάστιμο τρόπο συμπεριφοράς στο στοιχείο (π.χ. στο οπλισμένο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με τοποθέτηση συνδετήρων στις κρίσιμες περιοχές των δομικών στοιχείων

(περίσφιξη), χάρη στους οποίους αποκτάται ικανότητα πλαστικής στροφής στα άκρα των στοιχείων).



Εικόνα 2.2 Διάταξη συνδετήρων σύμφωνα με σημερινές διατάξεις (αριστερά) και όπως γινόταν παλιότερα (δεξιά).

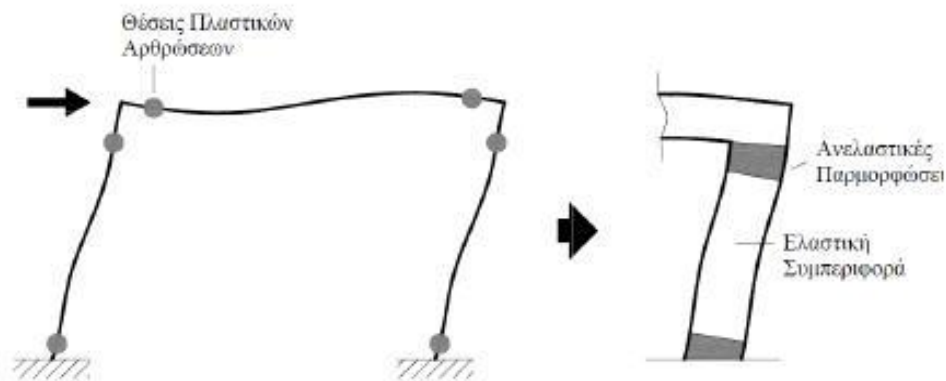
2.3 Πλαστικές Αρθρώσεις

Η ελαστική θεωρία μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά ενός φορέα με ελαστική απόκριση σε μια δράση. Οι κατασκευές, όμως, είναι ζητούμενο να σχεδιάζονται ώστε να έχουν πλαστική συμπεριφορά υπό την επίδραση σεισμικών φορτίσεων. Επειδή λοιπόν όταν δημιουργούνται σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις στα στοιχεία, αυτές καταναλώνουν ενέργεια που εισάγει ο σεισμός στο φορέα, τις θεωρούμε βάση για το σχεδιασμό κατασκευών. Επιπλέον, για να καταλήξουμε σε ακριβή συμπεράσματα για τη φέρουσα ικανότητα μιας κατασκευής είναι σκόπιμο να λαμβάνουμε υπόψη μας τη δυνατότητα κατανάλωσης ενέργειας από αυτήν. Η ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής εισάγεται στις ελαστικές μεθόδους χάρη στο συντελεστή συμπεριφοράς q , ενώ στις ανελαστικές αναλύσεις θα πρέπει ο τρόπος συμπεριφοράς των μελών της κατασκευής να προσομοιωθεί άμεσα σε όλο το φάσμα απόκρισής τους.

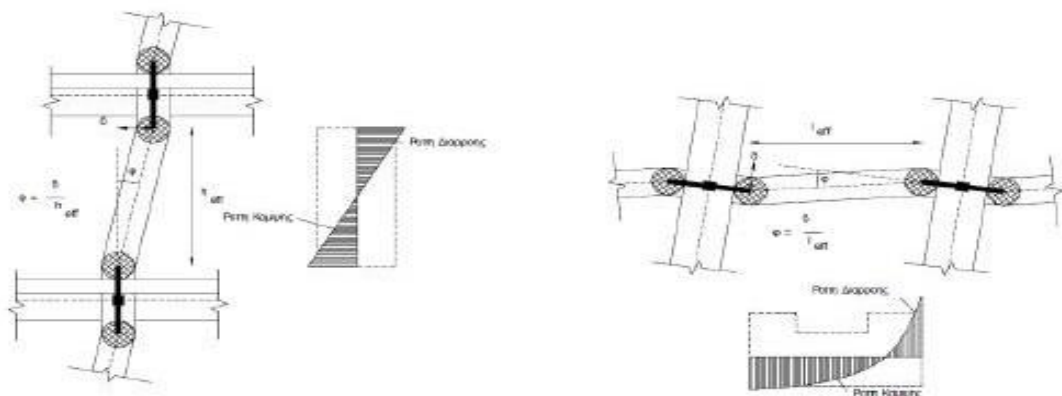
Τα στοιχεία ενός φορέα, υπό την επίδραση αυξανόμενης έντασης, σταδιακά διαρρέουν και δημιουργούν ανελαστικές παραμορφώσεις σε θέσεις οι οποίες απαντώνται στα άκρα δοκών και στην κορυφή και βάση των υποστυλωμάτων. Στο σχήμα της Εικόνας 2.3 φαίνονται αυτές ακριβώς οι πιθανές θέσεις για ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης σε ένα πλαίσιο.

Αντίστοιχα, κατά το σχεδιασμό νέας κατασκευής λόγω των κρίσιμων περιοχών σε υποστυλώματα και δοκάρια είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν αυξημένες παραμορφώσεις κατά τη σεισμική φόρτιση. Αυτό θα οδηγήσει στη δημιουργία ανελαστικών παραμορφώσεων από τα δομικά στοιχεία του φορέα σε περιοχές πεπερασμένου μήκους που

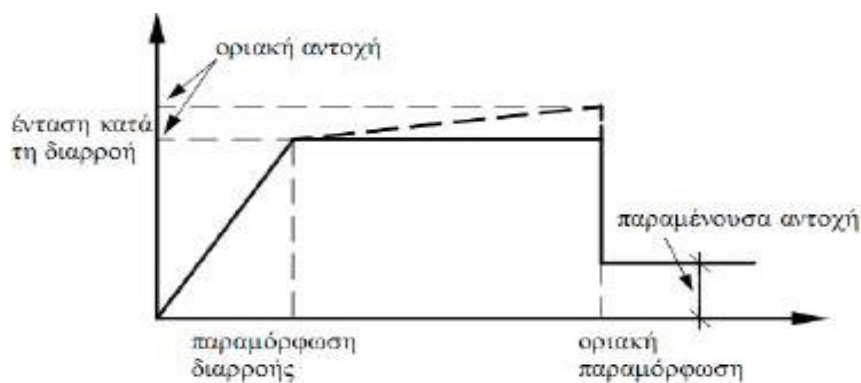
λέγονται πλαστικές αρθρώσεις. Οι περιοχές αυτές των πλαστικών αρθρώσεων πρέπει να βρίσκονται στο προσομοίωμα και να περιγράφεται ο τρόπος συμπεριφοράς τους. Τις προσομοιώνουμε χρησιμοποιώντας στροφικά ελατήρια και οι ιδιότητές τους δύνανται να προσδιοριστούν από διαγράμματα έντασης - παραμόρφωσης με μορφή που προσεγγίζει την περιβάλλουσα των βρόγχων υστέρησης. Καταλήγουμε τελικά σε διγραμμικό διάγραμμα με ελαστικό κλάδο ως τη διαρροή και μετά οριζόντιο πλαστικό ως την αστοχία, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.3 Ενδεχόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων σε δίτυλο πλαίσιο.



Εικόνα 2.4 Πλαστικές αρθρώσεις και διαγράμματα ροπών.



Εικόνα 2.5 Διάγραμμα έντασης - παραμόρφωσης.

2.4 Στάθμες επιτελεστικότητας

Τρεις είναι οι σημαντικές στάθμες επιτελεστικότητας για τα φέροντα και μη φέροντα στοιχεία κατασκευής, βάσει του επιπέδου βλαβών, όπως αυτές ορίζονται από όλους τους κανονισμούς:

- **Άμεση χρήση (immediate occupancy)**

Σε αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας το επίπεδο βλαβών εξασφαλίζει τη συνέχιση κάθε λειτουργίας μετά το τέλος του σεισμού ή και κατά τη διάρκειά του και ο κίνδυνος τραυματισμού από αυτές θεωρείται αμελητέος. Επομένως, επιτρεπτές είναι αποκλειστικά μερικές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα που δεν επηρεάζουν την ικανότητα του φορέα να φέρει τα κατακόρυφα φορτία.

- **Προστασία ζωής (life safety)**

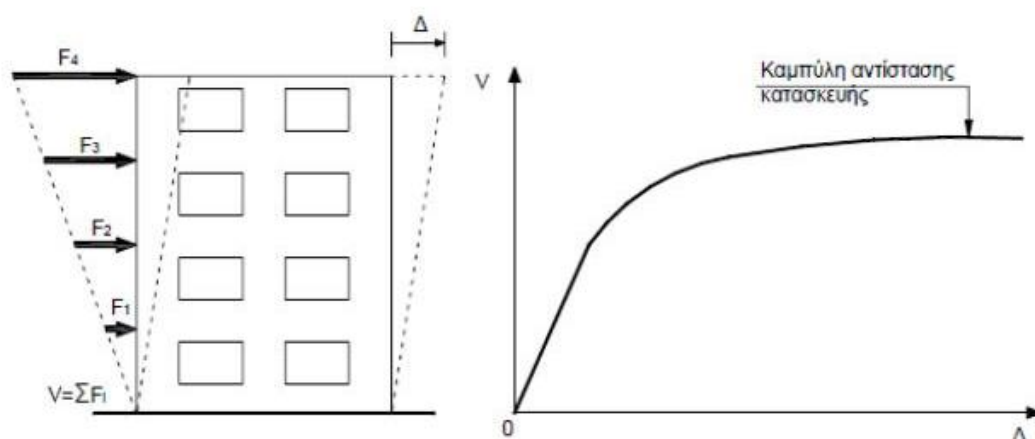
Στη στάθμη επιτελεστικότητας της προστασίας ζωής αναμένουμε την εμφάνιση ζημιών επισκευάσιμων, οι οποίες δε δύνανται να ευθύνονται για απώλεια της στατικής ευστάθειας του φορέα ή για τραυματισμό ανθρώπων. Οι βλάβες πρέπει να επισκευαστούν για να επαναχρησιμοποιηθεί η κατασκευή.

- **Οιονεί κατάρρευση (structural stability)**

Σε περίπτωση οιονεί κατάρρευσης αναμένουμε πλέον τη δημιουργία και εμφάνιση εκτεταμένων, μη επισκευάσιμων κυρίως, βλαβών, με το φορέα να είναι ακόμη σε θέση να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, αλλά με πολύ μειωμένη την οριζόντια δυσκαμψία του. Η μείωση της αυτή συνεπάγεται κίνδυνο κατάρρευσης σε πιθανή περίπτωση μετασεισμικής διέγερσης της κατασκευής. Επιπλέον, μεγάλος είναι ο κίνδυνος σοβαρών τραυματισμών, συνήθως από πτώσεις μελών της κατασκευής. Η επανάχρηση της κατασκευής απαιτεί εκτεταμένες διορθώσεις με πιθανότητα μη δυνατής επισκευής της τεχνικά ή οικονομικά.

2.5 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής

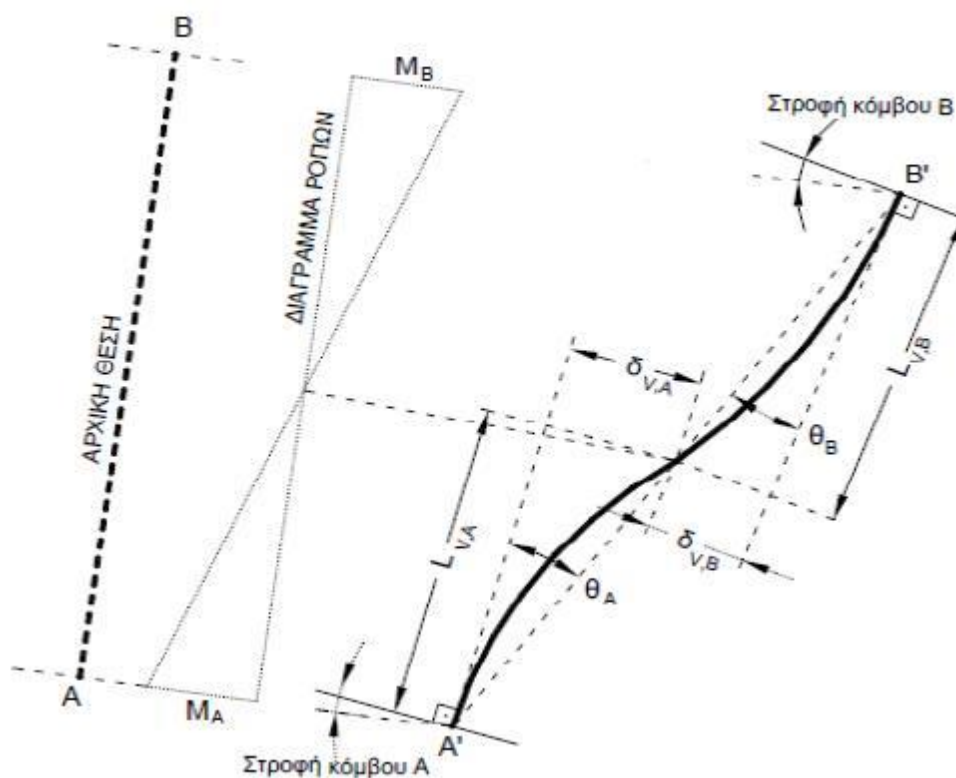
Η καμπύλη ικανότητας σε μια κατασκευή εκφράζει τη μη γραμμική σχέση επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και μετατόπισης της κορυφής (Εικόνα 2.6). Πάνω στην καμπύλη ικανότητας της κατασκευής προσδιορίζονται οι διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας. Υπολογίζοντας την ανελαστική μετακίνηση της κορυφής για διάφορες τιμές του οριζόντιου φορτίου και θεωρώντας δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους, είμαστε σε θέση να την κατασκευάσουμε. Μπορούμε να λάβουμε υπόψη μας την πρώτη ιδιομορφή, την τριγωνική ή συνδυασμούς όπου συμμετέχουν ανώτερες ιδιομορφές για την κατανομή καθ' ύψος των φορτίων. Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας του φορέα μιας κατασκευής απαιτεί πλήθος στατικών επιλύσεων, αυξάνοντας σταδιακά την τέμνουσα βάσης και υπολογίζοντας τη μετακίνηση της κορυφής ανά βήμα. Θα πρέπει τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει να θεωρούνται με μειωμένη δυσκαμψία.



Εικόνα 2.6 Καμπύλη ικανότητας κατασκευής με τριγωνική κατανομή καθ' ύψος των φορτίων.

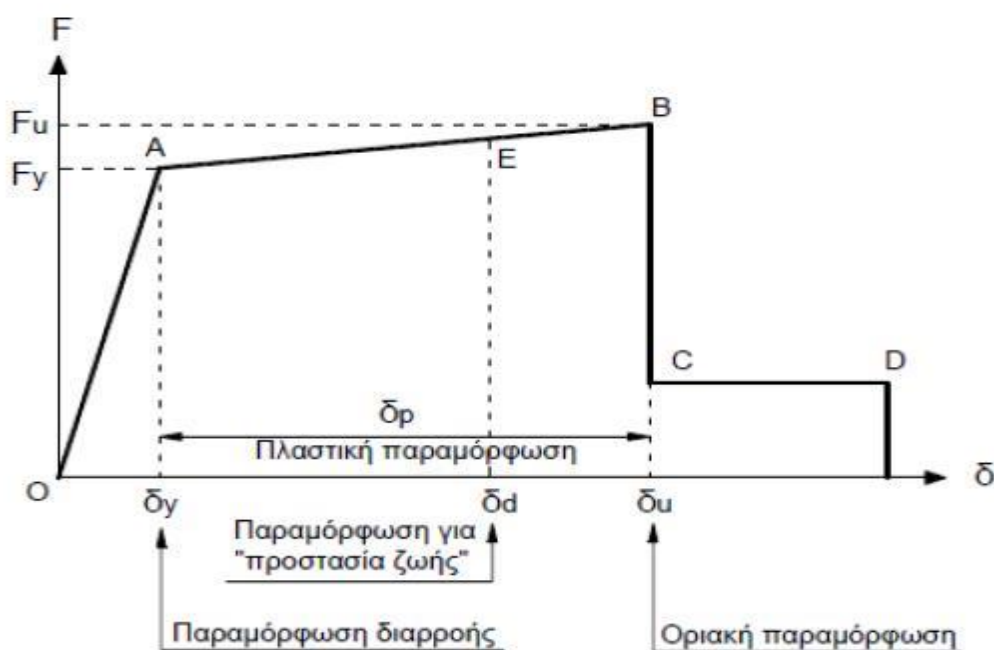
2.6 Καμπύλη F-δ μέλους κατασκευής

Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας του φορέα μιας κατασκευής απαιτεί αρχικά την έκφραση μέσω διαγραμμάτων έντασης - μετακίνησης F-δ των νόμων ανελαστικής συμπεριφοράς που ακολουθούν τα επιμέρους στοιχεία της. Για μέλη κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα θεωρούμε τη ροπή κάμψης M ως ένταση και τη στρόφη χορδής $\theta = \delta_v / L_v$ με $L_v = M / V$ ως μετακίνηση, όπως δείχνεται στην Εικόνα 2.7.

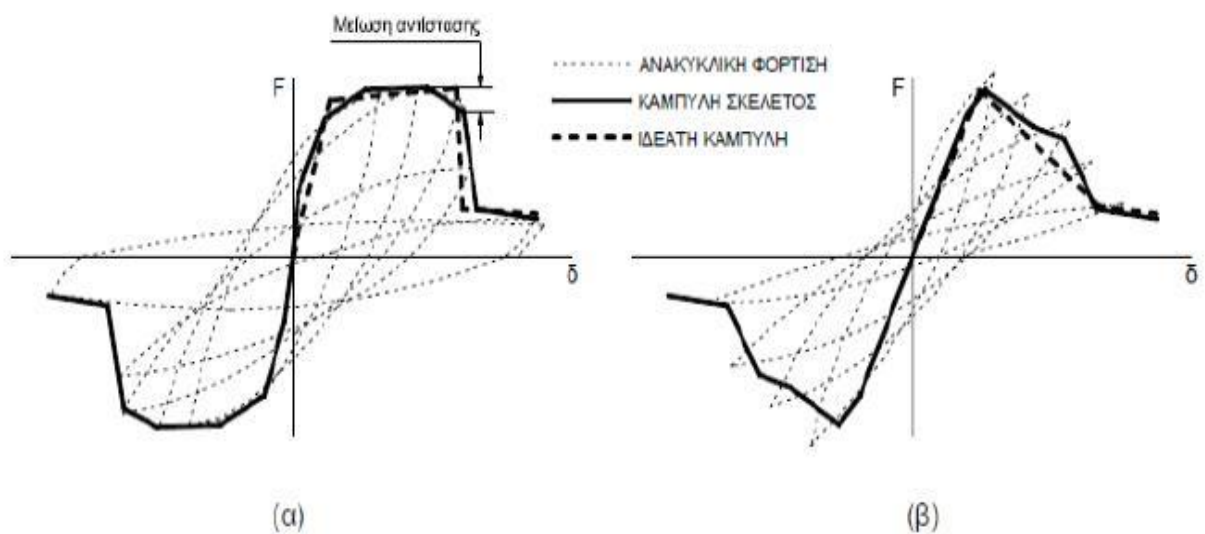


Εικόνα 2.7 Γωνία στροφής - χορδής θ .

Τα διαγράμματα F- δ κατασκευάζονται ακολουθώντας ιδεατό πρότυπο και η γενική τους μορφή φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Επισημαίνεται ότι η μορφή αυτή στηρίζεται στην καμπύλη - σκελετό για συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.8 Ιδεατή μορφή διαγράμματος F- δ στοιχείων κατασκευής.



Εικόνα 2.9 Καμπτικός (αριστερά) και διατμητικός (δεξιά) τρόπος συμπεριφοράς καμπυλών F- δ μελών κατασκευής.

- **Τμήμα OA:**

Το τμήμα OA αφορά την ελαστική συμπεριφορά έως το θεωρητικό σημείο διαρροής. Είναι γραμμικό με κλίση που ορίζει την τέμνουσα δυσκαμψία κατά την ελαστική ανάλυση. Θεωρούμε κατά τον υπολογισμό της θ_y για παραμόρφωση σε όρους στροφής - χορδής, εκτός από την καμπυλότητα διαρροής $1/r$, τη συμμετοχή διατμητικών παραμορφώσεων και ενδεχόμενης ολίσθησης οπλισμού στις αγκυρώσεις.

- **Τμήμα AB:**

Το τμήμα AB αφορά τη μετελαστική συμπεριφορά από το θεωρητικό σημείο διαρροής A έως το θεωρητικό σημείο αστοχίας B, το οποίο προκύπτει από την οριακή παραμόρφωση για την οποία παρατηρείται σημαντική μείωση φέρουσας ικανότητας (θεωρείται συνήθως ως 20% μικρότερη αντοχή σε σχέση με τη μέγιστη). Όταν για το τμήμα AB γίνεται υπόθεση ότι είναι οριζόντιο, ως είθισται, η αντίσταση διαρροής F_y θεωρείται ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας. Η παραμόρφωση δ_u , όπου $\delta_p = \delta_u - \delta_y$, ορίζει την ικανότητα παραμόρφωσης ως την αστοχία.

- **Τμήμα CD:**

Το τμήμα CD αφορά την απομένουσα ικανότητα μέλους. Η ικανότητα του μέλους να φέρει κατακόρυφα φορτία μειώνεται πολύ χωρίς να μηδενίζεται με το πέρας της παραμόρφωσης αστοχίας δ_u . Οπότε έως το σημείο D μπορεί το μέλος να φέρει φορτία. Συνήθως η απομένουσα ικανότητα μέλους θεωρείται ίση με το 20% της οριακής αντοχής.

- **Στάθμες επιτελεστικότητας E:**

Σύμφωνα με τις παραμορφώσεις δ_d ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας στην καμπύλη F- δ . Για παράδειγμα, στην Εικόνα 2.8 το σημείο E βρίσκεται σε στάθμη επιτελεστικότητας προστασίας ζωής.

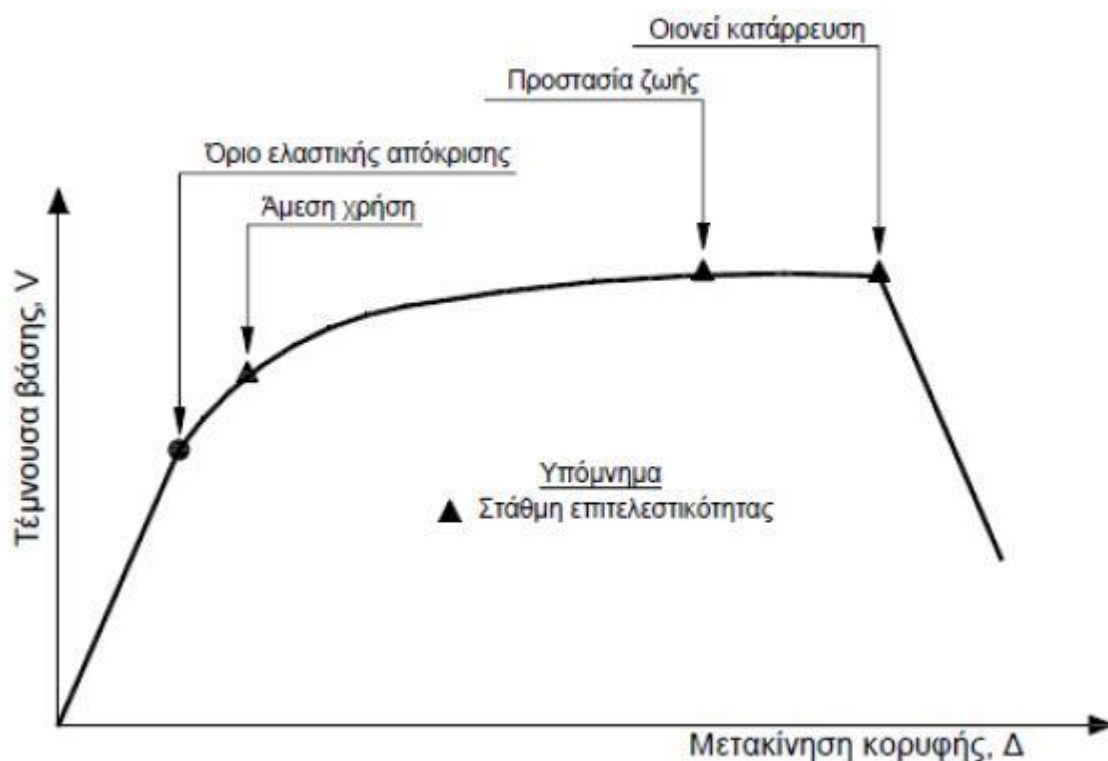
Ανάλογα με το είδος του μέλους (δοκός ή υποστύλωμα), το αν είναι πρωτεύον ή δευτερεύον και την πλάστιμη ή ψαθυρή συμπεριφορά αστοχίας του, δίνεται ο ορισμός των σημείων επιτελεστικότητας E από τους διάφορους κανονισμούς.

2.7 Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Η καμπύλη ικανότητας του φορέα όλης της κατασκευής προκύπτει με τον προσδιορισμό των καμπυλών F- δ των στοιχείων της και των σταθμών επιτελεστικότητας πάνω σε αυτές. Επίσης, είναι πλέον εφικτό να τοποθετηθούν επί αυτής τα σημεία για τις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας συνολικά της κατασκευής (Εικόνα 2.10). Ωστόσο, μια στάθμη επιτελεστικότητας για την κατασκευή ως σύνολο δεν αφορά σίγουρα στο σημείο όπου το πρώτο σημείο της κατασκευής φθάνει σε αυτή. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατασκευή συνολικά μπορεί να βρίσκεται κάτω από μία στάθμη επιτελεστικότητας παρά το γεγονός ότι κάποια μέλη την έχουν υπερβεί, επειδή ως σύνολο αποτελείται από πολλά στοιχεία. Συνεπάγεται λοιπόν ότι ο προσδιορισμός των σημείων επιτελεστικότητας επί της καμπύλης ικανότητας του φορέα της κατασκευής απαιτεί κρίση μηχανικού.

Αυτό το κριτήριο αποτελεί τη βάση διαχωρισμού των μελών της κατασκευής σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, όπου τα πρώτα είναι εκείνα που συνεισφέρουν στην αντοχή και ευστάθειά της. Παραμορφώσεις και βλάβες στα δευτερεύοντα στοιχεία είναι γενικά πιο μεγάλες από ότι στα πρωτεύοντα για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας. Σε περίπτωση που ένα μικρό ποσοστό των μελών υπερβαίνει μια στάθμη επιτελεστικότητας κατά την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας, μπορούμε να ορίσουμε ως δευτερεύοντα τα μέλη αυτά, αυξάνοντας το όριο παραμόρφωσης του φορέα της κατασκευής στο συγκεκριμένο

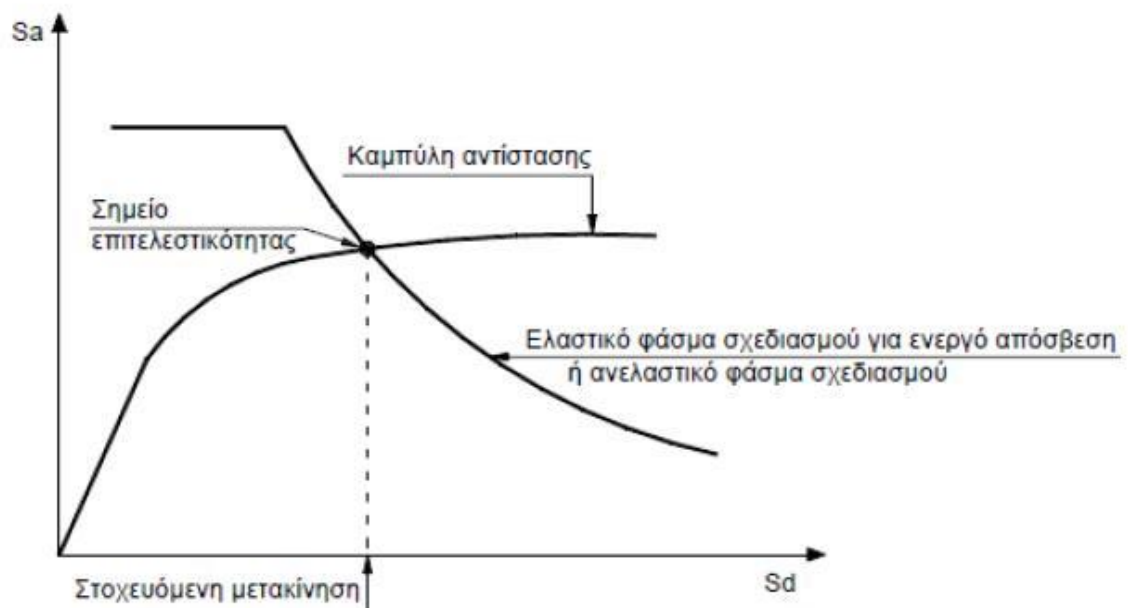
επίπεδο επιτελεστικότητας. Έχοντας διαχωρίσει τα μέλη σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, ορίζουμε τις στάθμες της κατασκευής με κριτήριο, για παράδειγμα, ως το σημείο όπου το πρώτο πρωτεύον φτάνει στην αντίστοιχη στάθμη.



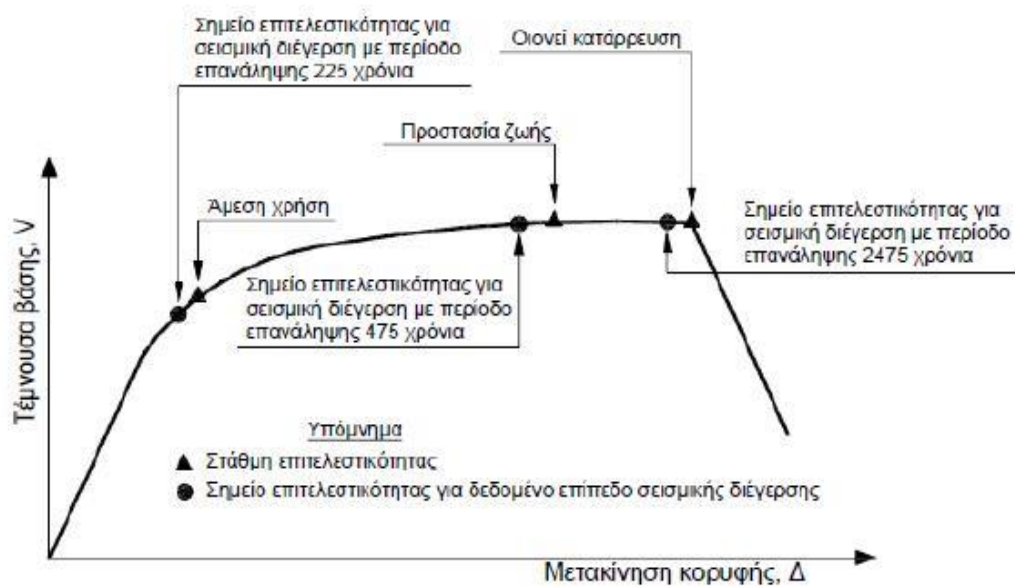
Εικόνα 2.10 Προσδιορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη ικανότητας φορέα κατασκευής.

2.8 Έλεγχος στοχευόμενης ικανότητας

Αρχικά, υπολογίζεται η αναμενόμενη μετακίνηση του φορέα της κατασκευής (στοχευόμενη μετακίνηση - target displacement), βάσει της οποίας ορίζεται το σημείο επιτελεστικότητας (performance point) της κατασκευής για συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού. Με μη γραμμική ανάλυση ιστορίας (μέθοδος που απαιτεί εξειδικευμένα προγράμματα και μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, ενώ τα αποτελέσματα δεν είναι σίγουρα πλήρως αξιοποιήσιμα, λόγω εξάρτησής τους από την επιλογή της σεισμικής δράσης) γίνεται ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού αυτής της μετακίνησης. Άλλες προσεγγιστικές μέθοδοι προτιμώνται για την απλοποίηση του προβλήματος, όπως η μέθοδος των συντελεστών ή η στατική μη γραμμική ανάλυση (Pushover), με γενικότερη θεώρηση και ακρίβεια.



Εικόνα 2.11 Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.



Εικόνα 2.12 Σύγκριση της στοχευόμενης μετακίνησης και της αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας.

Μετά τον υπολογισμό της αναμενόμενης μετακίνησης της κορυφής της κατασκευής, σημειώνουμε το αντίστοιχο σημείο επιτελεστικότητας για την εν λόγω σεισμική διέγερση στην καμπύλη ικανότητας του φορέα της κατασκευής. Για όλες τις στάθμες επιτελεστικότητας που γίνεται έλεγχος η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται (Εικόνα 2.11). Διαπιστώνεται λοιπόν εάν κάποιος στόχος σεισμικής ικανότητας έχει ή όχι ξεπεραστεί. Μπορεί να ελεγχθεί σε ποιο σημείο της δικής του καμπύλης F-δ βρίσκεται κάθε μέλος της κατασκευής για τη στοχευόμενη μετακίνηση την αναφερόμενη σε κάποια στάθμη σεισμικής δόνησης. Απαιτείται ενίσχυση μελών κατασκευής, όπου υπερβαίνεται η επιθυμητή στάθμη επιτελεστικότητας, και να επαναληφθεί η διαδικασία.

2.9 Αποτίμηση σεισμικής επάρκειας κατασκευής

Όταν αποτιμούμε μία υφιστάμενη κατασκευή, εκτιμούμε τη διαθέσιμη φέρουσα ικανότητά της και ελέγχουμε την πλήρωση των ελαχίστων υποχρεωτικών απαιτήσεων των κανονισμών. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνει πορεία εργασίας σύμφωνα με την οποία η αποτίμηση του φορέα μιας κατασκευής περιλαμβάνει διαδοχικά: τη συλλογή στοιχείων για το ιστορικό της κατασκευής, την ανάλυση και τον έλεγχο οριακών καταστάσεων.

Όταν αναφερόμασταν σε αποτίμηση κατασκευών παλαιότερα, κάναμε λόγο για έλεγχο παλαιότερων κτιρίων ως προς τις απαιτήσεις των διατάξεων των αντισεισμικών κανονισμών για τα σύγχρονα. Όμως τα περισσότερα κτίρια δεν ικανοποιούσαν τις διατάξεις των νέων κτιρίων σε ζητήματα σχετικά με τη διαμόρφωση του οπλισμού των δομικών στοιχείων και άρα την τοπική και συνολική πλαστιμότητα κ.λπ., καθώς η μελέτη τους είχε γίνει με παλαιότερους κανονισμούς. Κατά συνέπεια, τα κτίρια αυτά απαιτούσαν απαγορευτικού κόστους ενίσχυση, καθώς κρίνονταν ως σεισμικά μη επαρκή.

Πλέον οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τη σεισμική αποτίμηση είναι ελαστικές με συντελεστές αύξησης των φορτίων ώστε να προκύπτουν οριακές καταστάσεις σχεδιασμού (μέθοδοι, όπως η δυναμική φασματική ανάλυση και η γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας απόκρισης, τις οποίες χρησιμοποιούμε και για την ανάλυση νέων κατασκευών, με κατάλληλες τροποποιήσεις για να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες των υφιστάμενων κτιρίων) και ανελαστικές (πιο απαιτητικές ως προς τους υπολογισμούς, με πιο ακριβή αποτελέσματα λόγω λεπτομερούς προσομοίωσης της συμπεριφοράς των στοιχείων και της αντιμετώπισης του σεισμού με πιο ορθολογικό τρόπο).

Σχετικά με τη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας η οποία δε θα χρησιμοποιηθεί στην

παρούσα εργασία, εφαρμόζεται σεισμική διέγερση για ελαστική ανάλυση του φορέα του κτιρίου, εκφραζόμενη μέσω ενός επιταχυνσιογραφήματος εδαφικών δονήσεων και κάνουμε για κάθε χρονική στιγμή επίλυση του δυναμικού προβλήματος. Με τη μέθοδο της γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας, αποτυπώνεται για μία πραγματική σεισμική διέγερση η συμπεριφορά του φορέα. Προκύπτει, οπότε, η ανάγκη εισαγωγής και άλλων πραγματικών ή τεχνητών διεγέρσεων με σκοπό την πιο ασφαλή αποτίμηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

3.1 Παρουσίαση του υφιστάμενου κτιρίου

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η στατική και σεισμική αποτίμηση κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα για απαίτηση στόχου επιτελεσματικότητας φέροντος οργανισμού: «Ασφάλεια ζωής ενοίκων». Το υπό μελέτη κτίριο δεκαετίας του 1970 βρίσκεται στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Αποτελείται από δύο υπόγεια, τρεις ορόφους και έναν τελευταίο όροφο που αποτελείται από δύο δώματα. Στόχος της μελέτης είναι η αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου με σύγχρονες μεθόδους και κανονιστικές διατάξεις, ώστε να προταθεί τρόπος ενίσχυσής της, εφόσον κρίνεται απαραίτητο.

Για ικανοποιητική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής προβήκαμε σε συλλογή στοιχείων. Από την έρευνα του ιστορικού της κατασκευής προέκυψε, ότι από τη φάση κατασκευής και έπειτα, δεν έχει λάβει χώρα ουδεμία επέμβαση στον φέροντα οργανισμό της. Επιπλέον, στην κατασκευή δεν εντοπίζονται εμφανείς βλάβες στον φέροντα οργανισμό.

Η αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας πραγματοποιείται σύμφωνα με τα σχέδια της μελέτης, για τα οποία θεωρούμε εφαρμογή τους επακριβώς, καθώς δεν ήταν εφικτό να εφαρμοστούν μη καταστροφικοί έλεγχοι στην κατασκευή. Κατά συνέπεια, έχουμε επίπεδο γνώσης ΕΓ2: Κανονική γνώση (Στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων: Ικανοποιητική), σύμφωνα με τον EC8- Μέρος 3:

- Ο φέρων οργανισμός αποτελούμενος από δοκούς και υποστυλώματα με διαστάσεις και θέσεις σύμφωνες με τα σχέδια της μελέτης.
- Η θεμελίωση με μεμονωμένα πέδιλα και τάση εδάφους $\sigma_{ed}=1,50\text{kg/cm}^2$.
- Υλικά, διαστάσεις και διατομές μελών φορέα σύμφωνα με τη μελέτη.
- $q = 1,5$ με τη χρήση του κτιρίου να παραμένει αυτή ενός κτιρίου κατοικιών.
- Δεν υπάρχουν βλάβες στην κατασκευή.

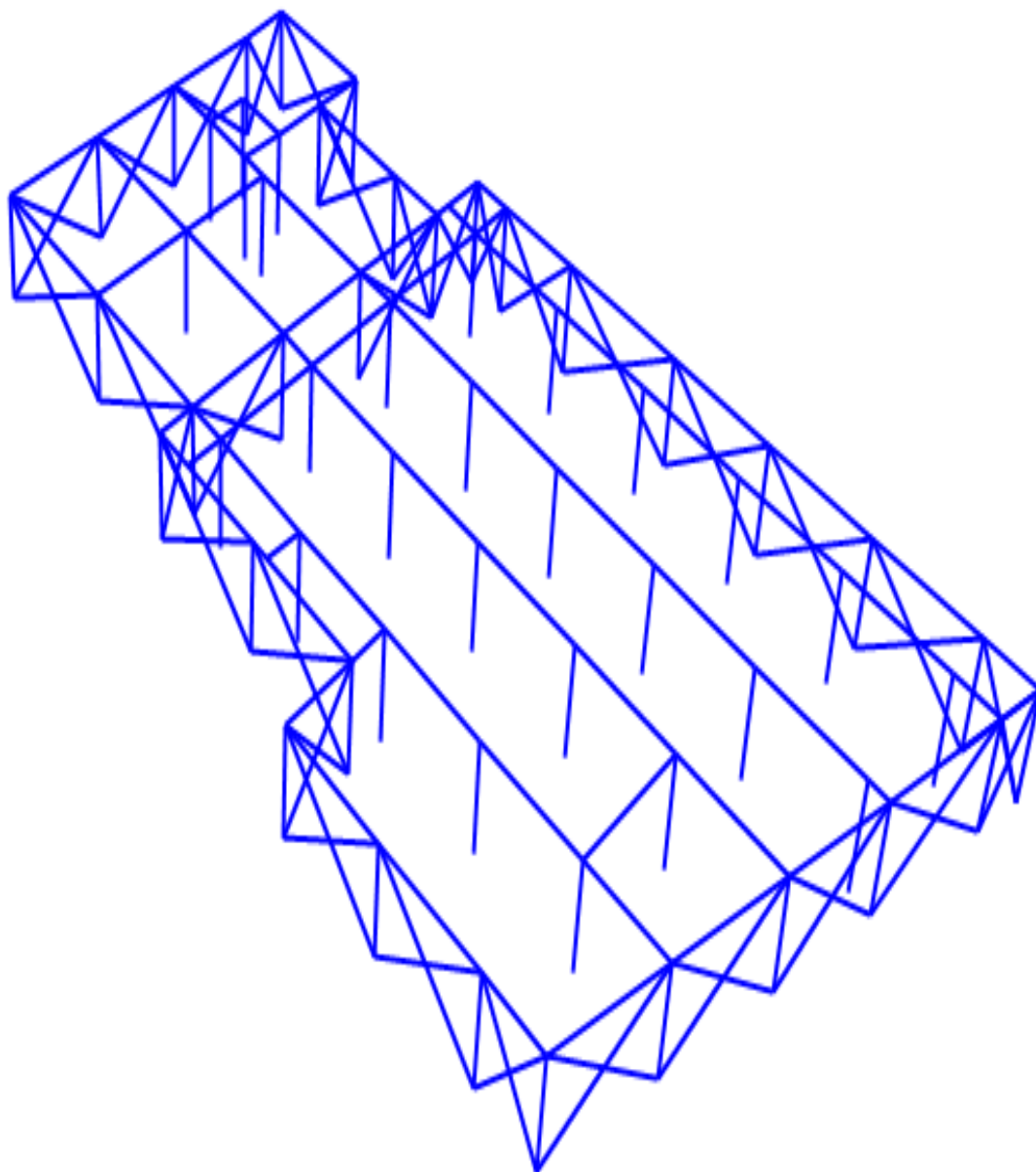
Το κτίριο ανεγέρθη το 1972, σχεδιάστηκε σύμφωνα με τον ισχύοντα αντισεισμικό κανονισμό του 1959 και τις διατάξεις του Κ.Ω.Σ. 1954 για κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έχει κατακόρυφο σύστημα στήριξης αποτελούμενο από υποστυλώματα και περιμετρικά τοιχώματα στο β' υπόγειο και στις τρεις εκ των τεσσάρων πλευρών του α' υπογείου. Τα σεισμικά φορτία υπολογίστηκαν για έδαφος κατηγορίας Β (μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας) και ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ.

Η κάτοψη της κατασκευής άνωθεν του α' υπογείου έχει σχήμα Γ, το οποίο διατηρεί καθ' ύψος. Παρουσιάζει, επομένως, κανονικότητα σε όψη, καθώς δεν εμφανίζει εσοχές στους ορόφους. Η μεταφορική μάζα και δυσκαμψία της μειώνεται σταδιακά καθ' ύψος. Το ύψος του β' υπογείου είναι 3m, του α' υπογείου 3,45m και το μέσο ύψος των ορόφων περίπου 3,85m. Το συνολικό της ύψος φθάνει στα 15,20m και οι διαστάσεις της σε κάτοψη είναι: η μεγάλη πλευρά 35,5m κατά Χ και 28m κατά Υ, η μικρή πλευρά 16,5m κατά Χ και 11m κατά Υ, ενώ το β' υπόγειο έχει διαστάσεις 19m κατά Χ και 28m κατά Υ. Η λυγηρότητά της είναι μικρότερη από 4 ($L_{max}/L_{min} = 35,5m / 11m = 3,23 < 4$).

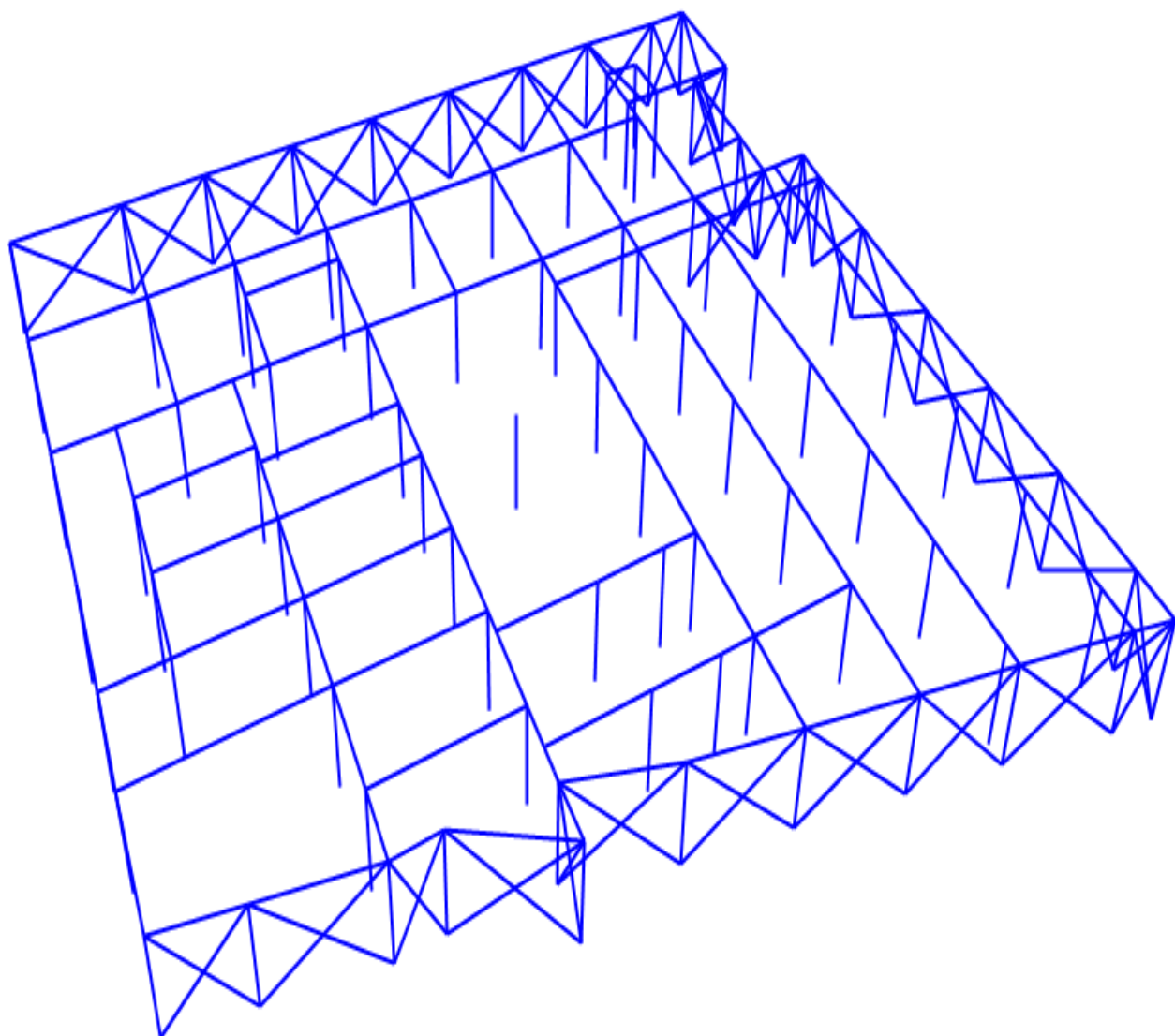
Θεωρούμε ποιότητα σκυροδέματος C16/20, σύμφωνα με την αντιστοίχιση παλαιών και νέων κατηγοριών σκυροδέματος, και χάλυβα οπλισμού S400, βάσει των στοιχείων που αντλούμε από το τεύχος στατικού υπολογισμού του φακέλου οικοδομικής άδειας.

3.2 Προσομοίωση του φορέα του υφιστάμενου κτιρίου

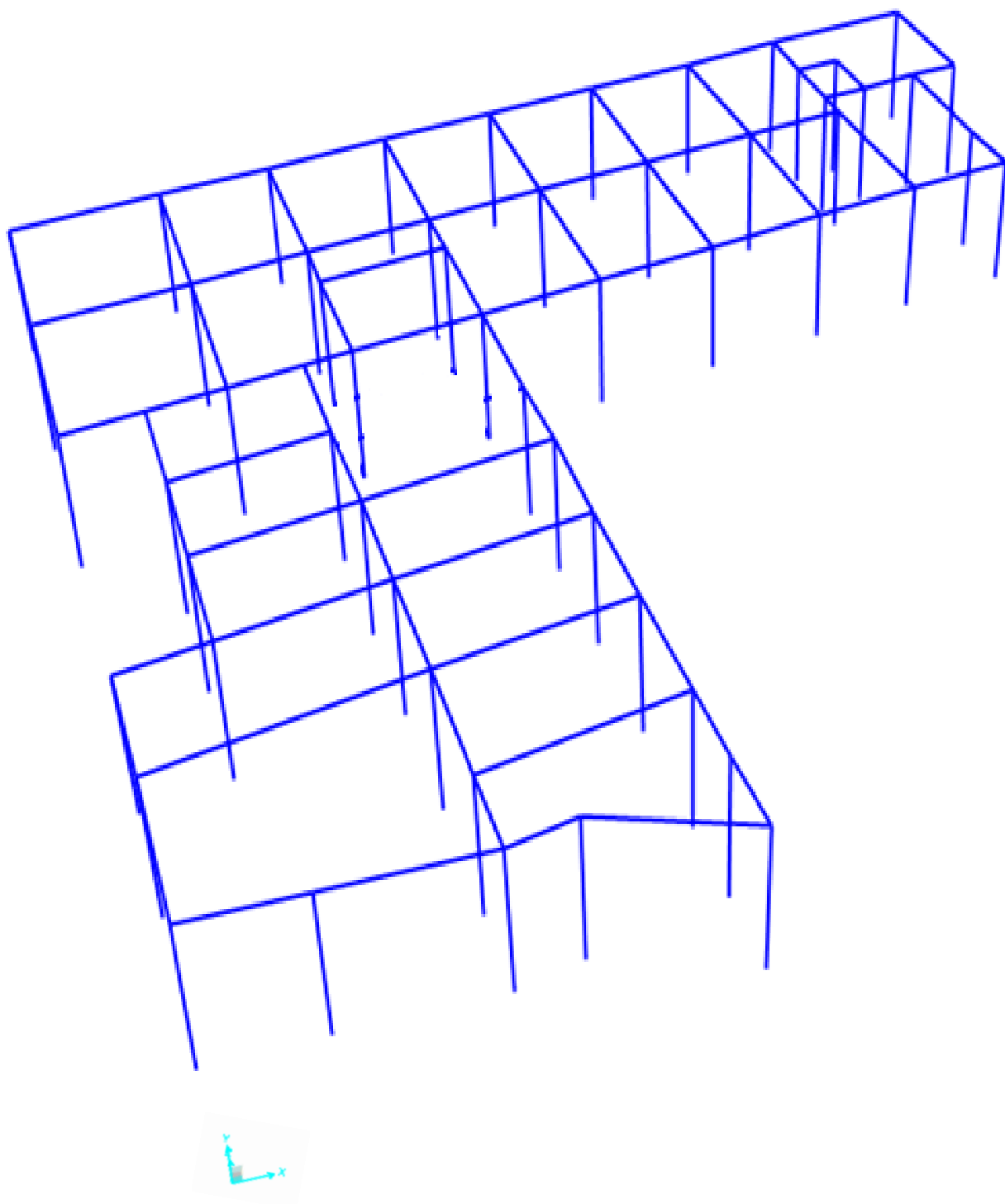
Από τα σχέδια του φακέλου οικοδομικής άδειας προέκυψε το χωρικό προσομοίωμα της κατασκευής με τις πραγματικές τιμές διαστάσεων δομικών στοιχείων και σταθμών στο πρόγραμμα SAP2000, με διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια, παρατίθενται τρισδιάστατα προσομοιώματα που αντιστοιχούν σε κάθε επιμέρους όροφο του κτιρίου.



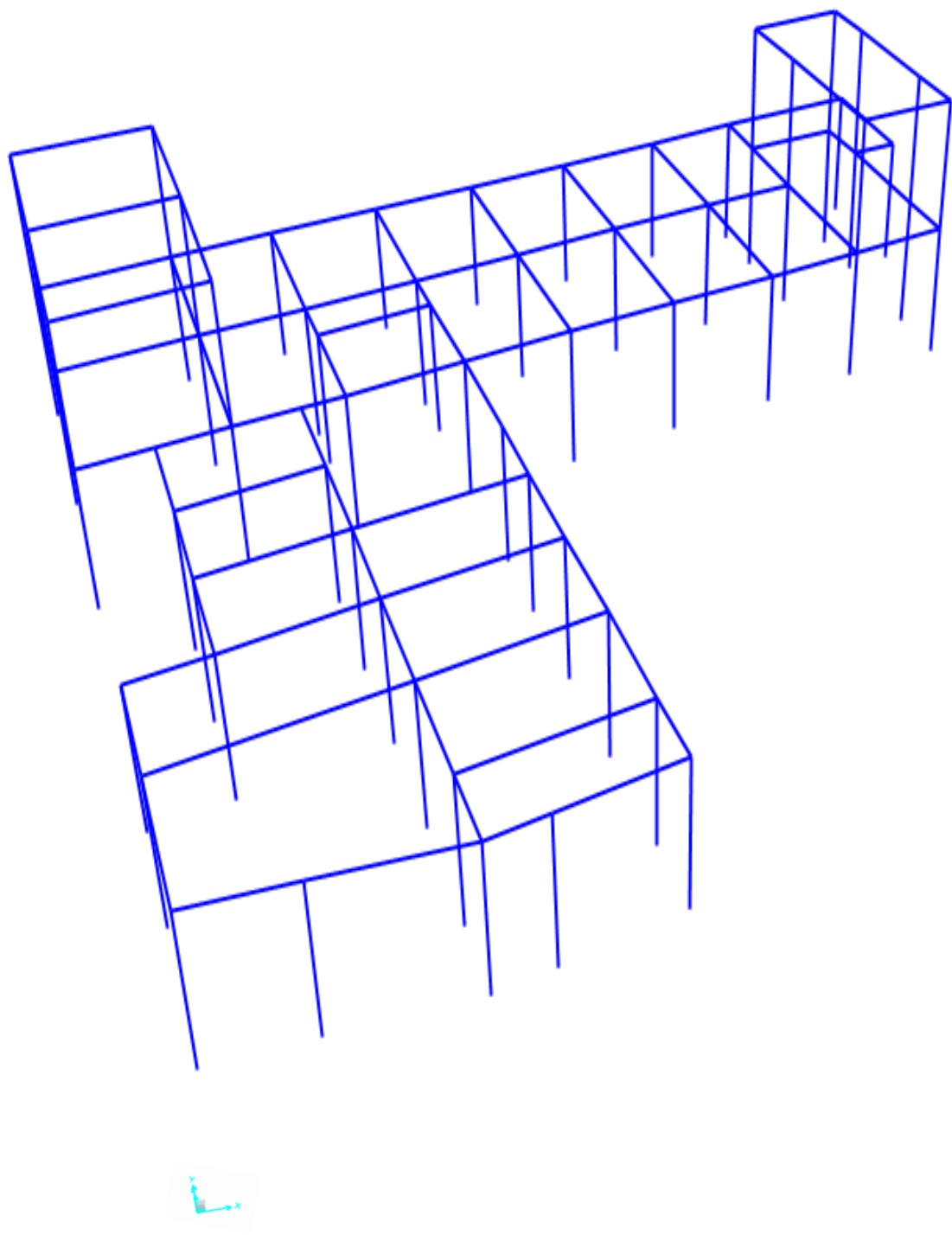
Εικόνα 3.1 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του β' υπογείου σε SAP2000.



Εικόνα 3.2 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του α' υπογείου σε SAP2000.



Εικόνα 3.3 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του ισογείου ή του α' ορόφου σε SAP2000.



Εικόνα 3.4 Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα του β' και γ' ορόφου σε SAP2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SAP2000

4.1 Ορισμός ιδιοτήτων των υλικών

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον ορισμό των ιδιοτήτων των υλικών του φορέα (σκυρόδεμα C16/20, χάλυβας οπλισμού S400) στο πρόγραμμα SAP2000 είναι η εξής (Εικόνα 4.1):

Define → Materials → Add New Material

The image displays two side-by-side screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in the SAP2000 software. Both windows are titled 'Material Property Data' and have a close button (X) in the top right corner.

Left Window (Concrete Material C16/20):

- General Data:** Material Name and Display Color: C16/20 (yellow icon); Material Type: Concrete; Material Grade: (empty); Material Notes: (empty) with a 'Modify/Show Notes...' button.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 24.9926; Mass per Unit Volume: 2.5485; Units: KN, m, C.
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E: 29000000; Poisson, U: 0.2; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.000E-05; Shear Modulus, G: 12083333.
- Other Properties For Concrete Materials:** Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 16000; Expected Concrete Compressive Strength: 16000; ☐ Lightweight Concrete; Shear Strength Reduction Factor: (empty).
- Buttons:** 'Switch To Advanced Property Display' (unchecked), 'OK', and 'Cancel'.

Right Window (Rebar Material S400):

- General Data:** Material Name and Display Color: S400 (cyan icon); Material Type: Rebar; Material Grade: (empty); Material Notes: (empty) with a 'Modify/Show Notes...' button.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 76.9729; Mass per Unit Volume: 7.849; Units: KN, m, C.
- Uniaxial Property Data:** Modulus Of Elasticity, E: 2.000E+08; Poisson, U: 0; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05; Shear Modulus, G: (empty).
- Other Properties For Rebar Materials:** Minimum Yield Stress, F_y: 400000; Minimum Tensile Stress, F_u: 500000; Expected Yield Stress, F_{ye}: 440000; Expected Tensile Stress, F_{ue}: 550000.
- Buttons:** 'Switch To Advanced Property Display' (unchecked), 'OK', and 'Cancel'.

Εικόνα 4.1 Ορισμός ιδιοτήτων σκυροδέματος (concrete) C16/20 και χάλυβα οπλισμού (rebar) S400 στο SAP2000.

Για κατασκευές από σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στην καρτέλα Material Property Data τιμή για το λόγο Poisson ίση με 0,2 για μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα και 0 για ρηγματωμένο (EC2 §3.1.3(4)). Το ειδικό βάρος οπλισμένου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 25 kN/m³ (ΕΚΩΣ2000 §Σ.2.2) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής ίσος με 10·10⁻⁶ K⁻¹ (EC2§3.1.3(5)).

4.2 Ορισμός διατομών δομικών στοιχείων του φορέα

4.2.1 Γραμμικά στοιχεία

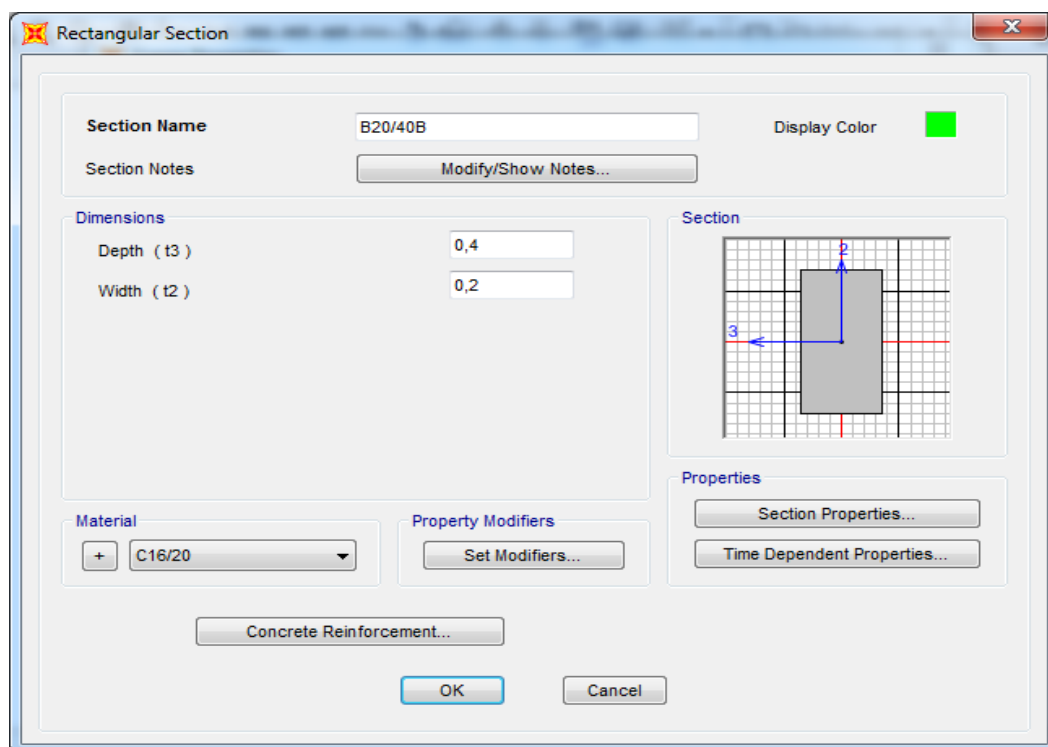
4.2.1.1 Υποστυλώματα και δοκοί

Τα γραμμικά στοιχεία του φορέα (υποστυλώματα και δοκοί) εισάγονται στο πρόγραμμα SAP2000 ως ορθογωνικές διατομές (sections) σύμφωνα με την ακόλουθη εντολή:

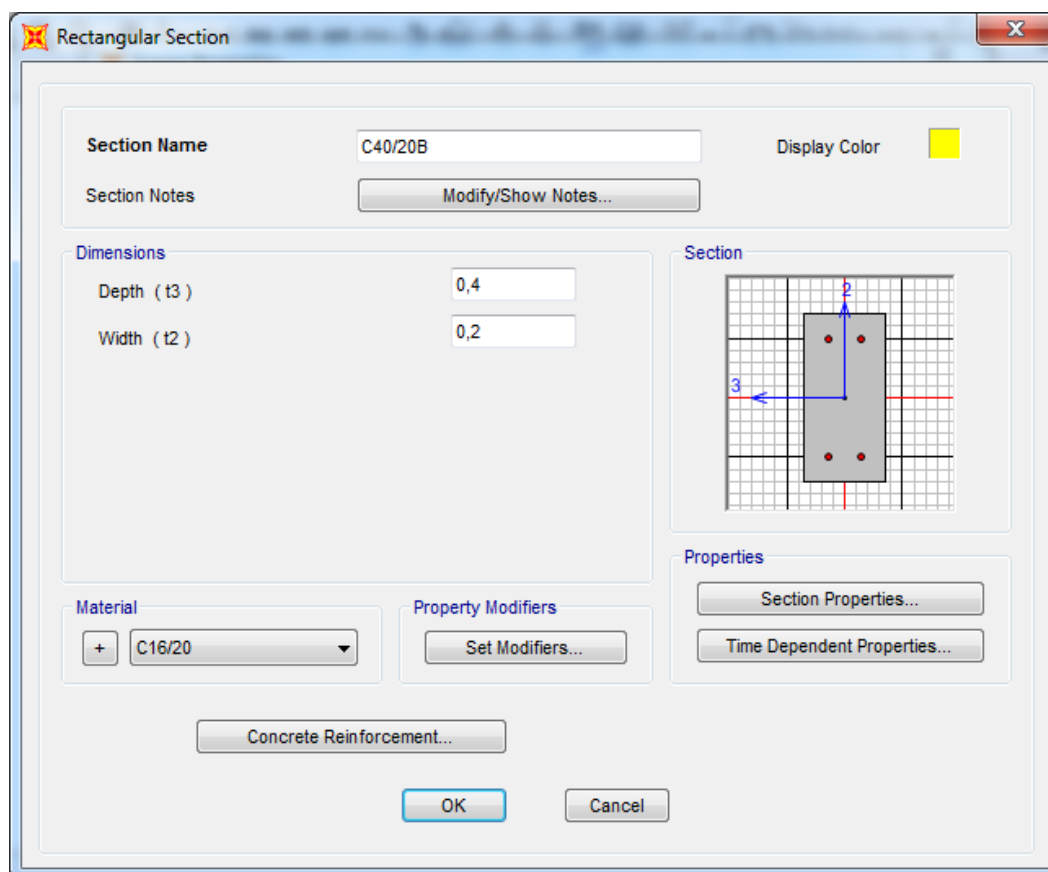
Define → Section Properties → Frame Sections → Add New Property → Concrete → Rectangular

και στην καρτέλα Rectangular Section για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το υλικό υποστυλώματος ή δοκού, αντίστοιχα (Εικόνες 4.2 και 4.3).

Επισημαίνεται ότι ο δείκτης στο τέλος του ονόματος τυχόντος στοιχείου (π.χ. της δοκού B20/40B) αφορά το διακριτό τύπο οπλισμού (π.χ. 4φ14) της εν λόγω διατομής από τις αντίστοιχες με ίδιες ιδιότητες. Περισσότερες πληροφορίες για το παρόν θέμα θα παρατεθούν σε επόμενο Κεφάλαιο που αφορά την Ανάλυση Pushover.



Εικόνα 4.2 Ορισμός ιδιοτήτων (γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικού) διατομής ορθογωνικής δοκού (beam) B20/40B στο SAP2000.



Εικόνα 4.3 Ορισμός ιδιοτήτων (γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικού) διατομής ορθογωνικού υποστυλώματος (column) C40/20B στο SAP2000.

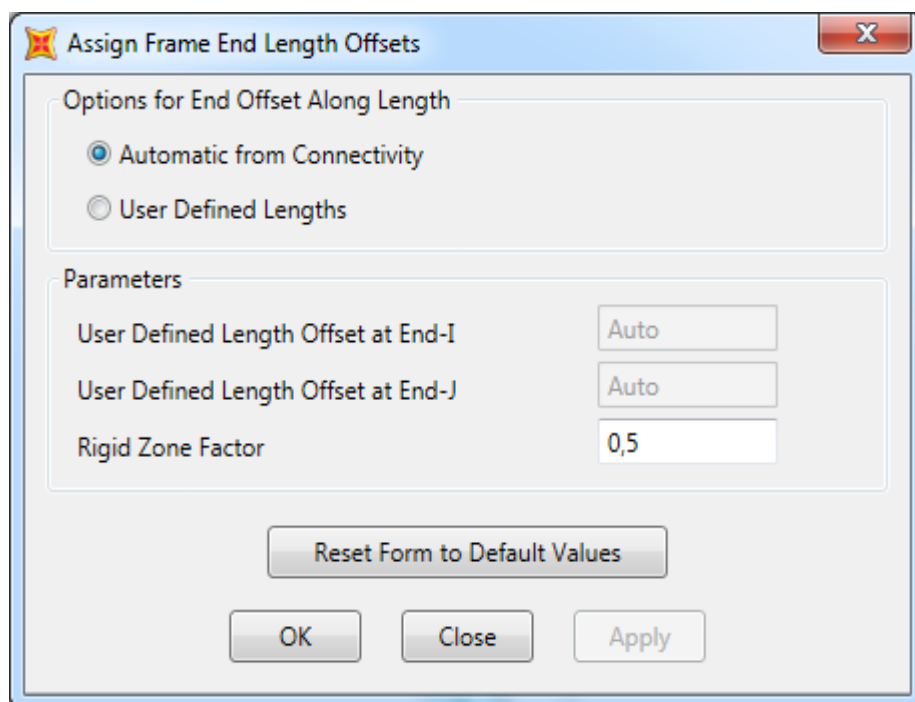
Με την ολοκλήρωση του ορισμού των διατομών των γραμμικών στοιχείων, επιλέγονται τα πεπερασμένα στοιχεία και γίνεται στο καθένα ανάθεση της κατάλληλης διατομής με την εντολή:

Assign → Frame → Frame Sections

4.2.1.2 Άκαμπτα άκρα υποστυλωμάτων και δοκών

Τα γραμμικά στοιχεία που προσομοιώνουν τα υποστυλώματα και δοκάρια του φορέα συνδέονται στους κόμβους αξονικά, οπότε στις θέσεις σύνδεσής τους δημιουργούνται κόμβοι εντός των οποίων βρίσκεται ένα τμήμα στα άκρα των γραμμικών στοιχείων. Το τμήμα αυτό είναι, κατά συνέπεια, πολύ πιο δύσκαμπτο σε σχέση με το ελεύθερο μήκος δοκού ή υποστυλώματος.

Η απαίτηση αυτή για τη συνεισφορά της περιοχής κάθε κόμβου στην ικανότητα παραμόρφωσης του φορέα (EC8 §4.3.1(2)) εξασφαλίζεται στο προσομοίωμα της κατασκευής μέσω θεώρησης, σε κάθε θέση σύνδεσης, άκαμπτων άκρων υποστυλωμάτων και δοκών. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται ενιαίες μετακινήσεις στα σημεία εντός των κοινών περιοχών υποστυλωμάτων και δοκών.



Εικόνα 4.4 Εισαγωγή άκαμπτων άκρων σε υποστυλώματα και δοκούς για εξασφάλιση επιβολής ενιαίων μετακινήσεων των σημείων εντός των κόμβων στο SAP2000.

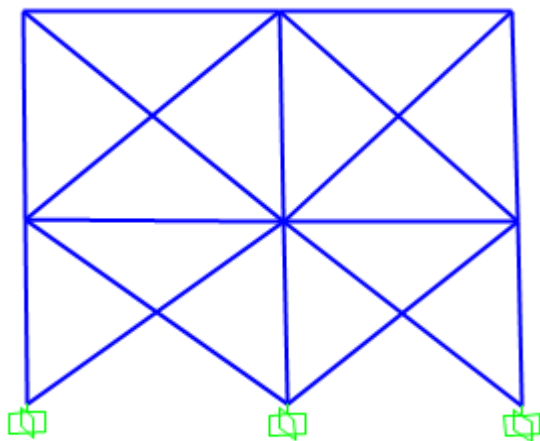
Στο SAP2000, αφού επιλεγούν όλα τα υποστυλώματα και δοκοί του φορέα, χρησιμοποιείται η εντολή:

Assign → Frame → End (Length) Offsets,

με αυτοποιημένο τρόπο υπολογισμού του μήκους τους (Automatic from Connectivity) και συντελεστή άκαμπτης ζώνης (Rigid-zone factor) 0,5 για θεώρηση, κατά την ανάλυση, του μισού μήκους εντός κάθε κόμβου ως άκαμπτου (Εικόνα 4.4).

4.2.1.3 Περιμετρικά τοιχώματα υπογείων

Για την προσομοίωση των περιμετρικών τοιχωμάτων των δύο υπογείων χρησιμοποιούνται άκαμπτες χιαστί ράβδοι με τις ιδιότητες του σκυροδέματος (Εικόνα 4.5). Στα γραμμικά αυτά στοιχεία προσδίδεται αρκετά μεγάλη τιμή για το εμβαδό διατομής $A = 1\text{m}^2$ και τη ροπή αδράνειας $I=1\cdot\text{m}^4$.



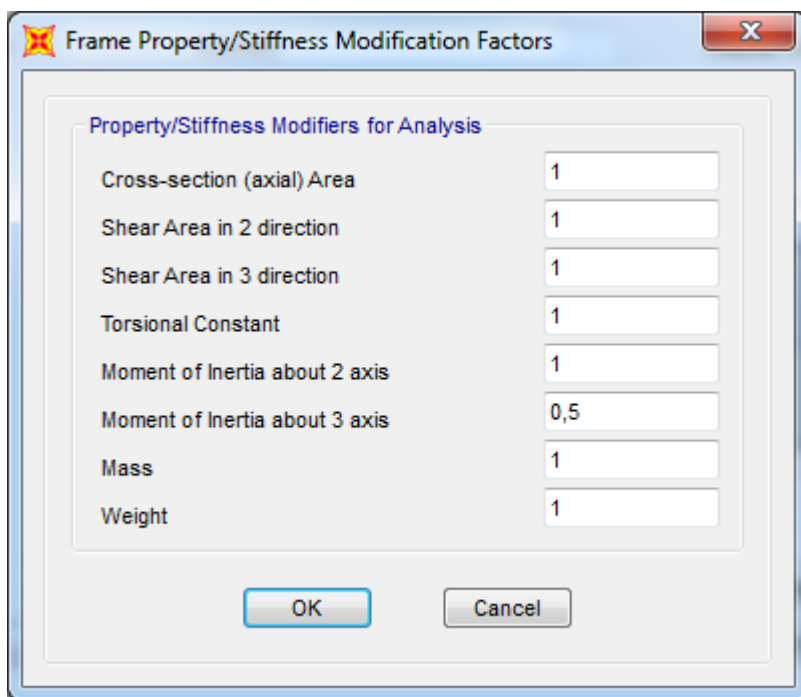
Εικόνα 4.5 Προσομοίωση του περιμετρικού τοιχώματος των δύο υπογείων με άκαμπτες χιαστί ράβδους στο SAP2000.

4.2.1.4 Απομείωση δυσκαμψίας των φερόντων δομικών στοιχείων

Ο *EC8 §4.3.1(7)* προτείνει τη μείωση στο μισό των τιμών των ελαστικών καμπτικών και διατμητικών ιδιοτήτων των διατομών των φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα της κατασκευής, τα οποία βρίσκονται σε στάδιο II (ρηγματωμένα) από τις τιμές

που είχαν αντίστοιχα οι διατομές σε στάδιο I (μη ρηγματωμένες). Στον *EAK 2000* §3.2.3(2) προτείνονται διαφορετικές τιμές απομείωσής τους (δυσκαμψία δοκών στο μισό της αρχικής, δυσκαμψία τοιχωμάτων στα 2/3 της αρχικής), ενώ στα σχόλια του *EAK 2000* §Σ.3.2.3[2] προτείνονται για την ενεργό δυσκαμψία δοκών ίση με το 0,40 της αρχικής, των εσωτερικών υποστυλωμάτων 0,80 και των περιμετρικών 0,60.

Στην προκειμένη περίπτωση θεωρούμε δυσκαμψίες φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε στάδιο ρηγμάτωσης (στάδιο II), βάσει *EAK2000* §Σ.3.2.3[2]) και *KAN.ΕΠΕ.* §4.4.1.4, με τιμές: δυσκαμψία υποστυλωμάτων ίση με δυσκαμψία σταδίου I, δοκών ίση με τη μισή σταδίου I, τοιχωμάτων ίση με τα 2/3 και αγνοείται ο συντελεστής στρεπτικής δυσκαμψίας. Στο *SAP2000* μπορούμε να θέσουμε τιμές για τους συντελεστές απομείωσης στα *Modifiers* των αντίστοιχων διατομών (π.χ. για τις διατομές δοκού: *Moment of Inertia about 3 axis* =0,5 στην Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6 Μειωτικοί συντελεστές δυσκαμψίας δοκού στο *SAP2000*.

4.2.2 Πλάκες

4.2.2.1 Λειτουργία διαφράγματος των πλακών του φορέα της κατασκευής

Η κίνηση ενός ορόφου σε μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα αντιστοιχεί σε κίνηση διαφράγματος σε περίπτωση παρουσίας πλάκας, επειδή η τελευταία προσφέρει μεγάλη εντός επιπέδου δυστένεια. Οι πλάκες γενικά δεν επιτρέπουν μεταξύ των κόμβων των υποστυλωμάτων οριζόντιες σχετικές μετακινήσεις και συνεισφέρουν ώστε να κατανεμηθούν ομοιόμορφα τα σεισμικά φορτία, επειδή εντός του επιπέδου τους η λειτουργία τους είναι όμοια με πρακτικά απαραμόρφωτο δίσκο. Κατά συνέπεια, η συμπεριφορά υπό σεισμό της κατασκευής ευνοείται. Αυτό αφορά πλάκες με κανονικό, συμπαγές και ομοιόμορφο σχήμα, χωρίς οπές και προεξοχές.

Οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν και αφορούν την προσομοίωση μιας πλάκας μίας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία είναι η δυσκαμψία και η δυστένειά (εντός επιπέδου αντίσταση σε παραμόρφωση) της. Αυτά τα χαρακτηριστικά διατομής ενός επιφανειακού στοιχείου πλάκας καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας της.

Το στατικό πρόγραμμα στο υπολογιστικό του προσομοίωμα λαμβάνει υπόψη την ιδιότητα της δυσκαμψίας μέσω του συνεργαζόμενου μήκους πλάκας στην κάμψη δοκών. Στον *EC8 §4.4.2.5 και §5.10* αναφέρεται ότι δεν είναι δεδομένη η λειτουργία διαφράγματος (με την οποία συνδέεται η ιδιότητα της δυστένειας) για πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα και, μάλιστα, ενδέχεται να είναι τελικά μικρότερη λόγω ανοιγμάτων στην κάτοψη, σχήματος ορόφου ή πάχους της πλάκας.

Κατά συνέπεια, θα πρέπει σε κάθε όροφο να οριστούν επιμέρους τμήματα με πιθανή λειτουργία διαφράγματος και, έτσι, να μη χρησιμοποιούνται αυτόματα διαφράγματα που παρέχουν τα στατικά προγράμματα όπως το SAP2000. Ακόμα καλύτερα συνιστάται η πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα να προσομοιωθεί στο μοντέλο του στατικού προγράμματος μέσω επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων για λόγους καλύτερης ακρίβειας.

4.2.2.2 Εισαγωγή επιφανειακών στοιχείων πλάκας

Δημιουργείται νέα διατομή για τα επιφανειακά στοιχεία της πλάκας (τύπου Shell) από την εντολή του SAP2000:

Define → Section Properties → Area Sections → Add New Section,

όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.7, όπου γίνεται ο ορισμός του είδους της (type: Shell - Thin), του υλικού της (C16/20) και του πάχους της για κάμψη (bending) (καταπόνηση εκτός επιπέδου) και για δυνάμεις δυστένειας - μεμβρανικές (membrane) (καταπόνηση εντός επιπέδου).

Τα γειτονικά γραμμικά στοιχεία δοκού μιας πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα που προσομοιώνεται στο στατικό της μοντέλο με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να συνδέονται σωστά με αυτά. Έτσι, βεβαιώνεται ότι τα επιφανειακά στοιχεία πράγματι λειτουργούν σωστά. Πλέον δεν είναι αναγκαίο, σε μία πρόσφατη έκδοση του SAP2000 όπως η 20, να γίνει διακριτοποίηση και των γραμμικών στοιχείων δοκού σε επιμέρους, για να εξασφαλιστεί η ύπαρξη κόμβων στις ίδιες θέσεις με τους κόμβους των επιφανειακών στοιχείων της πλάκας και άρα η σύνδεση να είναι εφικτή. Η αναλυτική σύνδεση από το χρήστη γίνεται πια αυτόματα, ενώ παλαιότερα η σύνδεση όλων των κόμβων των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων με τις γειτονικές δοκούς γινόταν από μόνη της μόνο στους υφιστάμενους κόμβους των άκρων των δοκών.

Τα γραμμικά στοιχεία δοκού, όπως εκτέθηκε και προηγουμένως, δεν προσομοιώνονται με διατομή πλακοδοκού αλλά με ορθογωνική. Είναι η σύνδεση των επιφανειακών με τα γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία που εξασφαλίζει από μόνη της την αύξηση δυσκαμψίας από το συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας στο προσομοίωμα του φορέα. Για να επιτευχθεί αποτελεσματικά η συνεργασία δοκού και πλάκας (για την απόκτηση πρόσθετης δυσκαμψίας και τη μεταβίβαση των κατακόρυφων φορτίων από την πλάκα στη δοκό), επιβάλλεται πυκνή διακριτοποίηση της πλάκας σε επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (Εικόνες 4.8 και 4.9). Η εντολή που χρησιμοποιείται στο SAP2000 για αυτό το σκοπό είναι η ακόλουθη:

Assign → Area → Automatic Area Mesh

Για τα επιφανειακά στοιχεία πλάκας σε μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν είναι σαφές αν πρέπει να επιλεγθεί κατάλληλος συντελεστής απομείωσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής τους. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ αποτελεί στοιχείο με καμπτική συμπεριφορά υπό τη δράση κατακόρυφων φορτίων, δεν αναμένεται να παραμορφωθεί ανελαστικά υπό σεισμική δράση. Επιπλέον, η πλάκα αποτελεί δομικό στοιχείο το οποίο υφίσταται ρηγματώσεις, άρα η δυσκαμψία της κρίνεται σκόπιμο να

απομειωθεί κατάλληλα.

Shell Section Data

Section Name: Display Color: ■

Section Notes:

Type

☒ Shell - Thin
☐ Shell - Thick
☐ Plate - Thin
☐ Plate Thick
☐ Membrane
☐ Shell - Layered/Nonlinear

Thickness

Membrane:
Bending:

Material

Material Name:
Material Angle:

Time Dependent Properties

Concrete Shell Section Design Parameters

Stiffness Modifiers

Temp Dependent Properties

Εικόνα 4.7 Ορισμός διατομής πλάκας PLAKA/0,14 πάχους 0,14m στο SAP2000.

Assign Automatic Area Mesh

Mesh Option

☐ None
☒ Auto Mesh Area Into This Number of Objects (Quads and Triangles Only)
Along Edge from Point 1 to 2:
Along Edge from Point 1 to 3:
☐ Auto Mesh Area Into Objects of This Maximum Size (Quads and Triangles Only)
Along Edge from Point 1 to 2:
Along Edge from Point 1 to 3:
☐ Auto Mesh Area Based on Points on Area Edges (Quads and Triangles Only)
Points Determined from:
☐ Intersections of Straight Line Objects in Meshing Group with Area Edges
☐ Point Objects in Meshing Group that are on Area Edges
☐ Auto Mesh Area Using Cookie Cut Based on Straight Line Objects in Meshing Group
☐ Extend All Lines to Intersect Area Edges
☐ Auto Mesh Area Using Cookie Cut Based on Point Objects in Meshing Group
Rotation of Cut Lines from Area Local Axes:
☐ Auto Mesh Area Using General Divide Tool Based on Points and Lines in Meshing Group
Maximum Size of Divided Object:

Select Meshing Group

Meshing Group:

Local Axes for Added Points

☐ Make same on EDGE if adjacent corner points have same local axes definition
☐ Make same on FACE if all corner points have same local axes definition

Restrains and Constraints for Added Points

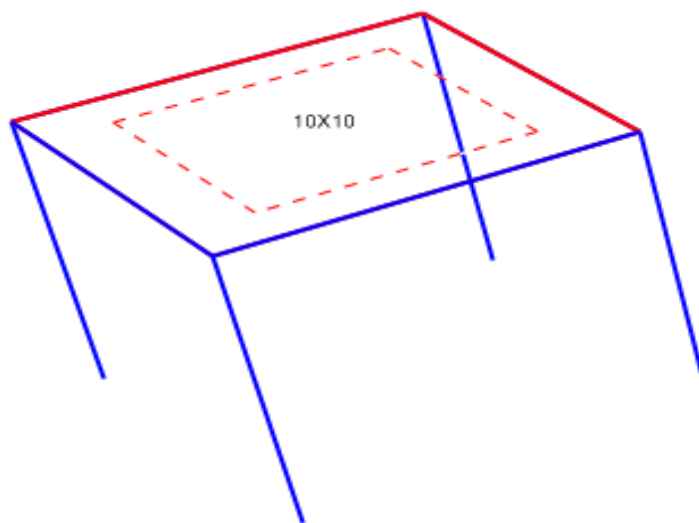
☐ Add on EDGE when restraints/constraints exist at adjacent corner points
(Applies when added edge point and adjacent corner points have same local axes definition)
☐ Add on FACE when restraints/constraints exist at all corner points
(Applies when added face point and all corner points have same local axes definition)

Submesh Option

☐ Submesh as required to obtain elements no larger than the specified maximum size
Maximum Submeshed Size: in

Εικόνα 4.8 Διακριτοποίηση επιφανειακού στοιχείου πλάκας σε μικρότερα στο SAP2000.

Σύμφωνα με τον *EC8 §4.3.1(7)* θα πρέπει να απομειωθούν όλες οι ελαστικές καμπτικές και διατμητικές ιδιότητες όλων των φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα κατά 50%. Ωστόσο για την πλάκα δεν προβλέπεται συγκεκριμένα η προσομοίωσή της, δεδομένου ότι συνήθως δε συμμετέχει ως επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Καμία αναφορά δε γίνεται, όμως, για απομείωση της, σχετιζόμενης με τη λειτουργία διαφράγματος της πλάκας, δυστένειας. Στην υπό μελέτη κατασκευή για τις πλάκες δε θα χρησιμοποιηθούν συντελεστές απομείωσης των γεωμετρικών ιδιοτήτων τους.



Εικόνα 4.9 Εμφάνιση διακριτοποίησης τετραέρειστης πλάκας σε μικρότερα (10x10) επιφανειακά στοιχεία στο SAP2000.

4.3 Ορισμός φορτίσεων

Για το φορέα της υπό μελέτη κατασκευής θεωρούμε τα εξής φορτία, σύμφωνα με τις παραδοχές μελέτης του: α) Μόνιμα (D+G) και β) Κινητά φορτία (Q).

- **Μόνιμα φορτία (D+G):**

Ίδιο βάρος οπλισμένου σκυροδέματος: **25,00 kN/m³**

Επικαλύψεις δαπέδων: **1,00 kN/m²**

Επικαλύψεις δωματίων: **1,50 kN/m²**

Δρομική οπτοπλινθοδομή: **2,00 kN/m²**

Μπατική οπτοπλινθοδομή: **3,50 kN/m²**

- **Ωφέλιμα φορτία (Q):**

Κύριοι χώροι κτιρίου: **2,00 kN/m²**

Διάδρομοι - Κλιμακοστάσιο: **3,50 kN/m²**

Εξώστες: **5,00 kN/m²**

Τα κατακόρυφα φορτία επηρεάζουν το φορέα τόσο ως φόρτισή του όσο και ως βάση για τον υπολογισμό της μάζας του, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη σεισμική ανάλυση της κατασκευής. Συνεπώς, ο προσδιορισμός τους απαιτεί ακρίβεια.

4.3.1 Φορτία επί δοκών

Αρχικά, εισάγουμε στα γραμμικά στοιχεία δοκού του φορέα τα γραμμικά μόνιμα φορτία (G) που αφορούν εσωτερικές και εξωτερικές τοιχοποιίες του ανωτέρω ορόφου, δηλαδή τα φορτία δρομικής και μπατικής οπτοπλινθοδομής αντίστοιχα, σε kN/m. Η τιμή του φορτίου που αναπτύσσεται επί της δοκού προκύπτει με πολλαπλασιασμό της τιμής του φορτίου της άνωθεν οπτοπλινθοδομής επί το ύψος του ανωτέρω ορόφου και η εισαγωγή της στο SAP2000 πραγματοποιείται, αφού επιλεγεί η υπόψη δοκός, με την ακόλουθη εντολή (Εικόνα 4.10):

Assign → Frame Loads → Distributed

Assign Frame Distributed Loads

General

Load Pattern: G

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: Gravity

Load Type: Force

Options

☐ Add to Existing Loads

☒ Replace Existing Loads

☐ Delete Existing Loads

Uniform Load

13,475 kN/m

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Relative Distance	0	0,25	0,75	1
Loads	0	0	0	0 kN/m

☒ Relative Distance from End-I ☐ Absolute Distance from End-I

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Εικόνα 4.10 Παράδειγμα ανάθεσης ομοιόμορφα κατανεμημένου μόνιμου φορτίου (G) σε δοκό στο SAP2000.

4.3.2 Φορτία επί πλακών

Στη συνέχεια, εισάγουμε στα επιφανειακά στοιχεία πλάκας του φορέα τα επιφανειακά μόνιμα (G) (επικαλύψεις δαπέδων και δωματίων) και κινητά (Q) φορτία που παρουσιάστηκαν παραπάνω σε kN/m^2 . Η εισαγωγή τους στο SAP2000 πραγματοποιείται, αφού επιλεγούν τα υπόψη στοιχεία πλάκας, με την ακόλουθη εντολή (Εικόνα 4.11):

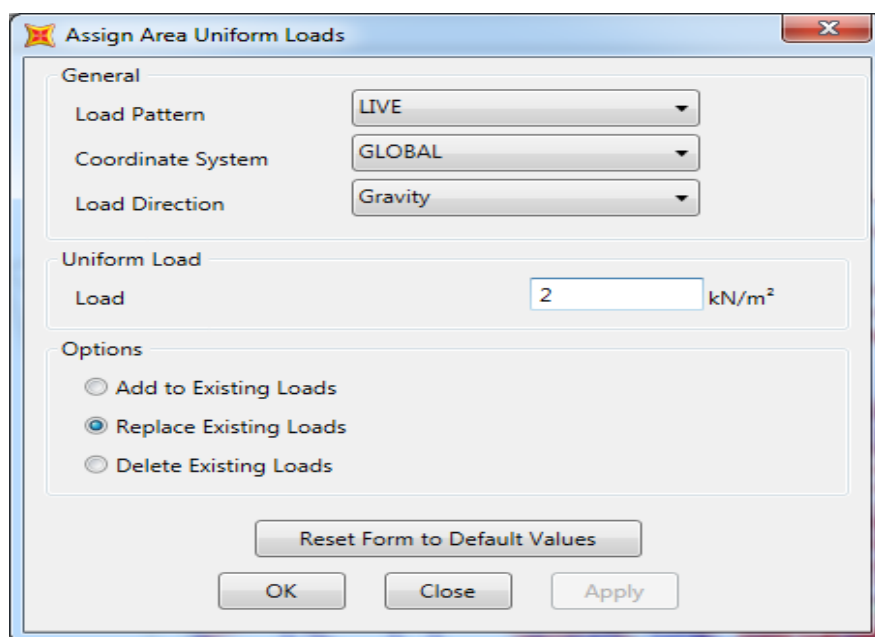
Assign → Area Loads → Uniform (Shell).

4.3.3 Ορισμός μορφών φόρτισης

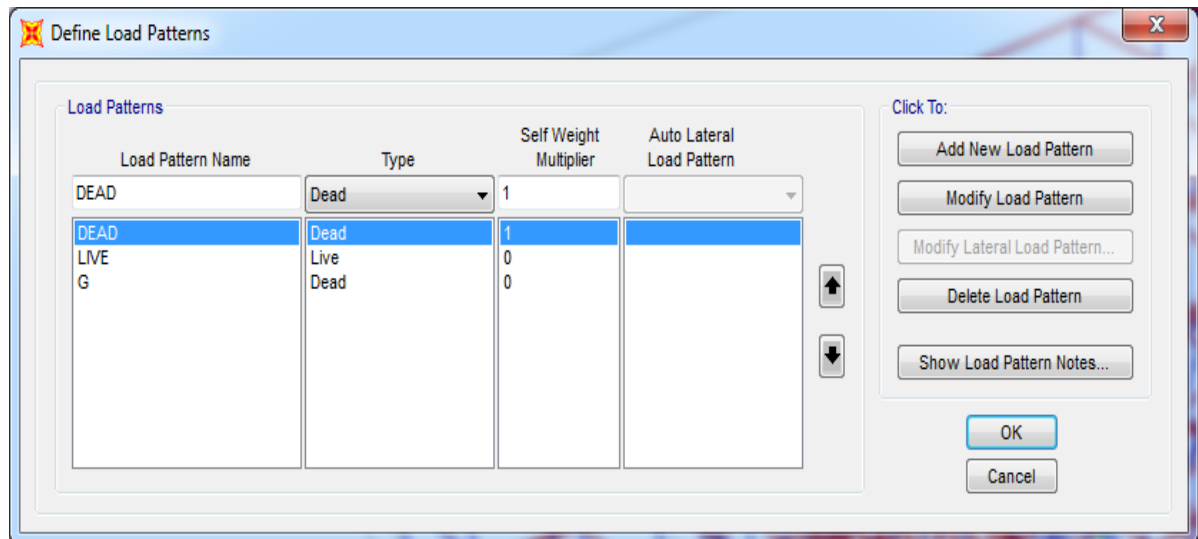
Ορίζονται τρεις διαφορετικές μορφές φόρτισης (Load Patterns) (Εικόνα 4.12) για την κατάλληλη ομαδοποίηση των φορτίων ανάλογα με τη φύση τους, οι ακόλουθες:

- **DEAD,**
- **G (Gravity),**
- **LIVE.**

Στη μορφή φόρτισης DEAD ανατίθενται τα ίδια βάρη των φερόντων δομικών στοιχείων της κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα (δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων, πλακών) με πολλαπλασιαστή (Self Weight Multiplier) 1,0 για τον αυτόματο υπολογισμό του ίδιου βάρους από την τιμή ειδικού βάρους σκυροδέματος που ορίστηκε εξαρχής. Στη μορφή φόρτισης G (Gravity) ανατίθενται βάρη τοιχοποιιών και επικαλύψεων και στη μορφή φόρτισης Q τα ωφέλιμα (κινητά) φορτία των χώρων του κτιρίου. Οι μορφές φόρτισης, επομένως, μπορούν να λάβουν διαφορετικό συντελεστή στους συνδυασμούς φορτίσεων (Load Combinations), που θα εισάγουμε αργότερα, αλλά και στον καθορισμό των μαζών.



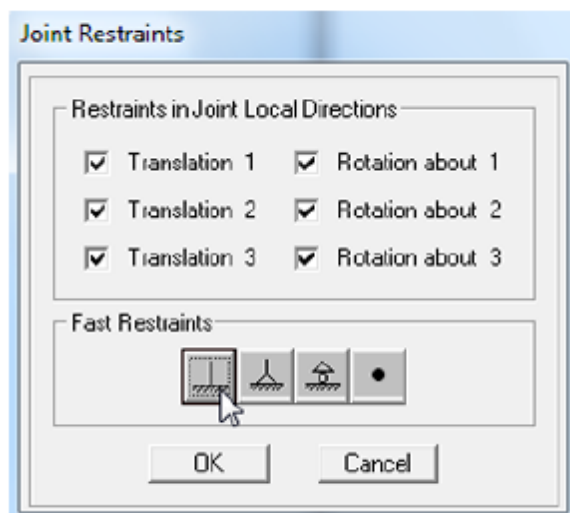
Εικόνα 4.11 Παράδειγμα ανάθεσης ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου ωφέλιμου φορτίου (Q) σε πλάκα στο SAP2000.



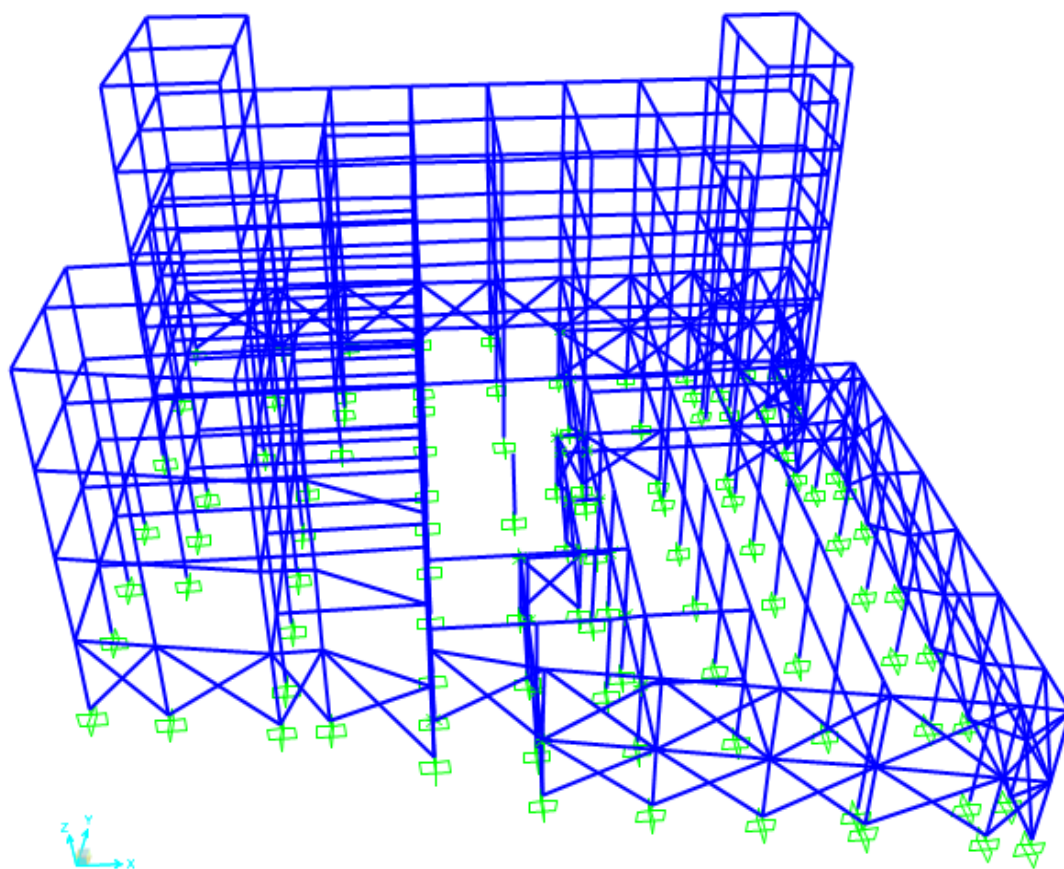
Εικόνα 4.12 Ορισμός μορφών φόρτισης (Load Patterns) στο SAP2000.

4.4 Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής

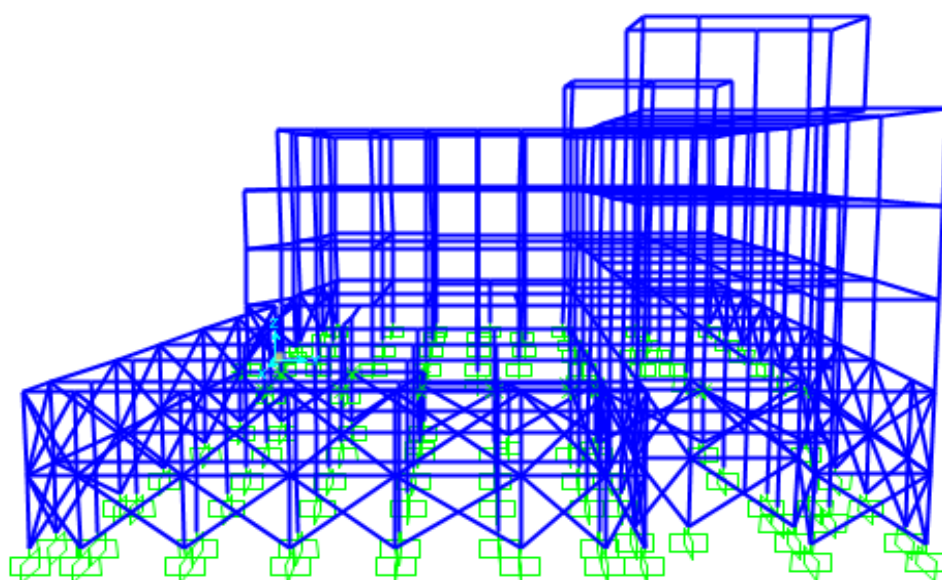
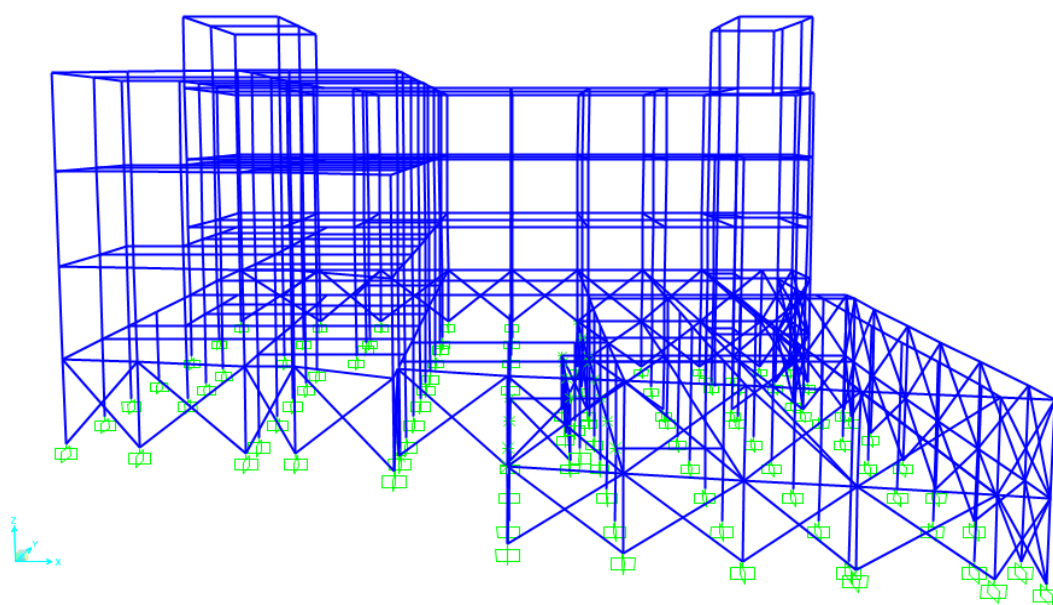
Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν πακτώσεις (Εικόνα 4.13) στη βάση του κτιρίου για να προσομοιωθεί η θεμελίωσή του.



Εικόνα 4.13 Συμβολισμός πάκτωσης σε βάση υποστυλώματος στο SAP2000.



Εικόνα 4.14 Χωρικό προσομοίωμα υφιστάμενης κατασκευής στο SAP2000.



Εικόνα 4.15 Χωρικό προσομοίωμα υφιστάμενης κατασκευής υπό διαφορετικές γωνίες στο SAP2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

5.1 Γενικά για τις ελαστικές μεθόδους ανάλυσης

Η θεώρηση γραμμικής ελαστικής σχέσης για τα μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης των μελών του προσομοιώματος της υπό μελέτη κατασκευής αποτελεί τη βάση των ελαστικών μεθόδων ανάλυσης. Για να θεωρείται και η πιθανότητα εμφάνισης μη γραμμικής συμπεριφοράς για το σεισμό σχεδιασμού γίνονται σε αυτές κατάλληλες τροποποιήσεις των κριτηρίων επιεστικότητας και των μετακινήσεων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις ελαστικές αυτές μεθόδους ανάλυσης είναι δυνατό να παρουσιάσουν μια εικόνα της ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής, έως το σημείο της πρώτης διαρροής, που κρίνεται ικανοποιητική. Ωστόσο, δε μας δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της ανακατανομής έντασης που λαμβάνει χώρα κατά την προοδευτική διαρροή των μελών της κατασκευής.

Το φάσμα σχεδιασμού χρησιμοποιείται στην ανάλυση, αν αυτή πραγματοποιείται για να υπολογιστεί η ένταση στα στοιχεία του φορέα υπό σεισμική δράση σχεδιασμού. Δύο είναι οι κυριότερες μέθοδοι για ελαστική ανάλυση κατασκευών, όπως και στον ΕΑΚ2000:

- Η στατική ανάλυση με ισοδύναμα οριζόντια φορτία σεισμού (ή Μέθοδος Οριζόντιας Φόρτισης) και
- Η **Ιδιομορφική Φασματική ανάλυση** (ή Ιδιομορφική Ανάλυση Φάσματος Απόκρισης).

5.2 Γενικά για την Ιδιομορφική Φασματική μέθοδο ανάλυσης κατασκευών

Η Ιδιομορφική Φασματική μέθοδος ανάλυσης κατασκευών είναι ουσιαστικά ίδια με τη Δυναμική Φασματική ανάλυση του ΕΑΚ2000. Εφαρμόζεται χωρίς περιορισμούς και σε κάθε περίπτωση κατασκευής. Αναφέρεται σε ένα μόνο προσανατολισμό των δύο οριζόντιων συνιστωσών της σεισμικής διέγερσης και είναι γραμμική ελαστική.

Η δυναμική φασματική ανάλυση ή, όπως είναι η πιο συνηθισμένη της ονομασία, δυναμική φασματική μέθοδος είναι η δυναμική ανάλυση του φορέα μιας κατασκευής υπό την επίδραση σεισμικής διέγερσης. Η μέθοδος αυτή οδηγείται τελικά σε σειρά στατικών αναλύσεων, παρόλο που πρόκειται για δυναμική μέθοδο ανάλυσης, αποφεύγοντας τη δυναμική ανάλυση μονοβάθμιων συστημάτων που για την ανάλυση χρονοϊστορίας απόκρισης είναι απαραίτητη. Αξιοποιεί, ωστόσο, τις ιδιότητες ταλάντωσης (ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφική απόσβεση) του φορέα της κατασκευής και τα δυναμικά χαρακτηριστικά που αφορούν την κίνηση του εδάφους μέσω του φάσματος απόκρισης, όντας μια δυναμική μέθοδος ανάλυσης.

Κατά την υλοποίησή της γίνεται πλήρης ιδιομορφική ανάλυση του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής, λαμβάνεται υπόψη το φάσμα σχεδιασμού και γίνεται ο υπολογισμός των πιθανών ακραίων τιμών τυχόντος μεγέθους απόκρισης με τετραγωνική επαλληλία των ιδιομορφικών τιμών του υπόψη μεγέθους.

Τηρείται ο κανόνας για ελάχιστο αριθμό ιδιομορφών, ήτοι το άθροισμα των συμμετεχουσών ιδιομορφικών μαζών για τις ιδιομορφές στη διεύθυνση κάθε συνιστώσας της σεισμικής διέγερσης που θεωρείται στην ανάλυση να είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής μάζας του κτιρίου. Κανόνες που μπορούν να ληφθούν υπόψη αντί του προαναφερθέντος είναι: να θεωρούνται όλες οι ιδιομορφές με συμμετέχουσες ιδιομορφικές μάζες μεγαλύτερες από το 5% της συνολικής ή να θεωρούνται όλες οι ιδιομορφές με ιδιοπερίοδο πάνω από 0,20s, αλλά όχι λιγότερες από $3\sqrt{n}$, όπου n είναι το πλήθος ορόφων πάνω από τη θεμελίωση ή πάνω από την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου.

Ο συνδυασμός των ιδιομορφικών μεγίστων επιτυγχάνεται, ομοίως με τον ΕΑΚ2000, με τη μέθοδο του Πλήρους Τετραγωνικού Συνδυασμού (CQC). Σημειώνεται ότι αρκεί να διαφέρουν κατά τουλάχιστον 10% όλες οι διαδοχικές ιδιοπερίοδοι, ώστε να εφαρμοστεί ο απλούστερος κανόνας της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων, πιο χαλαρή απαίτηση από τον ΕΑΚ2000.

Συνοψίζοντας, η δυναμική φασματική μέθοδος υλοποιείται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία για να υπολογιστούν οι μέγιστες τιμές των μεγεθών έντασης και παραμόρφωσης της απόκρισης:

- Ιδιομορφική ανάλυση (όπου υπολογίζονται οι ιδιομορφές ταλάντωσης, όπως επίσης οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες).
- Ιδιομορφική απόκριση (όπου υπολογίζεται η ακραία ένταση ή μετακίνηση για κάθε

ιδιομορφή και συνιστώσα σεισμού χρησιμοποιώντας το φάσμα απόκρισης).

- Ιδιομορφική επαλληλία (με τον κανόνα CQC της πλήρους τετραγωνικής επαλληλίας, όπου υπολογίζεται πιθανή ακραία τιμή τυχόντος μεγέθους απόκρισης για κάθε σεισμική συνιστώσα).
- Χωρική επαλληλία (με τον κανόνα SRSS της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων, όπου υπολογίζεται πιθανή ακραία τιμή τυχόντος μεγέθους απόκρισης για ταυτόχρονη δράση των σεισμικών συνιστωσών) και επαλληλία με το στατικό συνδυασμό $G+0,3Q$.

5.3 Ιδιομορφική Ανάλυση

Προσδιορίζονται οι ιδιομορφές ταλάντωσης του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής, όπως επίσης και οι ιδιοσυχνότητες και ιδιοπερίοδοι που τους αντιστοιχούν.

Στο SAP2000 η μάζα του φορέα προκύπτει αυτόματα με θεώρηση του ίδιου βάρους των μελών (Element Self Mass), επιπλέον μαζών (Additional Mass) που είναι συγκεντρωμένες και καθορισμένου συνδυασμού φόρτισης (Specified Load Pattern), όπως φαίνεται στην καρτέλα Mass Source Data της Εικόνας 5.1. Από *EAK* §3.2.2 [3], §4.1.2.1 [4] προκύπτει συνδυασμός φόρτισης $G_k+\psi_2Q_k$, με $\psi_2=0,3$ για κατοικίες (G_k η αντιπροσωπευτική τιμή μόνιμων φορτίων, Q_k η αντιπροσωπευτική τιμή κινητών φορτίων και ψ_2 μειωτικός συντελεστής). Η εντολή για τον υπολογισμό της μάζας είναι η ακόλουθη:

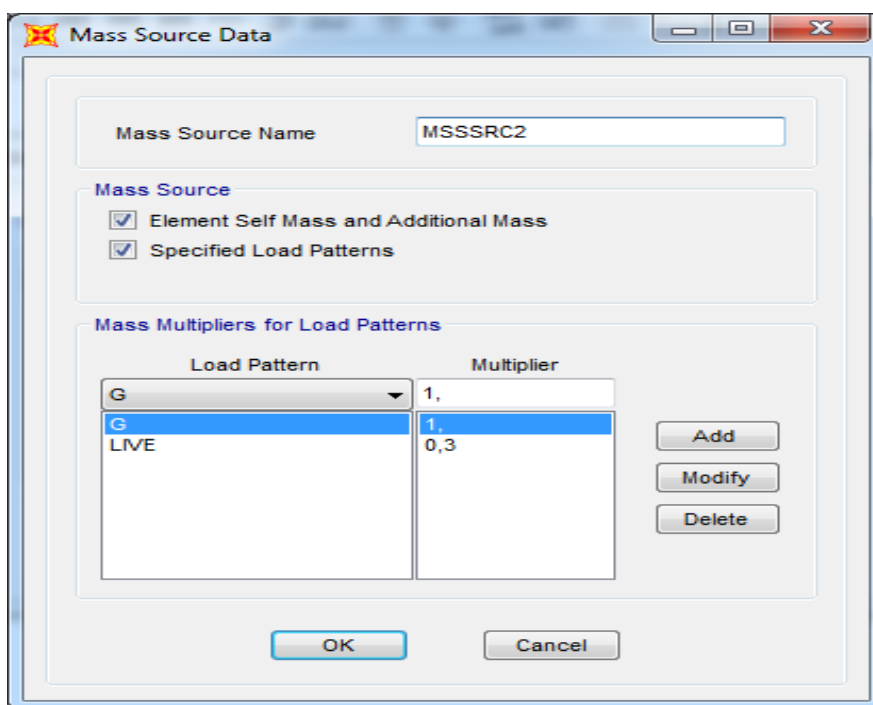
Define → Mass Source → Add New Mass Source

Μετά τον ορισμό της ταλαντούμενης μάζας της κατασκευής, ακολουθεί ο προσδιορισμός της φορτιστικής κατάστασης για την ιδιομορφική ανάλυση (καρτέλα Load Case Data - Modal στο SAP2000). Η συγκεκριμένη φορτιστική κατάσταση αφορά υπολογισμό δυσκαμψίας με βάση μηδενικές αρχικές συνθήκες - αφόρτιση κατάσταση φορέα (Zero Initial Conditions – Unstressed State).

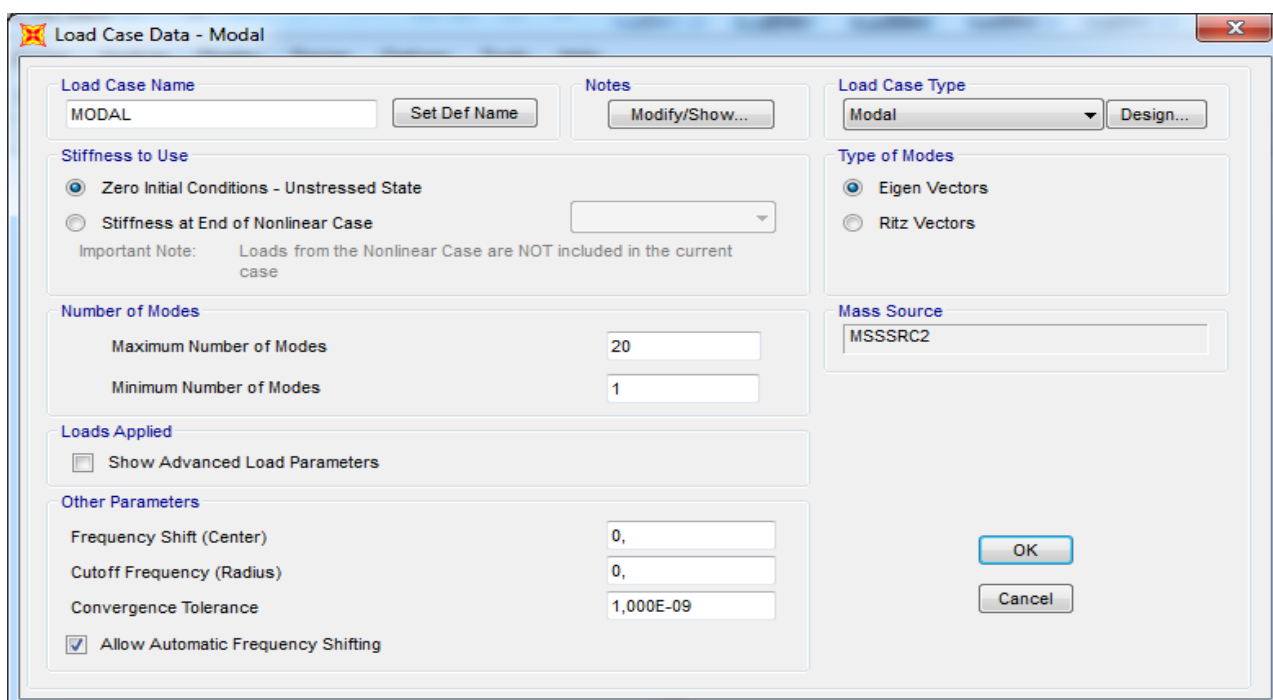
Επίσης, επιλέγουμε 20 ιδιομορφές (nodes) ως μέγιστο αριθμό (Maximum Number of Nodes), σύμφωνα με τη θεώρηση ότι ο σημαντικός αριθμός ιδιομορφών για κτίριο προκύπτει από πολλαπλασιασμό τριών βαθμών ελευθερίας ανά όροφο επί πλήθος ορόφων (για δέσμευση τριών εκ των συνολικά έξι βαθμών ελευθερίας κάθε ορόφου από λειτουργία

διαφράγματος των αντίστοιχων πλακών). Η συμπληρωμένη καρτέλα της Ιδιομορφικής Ανάλυσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2 και η ακολουθία εντολών που εκτελέστηκαν στο SAP2000 είναι η εξής:

Define → Load Cases → Modal



Εικόνα 5.1 Υπολογισμός της μάζας του φορέα βάσει συνδυασμού G+0,3Q στο SAP2000.



Εικόνα 5.2 Καρτέλα ιδιομορφικής ανάλυσης MODAL στο SAP2000.

StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
		Sec						
Mode	1	0,744603	0,23731	0,00956	9,524E-07	0,23731	0,00956	9,524E-07
Mode	2	0,699038	0,01304	0,33689	4,288E-08	0,25035	0,34645	9,953E-07
Mode	3	0,635236	0,10196	0,00365	1,633E-07	0,35231	0,3501	0,000001159
Mode	4	0,333156	0,01607	0,00001176	0,00003926	0,36838	0,35011	0,00004042
Mode	5	0,298499	0,00571	0,00506	1,082E-07	0,3741	0,35517	0,00004053
Mode	6	0,290573	0,00553	0,0191	0,00001544	0,37963	0,37428	0,00005597
Mode	7	0,279383	0,00282	0,01159	0,0000134	0,38245	0,38587	0,00006937
Mode	8	0,230851	0,01856	0,00023	0,000003177	0,401	0,3861	0,00007254
Mode	9	0,222094	0,00082	0,01999	7,236E-07	0,40183	0,40608	0,00007327
Mode	10	0,218737	0,00208	0,00125	7,704E-07	0,40391	0,40734	0,00007404
Mode	11	0,209765	0,00375	0,00183	0,00001641	0,40766	0,40917	0,00009045
Mode	12	0,19532	0,00046	0,00001336	7,544E-07	0,40812	0,40918	0,00009121
Mode	13	0,176492	0,00001476	0,00000568	0,00126	0,40813	0,40918	0,00135
Mode	14	0,172904	0,01139	0,00213	0,00008664	0,41953	0,41131	0,00144
Mode	15	0,167047	0,00182	0,02016	0,00028	0,42135	0,43148	0,00172
Mode	16	0,163745	0,00047	0,00045	0,00458	0,42182	0,43192	0,0063
Mode	17	0,162683	0,00024	0,00039	0,00126	0,42205	0,43232	0,00756
Mode	18	0,14949	0,0003	0,00003143	0,000009337	0,42235	0,43235	0,00757
Mode	19	0,137184	0,00329	0,00085	0,00007308	0,42564	0,4332	0,00764
Mode	20	0,118977	0,00004246	0,00001469	0,00006397	0,42568	0,43321	0,00771

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα Ιδιομορφικής Ανάλυσης (Ιδιομορφές και ποσοστά ενεργοποιούμενων μαζών).

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 5.1) παρατίθενται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι ιδιοπερίοδοι (Periods) και τα αντίστοιχα ποσοστά ιδιομορφικών μαζών του φορέα ανά ιδιομορφή και διεύθυνση. Η εντολή στο SAP2000 είναι:

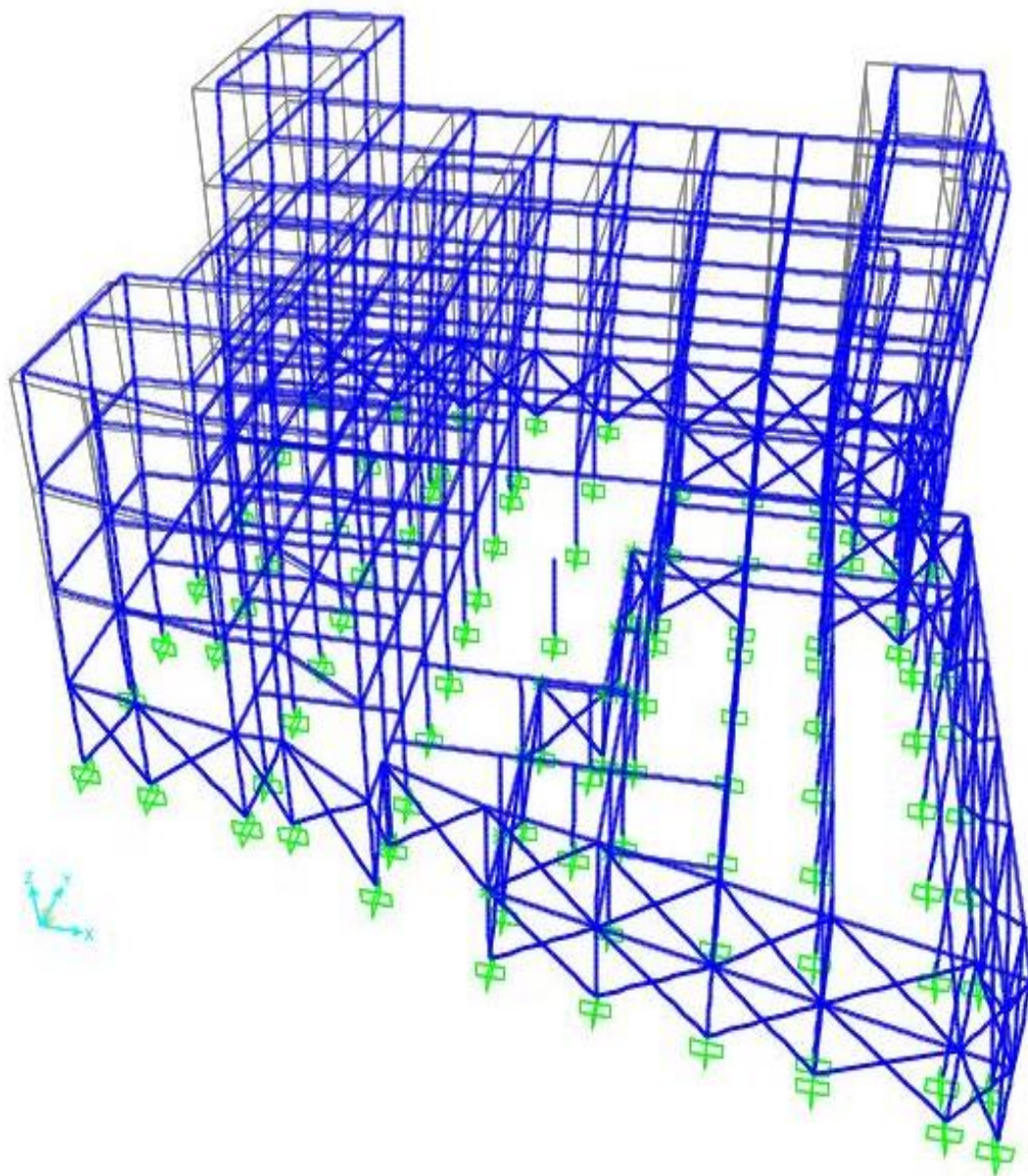
Display → Show Tables → Analysis Results → Modal Participating Mass Ratios

Οι 20 ιδιομορφές που επιλέχθηκαν δεν επαρκούν, καθώς για τις οριζόντιες συνιστώσες (X και Y) της σεισμικής διέγερσης το αθροιστικό ποσοστό συμμετοχής των δρυσών ιδιομορφικών μαζών υπολείπεται του ορίου του 90% που επιτάσσει ο κανονισμός για επιλεγέν πλήθος σημαντικών ιδιομορφών. Εάν το παραπάνω όριο δεν εξασφαλίζεται έως

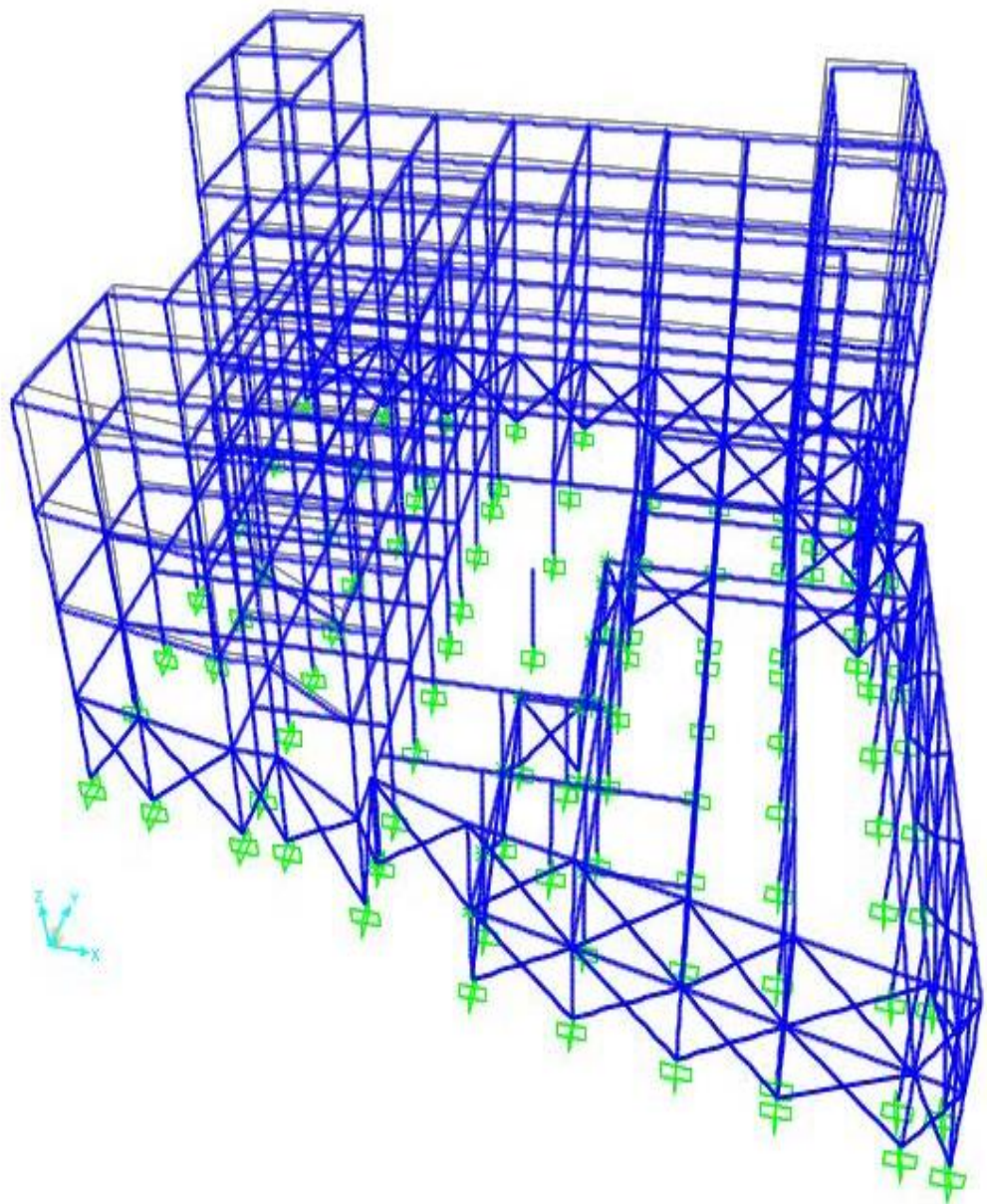
την ιδιομορφή με ιδιοπερίοδο $T = 0,03s$ σε ειδικές περιπτώσεις φορέων κατασκευών, τότε η συνεισφορά των υπολοίπων ιδιομορφών λαμβάνεται υπόψη προσεγγιστικά.

Η ιδιομορφική ανάλυση, επομένως, επαναλήφθηκε για μεγαλύτερο πλήθος ιδιομορφών, έως την ιδιομορφή με $T = 0,03s$, αλλά το όριο δεν επετεύχθη. Έτσι, η συνεισφορά των υπολοίπων ιδιομορφών υπολογίζεται προσεγγιστικά, με διαίρεση των τελικών τιμών των μεγεθών έντασης και μετακίνησης με το συνολικό ποσοστό που έχει επιτευχθεί σε δεκαδική μορφή, βάσει της πρόβλεψης του κανονισμού.

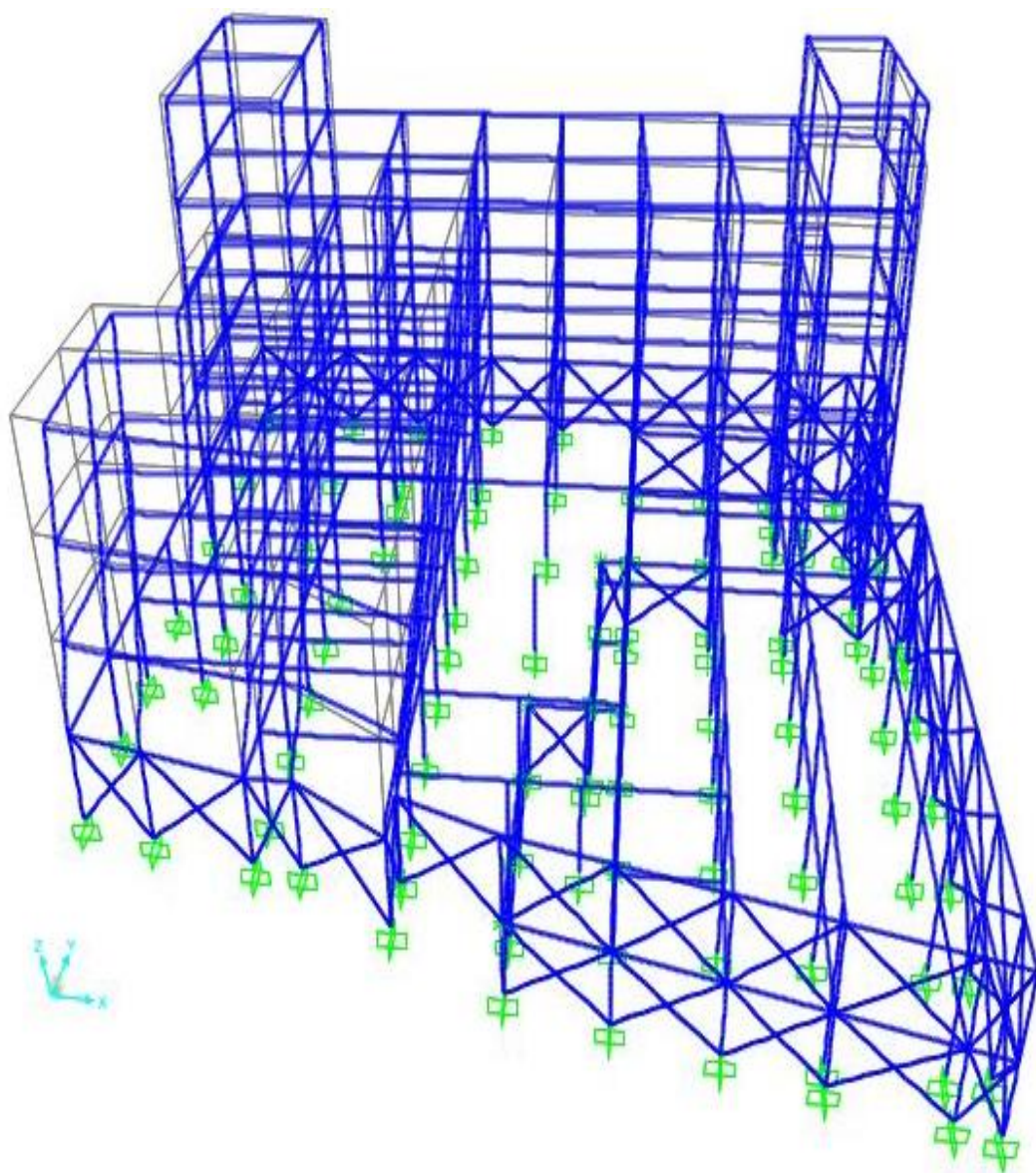
Παρακάτω γίνεται εποπτική παρουσίαση των τριών πρώτων ιδιομορφών του φορέα της κατασκευής (Εικόνες 5.3 έως 5.5).



Εικόνα 5.3 Πρώτη Ιδιομορφή με $T_1 = 0,745s$, $f_1 = 1,343$ (Μεταφορική κατά X).



Εικόνα 5.4 Δεύτερη ιδιομορφή με $T_2 = 0,699s$, $f_2=1,431$ (Μεταφορική κατά Y).



Εικόνα 5.5 Τρίτη ιδιομορφή με $T_3 = 0,635s$, $f_3=1,574$ (Στροφική).

5.4 Εισαγωγή του φάσματος σχεδιασμού του EC8

Θα κάνουμε χρήση του φάσματος σχεδιασμού για ελαστική ανάλυση που ορίζεται από τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 1 για την προσομοίωση των οριζόντιων συνιστωσών του σεισμού. Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις συναρτήσεων της περιόδου:

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

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \theta \cdot a_g \end{cases}$$

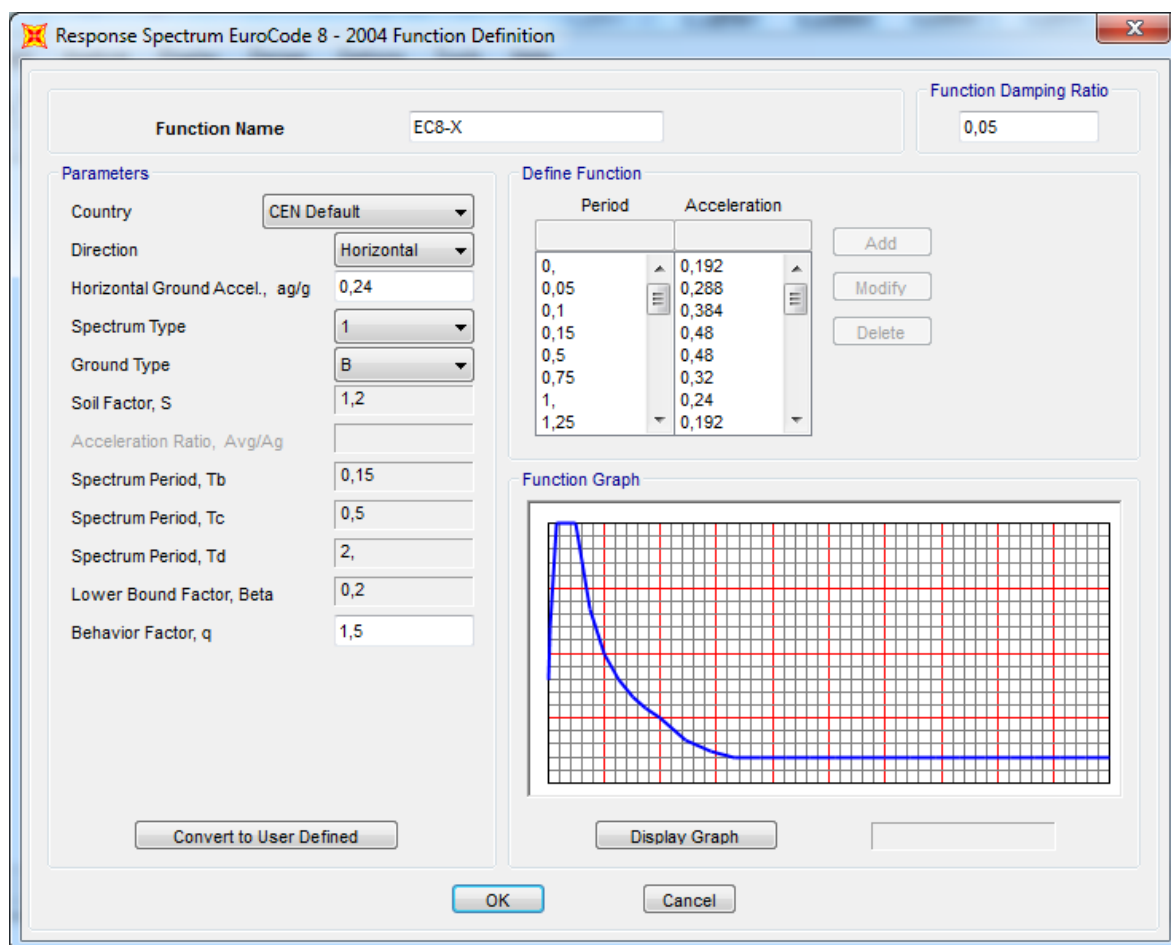
$$T_D \leq T: S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \\ \geq \theta \cdot a_g \end{cases}$$

Το φάσμα του EC8 προσαρμόζεται στις παραμέτρους της μελέτης της κατασκευής που αναφέρονται στη συνέχεια:

Η περιοχή του φορέα βρίσκεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II (οπότε $a_{gR} = 0,24g$), ο συντελεστής σπουδαιότητας είναι $\gamma_1 = 1,0$, η εδαφική επιτάχυνση είναι $a_g = a_{gR} \cdot \gamma_1 = 0,24g$, η κατηγορία εδάφους είναι B (οπότε $T_B = 0,15s$, $T_C = 0,5s$, $T_D = 2,0s$, $S = 1,2$), ο συντελεστής κατώτατου ορίου είναι $\beta = 0,2$ και ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι $q = 1,5$.

Το φάσμα σχεδιασμού της οριζόντιας συνιστώσας του EC8, λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω δεδομένα, εισάγεται στο SAP2000 με την παρακάτω ακολουθία εντολών (Εικόνα 5.6):

Define → Functions → Response Spectrum → EuroCode8 2004 → Add New Function



Εικόνα 5.6 Ορισμός Φάσματος Σχεδιασμού κατά EC8 οριζόντιας συνιστώσας στο SAP2000.

5.5 Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης

Για την υλοποίηση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης στο φορέα της υφιστάμενης κατασκευής από το πρόγραμμα SAP2000 καθορίζουμε προηγουμένως τους συνδυασμούς δράσεων που αφορούν τη συνεισφορά των μόνιμων δράσεων (G), ενός ποσοστού των ωφέλιμων φορτίων (Q) και τη σύγχρονη δράση της σεισμικής διέγερσης κατά τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, με την κατακόρυφη συνιστώσα να μη λαμβάνεται υπόψη.

Η μέθοδος SRSS (Square Root of Sum of Squares) της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων και η CQC (Complete Quadratic Combination) της πλήρους τετραγωνικής επαλληλίας αποτελούν τις συνηθέστερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επαλληλία των ιδιομορφών. Χάρη στην πρώτη εξ αυτών εξασφαλίζονται εκτιμήσεις εξαιρετικά ικανοποιητικές όσον αφορά την απόκριση φορέων κατασκευών με μεγάλη διαφορά μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων τους. Η δεύτερη μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ευρύτερη τάξη από φορείς κατασκευών.

Στην Εικόνα 5.7 φαίνεται η καρτέλα ορισμού της οριζόντιας συνιστώσας Fasma-X του σεισμού. Η Fasma-Y για τη σεισμική φόρτιση κατά Y ορίζεται με όμοιο τρόπο.

Ακολουθεί η εισαγωγή του στατικού συνδυασμού D+G+0,3Q που αναφέρεται στη δράση των κατακόρυφων φορτίων στο SAP2000 με τις εντολές (Εικόνα 5.8):

Define → Load Combination → Add New Combo

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: FasmaX **Set Def Name** **Notes:** **Modify/Show...**

Load Case Type: Response Spectrum **Design...**

Modal Combination:
☒ CQC ☐ SRSS ☐ Absolute ☐ GMC ☐ NRC 10 Percent ☐ Double Sum
GMC f1: 1, GMC f2: 0, Periodic + Rigid Type: SRSS

Modal Load Case:
Use Modes from this Modal Load Case: MODAL
☒ Standard - Acceleration Loading ☐ Advanced - Displacement Inertia Loading

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	EC8-X	9,81
Accel	U1	EC8-X	9,81

Add **Modify** **Delete**

☐ Show Advanced Load Parameters

Other Parameters:
Modal Damping: Constant at 0,05 **Modify/Show...**

Directional Combination:
☒ SRSS ☐ CQC3 ☐ Absolute
Scale Factor:

Mass Source: Previous (MSSSRC2)

Diaphragm Eccentricity:
Eccentricity Ratio: 0, **Override...**

OK **Cancel**

Εικόνα 5.7 Ορισμός σεισμικής φόρτισης Fasma-X στην οριζόντια διεύθυνση X στο SAP2000.

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
DEAD	Linear Static	1,
DEAD	Linear Static	1,
G	Linear Static	1,
LIVE	Linear Static	0,3

Εικόνα 5.8 Ορισμός στατικού συνδυασμού D+G+0,3Q στο SAP2000.

Έπειτα, προβαίνουμε στην εισαγωγή του γραμμικού συνδυασμού (Load Combination) στατικών και σεισμικών φορτίων. Εφαρμόζονται οι παρακάτω 8 συνδυασμοί φόρτισης, 4 ανά οριζόντια διεύθυνση X και Y:

Στην οριζόντια διεύθυνση X

$$D + G + 0.3Q + E_x + 0.3E_y$$

$$D + G + 0.3Q + E_x - 0.3E_y$$

$$D + G + 0.3Q - E_x + 0.3E_y$$

$$D + G + 0.3Q - E_x - 0.3E_y$$

Στην οριζόντια διεύθυνση Y

$$D + G + 0.3Q + 0.3E_x + E_y$$

$$D + G + 0.3Q + 0.3E_x - E_y$$

$$D + G + 0.3Q - 0.3E_x + E_y$$

$$D + G + 0.3Q - 0.3E_x - E_y$$

Στην Εικόνα 5.9 φαίνεται ο ορισμός στο SAP2000 του πρώτου κατά X γραμμικού συνδυασμού σεισμικών και στατικών φορτίων $D + G + 0.3Q + E_x + 0.3E_y$.

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated) D+G+0,3Q+FasmaX+0,3FasmaY

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
D+G+0,3Q	Combination	1,
D+G+0,3Q	Combination	1,
FasmaX	Response Spectrum	1,
FasmaY	Response Spectrum	0,3

Add Modify Delete

OK Cancel

Εικόνα 5.9 Εισαγωγή συνδυασμού $D + G + 0.3Q + E_x + 0.3E_y$ στο SAP2000.

Τέλος κάνουμε την ανάλυση στο λογισμικό SAP2000:

Analyze → Run Analysis

Set Load Cases to Run

Case	Type	Status	Action
DEAD	Linear Static	Not Run	Run
MODAL	Modal	Not Run	Run
LIVE	Linear Static	Not Run	Run
G	Linear Static	Not Run	Run
FasmaX	Response Spectrum	Not Run	Run
FasmaY	Response Spectrum	Not Run	Run

Click to:

Run/Do Not Run Case Show Case... Delete Results for Case

Run/Do Not Run All Delete All Results Show Load Case Tree...

Analysis Monitor Options

☐ Always Show ☐ Never Show ☒ Show After 4 seconds

☐ Model-Alive Run Now

OK Cancel

Εικόνα 5.10 Ορισμός φορτίσεων για ανάλυση προσομοιώματος φορέα στο SAP2000.

5.6 Αποτελέσματα της Δυναμικής Φασματικής Μεθόδου

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακες 5.2 έως 5.5) παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανωτέρω ελαστικής ανάλυσης, που αφορούν τις μέγιστες τιμές μετακινήσεων - στροφών και εντατικών μεγεθών σε υποστυλώματα ανά διεύθυνση X και Y και ανά επίπεδο ορόφου. Το υποστύλωμα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αξονική ένταση και στις δύο διευθύνσεις είναι το ακραίο πίσω αριστερά, στο χωρικό προσομοίωμα της Εικόνας 4.14, στη στάθμη ισογείου.

Πίνακας 5.2 ΜΕΓΙΣΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΦΩΝ – Διεύθυνση X						
Επίπεδο ορόφου	U₁ (m)	U₂ (m)	U₃ (m)	R₁ (rad)	R₂ (rad)	R₃ (rad)
Οροφή Γ' Ορόφου	0,0254	0,0137	-0,0025	0,0007	0,0011	0,0015
Οροφή Β' Ορόφου	0,0180	0,0096	-0,0024	0,0006	0,0009	0,0013
Οροφή Α' Ορόφου	0,0115	0,0065	-0,0021	0,0005	0,0006	0,0010
Οροφή Ισογείου	0,0051	0,0022	-0,0015	0,0003	0,0004	0,0008
Οροφή Α' Υπογείου	0,0010	0,0005	-0,0008	0,0001	0,0002	0,0002
Οροφή Β' Υπογείου	0,0003	0,0002	-0,0002	0,0001	0,0001	0,0001

Πίνακας 5.3 ΜΕΓΙΣΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΦΩΝ – Διεύθυνση Y						
Επίπεδο ορόφου	U₁ (m)	U₂ (m)	U₃ (m)	R₁ (rad)	R₂ (rad)	R₃ (rad)
Οροφή Γ' Ορόφου	0,0171	0,0211	-0,0027	0,0008	0,0009	0,0014
Οροφή Β' Ορόφου	0,0132	0,0168	-0,0026	0,0006	0,0007	0,0010
Οροφή Α' Ορόφου	0,0078	0,0109	-0,0022	0,0005	0,0006	0,0009
Οροφή Ισογείου	0,0036	0,0045	-0,0017	0,0002	0,0003	0,0007
Οροφή Α' Υπογείου	0,0007	0,0008	-0,0010	0,0001	0,0001	0,0002
Οροφή Β' Υπογείου	0,0002	0,0002	-0,0004	0,0001	0,0001	0,0001

Πίνακας 5.4 ΜΕΓΙΣΤΑ ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Χ					
ΕΠΙΠΕΔΟ ΟΡΟΦΟΥ	P (kN)	V₂ (kN)	V₃ (kN)	M₂ (kNm)	M₃ (kNm)
Ισόγειο	-937,97	118,72	-65,72	87,36	201,99
Α' Όροφος	-772,04	99,99	-50,01	78,64	-157,88
Β' Όροφος	-460,34	86,99	-48,25	41,43	92,25
Γ' Όροφος	-158,48	49,91	-37,32	-20,32	-23,50

Πίνακας 5.5 ΜΕΓΙΣΤΑ ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Υ					
ΕΠΙΠΕΔΟ ΟΡΟΦΟΥ	P (kN)	V₂ (kN)	V₃ (kN)	M₂ (kNm)	M₃ (kNm)
Ισόγειο	-934,76	88,59	-103,37	118,22	165,92
Α' Όροφος	-761,24	81,53	-86,78	97,06	-101,46
Β' Όροφος	-432,66	80,46	-77,25	61,58	68,27
Γ' Όροφος	-155,78	41,83	-56,78	-22,96	-23,35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER)

6.1 Γενικά για τις ανελαστικές μεθόδους ανάλυσης

Συγκριτικά με τις ελαστικές αναλύσεις για τις οποίες έγινε λόγος στο προηγούμενο Κεφάλαιο, οι ανελαστικές μέθοδοι ανάλυσης εκτιμούν πιο ρεαλιστικά τη σεισμική απόκριση ενός φορέα. Αυτό συμβαίνει επειδή θεωρούν τις ανακατανομές των εσωτερικών εντάσεων λόγω των βλαβών στα επιμέρους μέλη (πλαστικοποιήσεις ακραίων διατομών), εξαιτίας εισόδου πλέον του φορέα στην ανελαστική περιοχή.

Η ανελαστική αναλύση που εφαρμόζεται στα επόμενα Κεφάλαια (στο Κεφάλαιο 7 για τον υφιστάμενο φορέα της υπό μελέτη κατασκευής και στο Κεφάλαιο 8 για το προτεινόμενο για την ενίσχυσή της στατικό σύστημα) για την αξιοποίηση της δυνατότητας μιας πιο ρεαλιστικής αποτίμησης της κατασκευής είναι η Ανελαστική Στατική Ανάλυση (Static Pushover Analysis).

6.2 Ανελαστική στατική ανάλυση (Pushover)

Όταν η κατασκευή υποβάλλεται στη σεισμική δράση για την οποία λαμβάνει χώρα η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός, η ανάλυση Pushover επιδιώκει να παρέχει εκτίμηση σχετικά με το μέγεθος των αναπτυσσόμενων στα μέλη της ανελαστικών παραμορφώσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §5.7.1). Κατά συνέπεια, μορφώνεται η καμπύλη αντίστασης για το φορέα της υπό μελέτη κατασκευής, που μας δίνει τη σχέση τέμνουσας βάσης V_b , της κατασκευής και μετατόπισης κορυφής δ και γίνεται υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης (θεωρία ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος), με κάποια από τις μεθόδους (για παράδειγμα ATC-40 που παρουσιάζεται στη συνέχεια της εργασίας), ενώ καθορίζεται η στάθμη επιτελεστικότητας. Έπειτα, ακολουθεί σύγκριση για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση με την επιθυμητή στάθμη επιτελεστικότητας.

Τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του νόμου δύναμης - παραμόρφωσης των μελών του κτιρίου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη άμεσα από το προσομοίωμα του φορέα της

κατασκευής κατά την εφαρμογή της ανάλυσης Pushover. Οριζόντια φορτία αμετάβλητης καθ' ύψος κατανομής, μονοτονικά αυξανόμενα αποτελούν τη φόρτιση του προσομοιώματος. Οι οριζόντιες αυτές δυνάμεις αποτελούν αναπαράσταση των αδρανειακών δυνάμεων κατά τη σεισμική διέγερση στις στάθμες των ορόφων. Η αστοχία του φορέα σηματοδοτεί τη λήξη της ανάλυσης Pushover, με τη μορφή αστοχίας να είθισται να είναι είτε η τοπική ή συνολική μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό είτε η αστοχία σε κάμψη κρίσιμης διατομής. Άλλωστε οι διατάξεις των αντισεισμικών κανονισμών υπογορεύουν ικανοτικό σχεδιασμό κατασκευών, χάρη στον οποίο εξασφαλίζεται η απαίτηση να έπεται πάντα η διατμητική της καμπτικής αστοχίας. Θεωρούμε τη σχέση φορτίου - παραμόρφωσης μέσω πλήρων καμπυλών μονοτονικής φόρτισης έως την αστοχία, σε κάθε περιοχή όπου περιμένουμε να αναπτυχθεί ανελαστική συμπεριφορά.

6.3 Βασικές παραδοχές της μεθόδου

Οι βασικές παραδοχές της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. οι παρακάτω:

- Τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του νόμου δύναμης - παραμόρφωσης των μελών λαμβάνονται άμεσα υπόψη από το προσομοίωμα του φορέα της κατασκευής.
- Φορτία οριζόντια, κατανεμημένα ανάλογα προς τις αδρανειακές δυνάμεις της διέγερσης, μονοτονικά αυξανόμενα μέχρι κάποιο μέλος του φορέα να μη δύναται να φέρει τα κατακόρυφα φορτία του, αναπτύσσονται στο προσομοίωμα. Η ανάλυση Pushover παρέχει την καμπύλη ικανότητας του φορέα της κατασκευής και η οποία αφορά τη σχέση τέμνουσας βάσης – μετακίνησης ($V-S_d$) χαρακτηριστικού σημείου της κατασκευής (κόμβος ελέγχου), το οποίο λαμβάνεται στην κορυφή του. Όλοι οι απαιτούμενοι έλεγχοι ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας βασίζονται στην καμπύλη ικανότητας.
- Ο έλεγχος για την ικανοποίηση των κριτηρίων επιτελεστικότητας πραγματοποιείται για τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου για δεδομένη σεισμική δράση. Για τη μετακίνηση αυτή, ο έλεγχος αφορά ότι η παραμόρφωση (γωνία στροφής κατά ή μετά τη διαρροή) των πλάστιμων μελών του φορέα δεν οδηγεί σε βαθμό βλάβης μεγαλύτερο από τον ανεκτό για τη σκοπούμενη στάθμη επιτελεστικότητας της κατασκευής.

-
- Η στοχευόμενη μετακίνηση δ_i που προκαλεί η σεισμική δράση εκτιμάται, σε περιπτώσεις όπου δεν πραγματοποιείται πιο ακριβής υπολογισμός, σύμφωνα με το φάσμα μετακινήσεων για πλαστιμότητα συμβατή με τη μετακίνηση του κτιρίου.
 - Απλοποιητικές μέθοδοι που είναι γενικά αποδεκτές (KAN.ΕΠΕ., EC8) μπορούν να αξιοποιηθούν, ώστε να προσδιοριστεί η στοχευόμενη μετακίνηση.

6.4 Κατανομή των σεισμικών φορτίων

Στη στάθμη κάθε διαφράγματος εφαρμόζονται τα οριζόντια στατικά φορτία, βάσει της κατανομής των αδρανειακών φορτίων της διέγερσης. Για να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του τρόπου κατανομής των φορτίων λόγω μετελαστικής συμπεριφοράς ορισμένων περιοχών του φορέα, όπως και εξαιτίας της επίδρασης ανώτερων ιδιομορφών, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν δύο τουλάχιστον διαφορετικές κατανομές καθ' ύψος για όλες τις αναλύσεις.

Μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω κατανομές, βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 1:

- «**Ομοιόμορφη**», βασισμένη σε οριζόντια φορτία ανάλογα ως προς τη μάζα κάθε ορόφου ανεξάρτητα από τη στάθμη του (ομοιόμορφη επιτάχυνση απόκρισης).
- «**Ιδιομορφική**», ανάλογη προς οριζόντια φορτία συμβατά προς την κατανομή οριζόντιων φορτίων στην υπό εξέταση διεύθυνση, όπως προκύπτει από ελαστική ανάλυση.

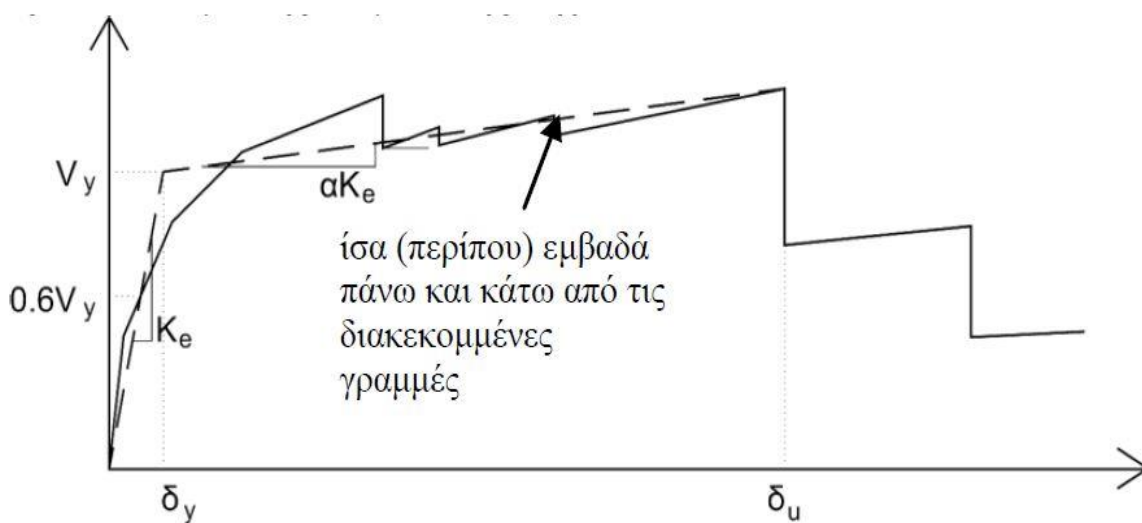
Χρησιμοποιώντας μεθόδους Δυναμικής ή με προσέγγιση από οριζόντιες μετακινήσεις γραμμικά αυξανόμενες με το ύψος της κατασκευής μπορεί να υλοποιηθεί ο υπολογισμός του σχήματος των θεμελιωδών ιδιομορφών στις οριζόντιες διευθύνσεις της ανάλυσης της κατασκευής.

6.5 Εξιδανικευμένη καμπύλη δύναμης - μετακίνησης

Η μη γραμμική σχέση δύναμης - μετακίνησης για τη σχέση τέμνουσας βάσης και μετακίνησης του κόμβου ελέγχου, μετασχηματίζεται σε εξιδανικευμένη καμπύλη, ώστε να υπολογιστεί η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία K_e και η αντίστοιχη δύναμη διαρροής V της

κατασκευής.

Η εξιδανικευμένη αυτή καμπύλη αντίστασης συνιστάται να είναι διγραμμική, με κλίση του πρώτου κλάδου K_e και του δεύτερου ίση με αK_e . Με κριτήριο την ισότητα των εμβαδών των χωρίων που προκύπτουν πάνω και κάτω από τις τομές πραγματικής και εξιδανικευμένης καμπύλης, μπορεί να γίνει γραφικός προσδιορισμός των δύο ευθειών που συναποτελούν τη διγραμμική καμπύλη (Εικόνα 6.1).

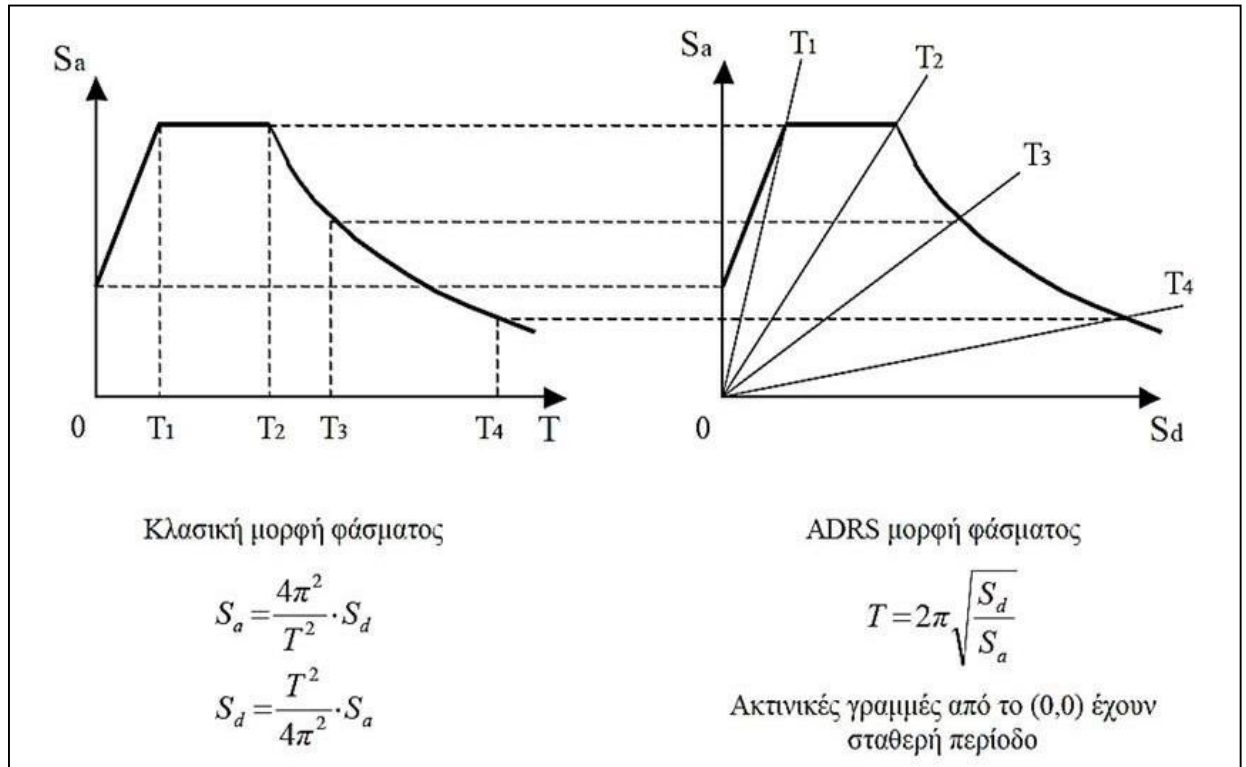


Εικόνα 6.1 Διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής.

6.6 Συνοπτική παρουσίαση κανονιστικών διατάξεων του ATC – 40 σχετικά με το φάσμα ικανότητας

Θα γίνει γραφική σύγκριση της καμπύλης ικανότητας ενός φορέα, η οποία εκφράζει τη διαθέσιμη ικανότητά του, με το φάσμα απαίτησης ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη μετελαστική μετακίνηση που μπορεί να πραγματοποιήσει. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη από τις αναφερόμενες στις διατάξεις του ATC-40. Το φάσμα απαίτησης προέρχεται από την απομείωση του ελαστικού σύμφωνα με την υστερητική απόσβεση του φορέα. Το σημείο επιτελεστικότητας, δηλαδή το σημείο τομής των δύο καμπυλών, αντιστοιχεί στη στοχευόμενη μετακίνηση για συγκεκριμένη σεισμική απαίτηση. Οι κανονιστικές διατάξεις προτείνουν τρεις μεθοδολογίες με παρεμφερή αποτελέσματα για τον υπολογισμό. Θα παρουσιαστεί στα επόμενα η πρώτη μέθοδος από αυτές, που είναι κυρίως αναλυτική.

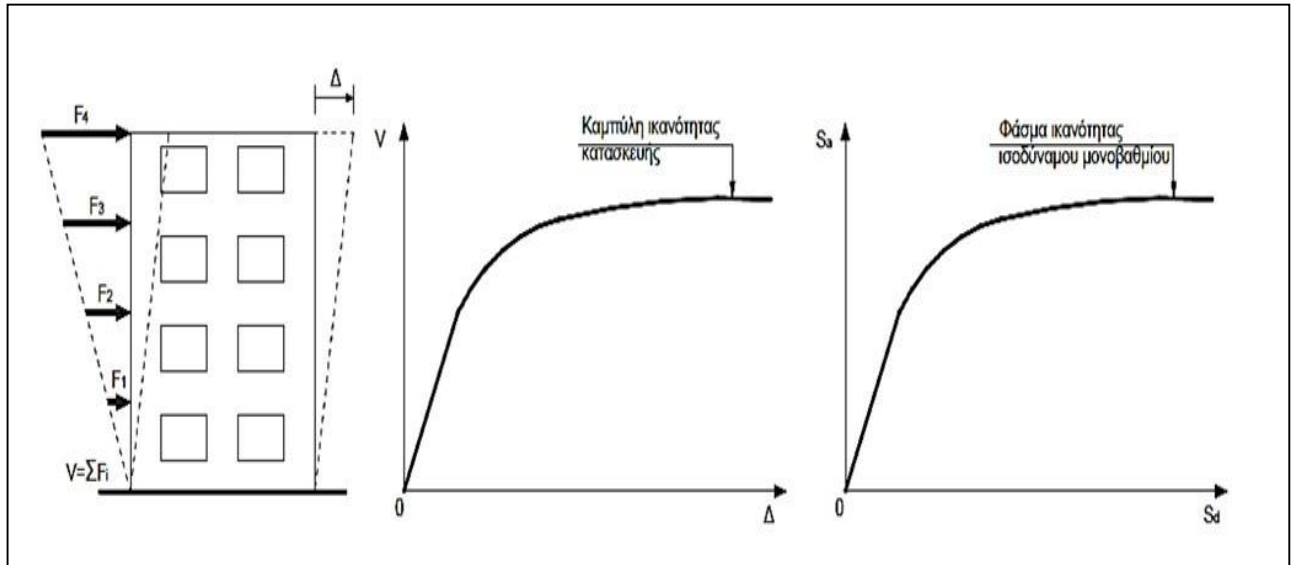
- Μεταφορά του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για $\zeta=5\%$, στο πεδίο επιτάχυνση - μετακίνηση (μορφή ADRS), η οποία πραγματοποιείται σύμφωνα με την Εικόνα 6.2 που ακολουθεί.



Εικόνα 6.2 Μετάβαση από ελαστικό φάσμα σχεδιασμού στη μορφή ADRS.

- Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας (capacity curve) και του φάσματος ικανότητας (capacity spectrum).

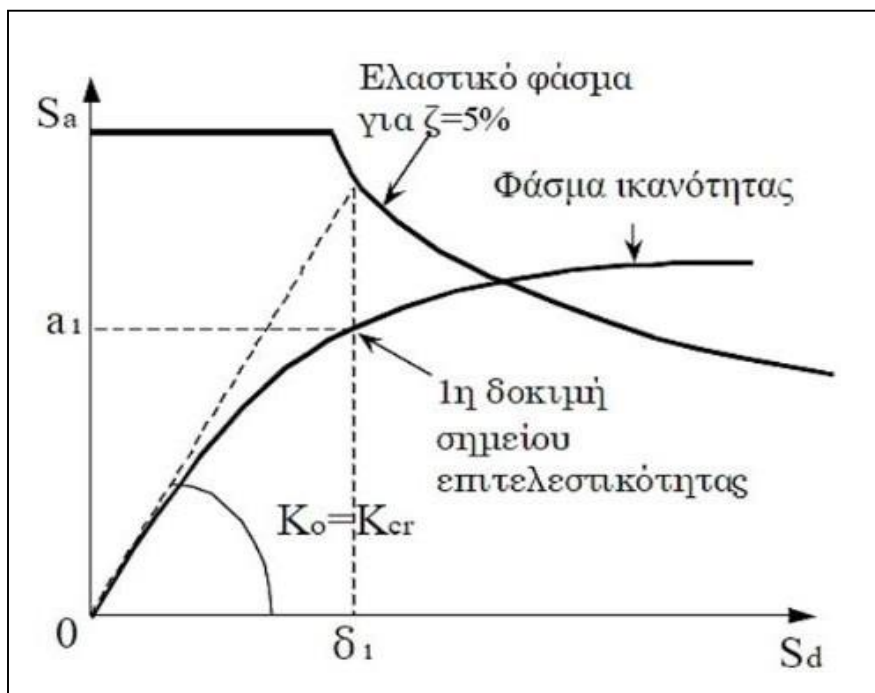
Η κατασκευή της πρώτης επιτυγχάνεται υπολογίζοντας τη μετακίνηση της κορυφής για διάφορες τιμές της τέμνουσας βάσης, θεωρώντας κατανομή καθ' ύψος των φορτίων συμβατή με την αναμενόμενη μορφή μετακινήσεων (Εικόνα 6.3). Τελικά, η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.



Εικόνα 6.3 Κατασκευή καμπύλης ικανότητας της κατασκευής και φάσματος ικανότητας.

- Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.

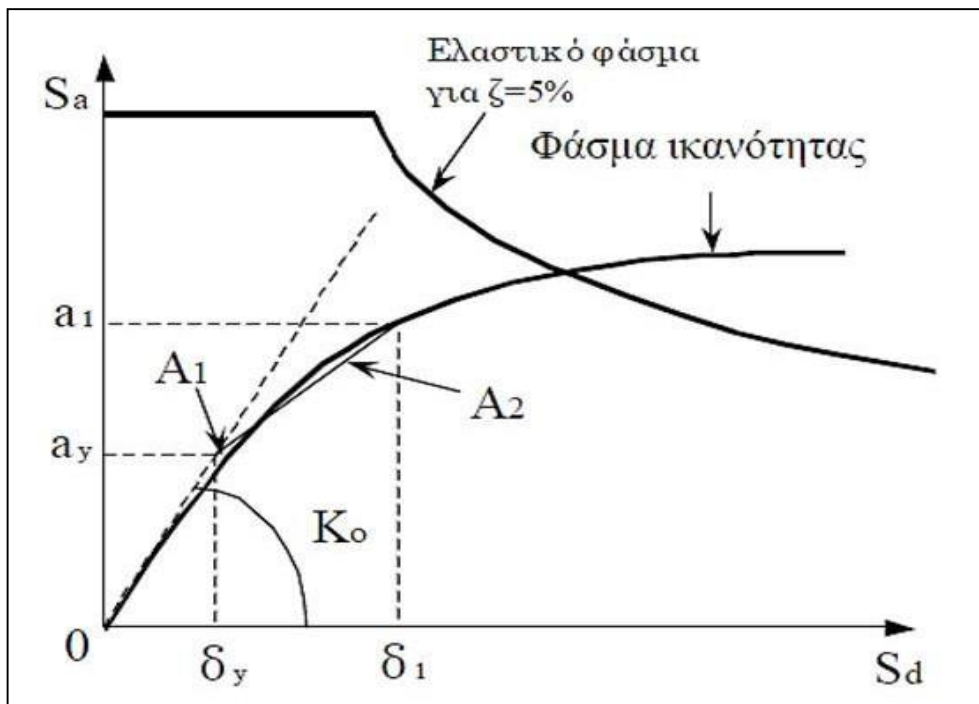
Υπολογίζεται η μετακίνηση δ_1 για τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής) από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση 5%. Γίνεται υπολογισμός της πρώτης εκτίμησης του σημείου επιτελεστικότητας πάνω στο φάσμα ικανότητας για τη μετακίνηση δ_1 και της αντίστοιχης επιτάχυνσης a_1 . Η μετακίνηση δ_1 είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και ανελαστικού συστήματος.



Εικόνα 6.4 Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.

- Δημιουργία διγραμμικού φάσματος ικανότητας.

Από το πρώτο σημείο δοκιμής φέρουμε ευθεία, ώστε τα εμβαδά A_1 και A_2 να είναι ίσα και ορίζουμε το σημείο τομής με την ευθεία που αντιστοιχεί στην αρχική δυσκαμψία. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη διαρροή σύμφωνα με τη διγραμμική καμπύλη συμπεριφοράς και η προβολή του στους άξονες S_a και S_d ορίζει την επιτάχυνση διαρροής, a_y και τη μετακίνηση διαρροής, δ_y αντίστοιχα.



Εικόνα 6.5 Δημιουργία διγραμμικού φάσματος ικανότητας.

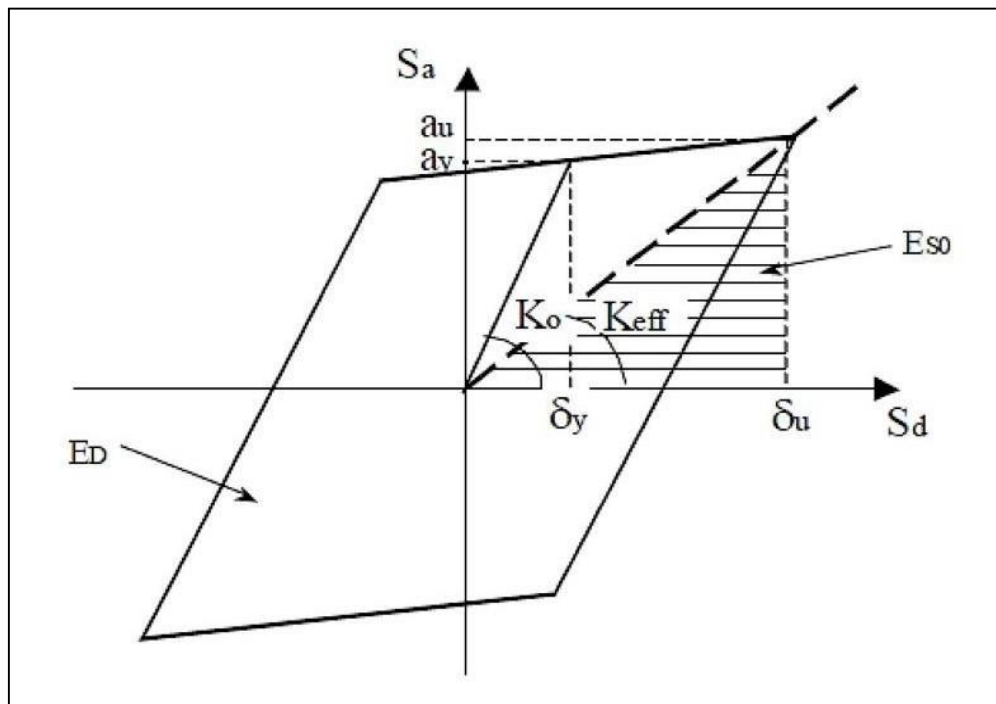
- Υπολογισμός ενεργού απόσβεσης.

Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφεί ως: $\zeta_{\text{eff}} = \zeta_{\text{ελ}} + \zeta_{\text{υστ}}$, όπου:

$\zeta_{\text{ελ}}$ η απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά ($\zeta_{\text{ελ}} = 0,05$ για οπλισμένο σκυρόδεμα) και $\zeta_{\text{υστ}}$ η υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

Για τον υπολογισμό της υστερητικής απόσβεσης προτείνεται η σχέση του Chopra που βασίζεται στη σχέση ενεργειών ελαστοπλαστικού και ισοδύναμου ελαστικού συστήματος:

$$\zeta_{\text{υστ}} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \Rightarrow \zeta_{\text{υστ}} = \frac{0.637 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$$



Εικόνα 6.6 Υπολογισμός υστερητικής απόσβεσης κατά Choppa.

Η σχέση του Choppa για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλάστιμη συμπεριφορά υπερεκτιμά την υστερητική απόσβεση. Στις διατάξεις του ATC – 40, επομένως, προτείνεται - ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση - η χρήση διορθωτικού συντελεστή κ .

Διάρκεια σεισμού	Νέες, καλές αντισεισμικές κατασκευές	Μέτριες αντισεισμικά κατασκευές	Φτωχές αντισεισμικά κατασκευές
Μικρή (κοντά στο επίκεντρο)	A	B	C
Μεγάλη (μακριά από επίκεντρο, γενικώς για ζώνες III & IV)	B	C	C

Πίνακας 6.1 Τύποι συμπεριφοράς κατασκευής και συντελεστές κ .

Τύπος συμπεριφοράς	$\zeta_{\text{ιστ}} (\%)$	κ
A	≤ 16.25	1.00
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$
B	< 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$
C	Όλες οι τιμές	0.33

Πίνακας 6.2 Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ ανάλογα με τον τύπο συμπεριφοράς.

Θέτοντας στην παραπάνω σχέση $a_u = a_1$ και $\delta_u = \delta_1$, προκύπτει η σχέση:

$$\zeta_{\text{eff}} (\%) = 5 + \frac{0.637 \kappa (a_y \delta_1 - \delta_y a_1)}{a_1 \delta_1}$$

- Απομείωση ελαστικού φάσματος απόκρισης.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για απόσβεση $\zeta = \zeta_{\text{eff}}$ πολλαπλασιάζοντας τις τιμές του φάσματος για $\zeta = 5\%$ με τους μειωτικούς συντελεστές SR_A και SR_V , στα τμήματα που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση και σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα.

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \ln \zeta_{\text{eff}}}{2.12} \geq SR_{A,\min}$$

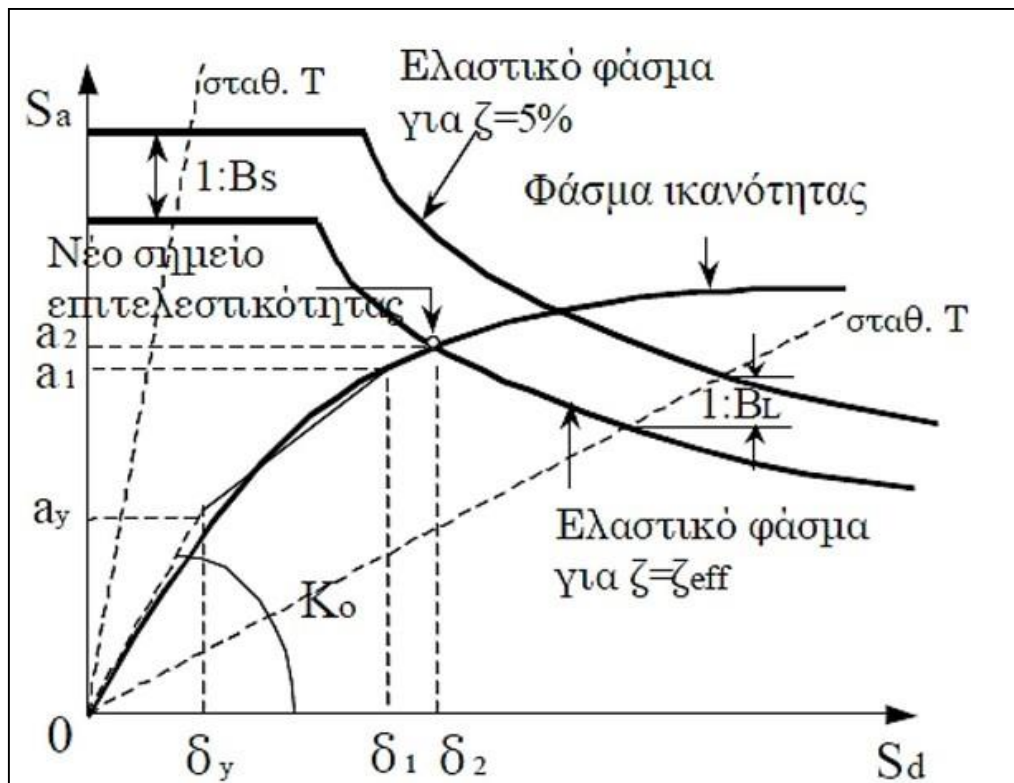
$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \ln \zeta_{\text{eff}}}{1.65} \geq SR_{V,\min}$$

Στον πίνακα (Πίνακας 6.3) που ακολουθεί δίνονται οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών SR_A και SR_V .

Τύπος συμπεριφοράς	$SR_{A,min}$	$SR_{V,min}$
A	0.33	0.50
B	0.44	0.56
C	0.56	0.67

Πίνακας 6.3 Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης SR_A και SR_V .

Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για $\zeta = \zeta_{eff}$ και του φάσματος ικανότητας ορίζει το νέο σημείο επιτελεσματικότητας, η προβολή του οποίου στους άξονες S_a και S_d ορίζει τη νέα επιτάχυνση, a_2 και τη νέα μετακίνηση, δ_2 αντίστοιχα.



Εικόνα 6.7 Απομειωμένο ελαστικό φάσμα απόκρισης.

- Έλεγχος σύγκλισης

Η μέθοδος βασίζεται σε επαναληπτική διαδικασία έως την επίτευξη σύγκλισης, η οποία θεωρείται ότι έχει λάβει χώρα όταν:

$$0,95 \delta_1 < \delta_2 < 1,05\delta_1$$

Αν το κριτήριο δεν ικανοποιείται, τίθενται $a_1 = a_2$ και $\delta_1 = \delta_2$ και επαναλαμβάνεται η

διαδικασία από το πέμπτο βήμα. Αν το κριτήριο ικανοποιείται, η μετακίνηση δ_2 αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (στοχευόμενη μετακίνηση).

- Στοχευόμενη μετακίνηση κατασκευής.

Μετά τη σύγκλιση της μεθόδου και την εύρεση του σημείου επιτελεστικότητας, μετατρέπεται η μετακίνηση που προσδιορίστηκε από μετακίνηση πολυβάθμιου σε μονοβάθμιου συστήματος και εξετάζεται η ένταση για αυτή τη μετακίνηση σε όλα τα δομικά στοιχεία και η ικανοποίηση των ελέγχων ασφαλείας. Ελέγχεται επίσης η ένταση ή παραμόρφωση των δομικών στοιχείων σε σχέση με αυτή που ορίζεται από την καθορισμένη στάθμη επιτελεστικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟ SAP2000 ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Η μέθοδος Pushover στο SAP2000

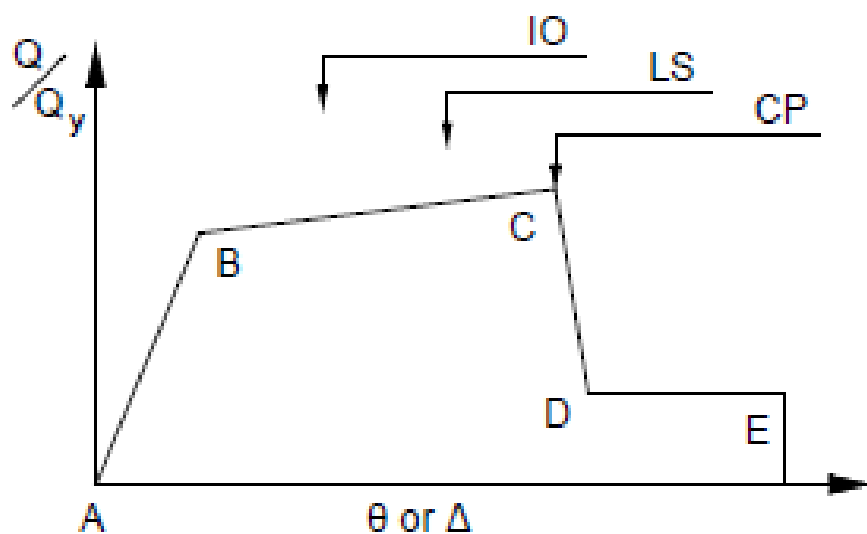
Η υλοποίηση της ανελαστικής ανάλυσης Pushover, όπως αναλύθηκε εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 6, αφορά τη διερεύνηση του τρόπου συμπεριφοράς του φορέα όταν υποβάλλεται σε σταθερά φορτία βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενα οριζόντια φορτία (*EC8 §4.3.3.4.2.1(1)*).

Η μέθοδος Pushover μας παρέχει τελικά την καμπύλη ικανότητας του φορέα της κατασκευής. Ειδικότερα, αποκτούμε εικόνα για τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η τέμνουσα βάσης ως προς τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου (*EC8 §4.3.3.4.2.3, ΚΑΝ.ΕΠΕ. §5.7.3.2*). Ο κόμβος ελέγχου τοποθετείται προσεγγιστικά στο κέντρο μάζας στην κορυφή του φορέα της κατασκευής που μελετάμε.

Αρχικά, θα πρέπει να περιγραφούν αναλυτικά τα υλικά και οι διατομές της κατασκευής όσον αφορά την ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού. Κρίνεται αναγκαίο να εισαχθούν στο πρόγραμμα SAP2000 οι οπλισμοί στα μέλη του φορέα της κατασκευής για την ανάλυση Pushover. Έτσι, για κάθε διατομή υπεισέρχονται τα μεγέθη παραμόρφωσης για το διάγραμμα ροπής – καμπυλότητας. Κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση του φορέα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, οι οπλισμοί δεν είχαν οριστεί, χωρίς επίδραση επί των αποτελεσμάτων.

Ακολουθεί η εισαγωγή στο SAP2000 των πλαστικών αρθρώσεων (hinges) στις διατομές των μελών του φορέα της υφιστάμενης κατασκευής. Στην εργασία αυτή ορίζονται κατά FEMA 356 και ASCE 41-13 (Εικόνα 7.1), αξιοποιώντας την αυτόματη επιλογή ορισμού του SAP2000. Τα πλαστικά παραμορφωσιακά μεγέθη ορίζονται για την ιδεατή καμπύλη παραμόρφωσης $M - \theta$ που προσδιορίζει ο κάθε κανονισμός, ώστε να γίνει η εκτίμηση των θέσεων και του τρόπου που θα έχουμε εμφάνιση ανελαστικών παραμορφώσεων στο φορέα της κατασκευής. Στην Εικόνα 7.1 προσδιορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας IO (Immediate Occupancy - Άμεση Χρήση), LS (Life Safety -

Προστασία Ζωής) και CP (Collapse Prevention – Οιονεί Κατάρρευση) επί της καμπύλης.



Εικόνα 7.1 Πρότυπα της ASCE 41-13 για τη γενική μορφή καμπύλης δύναμης - παραμόρφωσης και στάθμες επιτελεστικότητας επί αυτής.

Σε ό,τι αφορά το στάδιο προσδιορισμού των συνδυασμών φόρτισης της ανάλυσης Pushover του υφιστάμενου φορέα, ο Ευρωκώδικας 8 προβλέπει, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, τη δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων. Η δράση των οριζόντιων φορτίων αφορά την εφαρμογή δύο διαφορετικών καθ' ύψος κατανομών, μίας «ομοιόμορφης» ανάλυσης και μίας «ιδιομορφικής» ανάλυσης.

7.1.1 Καθορισμός ανελαστικής συμπεριφοράς υλικών κατασκευής

Στο πρώτο στάδιο εφαρμογής της μεθόδου Pushover στο πρόγραμμα SAP2000 κάνουμε την εισαγωγή των ιδιοτήτων των υλικών (του σκυροδέματος και του χάλυβα στις ράβδους οπλισμού) ως προς τη μη γραμμική ελαστική πλέον συμπεριφορά τους:

- παραμόρφωση διαρροής χάλυβα, $\epsilon_{sy} = 2\%$,
- παραμόρφωση διαρροής σκυροδέματος, $\epsilon_{cy} = 2\text{‰}$ και
- παραμόρφωση αστοχίας θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος, $\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$.

Στο SAP2000 εισάγουμε αυτές τις τιμές με την ακόλουθη εντολή:

Define → Materials → Modify/Show Material → Switch To Advanced Property Display → Modify/Show Material Properties → Nonlinear Material Data

7.1.2 Εισαγωγή οπλισμών στα μέλη του φορέα

Στο επόμενο στάδιο εφαρμογής της ανάλυσης Pushover πραγματοποιείται η εισαγωγή του ανελαστικού τρόπου συμπεριφοράς σε επίπεδο διατομής. Εισάγουμε λοιπόν τους οπλισμούς κάθε διατομής του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής βάσει των σχεδίων της μελέτης. Οι οπλισμοί ορίζονται στο πρόγραμμα SAP2000 με την εξής ακολουθία εντολών (Εικόνες 7.2 και 7.3):

Define → Section Properties → Frame Sections → Modify/Show Property → Concrete Reinforcement

The screenshot shows the 'Reinforcement Data' dialog box in SAP2000. The dialog is titled 'Reinforcement Data' and contains several sections. Under 'Rebar Material', 'Longitudinal Bars' and 'Confinement Bars (Ties)' are both set to 'S400'. Under 'Design Type', 'Beam (M3 Design Only)' is selected. Under 'Concrete Cover to Longitudinal Rebar Center', 'Top' and 'Bottom' are both set to '0,04'. Under 'Reinforcement Overrides for Ductile Beams', there are four input fields for 'Left' and 'Right' 'Top' and 'Bottom' reinforcement, all set to '2,260E-04'. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Εικόνα 7.2 Εισαγωγή οπλισμού S400 διατομής δοκού B20/60B στο SAP2000. Ο δείκτης B αφορά 4φ12.

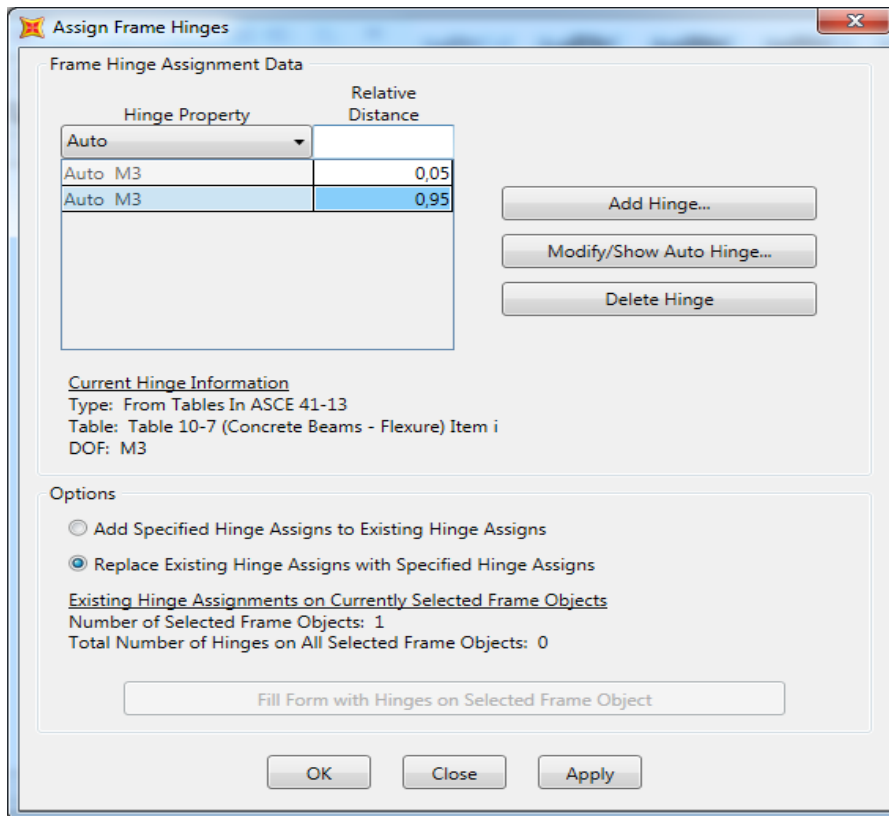
Εικόνα 7.3 Εισαγωγή οπλισμού (4φ18) διατομής υποστυλώματος C24/55 στο SAP2000.

7.1.3 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στις διατομές των μελών

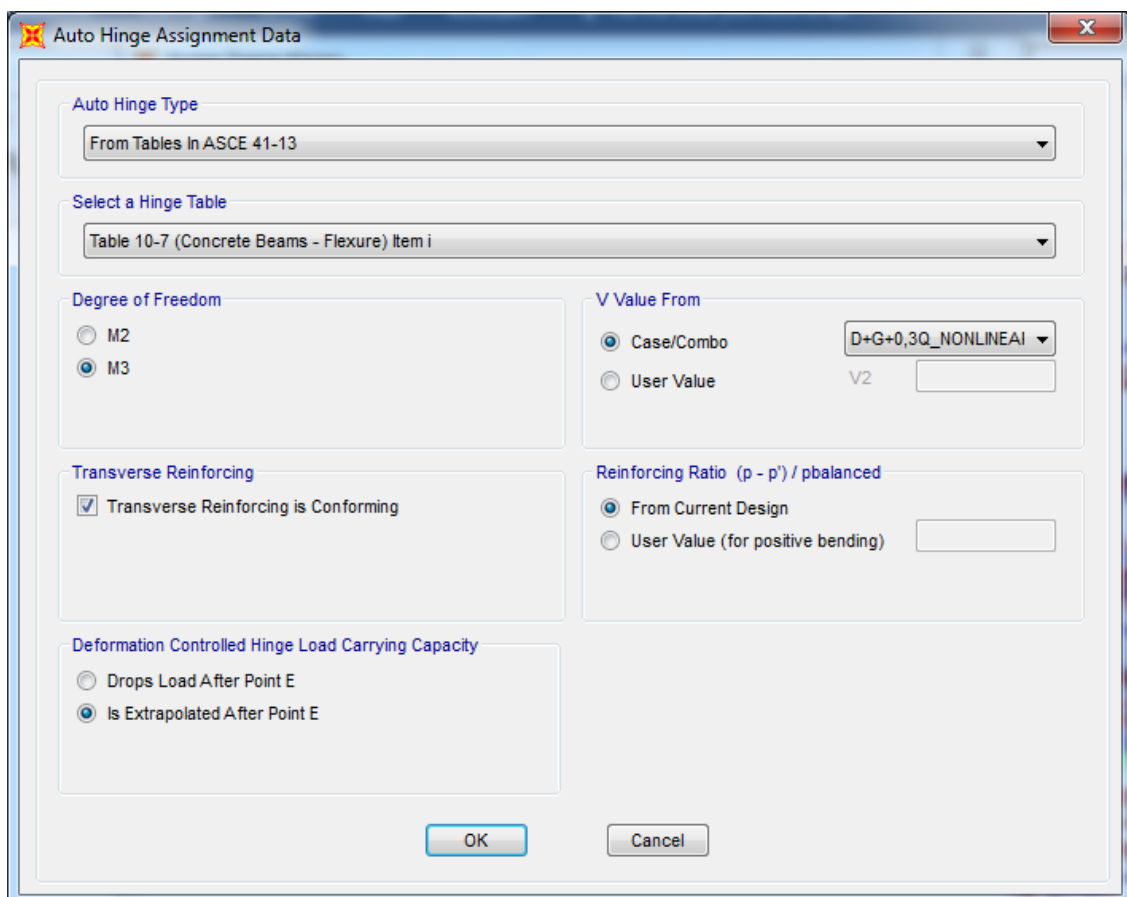
Ο τύπος πλαστικών αρθρώσεων (hinges) που χρησιμοποιείται στα επιμέρους φέροντα στοιχεία αφορά καθαρή κάμψη (M_3) στις δοκούς και αλληλεπίδραση διαξονικής κάμψης με αξονικό φορτίο (P- M_2 - M_3) στα υποστυλώματα ανάλογα με το ποιος τρόπος αστοχίας μέλους κρίνεται κρίσιμος σε κάθε περίπτωση. Οι δείκτες αναφέρονται σε τοπικούς άξονες μέλους. Επισημαίνεται ότι η πλαστική άρθρωση μιας διατομής ενεργοποιείται όταν η ροπή από ανάλυση ξεπεράσει τη ροπή διαρροής. Διαφορετικά το μέλος συμπεριφέρεται ελαστικά, αγνοώντας τις πλαστικές αρθρώσεις.

Επιλέγονται λοιπόν οι διατομές δοκών και ορίζονται πλαστικές αρθρώσεις (Εικόνες 7.4 και 7.5) στο 5% και 95% του μήκους καθεμιάς με την ακόλουθη εντολή στο SAP2000:

Assign → Frame → Hinges

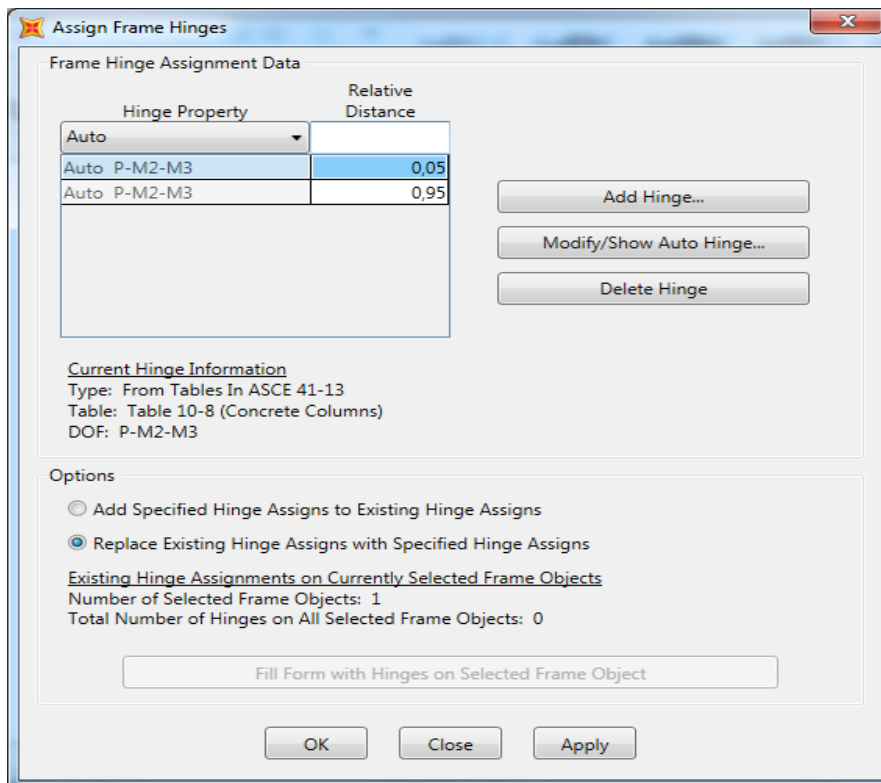


Εικόνα 7.4 Πλαστικές αρθρώσεις στο 5% και 95% του μήκους δοκού στο SAP2000.

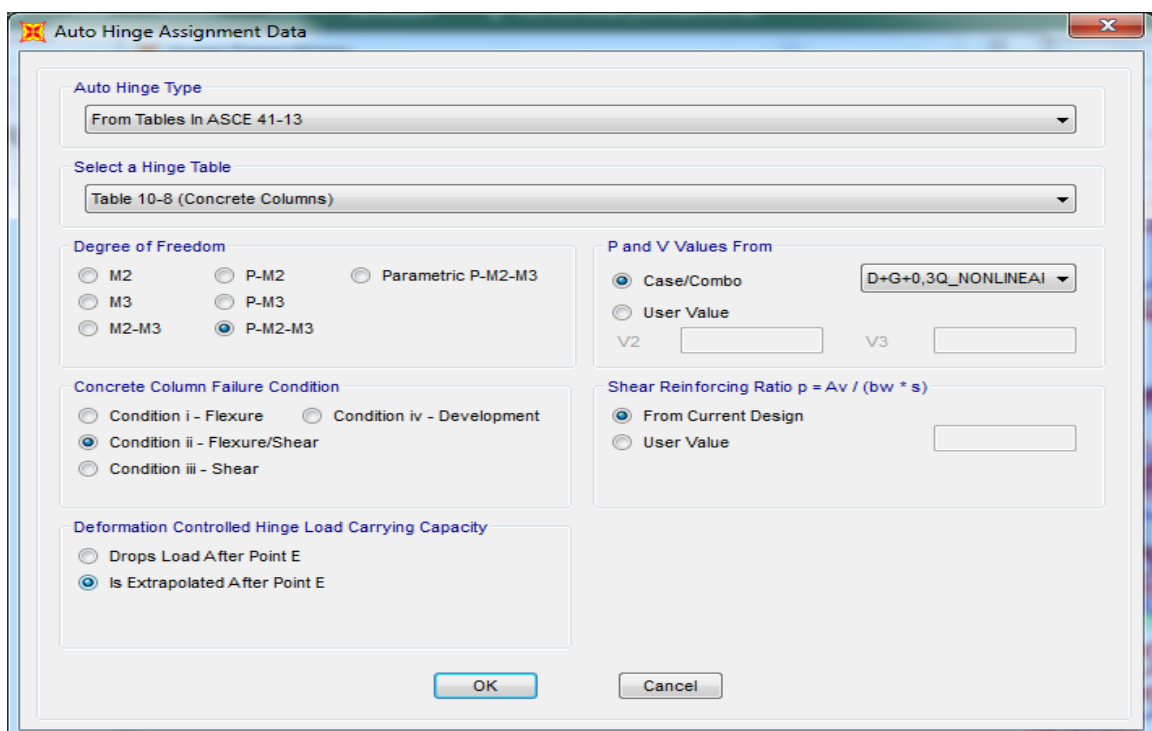


Εικόνα 7.5 Ορισμός ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε στοιχείο δοκού στο SAP2000.

Το ίδιο κάνουμε και για τα υποστυλώματα (Εικόνες 7.6 και 7.7).



Εικόνα 7.6 Πλαστικές αρθρώσεις στο 5% και 95% του μήκους υποστυλώματος στο SAP2000.



Εικόνα 7.7 Ορισμός ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε στοιχείο υποστυλώματος στο SAP2000.

7.1.4 Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης της ανάλυσης Pushover

Σε καθεμιά από τις διευθύνσεις X, -X, Y και -Y της σεισμικής φόρτισης γίνεται καθορισμός συνδυασμών φόρτισης, οι οποίοι θεωρούν και το 30% συμμετοχής της άλλης διεύθυνσης. Έτσι, καταλήγουμε σε 16 συνδυασμούς φόρτισης, δηλαδή 8 για κάθε τύπο κατανομής φορτίων (ομοιόμορφης ή ιδιομορφικής κατανομής):

Ομοιόμορφη κατανομή

Κατά τη διεύθυνση X

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_X+0,3Y

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_X-0,3Y

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_-X+0,3Y

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_-X-0,3Y

Κατά τη διεύθυνση Y

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_Y+0,3X

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_Y-0,3X

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_-Y+0,3X

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ_-Y-0,3X

Ιδιομορφική κατανομή

Κατά τη διεύθυνση X

IDIOMORFIKH_X+0,3Y

IDIOMORFIKH_X-0,3Y

IDIOMORFIKH_-X+0,3Y

IDIOMORFIKH_-X-0,3Y

Κατά τη διεύθυνση Y

IDIOMORFIKH_Y+0,3X

IDIOMORFIKH_Y-0,3X

IDIOMORFIKH_-Y+0,3X

IDIOMORFIKH_-Y-0,3X

Ο τρόπος με τον οποίο επιβάλλονται οι συνδυασμοί φόρτισης είναι ο παρακάτω:

- Πρώτα, λαμβάνονται υπόψη οι εντάσεις και οι παραμορφώσεις από το συνδυασμό φόρτισης της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης D+G+0.3Q_NONLINEAR, ο οποίος αφορά τα μόνιμα και κινητά φορτία. Οι συνθήκες έναρξης της ανάλυσης είναι μηδενικές (αφόρτιστη κατάσταση φορέα). Το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης αποθηκεύεται από το SAP2000.
- Έπειτα, αφού ολοκληρωθεί ο συνδυασμός φόρτισης D+G+0.3Q_NONLINEAR, το SAP2000 εισάγει τους ανωτέρω 16 συνδυασμούς φόρτισης για την ανάλυση Pushover.

Ο συνδυασμός φόρτισης D+G+0.3Q_NONLINEAR υλοποιείται με την ακόλουθη

εντολή στο SAP2000 (Εικόνα 7.8):

Define → Load Cases → Add New Load Case → Load Case Type: Static → Analysis Type: Nonlinear

Με την ακόλουθη εντολή στο SAP2000 γίνεται η εισαγωγή της ομοιόμορφης ανάλυσης (Εικόνα 7.9):

Define → Load Cases → Add New Load Case → Load Case Type: Static → Analysis Type: Nonlinear → Initial Conditions: Continue From State at End of Nonlinear Case: «D+G+0.3Q_NONLINEAR».

Ακολουθεί η εισαγωγή και των άλλων 7 συνδυασμών φόρτισης της ομοιόμορφης κατανομής κατ' αντιστοιχία.

Η εισαγωγή της ιδιομορφικής κατανομής γίνεται αντίστοιχα με την ομοιόμορφη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10 για το συνδυασμό IDIOMORFIKH_X+0.3Y κατά τη διεύθυνση X. Ακολουθεί ομοίως η εισαγωγή και των άλλων 7 συνδυασμών της κατανομής αυτής.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: D+G+0.3Q_NONLINEAR [Set Def Name] [Modify/Show...]

Initial Conditions:
☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☐ Continue from State at End of Nonlinear Case [Dropdown]
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	DEAD	1,
Load Pattern	DEAD	1,
Load Pattern	G	1,
Load Pattern	LIVE	0,3

[Add] [Modify] [Delete]

Other Parameters:
Load Application: Full Load [Modify/Show...]
Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]
Analysis Type: ☐ Linear ☒ Nonlinear ☐ Nonlinear Staged Construction
Geometric Nonlinearity Parameters: ☒ None ☐ P-Delta ☐ P-Delta plus Large Displacements
Mass Source: MSSSRC2

[OK] [Cancel]

Εικόνα 7.8 Ορισμός συνδυασμού φόρτισης D+G+0.3Q_NONLINEAR για μόνιμα και κινητά φορτία στο SAP2000.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name
OMOIOMORFH_X+0,3Y Set Def Name Notes Modify/Show...

Initial Conditions
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case D+G+0,3Q_NONLINE
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case
All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale
Accel	UX	1
Accel	UY	0,3

Add Modify Delete

Other Parameters
 Load Application: Displ Control Modify/Show...
 Results Saved: Multiple States Modify/Show...
 Nonlinear Parameters: User Defined Modify/Show...

Load Case Type
Static Design...

Analysis Type
☐ Linear
☒ Nonlinear
☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters
☒ None
☐ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Mass Source
Previous

OK Cancel

Εικόνα 7.9 Ορισμός ομοιόμορφης κατανομής φόρτισης OMOIOMORFH_X+0.3Y κατά X στο SAP2000.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name
IDIOMORFIKH_X+0,3Y Set Def Name Notes Modify/Show...

Initial Conditions
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case D+G+0,3Q_NONLINE
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case
All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale
Mode	1	1
Mode	2	0,3

Add Modify Delete

Other Parameters
 Load Application: Displ Control Modify/Show...
 Results Saved: Multiple States Modify/Show...
 Nonlinear Parameters: User Defined Modify/Show...

Load Case Type
Static Design...

Analysis Type
☐ Linear
☒ Nonlinear
☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters
☒ None
☐ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Mass Source
Previous

OK Cancel

Εικόνα 7.10 Ορισμός ιδιομορφικής κατανομής φόρτισης IDIOMORFIKH_X+0.3Y κατά X στο SAP2000.

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις των επιμέρους παραμέτρων των διαφόρων συνδυασμών φόρτισης (Εικόνα 7.11 και 7.12), εφαρμόζεται η μέθοδος Displacement Control της ελεγχόμενης μετακίνησης (με κόμβο ελέγχου τον κόμβο 470, τον πιο κοντινό στο κέντρο βάρους της κορυφής και τιμή 15cm για την ελεγχόμενη μετακίνηση).

Καθοριστικός για τη διάρκεια της στατικής ανελαστικής ανάλυσης που υλοποιείται είναι ο μέγιστος αριθμός βημάτων ανά στάδιο (Maximum Total Steps per Stage).

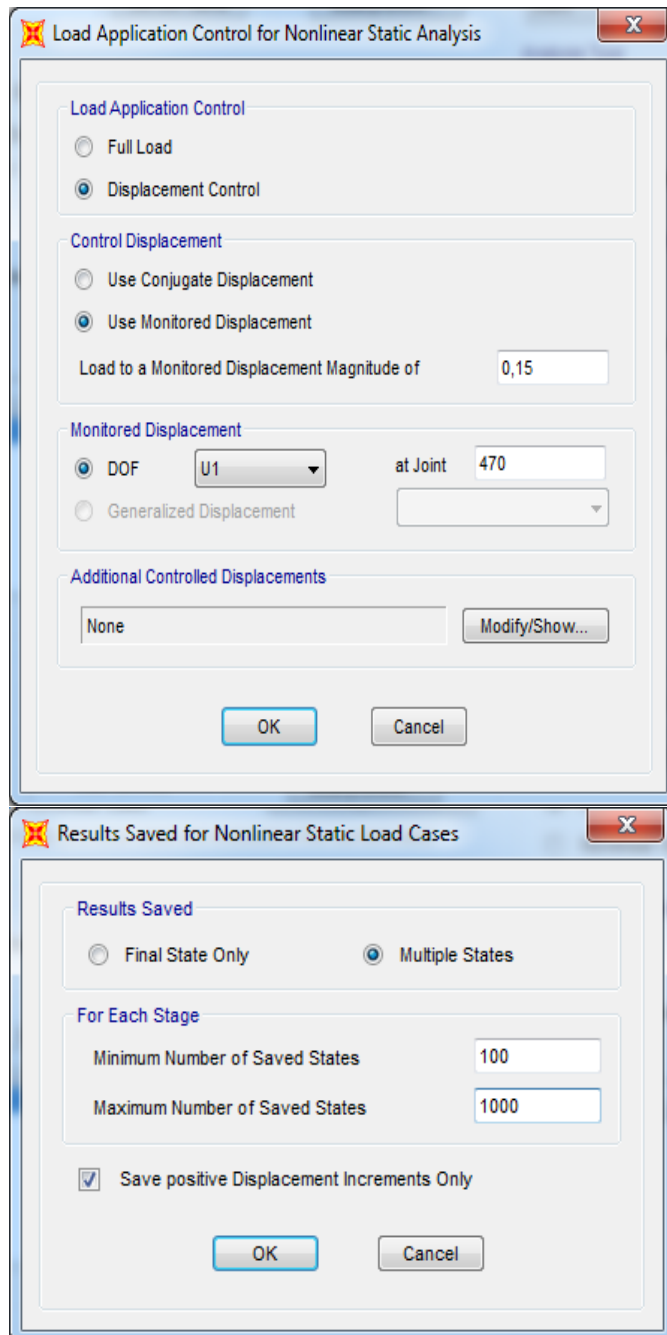
Solution Control	
Maximum Total Steps per Stage	1000
Maximum Null (Zero) Steps per Stage	300
Use Event-to-event Stepping	Yes
Event Lumping Tolerance (Relative)	0,01
Maximum Events per Step	40
Use Iteration	Yes
Maximum Constant-Stiff Iterations per Step	10
Maximum Newton-Raphson Iter. per Step	40
Iteration Convergence Tolerance (Relative)	1,000E-04
Use Line Search	Yes
Max Line Searches per Iteration	20
Line-search Acceptance Tol. (Relative)	0,1
Line-search Step Factor	1,618

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

Reset To Defaults

OK Cancel

Εικόνα 7.11 Καθορισμός μη γραμμικών παραμέτρων ανάλυσης Pushover στο SAP2000.



Εικόνα 7.12 Καθορισμός ελεγχόμενης μετακίνησης και πλήθους βημάτων ανάλυσης Pushover στο SAP2000.

7.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover για την κατασκευή

Παρακάτω θα παρατεθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης (Pushover) στην κατασκευή από το πρόγραμμα SAP2000.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης ανά διεύθυνση (X ή $-X$ και Y ή $-Y$) από τους προαναφερθέντες συνολικά 16 συνδυασμούς φόρτισης, 8 ομοιόμορφης και 8 ιδιομορφικής κατανομής. Αποτιμάται, τελικά, ο φορέας της κατασκευής σχετικά με την επάρκεια ή την απαίτηση ενίσχυσής του σε κάθε διεύθυνση για το δυσμενέστερο συνδυασμό. Πρόκειται για τους συνδυασμούς φόρτισης:

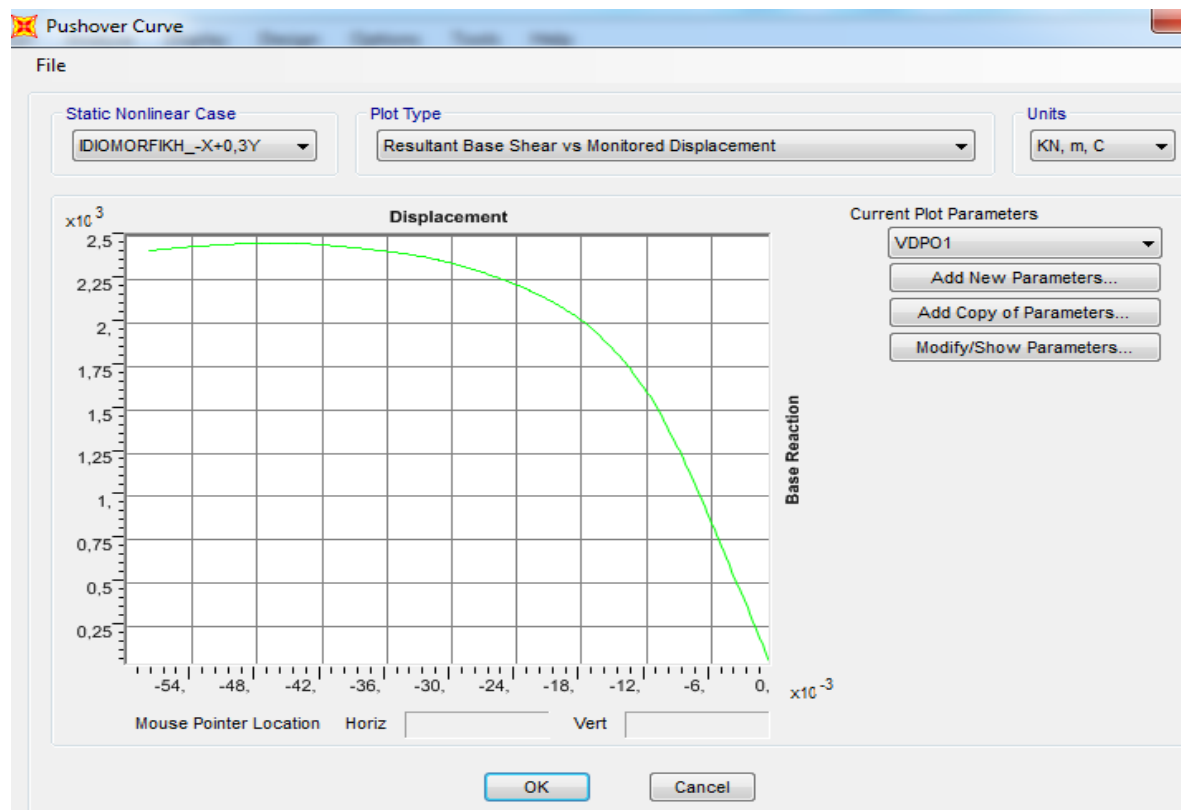
- **ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ** – Διεύθυνση $-X$ (Συνδυασμός: $-X + 0.3Y$)
- **ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ** – Διεύθυνση Y (Συνδυασμός: $Y - 0.3X$)

Το SAP2000 προβαίνει σε αυτόματο υπολογισμό για τη στοχευόμενη μετακίνηση (target displacement) του φορέα και μας παρέχει την καμπύλη ικανότητας του φορέα όπως επίσης και το διάγραμμα ADRS σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του ATC – 40.

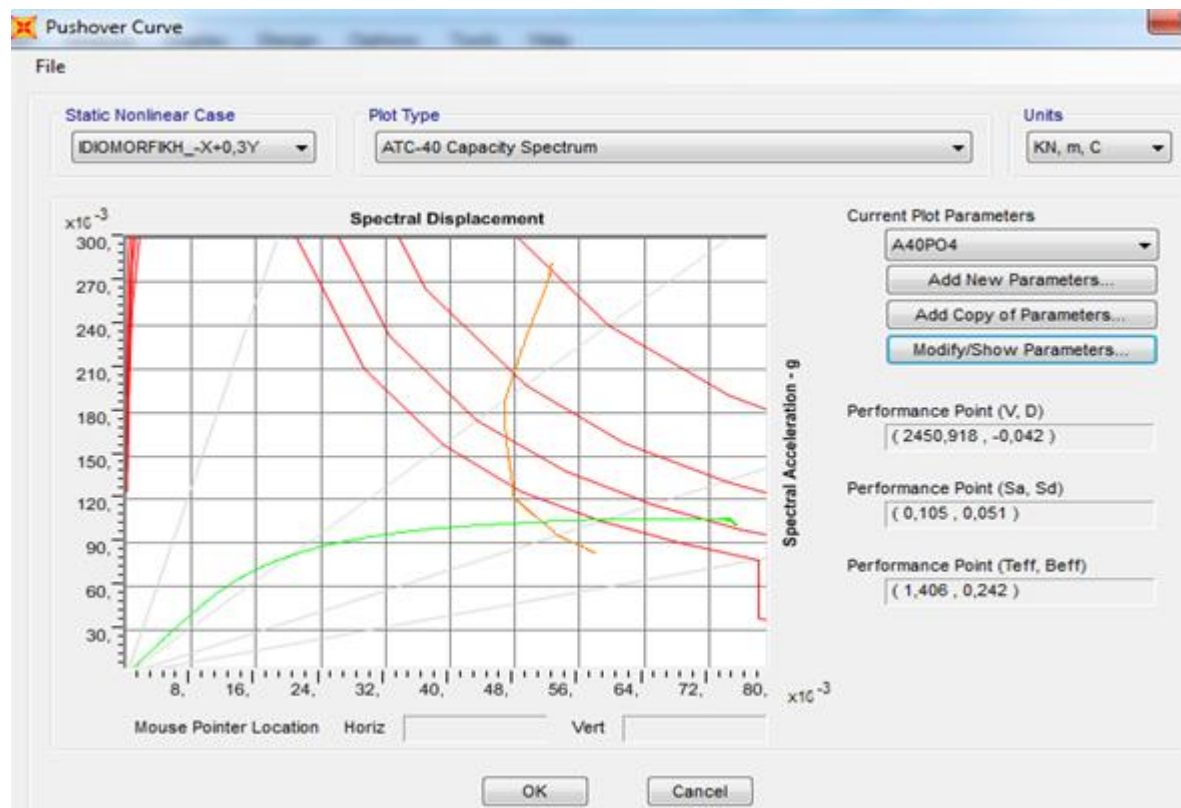
Για τους παραπάνω συνδυασμούς φόρτισης δίδονται οι καμπύλες ικανότητας $V - D$ (Resultant Base Shear vs Monitored Displacement) και τα φάσματα ικανότητας σε μορφή ADRS (ATC-40 Capacity Spectrum), όπου:

- Η πράσινη καμπύλη εκφράζει την καμπύλη ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.
- Η κίτρινη γραμμή αποδίδει την απαίτηση.
- Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού, όπως προκύπτει από τον Ευρωκώδικα 8, το οποίο είχε οριστεί προηγουμένως, όπως και μια σειρά από μειωμένες αποκρίσεις οι οποίες αναφέρονται σε αποσβέσεις.
- Το σημείο τομής της κίτρινης (απαίτησης) με την πράσινη γραμμή (ικανότητας) αποτελεί το αντίστοιχο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, σημείο επιτελεστικότητας (performance point) με τετμημένη τη στοχευόμενη μετακίνηση.

7.2.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – Διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X + 0.3Y)



Εικόνα 7.13 Καμπύλη ικανότητας φορέα στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X+0,3Y) στο SAP2000.



Εικόνα 7.14 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X+0,3Y) στο SAP2000.

Η υλοποίηση του συνδυασμού $-X+0,3Y$ κατά τη διεύθυνση $-X$ έγινε σε 341 βήματα ανάλυσης. Το σημείο επιτελεστικότητας (Performance Point) $(V,D) = (2450,918, -0,042)$ βρίσκεται μεταξύ των βημάτων 248 και 249, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1.

Step	Displacement	BaseForce
	m	KN
247	-0,041799	2448,253
248	-0,041991	2449,144
P.P.	-0,042	2450,918
249	-0,042173	2451,219
250	-0,042391	2452,214

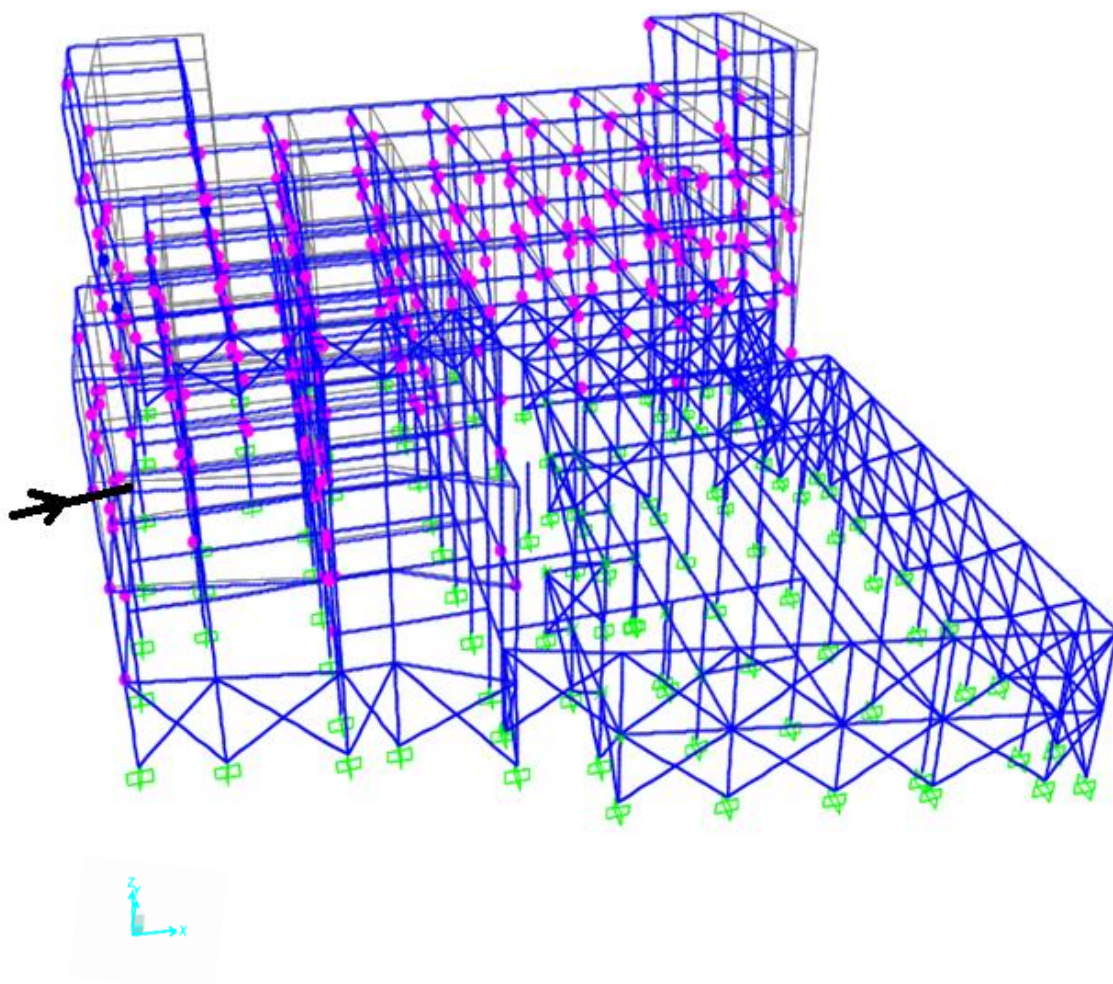
Πίνακας 7.1 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση $-X$ (Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).

Επίσης, στον Πίνακα 7.2 που ακολουθεί, επισημαίνεται το πλήθος και ο τύπος των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργούνται στο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).

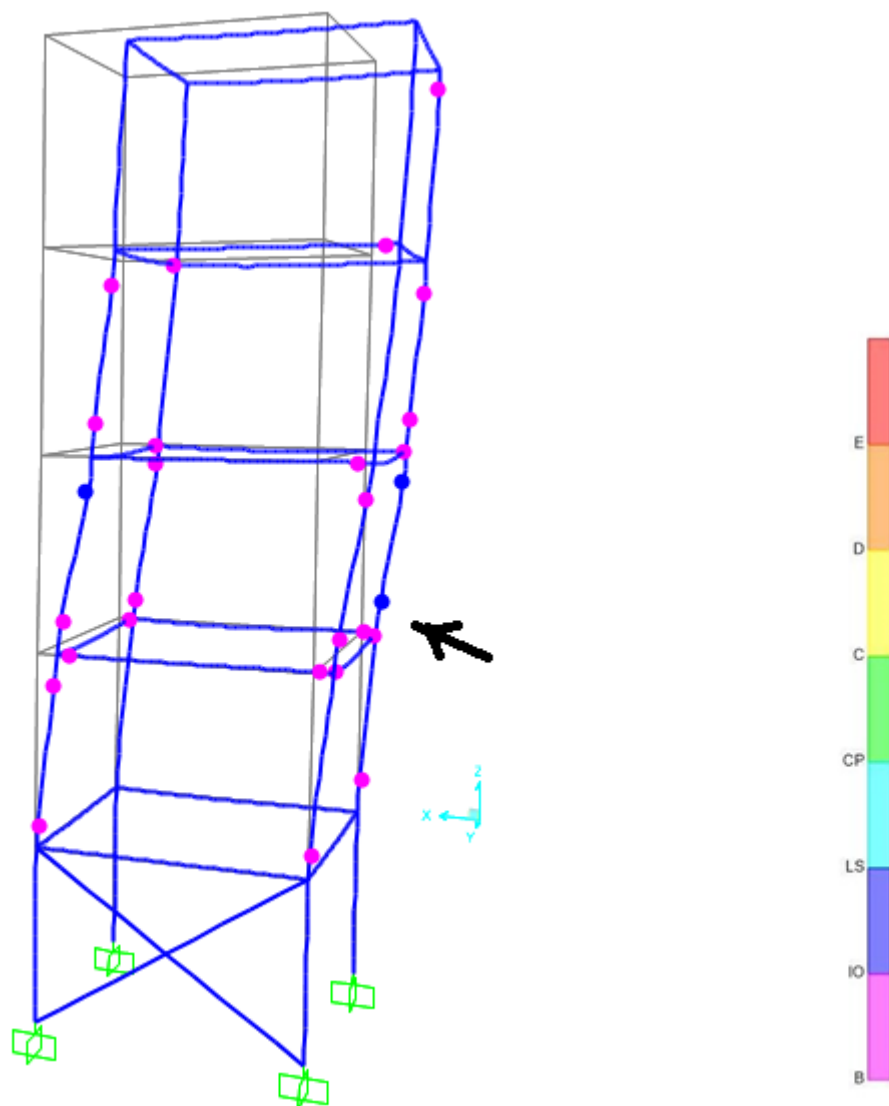
TABLE: Pushover Capacity Curve											
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LSstoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
	m	KN									
247	-0,041799	2448,253	1078	354	2	0	0	0	0	0	1434
248	-0,041991	2449,144	1077	355	2	0	0	0	0	0	1434
249	-0,042173	2451,219	1077	354	3	0	0	0	0	0	1434
250	-0,042391	2452,214	1076	354	4	0	0	0	0	0	1434
251	-0,042541	2453,728	1076	354	3	1	0	0	0	0	1434

Πίνακας 7.2 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).

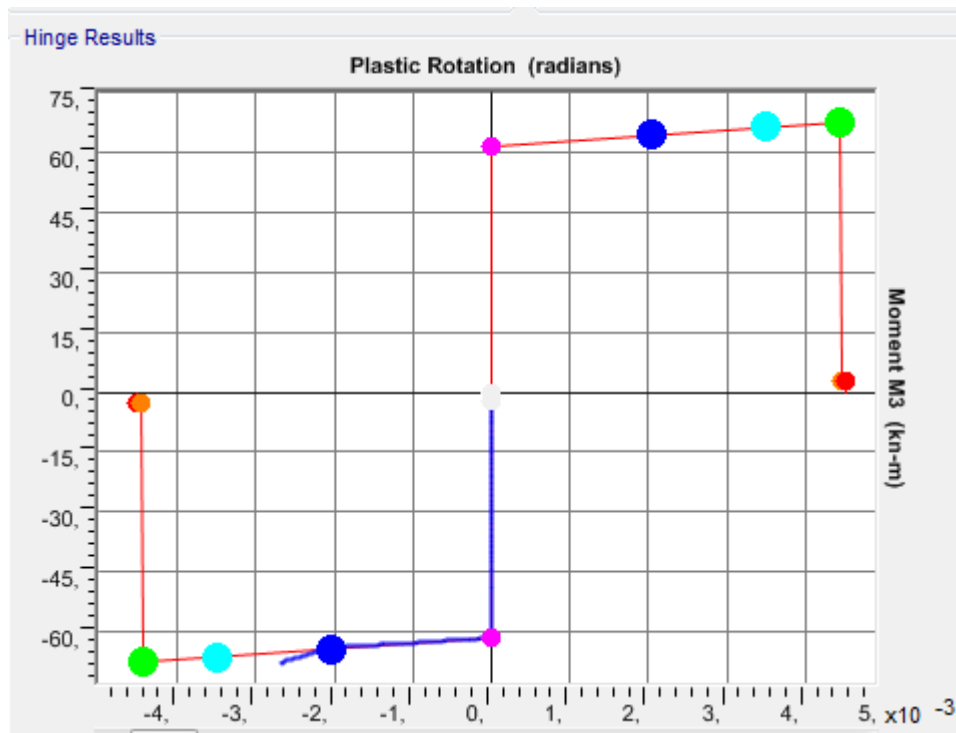
Επιπλέον, στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 7.15) φαίνονται οι θέσεις όπου δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).



Εικόνα 7.15 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).

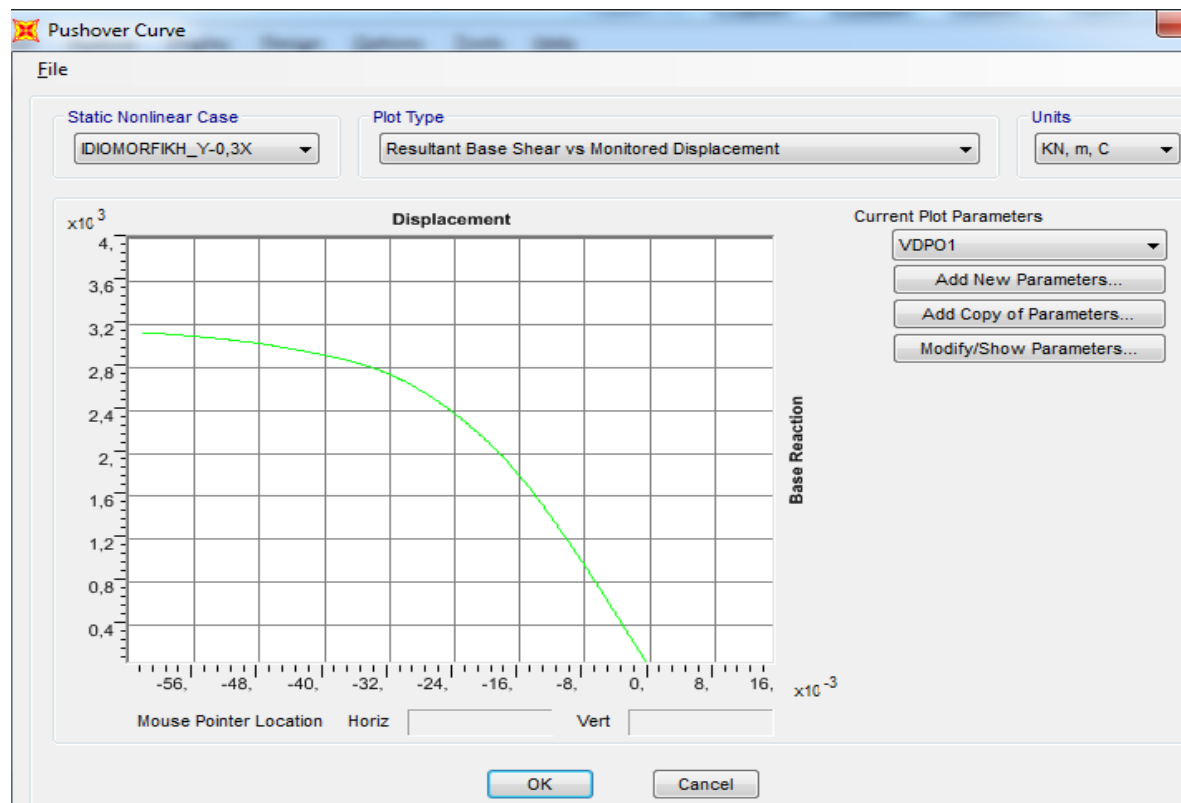


Εικόνα 7.16 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο υποδεικνυόμενο με βέλος φάνωμα (μπροστινή όψη κατά X) του φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).

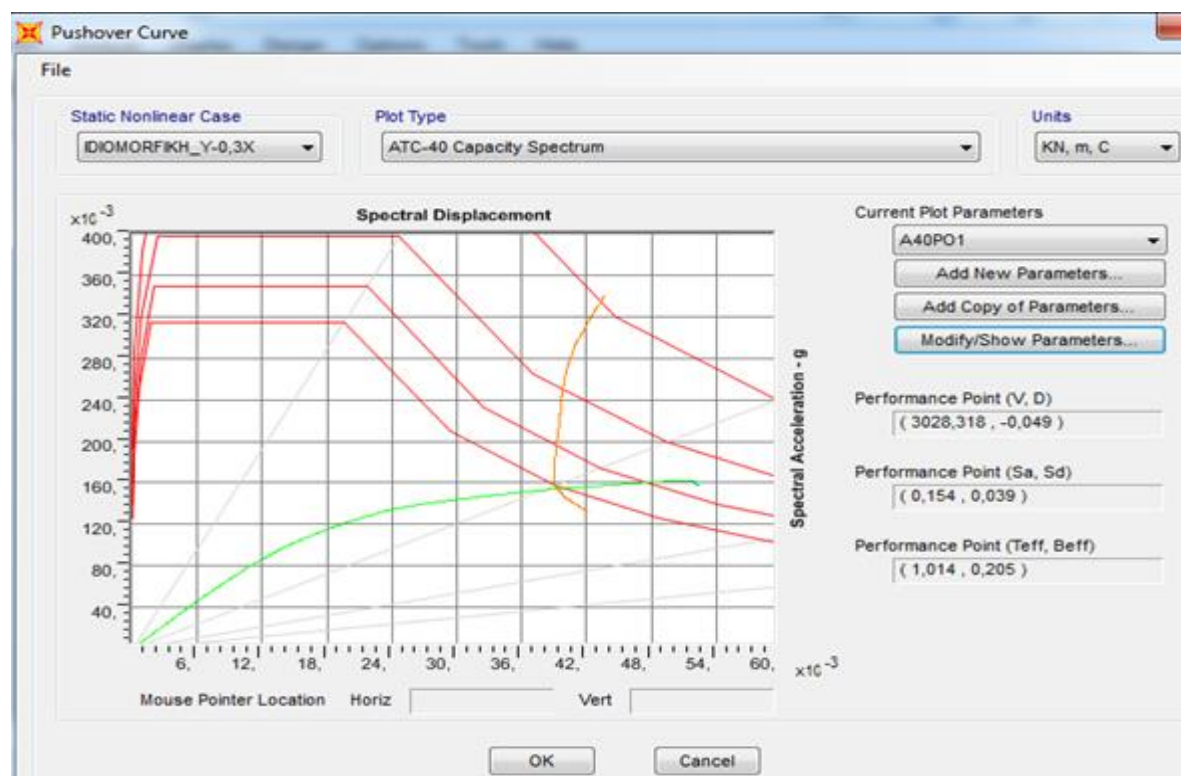


Εικόνα 7.17 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνύμενο με βέλος κόμβο υποστυλώματος της προηγούμενης εικόνας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y).

7.2.2 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – Διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y - 0.3X)



Εικόνα 7.18 Καμπύλη ικανότητας φορέα στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X) στο SAP2000.



Εικόνα 7.19 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X) στο SAP2000.

Η υλοποίηση του συνδυασμού Y-0,3X κατά τη διεύθυνση Y έγινε σε 368 βήματα ανάλυσης. Το σημείο επιτελεστικότητας (Performance Point) (V,D) = (3028,318 , -0,049) βρίσκεται μεταξύ των βημάτων 291 και 292, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.3.

Step	Displacement	BaseForce
	m	KN
290	-0,048408	3025,319
291	-0,04863	3027,609
P.P.	-0,049	3028,318
292	-0,049014	3030,558
293	-0,049107	3032,477

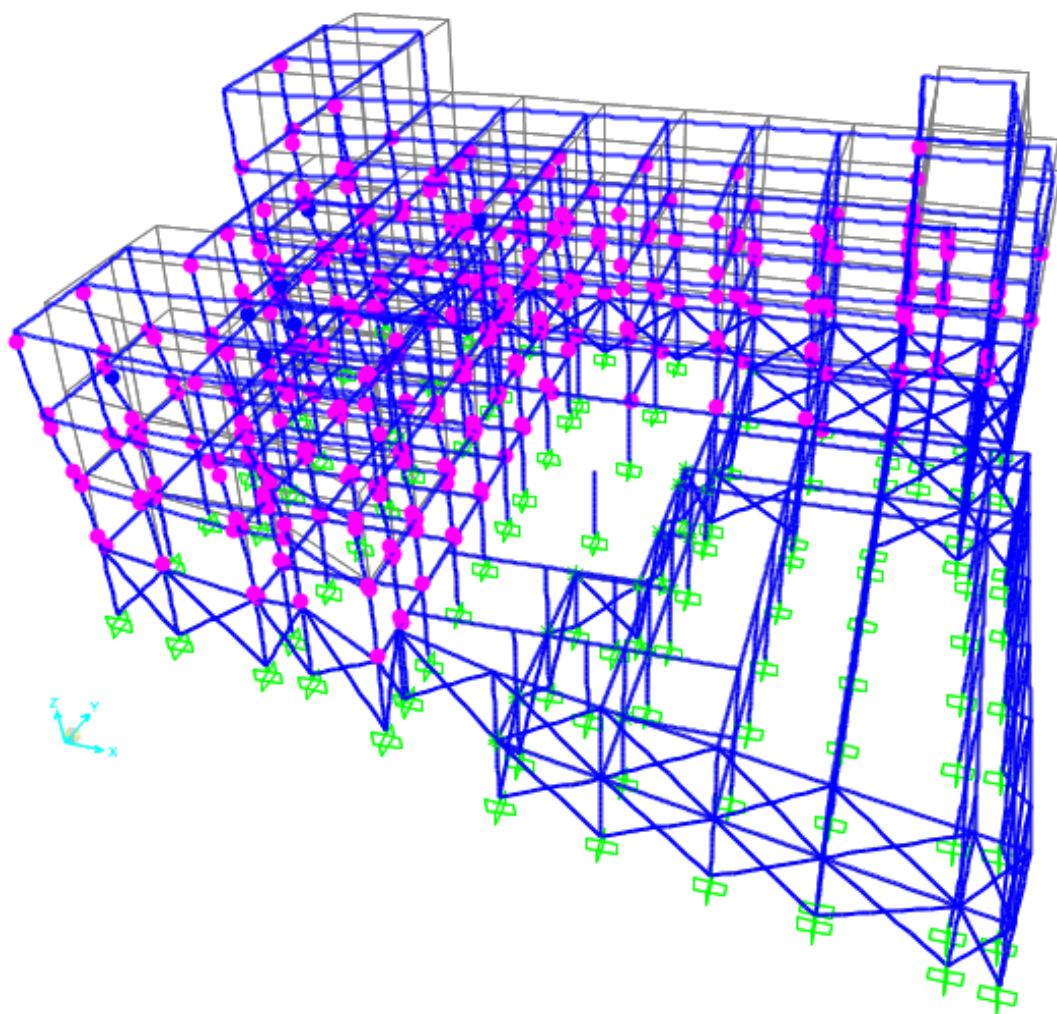
Πίνακας 7.3 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X).

Επίσης, στον Πίνακα 7.4 που ακολουθεί, επισημαίνεται το πλήθος και ο τύπος των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργούνται στο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).

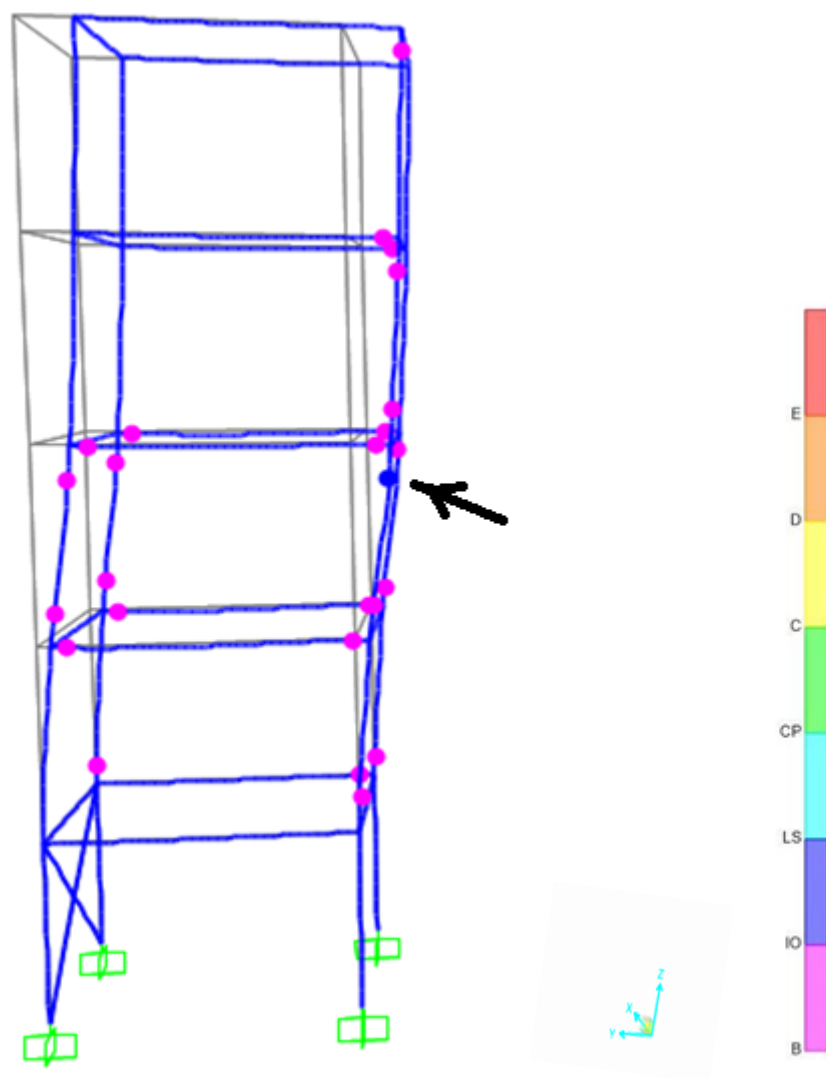
TABLE: Pushover Capacity Curve											
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LSstoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
	m	KN									
290	-0,048408	3025,319	1074	352	8	0	0	0	0	0	1434
291	-0,04863	3027,609	1073	353	8	0	0	0	0	0	1434
292	-0,049014	3030,558	1070	356	8	0	0	0	0	0	1434
293	-0,049107	3032,477	1070	355	9	0	0	0	0	0	1434
294	-0,049334	3034,538	1070	354	10	0	0	0	0	0	1434

Πίνακας 7.4 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).

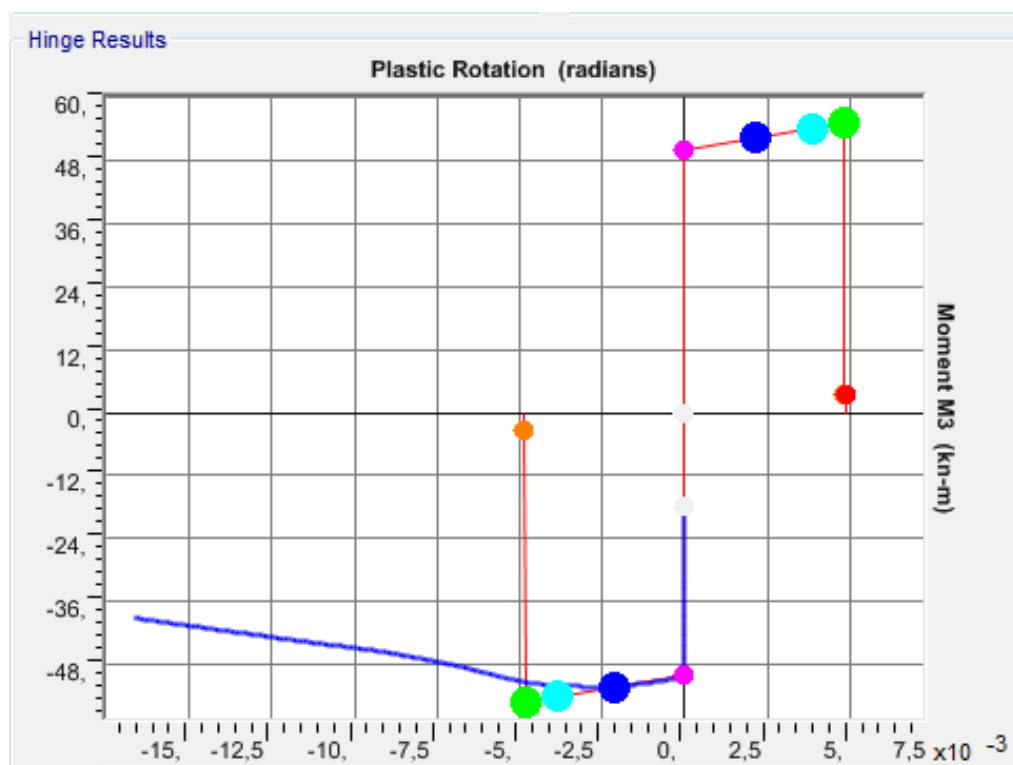
Επιπλέον, στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 7.20) φαίνονται οι θέσεις όπου δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).



Εικόνα 7.20 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).



Εικόνα 7.21 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο κάθετο φάνωμα με αυτό της Εικόνας 7.16 (μπροστινή όψη κατά Y) του φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).



Εικόνα 7.22 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνύμενο με βέλος κόμβο υποστυλώματος (σε διαφορετικό από το υποστύλωμα που είχε επισημανθεί στην Εικόνα 7.16) της προηγούμενης εικόνας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).

7.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανελαστικής ανάλυσης

Παρατηρούμε από την παρουσίαση των ανωτέρω αποτελεσμάτων της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης (Pushover) για τον υφιστάμενο φορέα της κατασκευής, όπως αυτή υλοποιήθηκε από το πρόγραμμα SAP2000 ότι οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης για κάθε διεύθυνση αφορούν ιδιομορφικό και όχι ομοιόμορφο τρόπο επιβολής φορτίων.

Επίσης, από τους παραπάνω πίνακες (Πίνακες 7.2 και 7.4) προσδιορίζεται το πλήθος των κόμβων των δομικών στοιχείων της κατασκευής που έχουν πλαστικοποιηθεί στο σημείο επιτελεστικότητας για διαφορετικούς μάλιστα συνδυασμούς φόρτισης. Είναι εμφανές ότι το ποσοστό συμμετοχής των υποστυλωμάτων στο πλήθος των μελών με πλαστικές αρθρώσεις στο σημείο επιτελεστικότητας είναι αυξημένο. Αυτό αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα για τη σεισμική επάρκεια του φορέα της υφιστάμενης κατασκευής.

Επιπλέον, στις Εικόνες 7.16 και 7.21 παρουσιάζονται εμφανείς μηχανισμοί σημαντικής πλαστικοποίησης υποστυλωμάτων λόγω σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα τους. Η βάση και η κορυφή τους σε πολλές περιπτώσεις, άλλωστε, έχουν ξεπεράσει τη στάθμη «Προστασία Ζωής», έχοντας πλαστικοποιηθεί ακόμα περισσότερο. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι το σημείο επιτελεστικότητας και για τους δύο δυσμενέστερους συνδυασμούς φόρτισης βρίσκεται στον οριζόντιο κλάδο της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής.

Συγκρίνοντας και για τις δύο διευθύνσεις τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το βήμα (step) ανάλυσης όπου εμφανίζεται η πρώτη πλαστική άρθρωση για τη στάθμη επιτελεστικότητας Life Safety, με τη μετακίνηση του στο σημείο επιτελεστικότητας (στοχευόμενη μετακίνηση), συμπεραίνουμε ότι είναι μικρότερη, άρα δεν ικανοποιείται η απαίτηση για στάθμη επιτελεστικότητας Life Safety.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του φορέα είναι τέτοια που ο τελευταίος απαιτεί ενίσχυση για τη στάθμη επιτελεστικότητας «Προστασία Ζωής» (Life Safety).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

8.1 Μέθοδοι για την ενίσχυση κατασκευών και κριτήρια επιλογής τους

Παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή δύο προτάσεις τρόπων για την ενίσχυση κατασκευών:

- Ενίσχυση υφιστάμενων δομικών στοιχείων του φορέα της κατασκευής με τρεις εναλλακτικές επιλογές, τις εξής:

Με κατασκευή εμφανιζόμενων τοιχωμάτων σε περίπτωση που η επιλογή αυτή μπορεί να υλοποιηθεί από πρακτική και αρχιτεκτονική άποψη, όπως στην περίπτωση κατά την οποία έχουμε δύο κοντινά υποστυλώματα.

Με ενίσχυση υποστυλωμάτων τα οποία έχουν επιλεγεί κατάλληλα και μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας σύνθετα υλικά (FRP) ή με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Στη δεύτερη περίπτωση, εάν το πάχος ενίσχυσης είναι μικρότερο των 7cm είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (gunite). Διαφορετικά, καταφεύγουμε σε έγχυτο σκυρόδεμα με κριτήριο το κόστος.

Με ενίσχυση υποστυλώματος και προσθήκη πτερυγίου με μορφή τοιχώματος.

- Προσθήκη νέων δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων ή δοκών) ή μεταλλικών, κατασκευάζοντας παράλληλα στις εξωτερικές πλευρές του δομήματος σιδηρά δικτυώματα. Επισημαίνεται ότι η ενδεχόμενη χρήση χιαστί μεταλλικών συνδέσμων δυσκαμψίας κατάλληλης διατομής θα πρέπει να γίνεται σε επιλεγμένες συμμετρικές θέσεις.

Η κατασκευή νέων πεδίων ή η ενίσχυση αυτών της κατασκευής είναι επιβεβλημένη ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα επιλεγεί για την ενίσχυση του υφιστάμενου φορέα.

Τα κριτήρια βάσει των οποίων θα επιλεγεί τελικά η κατάλληλη μέθοδος για την ενίσχυση του φορέα της υφιστάμενης κατασκευής ορίζονται από τους εξής παράγοντες:

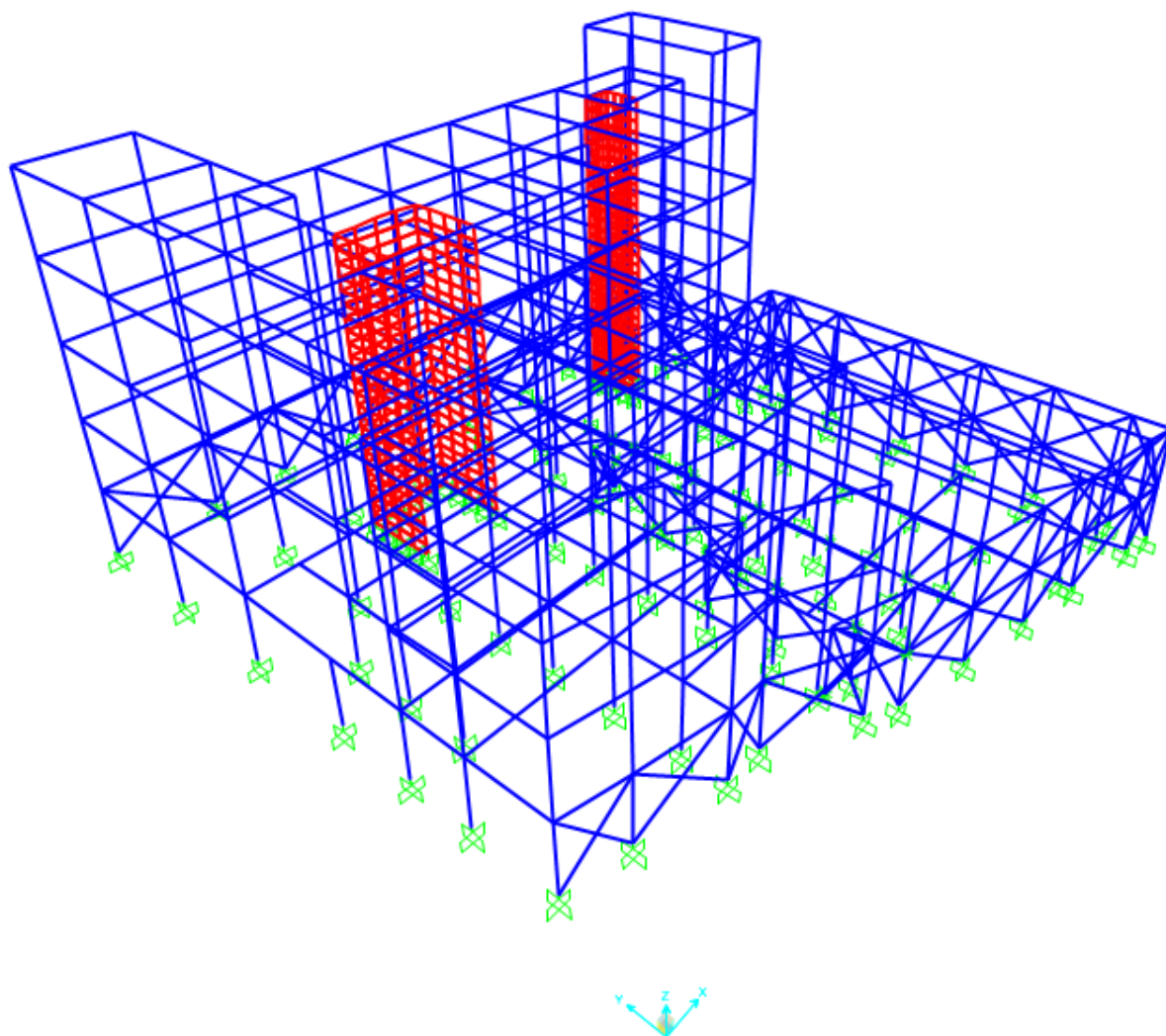
- Η χρήση της υφιστάμενης κατασκευής προσδιορίζει την επιδιωκόμενη αντοχή του φορέα, για να εξασφαλίζεται ότι το κτίριο θα ικανοποιεί την απαίτηση ασφάλειας.
- Το κόστος της μεθόδου ενίσχυσης της κατασκευής σε συνδυασμό με το κόστος που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη την αναστολή χρήσης της. Σε ένα κτίριο με χρήση ως κατοικία όπως αυτό της παρούσας εργασίας, το κόστος αναφέρεται επιπρόσθετα και στην ενόχληση των ενοίκων τόσο από το είδος των εργασιών ενίσχυσης όσο και από τη χρονική τους διάρκεια ή την έκτασή τους σε κάτοψη και καθ' ύψος του κτιρίου.
- Ενδεχόμενες συνέπειες όσον αφορά την αρχιτεκτονική.

8.2 Πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα κατά την ενίσχυση της κατασκευής

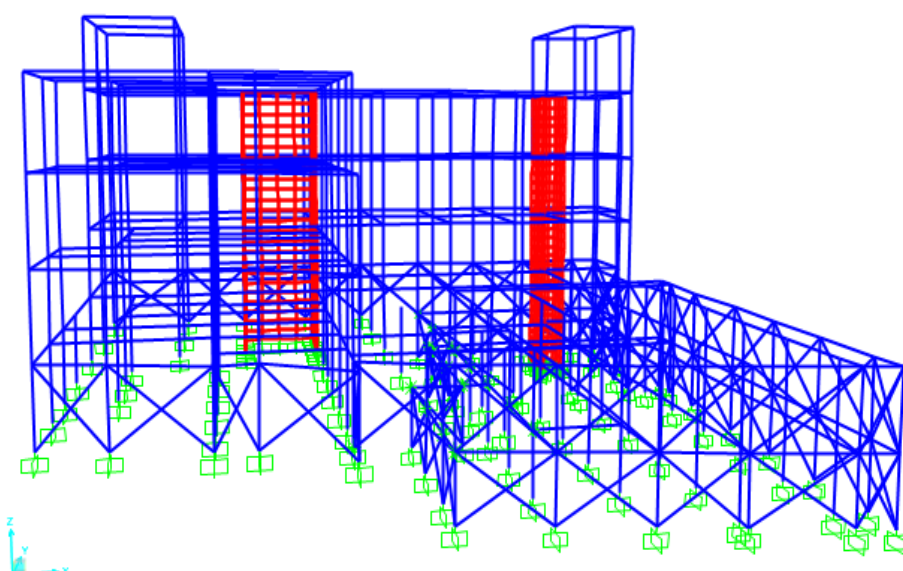
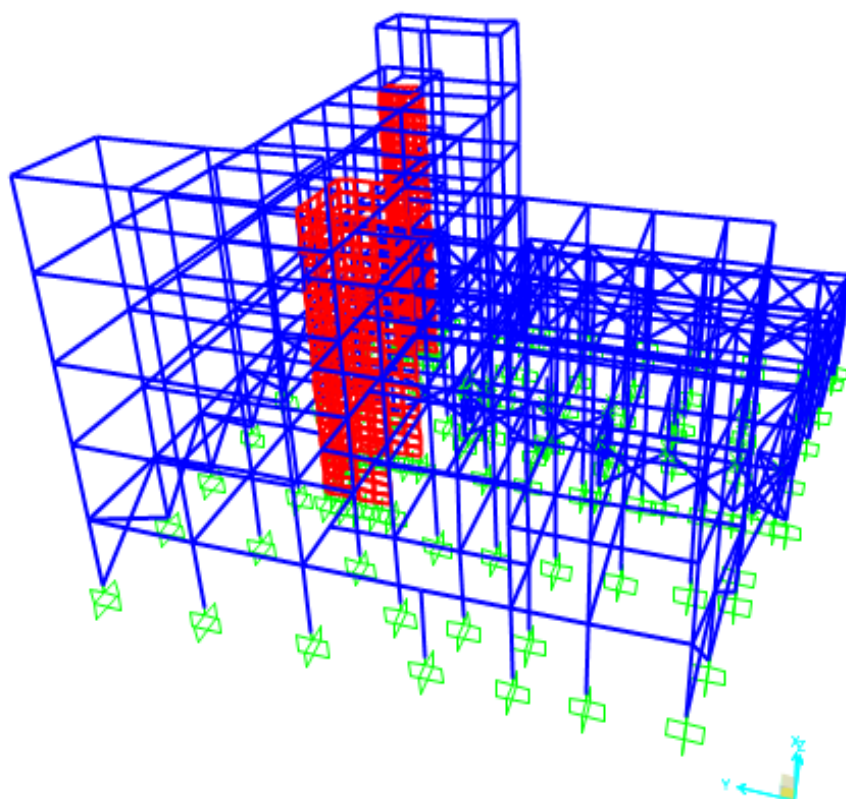
Η κατασκευή που μελετάται, στο στάδιο της ενίσχυσής της θα περιλαμβάνει πλέον δύο πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα (στο αριστερό και δεξί τμήμα της ενισχυμένης πλέον κατασκευής βάσει του χωρικού προσομοιώματός της, όπως φαίνεται στις Εικόνες 8.1 και 8.2), ο καθένας εκ των οποίων θα αποτελείται από τρία τοιχώματα (πάχους 0,20m για τις δύο παράλληλες πλευρές του πυρήνα αριστερά και 0,15m για την κάθετη σε αυτές πλευρά – πάχους 0,20m για τη μεγαλύτερη σε μήκος, εκ των τριών, πλευρά του πυρήνα δεξιά και 0,15m για τις άλλες δύο).

Η επιλογή αυτή της ενίσχυσης με δύο πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα επιτυγχάνει συγχρόνως την ικανοποίηση δύο στόχων: αφενός την εξασφάλιση της επιδιωκόμενης στατικής και σεισμικής επάρκειας του φορέα της κατασκευής και αφετέρου τη δυνατότητα τοποθέτησης ανελκυστήρων στις επιλεγμένες θέσεις, επιλύοντας ένα πρακτικό πρόβλημα και λαμβάνοντας υπόψη ενδεχόμενους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς.

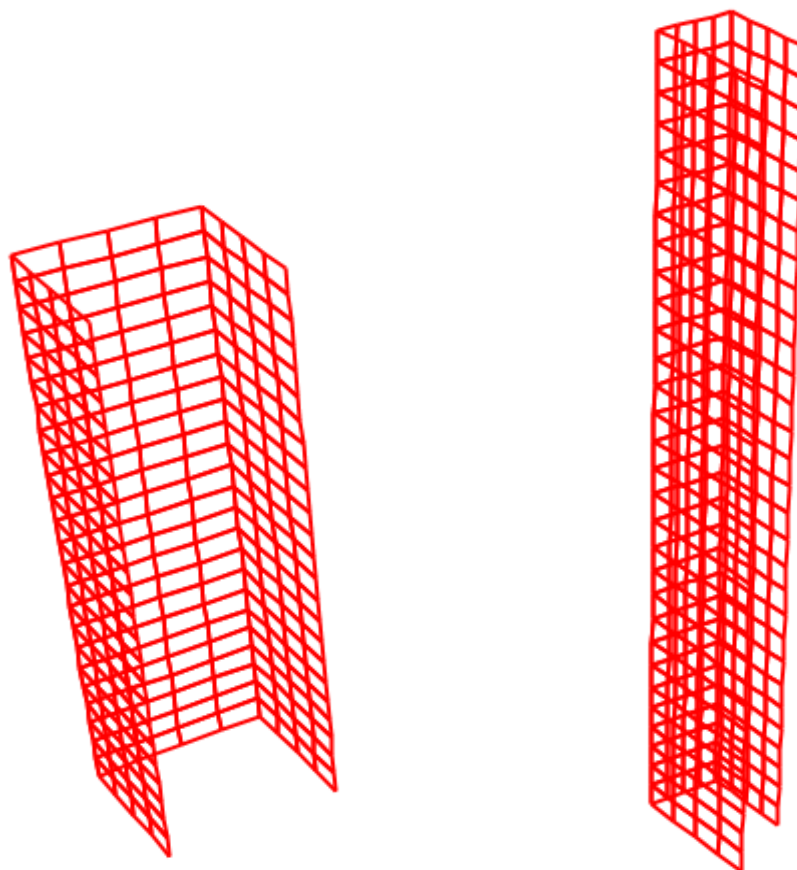
Δύο είναι οι πιο διαδεδομένοι τρόποι προσομοίωσης τοιχωμάτων: με χρήση γραμμικών στοιχείων ή με χρήση επιφανειακών στοιχείων (Εικόνα 8.3), δίνοντας τα κατάλληλα κάθε φορά πάχη. Στην υπό μελέτη κατασκευή επιλέχθηκαν τα γραμμικά στοιχεία.



Εικόνα 8.1 Χωρικό προσομοίωμα ενισχυμένης κατασκευής στο SAP2000.



Εικόνα 8.2 Χωρικό προσομοίωμα ενισχυμένης κατασκευής υπό διαφορετικές γωνίες στο SAP2000.



Εικόνα 8.3 Προσομοίωση των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέματος 4 επιπέδων (αριστερά) και 5 επιπέδων (δεξιά) με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στο SAP2000.

8.2.1 Δυνατότητα προσομοίωσης με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τοιχώματος

Ο λόγος που δεν προτιμάται η συγκεκριμένη μέθοδος στο φορέα της υπό μελέτη κατασκευής είναι το αυξημένο υπολογιστικό κόστος λόγω του μεγάλου πλήθους επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων που εισάγονται στο πρόγραμμα, όπως και της δυσκολίας που για αυτό το λόγο προκαλούν στην «ανάγνωση» των πληροφοριών του προσομοιώματος π.χ. σε μια τομή.

Κατά τη μέθοδο προσομοίωσης του τοιχώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, επιλέγονται τα τρία επιφανειακά στοιχεία που αναπαριστούν τα τοιχώματα των δύο πυρήνων αντίστοιχα και διακριτοποιούνται σε πιο μικρά, ούτως ώστε να αποδίδεται ορθότερα ο τρόπος συμπεριφοράς κάθε τοιχώματος. Η εντολή που χρησιμοποιείται στο SAP2000 είναι η εξής:

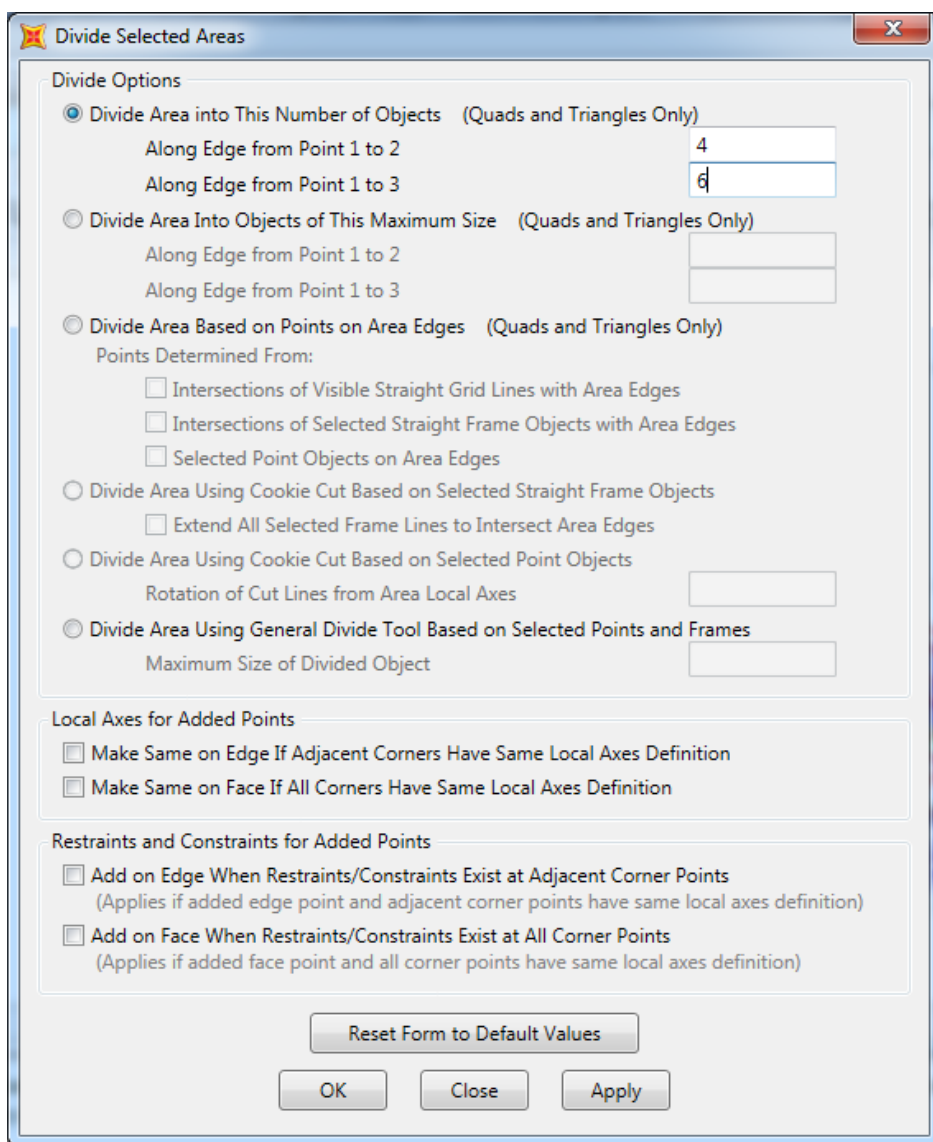
Edit → Edit Areas → Divide Areas,

με επιλογή διάσπασης σε 4 στοιχεία οριζοντίως και σε 6 κατακορύφως (Εικόνα 8.4).

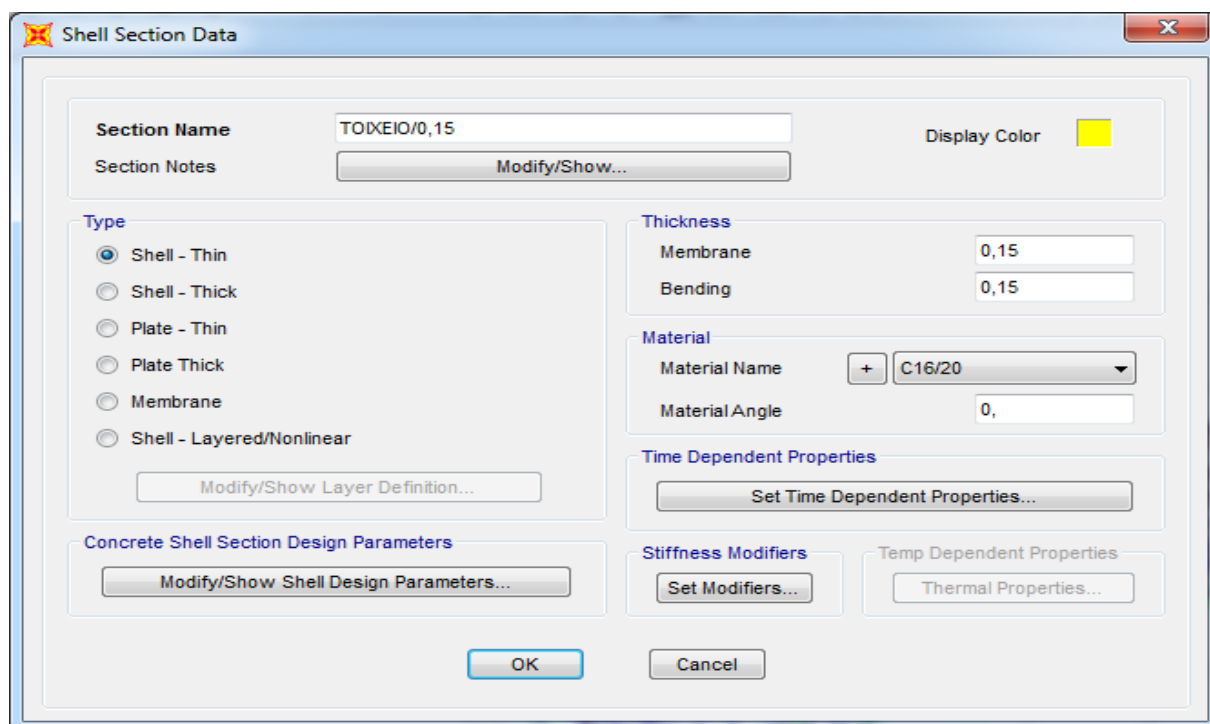
Στη συνέχεια, ανατίθεται η κατάλληλη διατομή στα επιφανειακά στοιχεία του τοιχώματος με την εντολή:

Define → Section Properties → Area Sections → Add New Section,

όπου προστίθενται οι νέες διατομές TOIXEIO/0,15 και TOIXEIO/0,20 τύπου Shell (κελύφους), όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.5. Σε καθεμία από αυτές, τίθενται το είδος Shell-Thin, τιμές πάχους (Thickness) 0,15 και 0,20m αντίστοιχα (και στα δύο πεδία Membrane και Bending της καρτέλας Shell Section Data) και υλικού (Material) C16/20.



Εικόνα 8.4 Διαδικασία διακριτοποίησης επιφανειακού στοιχείου που αναπαριστά τοίχωμα σε 4 στοιχεία οριζοντίως και σε 6 στοιχεία κατακορύφως στο SAP2000.



Εικόνα 8.5 Ιδιότητες διατομής TOIXEIO/0,15 πάχους 0,15m επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων αναπαράστασης τοιχώματος στο SAP2000.

Με το πέρας της εισαγωγής των ιδιοτήτων των διατομών των επιφανειακών στοιχείων τοιχώματος στο SAP2000, γίνεται επιλογή των αντίστοιχων επιφανειακών στοιχείων και τους ανατίθεται η κατάλληλη διατομή με την εντολή που ακολουθεί:

Assign → Area → Sections

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία νέας διατομής στοιχείου σύνδεσης (CONNECTION) για την εισαγωγή συνδετικών στοιχείων τοιχώματος - δοκών, η οποία αφορά στοιχείο γραμμικό, είναι τύπου General και έχει υψηλές τιμές δυσκαμψίας και δυστρεψίας και μηδενικές τιμές δυσμησίας και δυστένειας, όπως φαίνεται επιλέγοντας τις ιδιότητές της (Section Properties) (Εικόνα 8.6).

Τα βοηθητικά συνδετικά στοιχεία CONNECTION χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση τοιχωμάτων με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, διότι συνιστούν αποτελεσματικό τρόπο προσομοίωσης της σύνδεσης τοιχώματος με τις γειτονικές σε αυτό δοκούς, οπότε επιτυγχάνεται μονολιθικότητα. Κάθε συνδετικό στοιχείο CONNECTION καλύπτει μία διάσταση ενός μόνο επιφανειακού στοιχείου τοιχώματος, δηλαδή η σχεδιάσή τους γίνεται από κόμβο σε κόμβο (Εικόνα 8.7).

Property Data

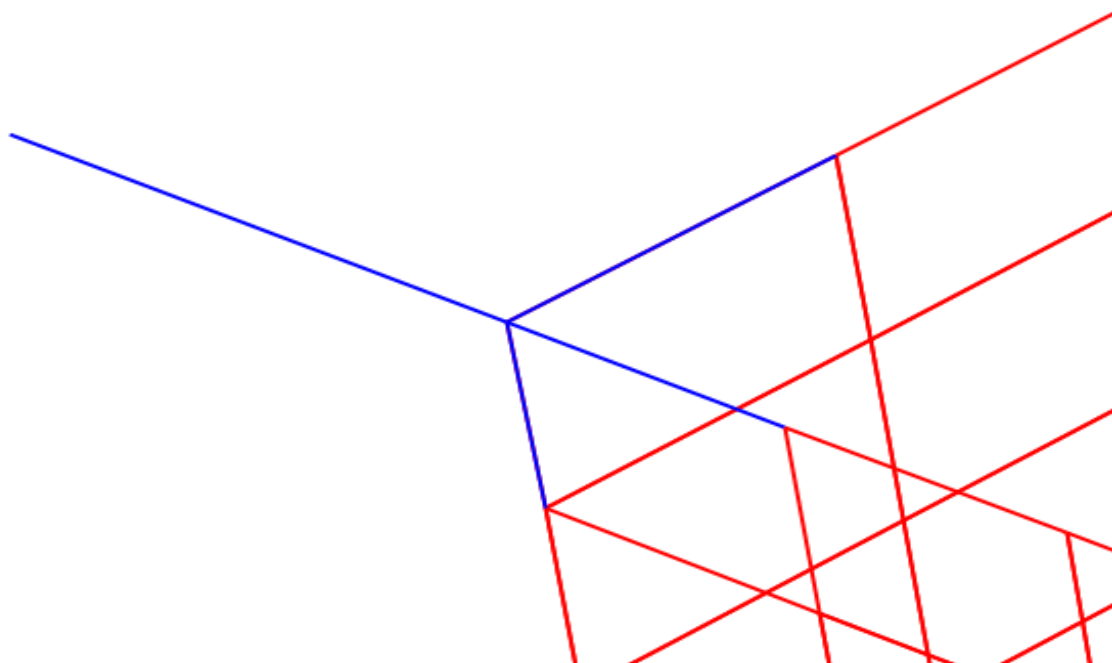
Section Name: CONNECTION

Properties

Cross-section (axial) area	0.	Section modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	100.	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	100.	Plastic modulus about 3 axis	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Torsional constant	100.	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

OK Cancel

Εικόνα 8.6 Ιδιότητες συνδετικού στοιχείου CONNECTION των επιφανειακών στοιχείων τοιχωμάτων με τις γειτονικές σε αυτά δοκούς στο SAP2000.

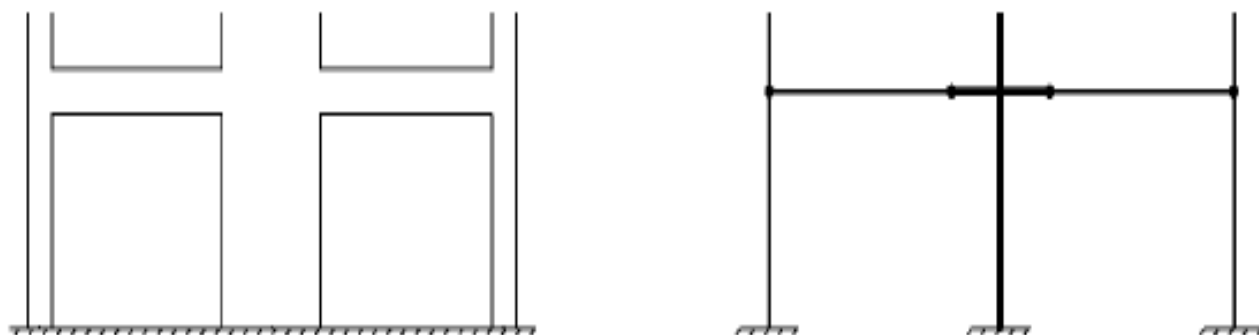


Εικόνα 8.7 Μονολιθική σύνδεση δοκού με γραμμικά στοιχεία CONNECTION επί των πλευρών επιφανειακών στοιχείων τοιχωμάτων (κόμβος σύνδεσης δοκού - τοιχωμάτων) στο SAP2000.

8.2.2 Ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέματος

Κατά την προσομοίωση ενός τοιχώματος με γραμμικά στοιχεία (ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση) όπως στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούμε έναν ισοδύναμο στύλο (δηλαδή ένα κατακόρυφο γραμμικό στοιχείο) στο μέσο του τοιχώματος και στερεούς βραχίονες (δηλαδή βοηθητικά οριζόντια γραμμικά στοιχεία με πλασματικά υψηλές τιμές χαρακτηριστικών γεωμετρίας, ώστε να έχουν σημαντική δυσκαμψία, δυσστησία και δυστένεια ως προς γειτονικά στοιχεία) στις στάθμες των ορόφων. Οι τελευταίοι έχουν μήκος από τον κόμβο του ισοδύναμου στύλου μέχρι τις παρειές του τοιχώματος σε κάθε όροφο του φορέα της κατασκευής. Η Εικόνα 8.8 δείχνει την ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση τοιχώματος για έναν όροφο.

Οι ιδιότητες της διατομής του ισοδύναμου στύλου είναι ίδιες με αυτές της διατομής του τοιχώματος που προσομοιώνει. Συνήθως για τη διατομή του κατακόρυφου αυτού στοιχείου (για απλά τοιχώματα με σταθερό πάχος) χρησιμοποιείται ορθογωνική με διαστάσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε αυτές του τοιχώματος που προσομοιώνεται. Τέλος, με τις αυξημένες τιμές που, όπως αναφέρθηκε, ανατίθενται στις ιδιότητες της διατομής των στερεών βραχιόνων για συνήθη επίπεδα τοιχώματα (για παράδειγμα 1000 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των υπολοίπων στοιχείων), επιτυγχάνεται αποτελεσματικά η προσομοίωση του τρόπου συμπεριφοράς του κορμού του τοιχώματος σε όλο του το μήκος και η σύνδεσή του με τα υπόλοιπα γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία του φορέα της υπό μελέτη κατασκευής.

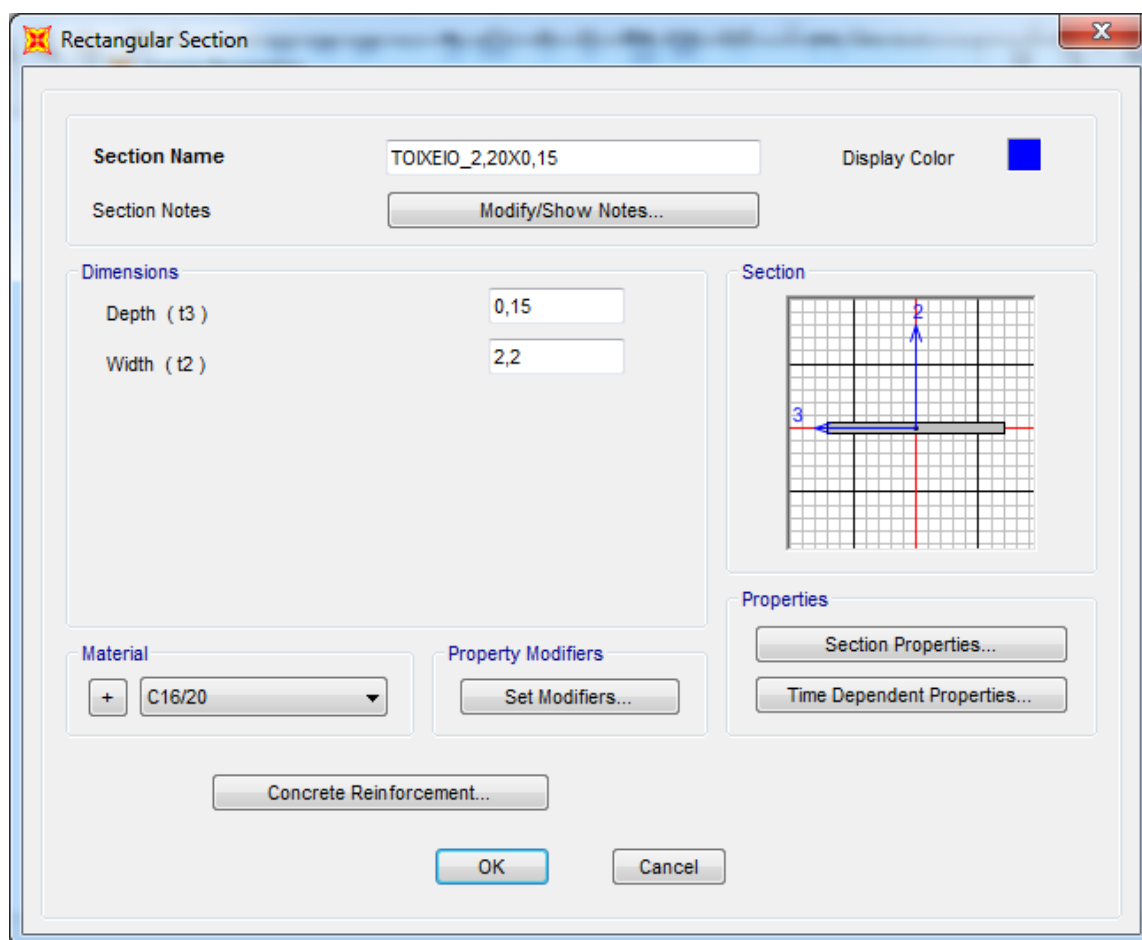


Εικόνα 8.8 Ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση τοιχώματος (αριστερά) για έναν όροφο με χρήση ενός ισοδύναμου στύλου και δύο οριζόντιων βοηθητικών στερεών βραχιόνων για κάθε όροφο (δεξιά).

Αρχικά, ορίζουμε μια διατομή ορθογωνική με διαστάσεις κατάλληλες και ιδιότητες οπλισμένου σκυροδέματος, για να προσομοιωθεί ο κορμός του τοιχώματος, κατ' αντιστοιχία με όσα αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4, σύμφωνα με την εντολή (Εικόνα 8.9):

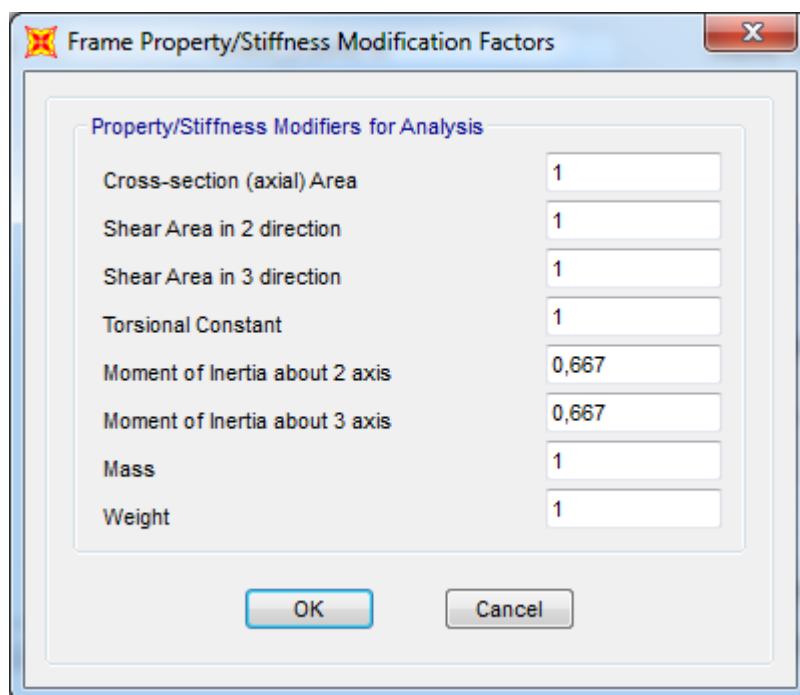
Define → Section Properties → Frame Sections

Εισάγονται, επίσης, μειωτικοί συντελεστές δυσκαμψίας για τον κορμό του τοιχώματος, όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 8.10.

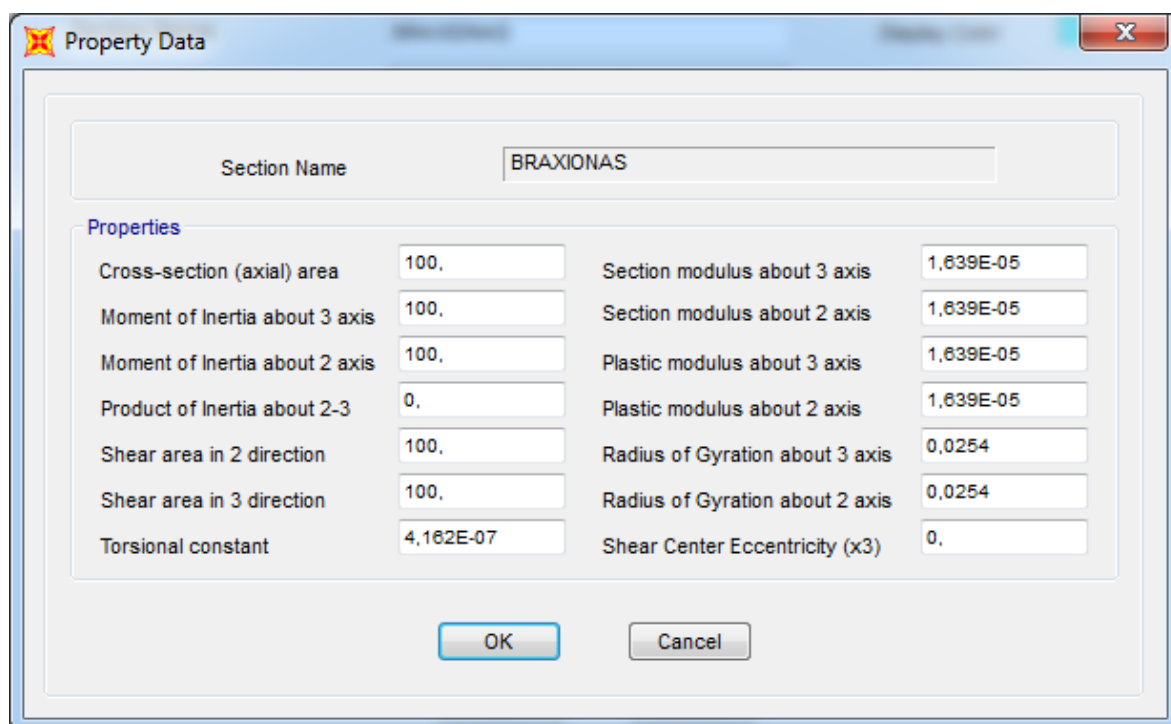


Εικόνα 8.9 Ορισμός ιδιοτήτων (γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικού) διατομής ισοδύναμου στύλου - κορμού τοιχώματος στο SAP2000.

Τέλος, στην Εικόνα 8.11 παρουσιάζονται οι ιδιότητες της διατομής τύπου General, η οποία αναπαριστά το στερεό βραχίονα σε κάθε άκρο του ισοδύναμου στύλου.

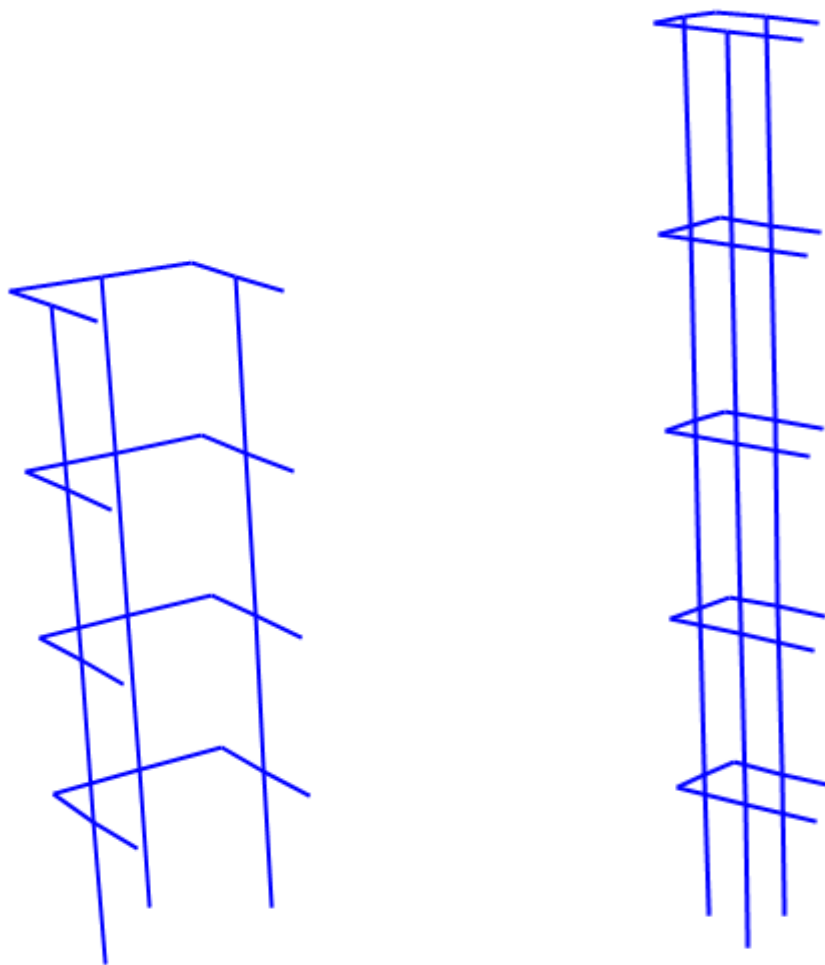


Εικόνα 8.10 Μειωτικοί συντελεστές δυσκαμψίας κορμού τοιχώματος στο SAP2000.

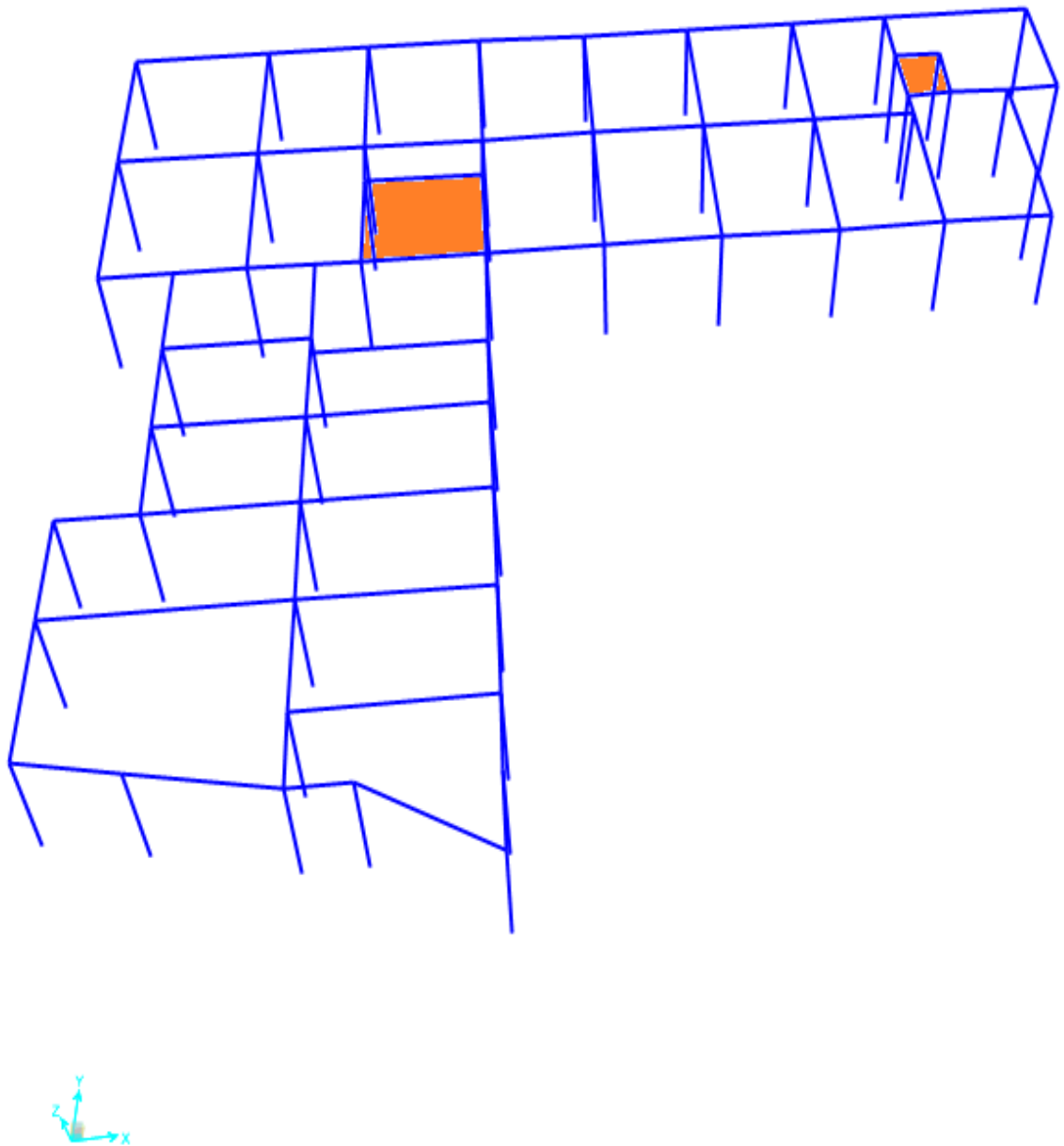


Εικόνα 8.11 Ορισμός ιδιοτήτων διατομής στερεού βραχίονα στο SAP2000.

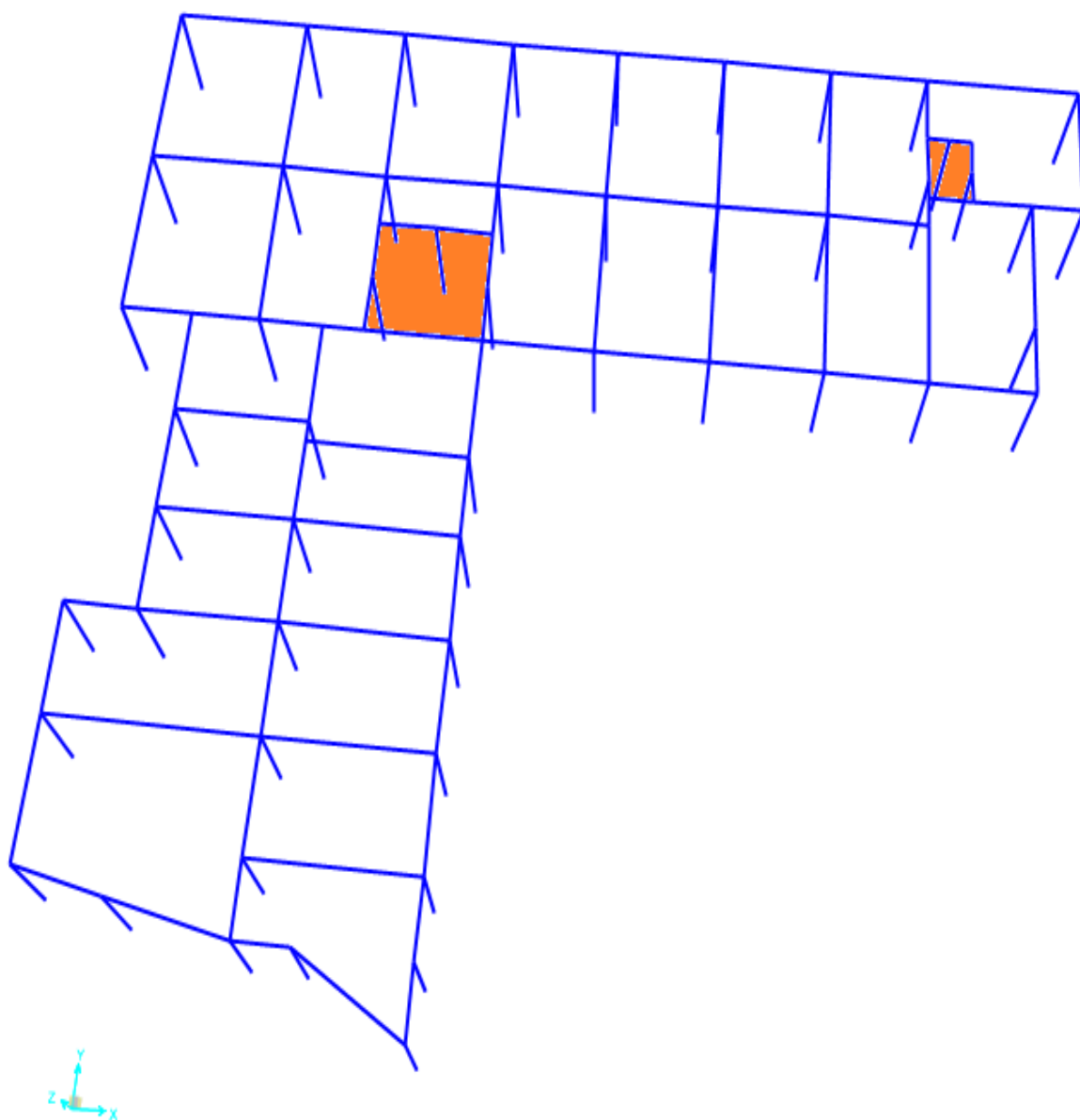
Στην Εικόνα 8.12 φαίνεται η εικόνα της προσομοίωσης των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέματος 4 επιπέδων (αριστερά) και 5 επιπέδων (δεξιά) σύμφωνα με τη μέθοδο του ισοδύναμου στύλου στο SAP2000.



Εικόνα 8.12 Προσομοίωση των πυρήνων οπλισμένου σκυροδέματος 4 επιπέδων (αριστερά) και 5 επιπέδων (δεξιά) με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων (κατά αντιστοιχία με την Εικόνα 8.3) στο SAP2000.



Εικόνα 8.13 Χωρικό προσομοίωμα (με τα αρχικά υποστυλώματα και δοκούς στις κόκκινες θέσεις) του φορέα της κατασκευής πριν την ενίσχυση (προβολή επιπέδου ισογείου).



Εικόνα 8.14 Χωρικό προσομοίωμα (με γραμμικά στοιχεία για τους πυρήνες στις κόκκινες θέσεις) του φορέα της κατασκευής μετά την ενίσχυση (προβολή επιπέδου ισογείου).

8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover για την ενισχυμένη κατασκευή

Παρακάτω θα παρατεθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης (Pushover) στην ενισχυμένη κατασκευή από το πρόγραμμα SAP2000.

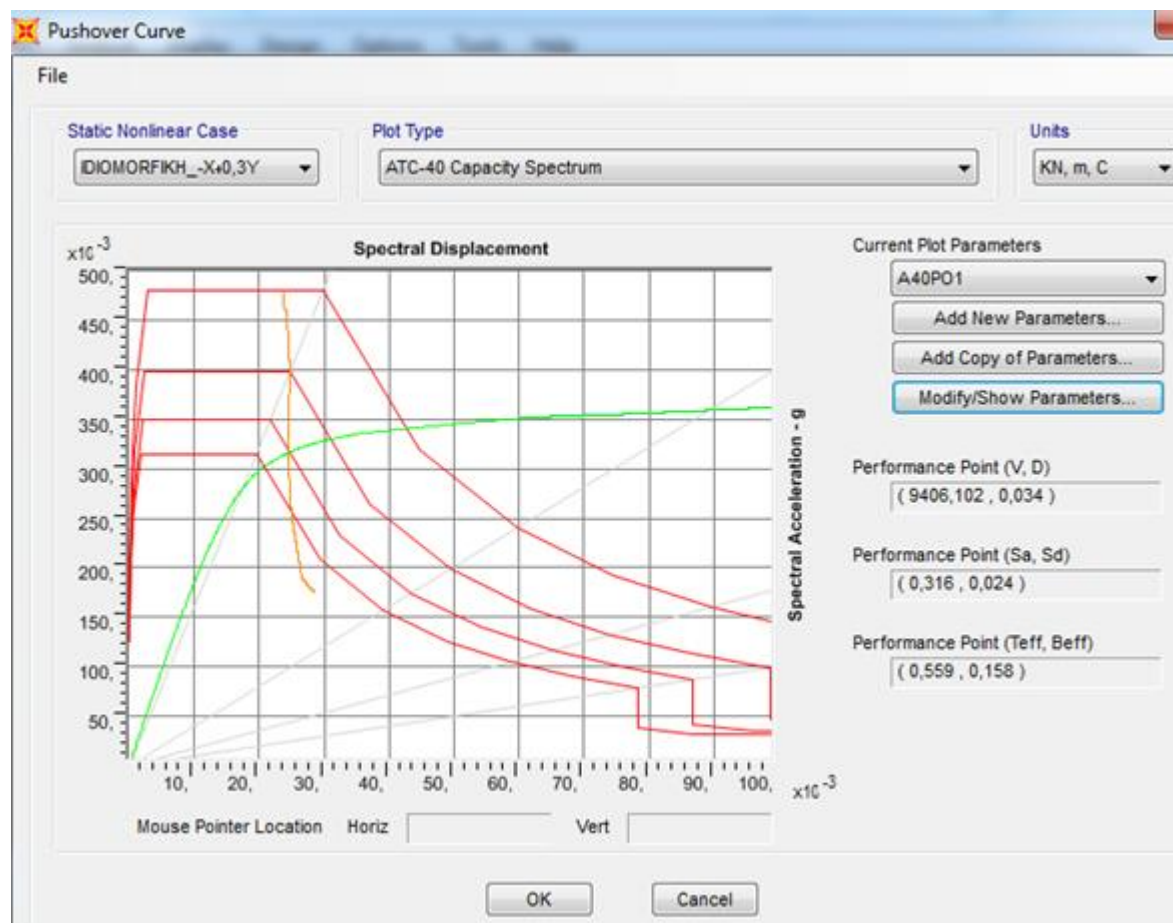
Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται, όπως και για την υφιστάμενη κατάσταση του φορέα, οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης ανά διεύθυνση (X ή -X και Y ή -Y) από τους προαναφερθέντες συνολικά 16 συνδυασμούς φόρτισης, 8 ομοιόμορφης και 8 ιδιομορφικής κατανομής. Αποτιμάται, τελικά, ο φορέας της κατασκευής σχετικά με την επάρκεια ή την απαίτηση ενίσχυσής του σε κάθε διεύθυνση για το δυσμενέστερο συνδυασμό. Πρόκειται για τους συνδυασμούς φόρτισης:

- **ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – Διεύθυνση -X** (Συνδυασμός: $-X + 0.3Y$)
- **ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – Διεύθυνση Y** (Συνδυασμός: $Y - 0.3X$)

Για τους παραπάνω συνδυασμούς φόρτισης δίδονται τα φάσματα ικανότητας σε μορφή ADRS (ATC-40 Capacity Spectrum).

Επισημαίνεται ότι και στην ενισχυμένη κατάσταση του φορέα της κατασκευής, οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης είναι οι ίδιοι με αυτούς της υφιστάμενης κατάστασης. Επιτυγχάνεται, επομένως, σύγκριση συγχρόνως και επί των δυσμενέστερων αλλά και επί ομοειδών συνδυασμών φόρτισης. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δε συνέβαινε, θα ήταν σκόπιμη μία επιπλέον αντιπαραβολή καμπυλών ικανότητας της κατασκευής με κριτήριο τη διεύθυνσή τους αυτή τη φορά.

8.3.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – Διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X + 0.3Y)



Εικόνα 8.15 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) ενισχυμένου φορέα στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X+0,3Y) στο SAP2000.

Η υλοποίηση του συνδυασμού -X+0,3Y κατά τη διεύθυνση -X έγινε σε 445 βήματα ανάλυσης. Το σημείο επιτελεστικότητας για τον ενισχυμένο φορέα (Performance Point) (V,D) = (9406,102 , 0,034) βρίσκεται μεταξύ των βημάτων 107 και 108, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1.

Step	Displacement	Base Force
	m	KN
106	0,033745	9381,905
107	0,033895	9395,951
P.P.	0,034	9406,102
108	0,034045	9409,332
109	0,034195	9422,823
110	0,034345	9436,279

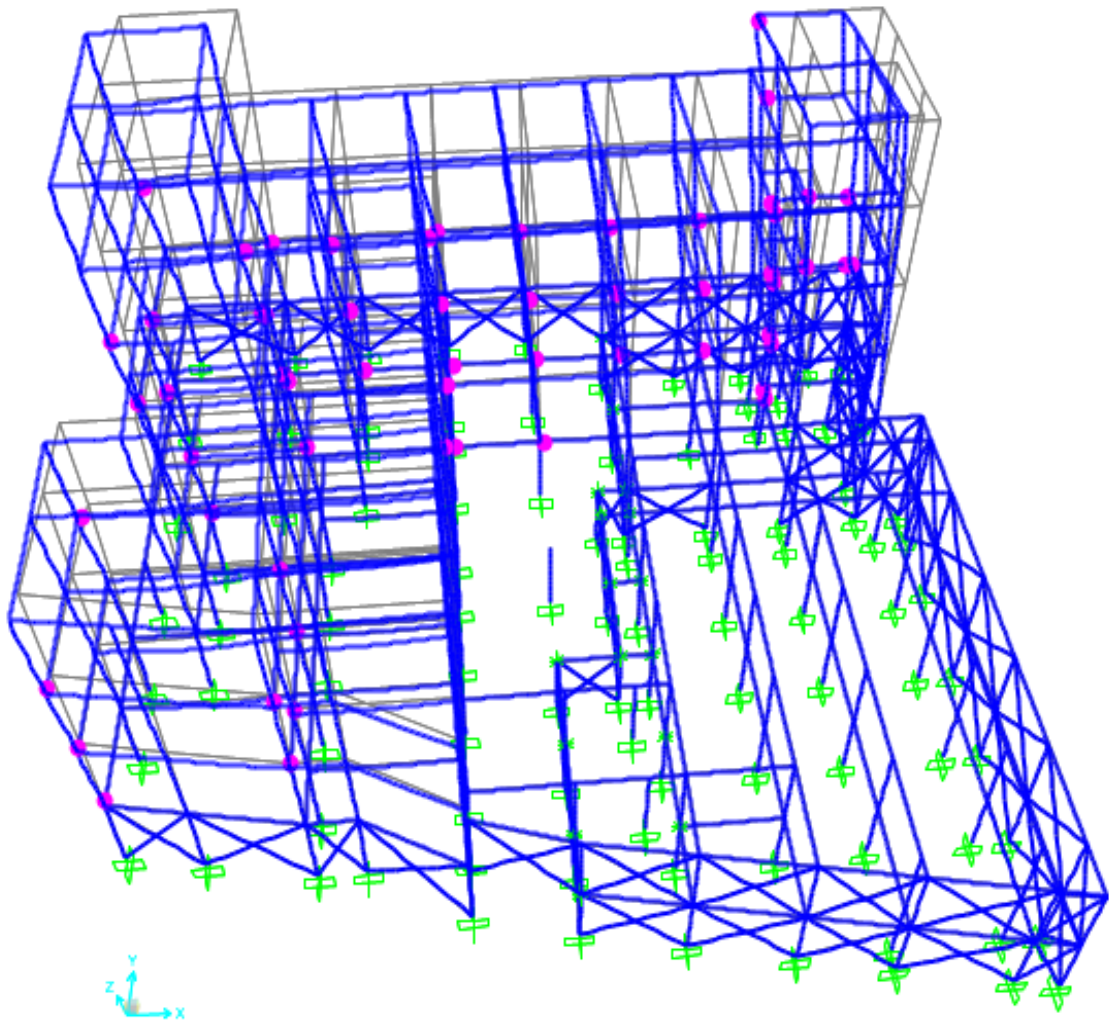
Πίνακας 8.1 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) για τον ενισχυμένο φορέα στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση -X (Συνδυασμός: -X+0,3Y).

Επίσης, στον Πίνακα 8.2 που ακολουθεί, επισημαίνεται το πλήθος και ο τύπος των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργούνται στον ενισχυμένο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y).

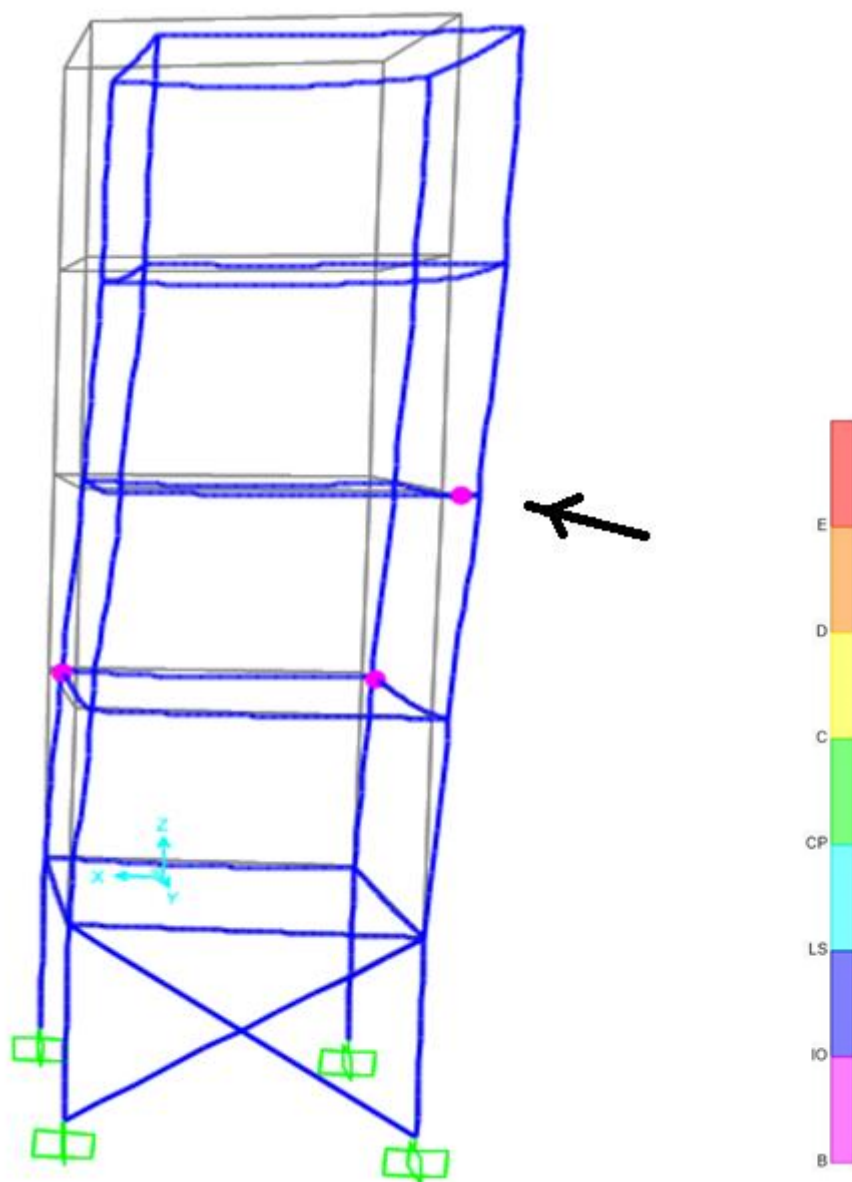
TABLE: Pushover Capacity Curve											
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
	m	KN									
106	0,033745	9381,905	1389	45	0	0	0	0	0	0	1434
107	0,033895	9395,951	1389	45	0	0	0	0	0	0	1434
108	0,034045	9409,332	1388	46	0	0	0	0	0	0	1434
109	0,034195	9422,823	1387	47	0	0	0	0	0	0	1434
110	0,034345	9436,279	1386	48	0	0	0	0	0	0	1434

Πίνακας 8.2 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y).

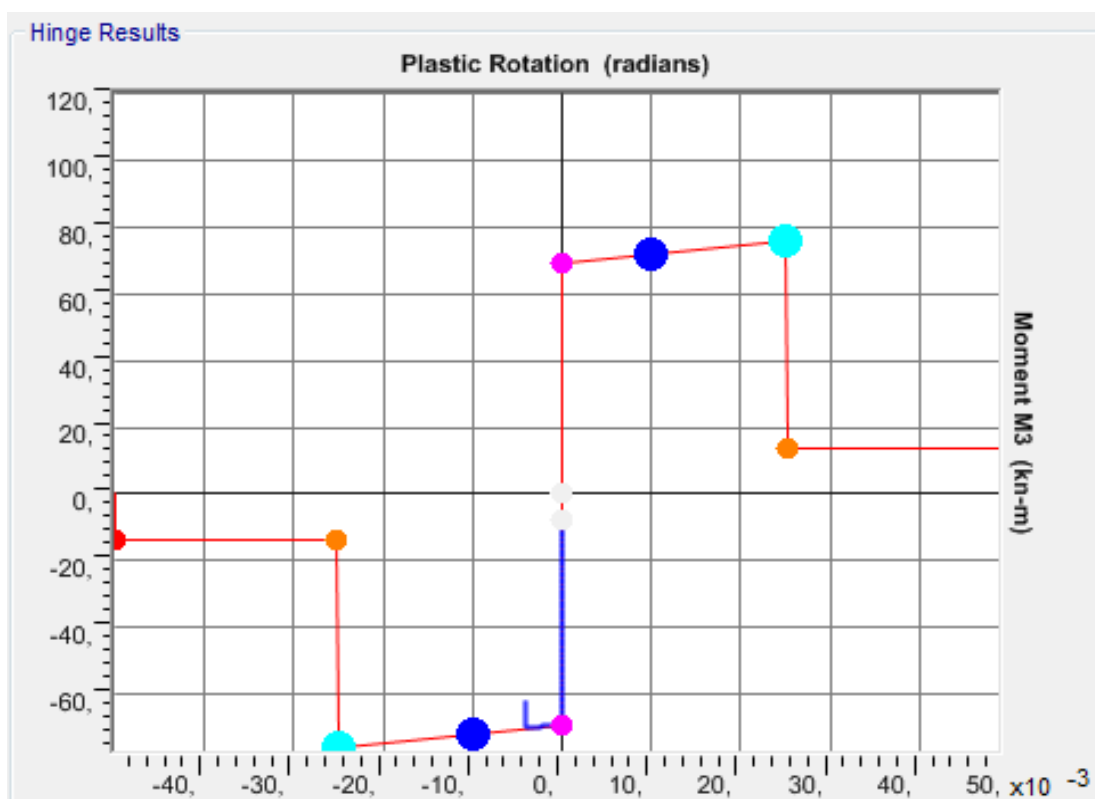
Επιπλέον, στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8.16) φαίνονται οι θέσεις όπου δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στον ενισχυμένο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y).



Εικόνα 8.16 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα της κατασκευής, στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).

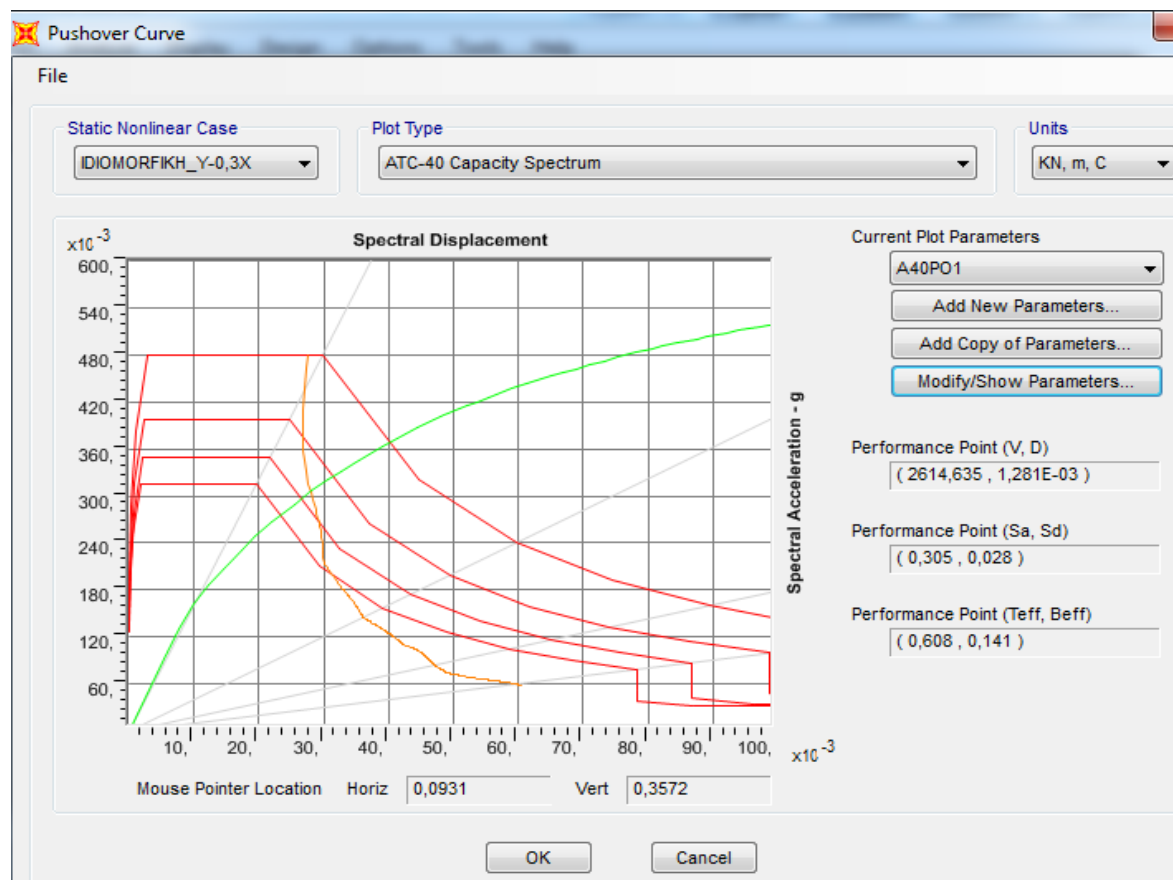


Εικόνα 8.17 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο ίδιο φάτνωμα (βλ. θέση στην Εικόνα 7.15) (μπροστινή όψη κατά X) του ενισχυμένου φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση $-X$, Συνδυασμός: $-X+0,3Y$).



Εικόνα 8.18 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνύόμενο με βέλος κόμβο δοκού της προηγούμενης εικόνας του ενισχυμένου φορέα (διεύθυνση -X, Συνδυασμός: -X+0,3Y).

8.3.2 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – Διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y - 0.3X)



Εικόνα 8.19 Υπολογισμός σημείου επιτελεστικότητας (Performance Point) ενισχυμένου φορέα στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X) στο SAP2000.

Η υλοποίηση του συνδυασμού Y-0,3X κατά τη διεύθυνση Y έγινε σε 319 βήματα ανάλυσης. Το σημείο επιτελεστικότητας για τον ενισχυμένο φορέα (Performance Point) (V,D) = (2614,635 , 0,00128) βρίσκεται μεταξύ των βημάτων 9 και 10, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1.

Step	Displacement	BaseForce
	m	KN
8	0,000877	2527,18
9	0,001129	2579,793
P.P.	0,00128	2614,635
10	0,001293	2617,246
11	0,001462	2644,736

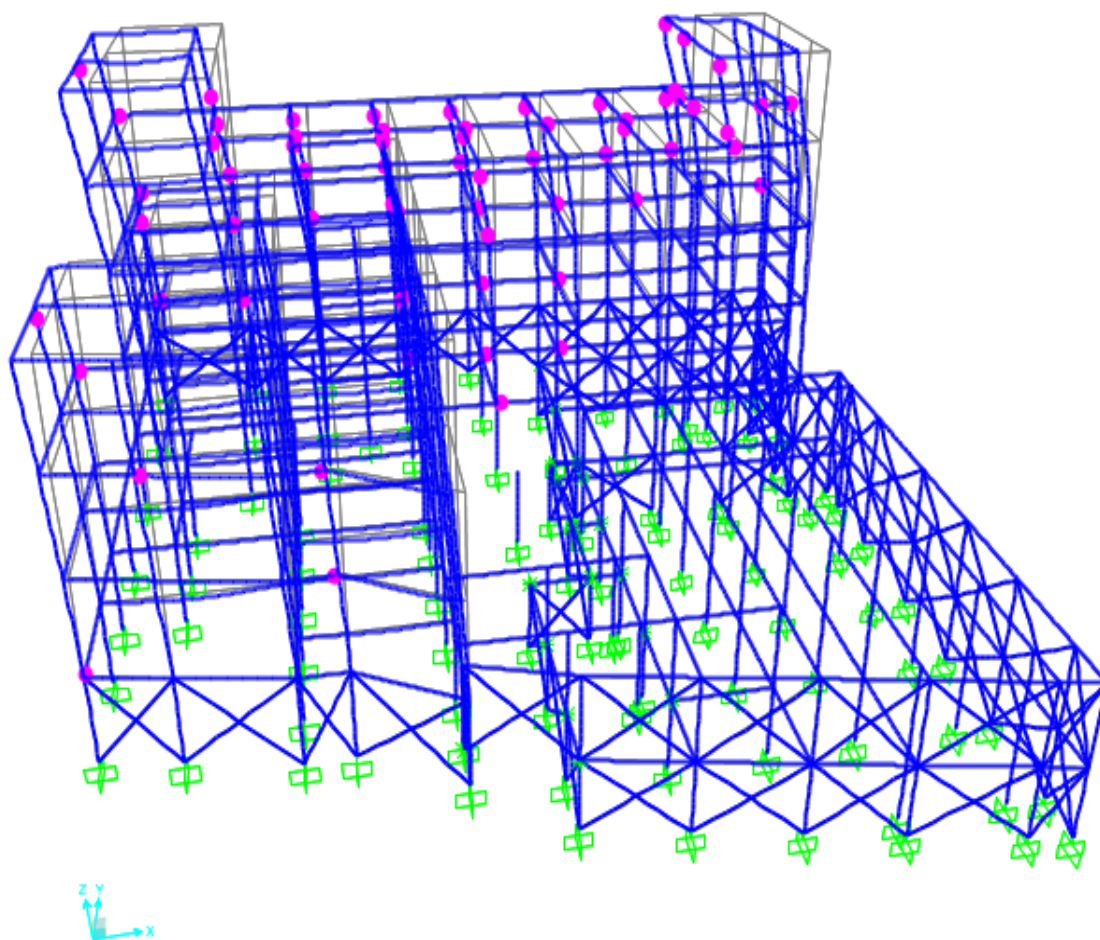
Πίνακας 8.3 Εντοπισμός σημείου επιτελεστικότητας (P.P.) για τον ενισχυμένο φορέα στα βήματα ανάλυσης στη διεύθυνση Y (Συνδυασμός: Y-0,3X).

Επίσης, στον Πίνακα 8.2 που ακολουθεί, επισημαίνεται το πλήθος και ο τύπος των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργούνται στον ενισχυμένο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).

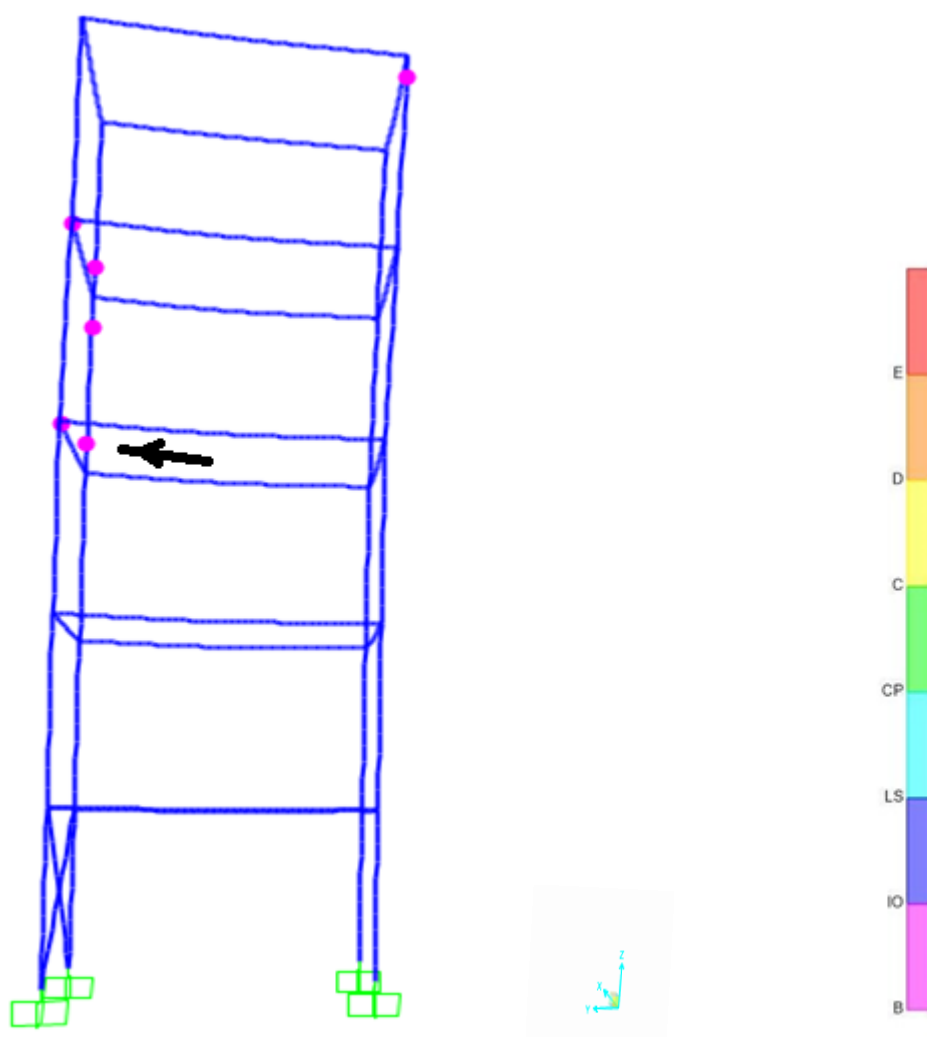
TABLE: Pushover Capacity Curve											
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LSstoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
	m	KN									
8	0,000877	2527,18	1320	46	0	0	0	0	0	0	1366
9	0,001129	2579,793	1315	51	0	0	0	0	0	0	1366
10	0,001293	2617,246	1307	59	0	0	0	0	0	0	1366
11	0,001462	2644,736	1301	65	0	0	0	0	0	0	1366
12	0,001613	2666,965	1290	74	2	0	0	0	0	0	1366

Πίνακας 8.4 Πλήθος και τύπος πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).

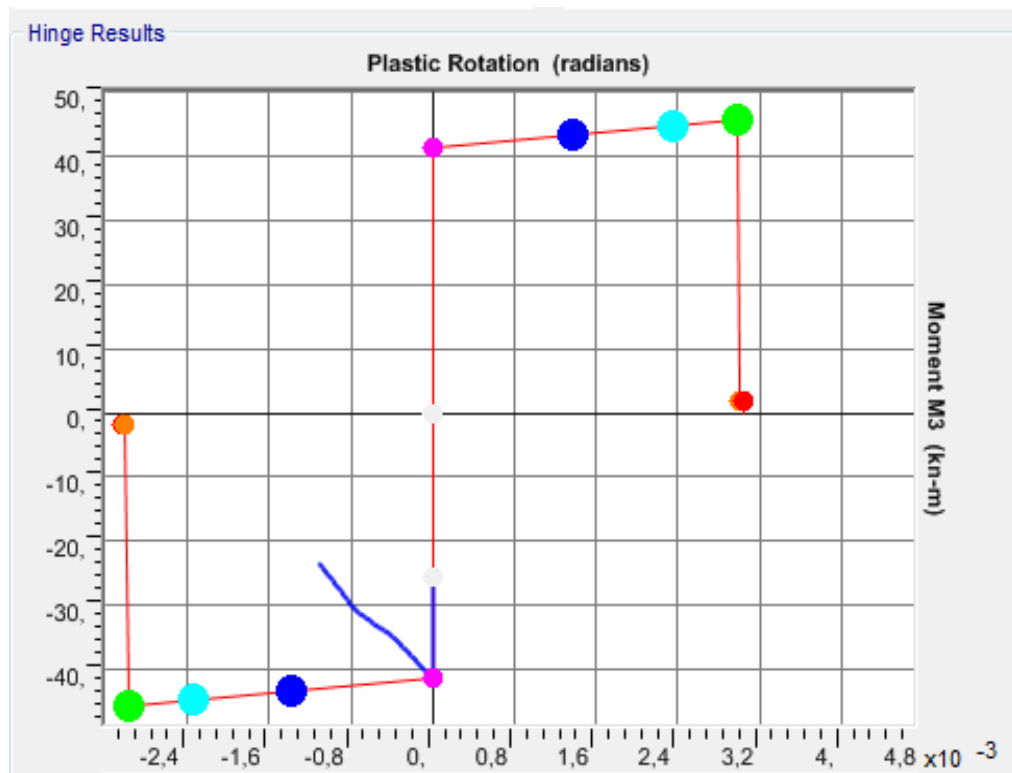
Επιπλέον, στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8.16) φαίνονται οι θέσεις όπου δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στον ενισχυμένο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).



Εικόνα 8.20 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στον ενισχυμένο φορέα της κατασκευής στο σημείο επιτελεστικότητας (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).



Εικόνα 8.21 Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο κάθετο φάτνωμα με αυτό της Εικόνας 7.16 (μπροστινή όψη κατά Y) του ενισχυμένου φορέα της κατασκευής της προηγούμενης εικόνας στο σημείο επιτελεστικότητα (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).



Εικόνα 8.22 Πλαστική άρθρωση στον υποδεικνυόμενο με βέλος κόμβο υποστυλώματος της προηγούμενης εικόνας του ενισχυμένου φορέα (διεύθυνση Y, Συνδυασμός: Y-0,3X).

8.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover για την ενισχυμένη κατασκευή

Παρατηρούμε από την παρουσίαση των ανωτέρω αποτελεσμάτων της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης (Pushover) για τον ενισχυμένο αυτή τη φορά φορέα της κατασκευής, ότι και πάλι οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης για κάθε διεύθυνση αφορούν ιδιομορφικό και όχι ομοιόμορφο τρόπο επιβολής φορτίων. Έχουμε, έτσι, τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τόσο τους δυσμενέστερους όσο και δύο ομοειδείς συνδυασμούς φόρτισης.

Επίσης, από τους Πίνακες 8.2 και 8.4 διαπιστώνεται σημαντική μείωση στο πλήθος των κόμβων των δομικών στοιχείων της κατασκευής που έχουν πλαστικοποιηθεί για το σημείο επιτελεστικότητας και για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης. Επιπλέον, οι πλαστικές αρθρώσεις που σχηματίζονται εντοπίζονται πιο πολύ στους ανώτερους ορόφους της ενισχυμένης κατασκευής και πολύ λιγότερο σε κατακόρυφα στοιχεία. Το τελευταίο καθιστά λιγότερο πιθανό το σχηματισμό μηχανισμού αστοχίας για τα υποστυλώματα, μιας και οι περισσότερες πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα δοκών συνεπάγονται ότι σε αυτές προηγείται η αστοχία.

ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ	BtoIO	IOtoLS
Συνδυασμός "-X+0,3Y"	354	3
Συνδυασμός "Y-0,3X"	356	8
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ	BtoIO	IOtoLS
Συνδυασμός "-X+0,3Y"	46	0
Συνδυασμός "Y-0,3X"	59	0

Πίνακας 8.5 Πλήθος πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα της κατασκευής πριν και μετά την ενίσχυση.

Πλέον στο σημείο επιτελεστικότητας για στάθμες από IO σε LS έχουμε μηδέν στοιχεία (οι μπλε κόμβοι απουσιάζουν εντελώς) και στις δύο περιπτώσεις, ενώ και από B σε IO έχουμε πολύ μεγάλη μείωση (Πίνακας 8.5). Δεν έχει αναπτυχθεί, συνεπώς, πλαστική άρθρωση σε στοιχείο του ενισχυμένου φορέα της κατασκευής, η οποία να έχει φθάσει σε στάθμη επιτελεστικότητας Life Safety. Επιπλέον, στις Εικόνες 8.17 και 8.21 παρουσιάζεται σαφώς πιο ήπια και αραιή εικόνα πλαστικοποίησης στα υποστυλώματα λόγω σχηματισμού

πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα τους. Επίσης, η T_{eff} , είναι μικρότερη και στις δύο διευθύνσεις μετά την ενίσχυση. Επιπρόσθετα, διαπιστώνουμε ότι το σημείο επιτελεστικότητας και για τους δύο δυσμενέστερους συνδυασμούς φόρτισης δε βρίσκεται πλέον στον οριζόντιο κλάδο της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής.

Συγκρίνοντας και για τις δύο διευθύνσεις της ενισχυμένης κατασκευής, τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το βήμα (step) ανάλυσης όπου εμφανίζεται η πρώτη πλαστική άρθρωση για τη στάθμη επιτελεστικότητας Life Safety, με τη μετακίνηση του στο σημείο επιτελεστικότητας (στοχευόμενη μετακίνηση), συμπεραίνουμε ότι είναι μεγαλύτερη, άρα ικανοποιείται η απαίτηση για στάθμη επιτελεστικότητας Life Safety.

Τελικά, λοιπόν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του φορέα είναι τέτοια που ο τελευταίος παρουσιάζει σεισμική επάρκεια για τη στάθμη επιτελεστικότητας «Προστασία Ζωής» (Life Safety).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας υπήρξε ο φορέας ενός υφιστάμενου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα όσον αφορά τη σεισμική του απόκριση και επάρκεια. Η αποτίμηση της συμπεριφοράς της υφιστάμενης κατασκευής πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της Δυναμικής φασματικής ανάλυσης και της ανάλυσης Pushover και προτάθηκε ένα νέο στατικό σύστημα για την ενίσχυσή της. Το υπό μελέτη κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής και η μελέτη του έγινε το 1972, βάσει των διατάξεων του Κ.Ω.Σ. 1954 για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και του ισχύοντος αντισεισμικού κανονισμού του 1959. Αποτελείται από δύο υπόγεια, τρεις ορόφους και έναν τελευταίο όροφο που αποτελείται από δύο δώματα.

Το κόστος της μεθόδου που προτείνεται για την ενίσχυση του φορέα δεν είναι αμελητέο, καθώς κατασκευάζονται δύο πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο, η επιλογή αυτή είναι στοχευμένη, εξαιτίας της δυνατότητας που προσφέρει στον ιδιοκτήτη να αποκτήσει το κτίριο ανελκυστήρα, της βολικής από αρχιτεκτονική και στατική άποψη επιλογής των θέσεων ενίσχυσης του υφιστάμενου φορέα της κατασκευής και της ελάχιστης δυνατής ενόχλησης που οι εργασίες θα προξενήσουν στους ενοίκους.

Εναλλακτικά, θα μπορούσαν να τοποθετηθούν χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας συμμετρικά στις δύο διευθύνσεις και, πάντως, σε θέσεις πλησίον των θέσεων που επιλέχθηκαν για τους δύο πυρήνες ή ακόμα και στην ίδια θέση.

Οι βασικές ιδιομορφές του υφιστάμενου φορέα προέκυψαν από την ιδιομορφική ανάλυση στο πρόγραμμα SAP2000: η πρώτη είναι μεταφορική κατά X με $T_1 = 0,745s$, η δεύτερη μεταφορική κατά Y με $T_2 = 0,699s$ και η τρίτη στρωφική με $T_3 = 0,635s$. Από τη Δυναμική Φασματική Ανάλυση βάσει Ευρωκώδικα 8, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα όσον αφορά τις μέγιστες τιμές μετακινήσεων και στροφών των κόμβων του φορέα και τις μέγιστες τιμές αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών στα υποστυλώματα, σε κάθε στάθμη και για τις δύο διευθύνσεις.

Από την ελαστική ανάλυση δόθηκε μια πρώτη εικόνα συμπεριφοράς του κτιρίου στο σεισμό. Ακολούθησε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την ανελαστική μέθοδο ανάλυσης Pushover για το υφιστάμενο κτίριο που υλοποιήθηκε στο SAP2000 και

περιλάμβανε την εφαρμογή ομοιόμορφων και ιδιομορφικών καθ' ύψος κατανομών φορτίσεων σε διευθύνσεις X , $-X$, Y και $-Y$ του σεισμού, με στόχο τη στάθμη επιτελεστικότητας (δηλαδή το αποδεκτό επίπεδο βλαβών) «Προστασία Ζωής» για τη σεισμική ικανότητα του φορέα της υφιστάμενης κατασκευής.

Η εκτίμηση όσον αφορά τη σεισμική απαίτηση του φορέα μιας κατασκευής επιτυγχάνεται με μη γραμμικές μεθόδους, όπως η μέθοδος Pushover. Υπολογίζοντας τη μετακίνηση ενός ισοδύναμου γραμμικού ελαστικού συστήματος, προσδιορίζεται η αναμενόμενη μετελαστική μετακίνηση του υπό μελέτη συστήματος. Μετά την αναγωγή της στοχευόμενης μετακίνησης του μονοβάθμιου σε μετακίνηση του αντίστοιχου πολυβάθμιου συστήματος, τα δομικά στοιχεία του φορέα ελέγχονται ως προς την επιτελεστικότητα.

Οι πληροφορίες που απαιτούνται για να χαρακτηριστεί η κατασκευή ως επαρκής ή όχι, συλλέγονται χάρη στη δυνατότητα παρουσίασης του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται ο φορέας σε ένα διάγραμμα τέμνουσας βάσης - μετατόπισης κορυφής. Πιο συγκεκριμένα, αυτό είναι εφικτό προσδιορίζοντας τη στοχευόμενη μετατόπιση και τοποθετώντας την στην καμπύλη ικανότητας του φορέα. Στην καμπύλη αυτή είναι δυνατός ο εντοπισμός αντίστοιχων τιμών μετατόπισης, οι οποίες αναφέρονται στην ικανοποίηση των κριτηρίων επιτελεστικότητας των δομικών στοιχείων του φορέα της κατασκευής, με τον έλεγχό τους να είθισται να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της ανελαστικής ανάλυσης.

Για να ικανοποιούνταν για τον υφιστάμενο φορέα οι απαιτήσεις για στάθμη επιτελεστικότητας «Προστασία Ζωής», θα έπρεπε η στοχευόμενη μετακίνηση να προέκυπτε μικρότερη από την κρίσιμη που αφορά την παραβίαση των αντίστοιχων κριτηρίων μετακίνησης. Αυτό δε συνέβη σε καμία διεύθυνση και, έτσι, προτείνεται τρόπος ενίσχυσης του φορέα.

Από την ανάλυση του ενισχυμένου πλέον φορέα προέκυψαν μέλη που αναπτύσσουν πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα τους, αλλά με το όριο για την επιθυμητή στάθμη να μην υπερβαίνεται από κανένα εξ αυτών. Επίσης, οι πλαστικές αρθρώσεις εντοπίζονται στην περίπτωση της ενισχυμένης κατασκευής περισσότερο στα άκρα δοκών και όχι υποστυλωμάτων. Διαπιστώνεται, τελικά, η σεισμική επάρκεια του ενισχυμένου φορέα της υπό μελέτη κατασκευής για στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας «Προστασία Ζωής».

Εν κατακλείδει, το ενισχυμένο πλέον κτίριο είναι επαρκές σεισμικά σε όρους αντοχής και μετακινήσεων υπό ισχυρό σεισμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fahjan Y.M.& Kubin J.& Tan M.T., 2014, *Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings*, ECEE
2. Fardis M.N., Carvalho E., Elnashai A., Faccioli E., Pinto P.E., Plumier A., 2011, *Οδηγός σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός κατασκευών*, Κλειδάριθμος
3. Computers and Structures INC., *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000*, California
4. Eurocode 8, 2005, *EC 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules*, Seismic Actions and Rules for Buildings, EN1998-1:2004
5. Eurocode 8, 2005, *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings*, EN1998-3:2005
6. ATC-40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1*, California
7. FEMA 273, 1997, *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Washington, D.C.
8. FEMA 356, 2001, *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Washington, D.C.
9. FEMA 356, 2000, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*
10. FEMA 440-ATC 55, 2005, *Improvement of nonlinear static analysis procedures*, Washington, D.C.
11. Ο.Α.Σ.Π., 2001, *Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ 2000)*, Αθήνα
12. Ο.Α.Σ.Π., 2001, *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 (ΕΑΚ 2000)*, Αθήνα
13. Ο.Α.Σ.Π., 2013, *Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)*, Αθήνα
14. Ζηκίδη Β., 2012, *Αποτίμηση Ανελαστικής Συμπεριφοράς Πολυώροφου Κτηρίου από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, Αθήνα
15. Κανελλόπουλος Α., 2007, *Αντισεισμικός σχεδιασμός και ενίσχυση κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Pushover- πλαστιμότητα και θραύση- εφαρμογές*, Cubus Hellas
16. Κίρτας Ε., Παναγόπουλος Γ., 2015, *Προσομοίωση Κατασκευών σε Προγράμματα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή – Εφαρμογές με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP2000*, Σέρρες

-
- 17.Κουκιαΐνης Σ., 2018, *Αποτίμηση φέρουσας ικανότητας πολυώροφης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα στη Ρόδο*, Αθήνα
- 18.Κουμούσης Β.,1998, *Ανάλυση Φορέων με Πεπερασμένα Στοιχεία*, Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος, Αθήνα
- 19.Λουράντος Κ., 2015, *Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα μελετημένο το 1961*, Αθήνα
- 20.Μίντζολη Χ., 2015, *Αλλαγή χρήσης εμπορικού κέντρου σε δικαστικό μέγαρο: Αποτίμηση φέρουσας ικανότητας - Προτάσεις*, Αθήνα
- 21.Ταγκούλη Μ., 2013, *Αποτίμηση Φέρουσας Ικανότητας Πενταώροφου Κτηρίου από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, Αθήνα
- 22.Φλώρου Δ., 2018, *Αποτίμηση και ενίσχυση φέροντος οργανισμού τετραώροφης οικοδομής με δώμα της δεκαετίας '80*, Αθήνα
- 23.Ψυχάρης Ι., 2016, *Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας*, Τεύχος 1, Αθήνα
- 24.Ψυχάρης Ι., 2015, *Αντισεισμικός Σχεδιασμός με στάθμες Επιτελεστικότητας*, Αθήνα
- 25.<https://www.csiamerica.com>