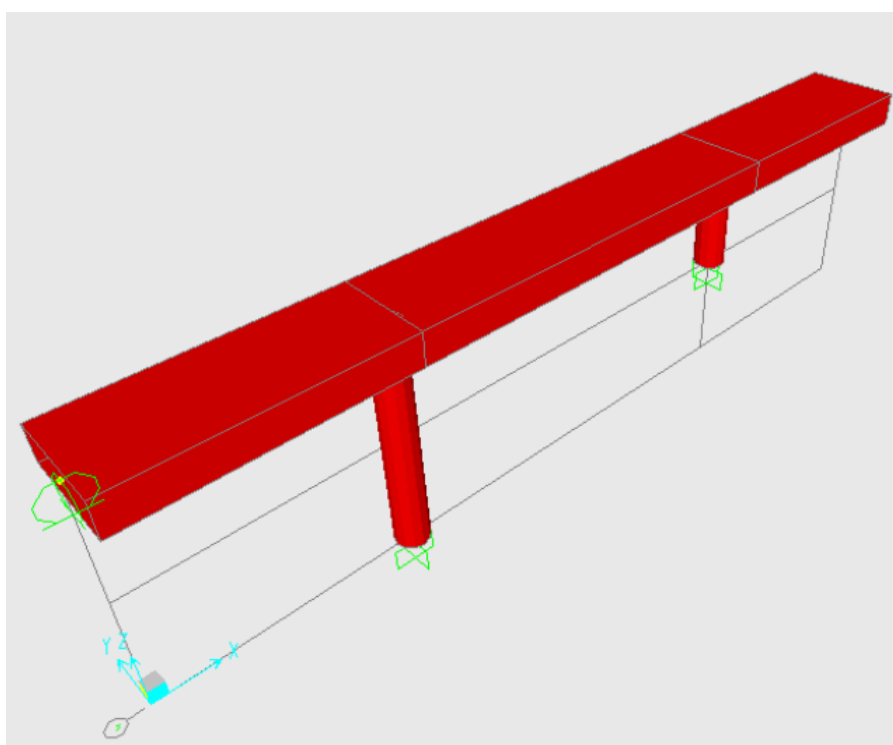




Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ



Σπουδάστριες:

Σωτηρία Καματερού, Α. Μ.: 5296

Άννα Κυριακοπούλου, Α. Μ.: 5417

Εποπτεύων Καθηγητής:

Δρ. Δημήτριος Μπάρος, Ακαδ. Υπότροφος

Πάτρα, 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στον τομέα του τεχνικού σχεδιασμού οι περισσότερες σημαντικές αλλαγές έγιναν από το 1965 και μετά, όπου η προηγμένη τεχνολογία έχει μεταφέρει το βιομηχανικό σχεδιασμό και την τεχνική σχεδίαση στη σφαίρα των υπολογιστών. Πριν από την εμφάνιση τους ο έλεγχος για την αντισεισμική συμπεριφορά ενός οικοδομήματος γινόταν με μεγάλη δυσκολία καθώς ο μηχανικός έπρεπε να κάνει πολλαπλές δοκιμές οι οποίες αντλούσαν αρκετό χρόνο και από τον ίδιο αλλά και από τη κατασκευή του έργου.

Σήμερα, οι μηχανικοί, οι μελετητές και οι σχεδιαστές πρέπει όχι μόνο να καταλαβαίνουν και να εφαρμόζουν διαφορές τεχνικές σχεδιάσεως και πρακτικές, αλλά και να είναι ικανοί να εργασθούν με τους υπολογιστές που έχουν επιφέρει καινοτόμες αλλαγές όσον αφορά το σχεδιασμό των κατασκευών.

Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο μηχανικός πλέον μπορεί να εξετάζει με χρήση προσομοιωμάτων τον τρόπο που μπορεί να συμπεριφερθεί η κατασκευή σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με την ισχύ της σεισμικής δόνησης και να ελέγχει την αντισεισμική συμπεριφορά της. Εξασφαλίζοντας έναν βέλτιστο συνδυασμό ασφάλειας και οικονομίας.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του αντισεισμικού σχεδιασμού είναι η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς της κατασκευής και πέραν της ελαστικής περιοχής, δηλαδή μετά την εμφάνιση των ζημιών έως οιονεί κατάρρευση. Η ανάλυση pushover είναι μία σύγχρονη μέθοδος που εφαρμόζεται σε όλα τα στάδια ανάλυσης της κατασκευής όπως όπως αυτά περιγράφονται παραπάνω.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Δημήτριο Μπάρο ο οποίος ήταν η κινητήριος δύναμη για τη συγγραφή αυτής της εργασίας, διότι μας υπέδειξε το θέμα και με τη πολύτιμη βοήθεια του συνέβαλλε καθοριστικά στην υλοποίηση της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση και στατική ανελαστική ανάλυση μιας απλής γέφυρας τύπου δοκού με ανελαστικά βάρη διαφορετικού ύψους χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά (ποιότητες χάλυβα και σκυροδέματος). Οι αναλύσεις έχουν στόχο να «αποτυπώσουν» τη συμπεριφορά της γέφυρας σε περίπτωση σεισμού.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι μέθοδοι αντισεισμικής ανάλυσης (ελαστικές και ανελαστικές μέθοδοι) και σχολιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι διαφορές τους.

Το Κεφάλαιο 2 αναφέρεται στην προσομοίωση της ανελαστικότητας και, πιο αναλυτικά, στην έννοια της πλαστικής άρθρωσης. Παρουσιάζονται οι προτάσεις που αφορούν την προσομοίωση της συμπεριφοράς δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα σε Ελληνικούς και διεθνείς Κανονισμούς.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η εφαρμογή της ανελαστικής στατικής ανάλυσης με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού (SAP2000) για το σεισμικό έλεγχο μίας απλής γέφυρας. Περιγράφεται η διαδικασία μόρφωσης του προσομοιώματος και παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων (καμπύλες αντίστασης και παραμορφώσεις στις πλαστικές αρθρώσεις).

Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 σημειώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε και την εργασία συνολικά.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστριών:

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες σπουδάστριες έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή `αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Οι Σπουδάστριες:

Σωτηρία Καματερού

Άννα Κυριακοπούλου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	5
1.2.1 Ελαστικές μέθοδοι.....	6
1.2.2 Ανελαστικές μέθοδοι.....	7
1.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER).....	9
1.3.1 Περιπτώσεις οριζόντιας φόρτισης	10
1.3.2 Καμπύλη αντίστασης.....	11
1.3.3 Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης.....	11
1.3.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	22
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	22
2.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ.....	23
2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ.....	26
2.4 ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	34
3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΛΥΕΤΑΙ.....	34
3.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	35
3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	36
3.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....	37
3.5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	41
3.6 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.....	43
3.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	45
3.7.1 Αξιολόγηση της επιρροής της φοράς του οριζόντιου φορτίου.....	50
3.7.2 Φαινόμενα P-Δ και μεγάλες μετατοπίσεις.....	51
3.7.3 Αξιολόγηση της επιρροής της ποιότητας των υλικών.....	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΤΟΜΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	
ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την πάροδο των χρόνων έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την έρευνα στο πεδίο των αντισεισμικών κατασκευών και αυτό οφείλεται στις επιπτώσεις που προκάλεσαν οι ισχυροί σεισμοί του παρελθόντος. Η ανάπτυξη πιο σύγχρονων αντιλήψεων όσον αφορά τις κατασκευές και οι συνεχείς εξελίξεις στην τεχνολογία των δομικών υλικών έχουν ως αποτέλεσμα οι κατασκευές που δημιουργούνται στις μέρες μας να είναι ασφαλέστερες σε σύγκριση με το παρελθόν, τόσο λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται όσο και λόγω των αυξημένων απαιτήσεων που λαμβάνονται όσον αφορά τη σεισμική απειλή. Με βάση την προηγούμενη παρατήρηση πολλά από τα κτίρια προ του 1985 θεωρούνται ανεπαρκή σύμφωνα με τις κατασκευαστικές αντιλήψεις της εποχής μας, συνεπώς το 80% των κτιρίων είναι ανέφικτο να αντικατασταθεί.

Το γεγονός αυτό καθώς και η ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων συντέλεσε στην δημιουργία μιας αντίληψης που εφαρμόζεται μέχρι και σήμερα για την αποτίμηση και ανάλυση κατασκευών για σεισμικές φορτίσεις. Μέσω της σεισμικής αποτίμησης προσπαθούμε να προσδιορίσουμε ποσοτικά τη σεισμική ικανότητα της κατασκευής και να διαπιστώσουμε μέσα από κριτήρια εάν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής, διαφορετικά να βρεθεί ο βαθμός ανεπάρκειάς της. Χρησιμοποιούμε κατάλληλα μαθηματικά προσομοιώματα για μια πιο ρεαλιστική θεώρηση του σεισμού ως μια μεταβαλλόμενη κίνηση που εισάγεται στη κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο η σεισμική απειλή αποτυπώνεται σε καμπύλες ικανότητας που μπορούν να συγκριθούν με τα φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων που αντιπροσωπεύουν την ένταση στο φορέα.

1.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Οι μέθοδοι αντισεισμικής ανάλυσης διακρίνονται στις ελαστικές, οι οποίες είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κυρίως και για την ανάλυση νέων κτιρίων, με κάποιες αλλαγές ώστε να συμπεριληφθούν οι ιδιαιτερότητες των υφιστάμενων κατασκευών, και στις ανελαστικές, οι οποίες μπορεί να είναι πιο απαιτητικές όσον αφορά τους υπολογισμούς, αλλά δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα μέσω της λεπτομερούς προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δομικών μελών και της ορθολογικότερης αντιμετώπισης της σεισμικής απειλής.

Οι ελαστικές μέθοδοι ανάλυσης περιλαμβάνουν την ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση με καθολικούς (q) ή (m) δείκτες συμπεριφοράς και την ελαστική δυναμική ανάλυση με καθολικούς (q) ή (m) δείκτες συμπεριφοράς αντίστοιχα.

Οι ανελαστικές μέθοδοι ανάλυσης περιλαμβάνουν την ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοιστορίας (Time-History) που επιτρέπεται σε όλες τις κατασκευές και την ανελαστική στατική ανάλυση (Static Pushover), που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο υπό προϋποθέσεις.

1.2.1 Ελαστικές μέθοδοι

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως οι ελαστικές μέθοδοι ανάλυσης περιλαμβάνουν την ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση και την ελαστική δυναμική ανάλυση. Η ελαστική στατική ανάλυση ονομάζεται και ισοδύναμη στατική μέθοδος σύμφωνα με τον ΕΑΚ και έχει αυστηρές προϋποθέσεις στην εφαρμογή της αλλά και διαφορές όσον αφορά τη διαδικασία της. Οι προϋποθέσεις αυτές σχετίζονται με τη μορφολογική ικανότητα της κατασκευής αλλά και την ομοιόμορφη κατανομή μάζας και δυσκαμψίας της. Είναι σημαντικό να αναφερθεί η ύπαρξη κριτηρίου που σχετίζεται με την τιμή του δείκτη ανεπάρκειας δηλαδή του λόγου ένταση προς αντοχή S/R_m των μελών, που πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2.5 για να γίνει χρήση των ελαστικών μεθόδων. Σε κτίρια με μεγάλο βαθμό ανεπάρκειας των μελών ο ΚΑΝ.ΕΠΕ απαιτεί τη χρήση κάποιας ανελαστικής μεθόδου όπου δίνει μια ακριβέστερη εκτίμηση της ικανότητας του υπό μελέτη κτιρίου.

Σύμφωνα με αυτά που έχουμε ήδη αναφέρει σχετικά με τους περιορισμούς στη χρήση των ελαστικών μεθόδων για την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών σημαντικό ζήτημα είναι και ο δείκτης συμπεριφοράς q του οποίου η τιμή στις υφιστάμενες κατασκευές είναι συνήθως άγνωστη. Ο συντελεστής συμπεριφοράς q εκφράζει την ικανότητα της κατασκευής να απορροφά ενέργεια με πλαστική συμπεριφορά χωρίς να μειώνεται δραστικά η αντοχή της. Στους αντισεισμικούς κανονισμούς ο δείκτης συμπεριφοράς ορίζεται με ενιαία τιμή για ολόκληρο το κτήριο και καθορίζεται εμπειρικά με βάση τις βλάβες που έχουν παρατηρηθεί σε κτήρια έπειτα από καταστρεπτικούς σεισμούς. Επειδή όπως αναφέρθηκε παραπάνω η τιμή του q δεν είναι πάντα γνωστή, για την εκτίμησή της γίνεται μελέτη με βάση τα χαρακτηριστικά του κτιρίου που μελετάται αλλά και χρήση πινάκων όπως αυτός που ακολουθεί (Πίν. 1.1).

Πίνακας 1.1 Τιμές του δείκτη συμπεριφοράς q (ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2012)

Εφαρμοσθέντες Κανονισμοί μελέτης (και κατασκευής)	Ευμενής παρουσία τοιχοπληρώσεων (στο σύνολο του κτιρίου)		Δυσμενής παρουσία ή απουσία τοιχοπληρώσεων	
	Ουσιώδεις βλάβες σε πρωτεύοντα στοιχεία		Ουσιώδεις βλάβες σε πρωτεύοντα στοιχεία	
	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
1995<...	2,30	3,00 ή 3,50	1,80	2,30
1985<...<1995	1,80	2.30	1,30	1,80
...<1985	1,30	1,80	1,00	1,30

Οι ανωτέρω τιμές που προτείνονται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι εμπειρικές γεγονός που επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αποτίμησης. Σημαντικές ήταν οι προσπάθειες για τη διαμόρφωση μεθόδων ψευδοποσοτικής εκτίμησης της τιμής του δείκτη q μέσω αλγορίθμων (Τάσιος, 2003), οι οποίες οδήγησαν σε τιμές του δείκτη

συμπεριφοράς που προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις τιμές που προκύπτουν βάση ανελαστικών αναλύσεων. Επομένως η τιμή q προκύπτει από μια εμπειρική εκτίμηση, γεγονός που επηρεάζει την αξιοπιστία των υπολογισμών.

Εναλλακτικά, στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. καθώς και στο αμερικάνικο FEMA 356 προτείνεται για τις ελαστικές αναλύσεις η χρήση τοπικών δεικτών συμπεριφοράς m , οι οποίοι ορίζονται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$m = \delta_d / \delta_y$$

όπου ως δ_d ορίζεται η παραμόρφωση σχεδιασμού για την υπόψη στάθμη επιτελεκτικότητας και ως δ_y ορίζεται η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη θεωρητική διαρροή της υπόψιν κρίσιμης περιοχής του μέλους αντίστοιχα.

Στα αμερικάνικα σχέδια κανονισμών οι τιμές του m προκύπτουν από πίνακες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μέλους που εξετάζεται (δοκός, υποστύλωμα, πυκνοί συνδετήρες ή όχι). Με το δείκτη m βρίσκουμε το ποσοστό της τοπικής πλαστιμότητας των δομικών μελών στις κρίσιμες περιοχές άρα μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε για τη μείωση των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών μιας ελαστικής ανάλυσης. Παράλληλα όμως πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση των δεικτών m δεν εξαλείφει πλήρως τις αβεβαιότητες που εισάγονται από τη χρήση των ελαστικών μεθόδων ενώ η εφαρμογή τους διέπεται από προϋποθέσεις.

1.2.2 Ανελαστικές μέθοδοι

Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. αλλά και στο FEMA 356, οι ανελαστικές μέθοδοι που προτείνονται για την ανάλυση της κατασκευής, πριν και μετά την επέμβαση είναι δυο: (α) Η στατική ανελαστική ανάλυση (Static Pushover) και (β) η δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοιστορίας (Time-History).

Η μη-γραμμική στατική ανάλυση γνωρίζει ευρεία χρήση στο πεδίο της αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Έχει την ικανότητα πρόβλεψης της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα, μέσω ανελαστικής ανάλυσης. Με την ανελαστική ανάλυση αξιολογείται η σεισμική συμπεριφορά μιας κατασκευής χωρίς την αβεβαιότητα του δείκτη q .

Στην ανελαστική στατική ανάλυση χρησιμοποιείται ένα προσομοίωμα που λαμβάνει υπόψη ανελαστικούς νόμους φορτίου παραμόρφωσης για τα δομικά στοιχεία του κτιρίου. Το προσομοίωμα φορτίζεται με οριζόντια φορτία τα οποία αυξάνουν μονότονα και αναπαριστούν τις αδρανειακές δυνάμεις που εμφανίζονται στους ορόφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Η ανάλυση pushover συνεχίζεται μέχρι να δημιουργηθεί αστοχία στο φορέα. Συνήθως η αστοχία αυτή είναι αστοχία σε κάμψη μια κρίσιμης διατομής

Η ανελαστική στατική ανάλυση δίνει μια προσεγγιστική εκτίμηση των απαιτούμενων παραμορφώσεων κρίσιμων δομικών στοιχείων της κατασκευής και αποκαλύπτει τις αδυναμίες του φορέα όπως για παράδειγμα ασυνέχειες στην δυσκαμψία, υπερφόρτωση ψαθυρών στοιχείων ενώ παράλληλα αξιολογεί την ευστάθεια του δομικού συστήματος στο σύνολο του. Ωστόσο, η pushover δεν μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής ενώ παράλληλα τα αποτελέσματά της εξαρτώνται σε

αρκετά μεγάλο βαθμό από τη μορφή των οριζόντιων σεισμικών φορτίων που επιβάλλονται.

Η στατική ανελαστική ανάλυση μπορεί να μην είναι μια νέα μέθοδος παρόλα αυτά δεν έχει συμπεριληφθεί ξανά σε ελληνικό κανονισμό (πλην του ΚΑΝ.ΕΠΕ.), με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο γνωστή στην πλειοψηφία των μηχανικών που θα κληθούν να την εφαρμόσουν. Τα τελευταία χρόνια γνωρίζει ευρεία εφαρμογή στην αποτίμηση και τον ανασχηματισμό κτιρίων, διότι δίνει μια αποτελεσματική προσέγγιση της συμπεριφοράς των μελών μέσα από προσομοιώματα που έχουν αναπτυχθεί για τις ανελαστικές αναλύσεις. Σε κάθε περίπτωση η ανελαστική στατική ανάλυση οδηγεί σε ακριβέστερη εκτίμηση της ικανότητας της κατασκευής σε σχέση με τις ελαστικές μεθόδους, αρκεί η εφαρμογή των προσομοιωμάτων αλλά και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων να γίνεται προσεκτικά για να μην υπάρξουν στη συνέχεια λανθασμένα συμπεράσματα.

Η μη-γραμμική δυναμική ανάλυση είναι πολύπλοκη και κατ' επέκταση ακριβή μέθοδος. Όσον αφορά την εφαρμογή της ισχύουν όλα όσα αναφέρθηκαν και για τη στατική ανελαστική ανάλυση. Η μόνη διαφορά είναι ότι για την περιγραφή της συμπεριφοράς των μελών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πλήρης απόκριση τους υπό ανακυκλιζόμενες εντάσεις και η σεισμική απειλή εκφράζεται από φυσικά ή τεχνικά επιταχυνσιογραφήματα.

Τα υπολογιζόμενα εντατικά μεγέθη του φορέα αποτελούν ορθολογιστικές προσεγγίσεις των αναμενόμενων κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, επειδή το μοντέλο προσομοίωσης και η μεθοδολογία προσεγγίζουν με μεγάλη αμεσότητα την ανελαστική απόκριση του φορέα κατά τη διάρκεια του σεισμικού φαινομένου. Η δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς περιορισμούς σε οποιοδήποτε φορέα ή έδαφος θεμελίωσης. Παρόλα αυτά η κατασκευή μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητη στα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιούνται, συνεπώς, η ανάλυση χρονοϊστορίας πρέπει να επαναλαμβάνεται για περισσότερες από μια εδαφικές διεγέρσεις.

Ενώ η ανελαστική δυναμική ανάλυση είναι η ακριβέστερη μέθοδος ανάλυσης, χρησιμοποιείται σε περιορισμένο βαθμό στο σχεδιασμό των κατασκευών, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους της ανάγκης προσεκτικής επιλογής επιταχυνσιογραφημάτων και της δυσκολίας στην επεξεργασία του μεγάλου όγκου των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς ως σημείο αναφοράς και εργαλείο αξιολόγησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων μεθόδων ανάλυσης και κυρίως της ανελαστικής στατικής μεθόδου.

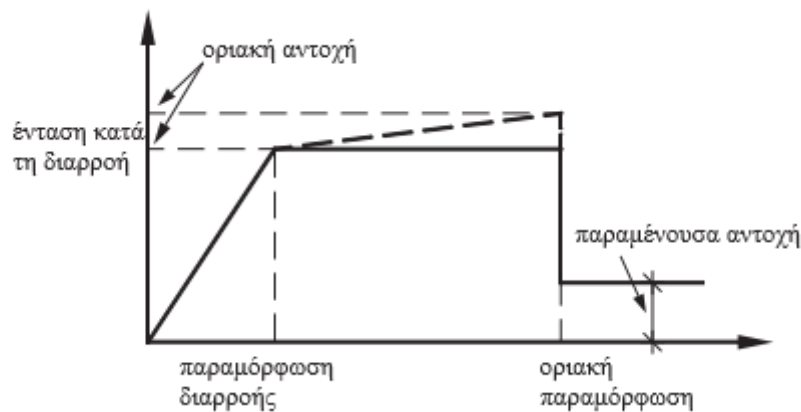
Από τα προαναφερθέντα διαπιστώνουμε ότι μεταξύ της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (pushover) και της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρονοϊστορίες υπάρχουν σημαντικές ομοιότητες αλλά και ουσιώδεις διαφορές σχετικά με την εφαρμογή τους στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών και με την άμεση ή έμμεση σύγκριση των τιμών που παρέχουν και οι δύο. Οι δυνατότητες σύγκρισης μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων ανάλυσης έχουν ως εξής [1]:

- 1) Σύγκριση των τεμνουσών βάσης οι οποίες αντιστοιχούν σε δεδομένη τιμή μετακίνησης της οροφής του κτιρίου και το αντίστροφο.
- 2) Σύγκριση των μετακινήσεων των ορόφων οι οποίες αντιστοιχούν σε δεδομένη τιμή της τέμνουσας βάσης και το αντίστροφο.

- 3) Σύγκριση του αριθμού των πλαστικών αρθρώσεων που έχουν σχηματιστεί στο κτίριο για δεδομένη τέμνουσα βάση και το αντίστροφο.

1.3 ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER).

Στόχος είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων, που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο βρίσκεται σε σεισμική δράση, για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός και η σύγκρισή τους με τις επιτρεπόμενες τιμές που προσδιορίζονται με βάση τη στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας και τις ικανότητες των μελών που προκύπτουν από τα προσομοιώματα για τη συμπεριφορά τους. Εκεί που εμφανίζεται ανελαστική συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη η σχέση έντασης-παραμόρφωσης μέσω καμπυλών μονότονης φόρτισης μέχρι την αστοχία, οι οποίες περιλαμβάνουν τη φάση εξασθένησης της αντίστασης του στοιχείου αλλά και την παραμένουσα αντίστασή τους (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Θεωρητικές καμπύλες εντατικού μεγέθους – παραμόρφωσης μέλους [12].

Το προσομοίωμα του κτιρίου υποβάλλεται σε οριζόντια φορτία καταμεμημένα κατά τρόπο ανάλογο προς τις αδρανειακές δυνάμεις του σεισμού, τα οποία αυξάνονται μονότονα μέχρι το βήμα όπου κάποιο δομικό στοιχείο εξαντλεί τη φέρουσα ικανότητά του. Από την ανάλυση του προσομοιώματος προκύπτει η καμπύλη αντίστασης του κτιρίου, η οποία χαράσσεται σε όρους τέμνουσας βάσης V_b – μετακίνησης δ . Η καμπύλη αυτή είναι η βάση για τους ελέγχους ικανοποίησης των κριτήριων επιτελεστικότητας. Η σχέση τέμνουσας βάσης – μετατόπισης αντικαθιστάται από μια διγραμμική καμπύλη από την οποία προσδιορίζεται η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία K_{el} και η δύναμη διαρροής V_y . Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η αντίστοιχη ελαστική ιδιοπερίοδος της κατασκευής, η οποία χρησιμοποιείται για να βρεθεί η τιμή της ψευδοεπιτάχυνσης Φ_{el} που εισάγεται στον υπολογισμό της στοχευόμενης μετατόπισης δ_i . Με αυτόν τον τρόπο καταλαβαίνουμε ότι η στοχευόμενη μετακίνηση δ_i επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας αποτίμησης. Μπορούμε επίσης να την υπολογίσουμε και με άλλες μεθόδους που βασίζονται κυρίως στα φάσματα απαίτησης, οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδικασίες για τη διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας.

Επιπλέον η (pushover) μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο της στατικής συμπεριφοράς νέων και υπαρχόντων κτιρίων με τους ακόλουθους στόχους:

- α) για τον έλεγχο ή την αναθεώρηση των τιμών του λόγου υπεραντοχής α_u/α_1 .

- β) για την εκτίμηση των αναμενόμενων πλαστικών μηχανισμών και της κατανομής των βλαβών
- γ) για την αποτίμηση της στατικής συμπεριφοράς υπαρχόντων ή ανασχεδιαζόμενων κτιρίων για τους σκοπούς του EN 1998-3
- δ) ως εναλλακτική λύση αντί της μελέτης που βασίζεται σε γραμμική-ελαστική ανάλυση που χρησιμοποιεί τον συντελεστή συμπεριφοράς q . Στην περίπτωση αυτή, η μετακίνηση-στόχος πρέπει να χρησιμοποιείται ως βάση της μελέτης.

Κτίρια που δεν ικανοποιούν τα κριτήρια κανονικότητας θα μελετώνται χρησιμοποιώντας χωρικό προσομοίωμα. Επιτρέπεται να εκτελούνται δυο ανεξάρτητες αναλύσεις με οριζόντια φορτία που εφαρμόζονται σε μια μόνον διεύθυνση. Αντίθετα για κτίρια που ικανοποιούν τα κριτήρια κανονικότητας η ανάλυση μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας δυο επίπεδα προσομοιώματα, ένα για κάθε κύρια οριζόντια διεύθυνση.

Για κτίρια από τοιχοποιία μικρού ύψους, στα οποία η συμπεριφορά των φερόντων τοίχων κυριαρχείται από την διάτμηση, κάθε όροφος μπορεί να αναλυθεί ανεξάρτητα. Αυτό συμβαίνει εάν το πλήθος των ορόφων είναι τρεις ή μικρότερο και εάν ο μέσος λόγος όψεως (ύψος προς πλάτος) των φερόντων τοίχων είναι μικρότερος από 1,0.

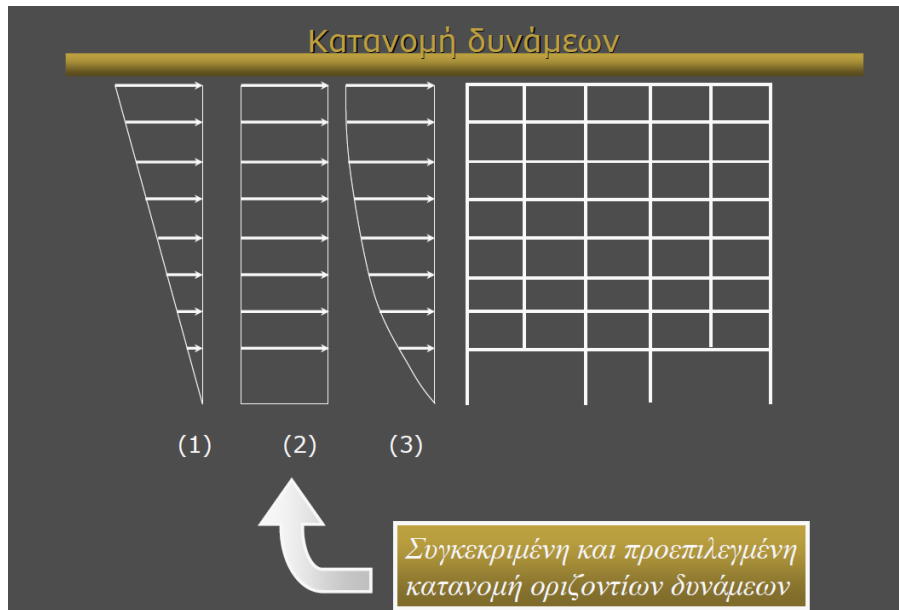
1.3.1 Περιπτώσεις οριζόντιας φόρτισης.

Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ενδεικτικά, προτείνονται τρεις περιπτώσεις οριζόντιας φόρτισης και είναι οι ακόλουθες (Σχ. 1.2):

- Ιδιομορφική κατανομή: Προκύπτει ως γινόμενο των μαζών κάθε στάθμης επί την ιδιομορφική επιτάχυνση αντιστοιχούσα στην κύρια για την υπόψη διεύθυνση ιδιομορφή
- Ομοιόμορφη κατανομή: Προκύπτει από την εφαρμογή ομοιόμορφης επιτάχυνσης καθ' ύψος, επομένως η φόρτιση είναι ανάλογη της κατανομής των μαζών
- Ανάλογα με τις τέμνουσες: Προκύπτει από την κατανομή καθ' ύψος των τεμνουσών ορόφων που υπολογίζεται με ελαστική δυναμική φασματική ανάλυση του φορέα.

Πρέπει να εφαρμόζονται τουλάχιστον δύο από τις παραπάνω καθ' ύψος κατανομές, και να συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Τα οριζόντια φορτία θα εφαρμόζονται στο προσομοίωμα στις θέσεις των μαζών. Η τυχηματική εκκεντρότητα λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 1.2 Ενδεικτικές εναλλακτικές κατανομές για τα οριζόντια φορτία που εφαρμόζονται σε στατικές ανελαστικές αναλύσεις [9].

1.3.2 Καμπύλη αντίστασης.

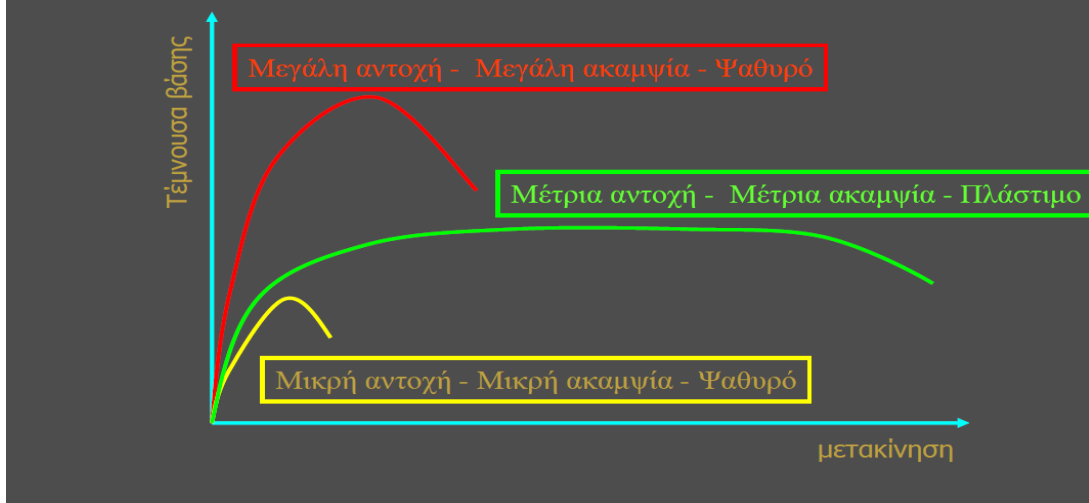
Η σχέση μεταξύ της τέμνουσας δύναμης βάσεως και της μετακίνησης-ελέγχου καθορίζεται από μη-γραμμική στατική ανάλυση για τιμές μετακίνησης – ελέγχου μεταξύ μηδέν και της τιμής που αντιστοιχεί στο 150% της μετακίνησης –στόχου και ονομάζεται καμπύλη αντίστασης ή καμπύλη ικανότητας της κατασκευής. Η καμπύλη ικανότητας προκύπτει διαφορετική ανάλογα με τη συμπεριφορά της κατασκευής και η μορφή της μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισής της, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Είναι επομένως ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για το μελετητή-μηχανικό.

Η μετακίνηση ελέγχου μπορεί να ληφθεί στο κέντρο μάζας του δώματος του κτιρίου. Το δώμα ορόφου σε εσοχή δεν πρέπει να θεωρείται δώμα του κτιρίου.

1.3.3 Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης.

Σύμφωνα με τα πρώτα σχέδια κανονισμών τα οποία αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ για την ενίσχυση αλλά και την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών προτάθηκαν δυο διαδικασίες για τον προσδιορισμό της τιμής της στοχευόμενης μετακίνησης δ_i . Η πρώτη μέθοδος που είναι γνωστή σαν μέθοδος των φασμάτων ικανότητας (capacity spectrum method) αναπτύχθηκε και παρουσιάσθηκε στο κείμενο του ATC-40. Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται μέθοδος των συντελεστών (coefficient method). Σε αυτήν η στοχευόμενη μετακίνηση προκύπτει από την μετακίνηση ενός ισοδύναμου ελαστικά αποκρινόμενου

Καμπύλη ικανότητας (καμπύλη pushover)

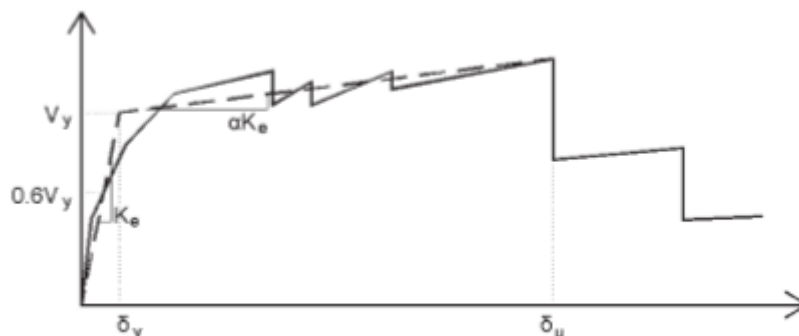


Σχήμα 1.3 Ενδεικτικές καμπύλες αντίστασης για κατασκευές με διαφορετικά χαρακτηριστικά [9].

μονοβάθμιου συστήματος, πολλαπλασιασμένη με συντελεστές που δείχνουν τη σχέση του απλοποιημένου αυτού προσομοιώματος με το πολυβάθμιο κτίριο. Η συγκεκριμένη διαδικασία αρχικά προτάθηκε από το FEMA 356 στη συνέχεια όμως επικράτησε και υιοθετείται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Αυτό συνέβη διότι είναι εύκολη στην εφαρμογή της αλλά και στα προβλήματα αλγοριθμικής που παρατηρήθηκαν στη πρώτη μέθοδο, η οποία μερικές φορές οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Η διαδικασία που ακολουθεί η μέθοδος των συντελεστών είναι η ακόλουθη [12]:

Σε πρώτο στάδιο χαράσσεται η εξιδανικευμένη καμπύλη αντίστασης, η οποία προκύπτει από τη διγραμμικοποίηση της σχέσης τέμνουσας βάσης – μετακίνησης που προκύπτει από την ανελαστική στατική ανάλυση του κτιρίου. Οι δυο ευθείες που φτιάχνουν την ιδανική καμπύλη προσδιορίζονται γραφικά σύμφωνα με τα εμβαδά των τμημάτων που προκύπτουν πάνω και κάτω από τις τομές της εξιδανικευμένης και της πραγματικής καμπύλης (Σχ. 1.4).



Σχήμα 1.4 Εξιδανίκευση της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής με διγραμμική καμπύλη [3].

Ως K_e ορίζεται η αρχική κλίση που προκύπτει ως η επιβατική δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε δύναμη ίση με 60% της δύναμης διαρροής V_y η οποία δίνεται από την τομή των ευθειών που προαναφέρθηκαν. Η κλίση του δευτέρου, ανελαστικού κλάδου της καμπύλης προέρχεται από την ευθεία που διέρχεται από το σημείο της καμπύλης αντίστασης που αντιστοιχεί στη μετακίνηση αστοχίας (δ_u). Η ισοδύναμη ελαστική ιδιοπερίοδος T_e του εξιδανικευμένου συστήματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_e = T_0 \sqrt{\frac{K_0}{K_e}} \quad (1.1)$$

Στην προηγούμενη εξίσωση, T_0 ονομάζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος και K_0 η αντίστοιχη δυσκαμψία για το κτίριο στην υπόψη διεύθυνση.

Τελικά, η στοχευόμενη μετατόπιση δ_t προσδιορίζεται ως το γινόμενο της ελαστικής μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή, του οποίου δυναμικά χαρακτηριστικά προσδιορίζονται από την διγραμμική καμπύλη αντίστασης, με κατάλληλους συντελεστές οι οποίοι χρησιμοποιούνται ώστε να ληφθεί υπόψη η σχέση εξιδανικευμένου και πραγματικού συστήματος καθώς και άλλα φαινόμενα όπως η παλαιότητα και τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης. Η σχέση είναι η ακόλουθη (KAN.ΕΠΕ.,2012):

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 \left(\frac{T_e^2}{4\pi^2} \right) \Phi_e \quad (1.2)$$

Στην παραπάνω σχέση, Φ_e η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο της κατασκευής T_e και C_0 , C_1 , C_2 και C_3 διορθωτικοί συντελεστές που ορίζονται όπως παρακάτω:

C_0 : Συντελεστής που συσχετίζει τη φασματική μετακίνηση του ισοδύναμου ελαστικού φορέα με δυσκαμψία K_e με την πραγματική μετακίνηση, δ_t της κορυφής του ελαστοπλαστικά αποκρινόμενου φορέα.

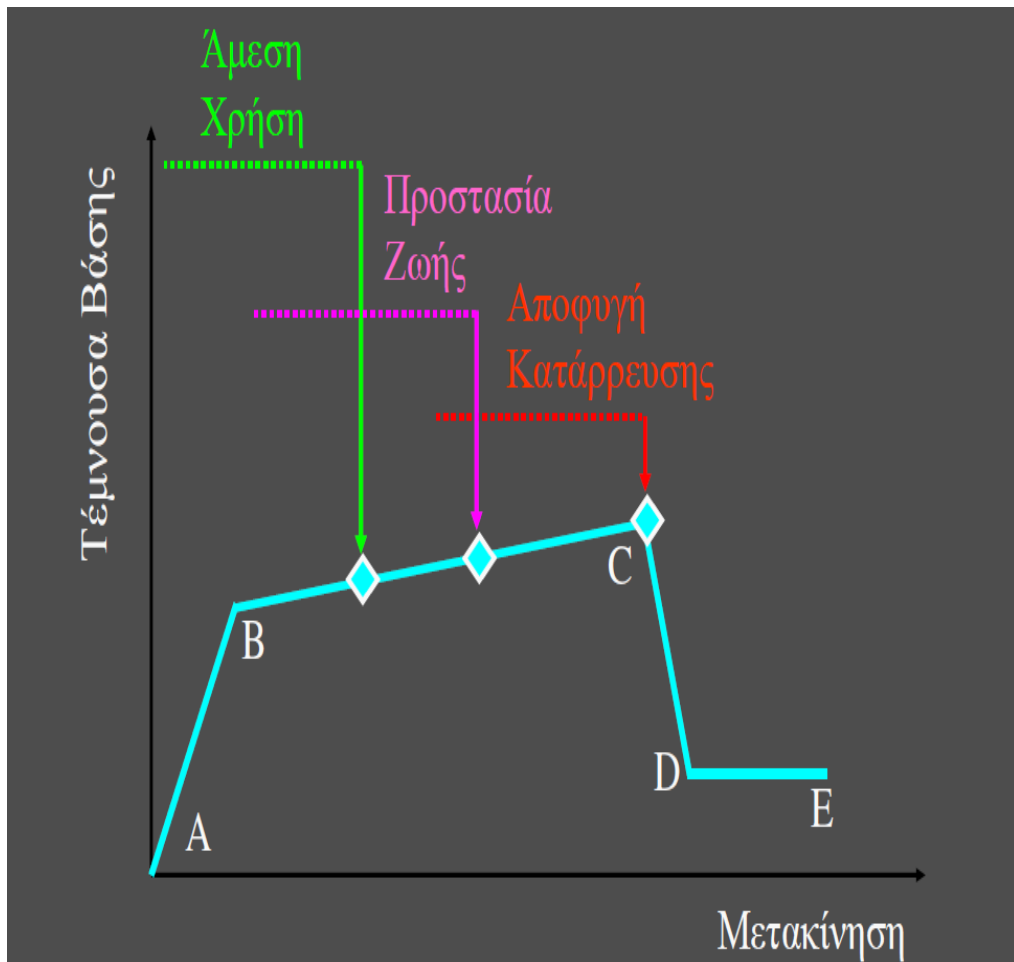
C_1 : $\delta_{inel}/\delta_{el}$, δηλαδή το πηλίκο της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης ενός κτιρίου προς την αντίστοιχη ελαστική.

C_2 : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του βρόχου υστέρησης στη μέγιστη μετακίνηση.

C_3 : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων 2^{ης} τάξης (P-Δ).

Για όλους αυτούς τους συντελεστές δίνονται τιμές ή εκφράσεις υπολογισμού και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. αλλά και στο FEMA 356. Η διαδικασία αποτίμησης ολοκληρώνεται με τους ελέγχους εντατικών μεγεθών ή παραμορφώσεων των μελών για μετακίνηση του κόμβου ελέγχου ίση με δ_t και για τη στάθμη επιτελεστικότητας (δηλαδή για το επίπεδο βλαβών) της κατασκευής που λαμβάνεται υπόψιν. Μάλιστα με βάση την τιμή της μετακίνησης όπου στα μέλη παρατηρείται υπέρβαση των παραμορφώσεων που αντιστοιχούν σε κάποιο

επίπεδο επιτελεστικότητας, μπορεί κανείς να ορίσει τις αντίστοιχες στοχευόμενες μετακινήσεις στην ιδανική καμπύλη αντίστασης της κατασκευής (Σχ. 1.5).



Σχήμα 1.5 Στοχευόμενες μετατοπίσεις για διάφορα επίπεδα επιτελεστικότητας σε εξιδανικευμένη καμπύλη αντίστασης [9].

Η απλότητα της διαδικασίας είναι εμφανής παρόλο αυτά δεν υπάρχει κοινή απεικόνιση της απαίτησης με την ικανότητα της κατασκευής και έτσι περιορίζεται η δυνατότητα συνολικής επισκόπησης της συμπεριφοράς του φορέα σε σχέση με τη ζητούμενη. Το γεγονός αυτό μπορεί να μην επηρεάζει τη διαδικασία αποτίμησης, είναι όμως σημαντικό για την επιλογή του κατάλληλου σχήματος επέμβασης, όπου η εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων της αποτίμησης είναι κρίσιμη.

Η διαδικασία αποτίμησης με βάση την ανελαστική στατική ανάλυση στον ATC-40 βασίζεται στη μέθοδο του φάσματος ικανότητας η οποία περιγράφεται στα παρακάτω βήματα [3]:

1. Προσδιορισμός της σχέσης της πλευρικής μετατόπισης της κατασκευής με την επιβαλλόμενη δύναμη, δηλαδή της καμπύλης αντίστασης του κτιρίου μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.
2. Μετατροπή της πιο πάνω καμπύλης σε φάσμα (ή διάγραμμα) ικανότητας με βάση τις σχέσεις:

$$A = \frac{V_b}{M_l} \quad (1.3)$$

$$D = \frac{u_N}{\Gamma_l \Phi_{Nl}} \quad (1.4)$$

$$\Gamma_l = \frac{\sum_{i=1}^n m_j \Phi_{jl}}{\sum_{i=1}^n m_j \Phi_{jl}^2} \quad (1.5)$$

$$M_l = \left(\sum_{j=1}^N m_j \Phi_{jl} \right)^2 / \sum_{j=1}^N m_j \Phi_{jl}^2 \quad (1.6)$$

Στις παραπάνω σχέσεις:

m_j , Φ_j η μάζα και ιδιομορφική συνιστώσα κάθε ορόφου

N ο αριθμός των ορόφων

A, D οι φασματικές συνιστώσες της επιτάχυνσης και της μετατόπισής αντίστοιχα.

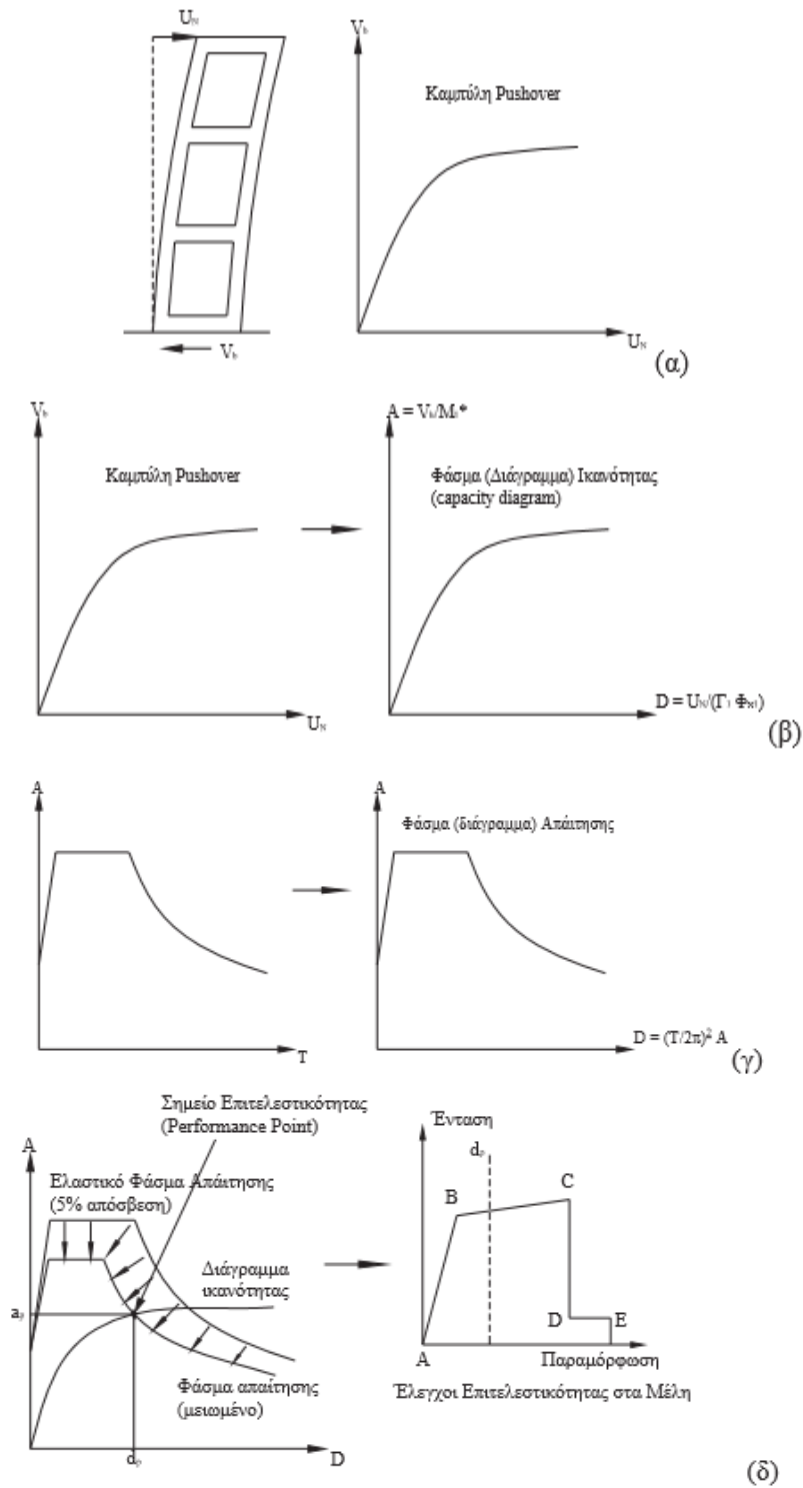
3. Μετατόπιση του ελαστικού φάσματος απαίτησης από την κλασική μορφή ψευδοεπιτάχυνσης –ιδιοπεριόδου στη μορφή $A-D$, όπου η φασματική μετατόπιση D προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$D = \frac{T^2}{4\pi^2} A \quad (1.7)$$

4. Σχεδιασμός των διαγραμμάτων απαίτησης και ικανότητας στο ίδιο σύστημα αξόνων και προσδιορισμός της απαιτούμενης μετακίνησης μέσω της θεωρητικής ισοδύναμου γραμμικού συστήματος με κατάλληλες τιμές της ιδιοπεριόδου και της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης, οι οποίες υπολογίζονται για να ληφθούν υπόψη η κατανάλωση ενέργειας λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς της ανελαστικής κατασκευής.
5. Μετατόπιση της απαιτούμενης μετακίνησης σε μετατόπιση οροφής της κατασκευής.

Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε παρουσιάζεται στο Σχ. 1.7.

Επειδή όμως έχουν παρουσιαστεί προβλήματα του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε απατηλά αποτελέσματα προτάθηκαν νέα σχέδια κανονισμών (ATC-55, 2006) βελτιωμένες εκδοχές της διαδικασίας. Παράλληλα αναπτύχθηκε και μια ακόμη μέθοδος η οποία βασίζεται στη χρήση ανελαστικών φασμάτων και όπως συμπεραίνουμε και από τις αναλύσεις των Chopra & Goel, 1999 οδηγούμαστε σε ακριβείς λύσεις όσον αφορά τη τιμή της μετακίνησης δ_t , ενώ παράλληλα διατηρείται η γραφική προσέγγιση της αρχικής μεθόδου του ATC-40 που είναι χρήσιμη για την διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το βαθμό ανεπάρκειας και την απαιτούμενη επέμβαση στην κατασκευή. Σύμφωνα με τη μέθοδο των ανελαστικών φασμάτων απαίτησης, η λογική του ισοδύναμου ελαστικού συστήματος και της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης, η οποία υιοθετείται ώστε να προκύψει το μειωμένο φάσμα που εκφράζει τις απαιτήσεις στη μέθοδο των φασμάτων ικανότητας, <<αντικαθίσταται>> από τη χρήση ανελαστικών φασμάτων απαίτησης. Τα φάσματα αυτά μπορούν να προκύψουν από απλές σχέσεις, όπου η ανελαστικότητα λαμβάνεται υπόψη μέσω του συνολικού δείκτη πλαστιμότητας μ της κατασκευής. Τέτοιες σχέσεις είναι οι ακόλουθες [12]:



Σχήμα 1.7 Η μέθοδος του Φάσματος ικανότητας (α) καμπύλη αντίστασης (β) μετατροπή σε φάσμα ικανότητας (γ) μετατροπή του ελαστικού φάσματος απόκρισης σε μορφή A-D (δ) υπολογισμός απαιτούμενης μετακίνησης [12].

$$D = \mu \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 A_y \quad (1.8)$$

$$A_y = \frac{A}{q} \quad (1.9)$$

όπου:

D η φασματική μετατόπιση (ανελαστική τιμή)

A_y η φασματική επιτάχυνση στη διαρροή

μ ο συνολικός δείκτης πλαστιμότητας

q ο δείκτης συμπεριφοράς που υπολογίζεται σαν συνάρτηση του μ σύμφωνα με τις σχέσεις (KAN.ΕΠΕ.,2012):

$$q = \mu_\delta, \text{ αν } T \geq T_2 \quad (1.10)$$

$$q = 1 + \frac{T}{T_2}(\mu_\delta - 1), \text{ αν } T \leq T_2 \quad (1.11)$$

όπου T η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου στην υπόψη διεύθυνση και T_2 η ιδιοπερίοδος στην αρχή του φθίνοντος κλάδου του φάσματος επιταχύνσεων. Από τις προηγούμενες σχέσεις προκύπτουν φάσματα ίσης πλαστιμότητας, με τη χρήση των οποίων υπολογίζεται η ζητούμενη μετακίνηση στόχος δ_i (η φασματική τιμή της) άμεσα, ως το σημείο τομής του εξιδανικευμένου διγραμμικού φάσματος ικανότητας με συγκεκριμένο ανελαστικό φάσμα απαίτησης σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία [12]:

1. Σχεδιασμός του ελαστικού φάσματος απαίτησης.
2. Μετατόπιση της καμπύλης αντίστασης σε φάσμα ικανότητας και σχεδιασμό της με το ίδιο σύστημα αξόνων με το ελαστικό φάσμα.
3. Υπολογισμός και σχεδίαση των ανελαστικών φασμάτων απαίτησης για διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μ .
4. Εύρεση του σημείου τομής του εξιδανικευμένου διγραμμικού φάσματος ικανότητας με τα ανελαστικά φάσματα. Για κάθε σημείο οριζοτολογείται ο δείκτης πλαστιμότητας $\mu = d_{pi}/d_y$. Το ζητούμενο σημείο επιτελεστικότητας (μετακίνηση στόχος) είναι αυτό για το οποίο προσδιοριζόμενη τιμή του μ ταυτίζεται με αυτήν του αντίστοιχου ανελαστικού φάσματος απαίτησης.

Συμπερασματικά διαπιστώνουμε ότι η διαδικασία αποτίμησης της σεισμικής ικανότητας ενός κτιρίου με χρήση της στατικής ανελαστικής ανάλυσης αποτελείται από τρεις ενότητες υπολογισμών. Η πρώτη περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της σχέσης τέμνουσας βάσης –μετατόπισης ελέγχου, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραδοχές προσομοίωσης που λαμβάνονται για την συμπεριφορά των μελών. Η δεύτερη αφορά τον υπολογισμό της μετατόπισης στόχου, για την οποία διατίθενται οι εναλλακτικές μέθοδοι, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Η τρίτη ενότητα περιλαμβάνει τους ελέγχους μελών με βάση τα κριτήρια επιτελεστικότητας, όπου πάλι κρίσιμες είναι οι παραδοχές προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων. Όσον αφορά τον προσδιορισμό της στοχευόμενης μετατόπισης, οι προτεινόμενες μέθοδοι δε διαφέρουν ως προς την ακρίβειά τους. Αντίθετα στην περίπτωση των προσομοιωμάτων συμπεριφοράς, παρατηρούνται διαφορές όσον αφορά τις τιμές της παραμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στο διάγραμμα έντασης-παραμόρφωσης. Έτσι απαιτείται η διερεύνηση της επίδρασης των παραδοχών που λαμβάνονται κατά τους υπολογισμούς αυτούς στο τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης.

Για τον υπολογισμό της στοχευόμενης μετακίνησης, μια Τρίτη διαδικασία προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8. Στα πλαίσια της διαδικασίας αυτής ο Ευρωκώδικας 8 επιπλέον προβλέπει [4]:

- Όταν ο λόγος υπεραντοχής (α_u/α_1) καθορίζεται από μη-γραμμική στατική ανάλυση, πρέπει να χρησιμοποιείται η μικρότερη τιμή του λόγου υπεραντοχής που προκύπτει από τις δύο κατανομές οριζόντιων φορτίων.
- Ο πλαστικός μηχανισμός θα προσδιορίζεται και για τις δύο εφαρμοζόμενες κατανομές οριζόντιων φορτίων. Οι πλαστικοί μηχανισμοί θα πρέπει να είναι συμβατοί με τους μηχανισμούς στους οποίους βασίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς q στην μελέτη.
- Τέλος η μετακίνηση στόχος θα ορίζεται ως η σεισμική απαίτηση σε όρους μετακίνησης που προκύπτει απ' το ελαστικό φάσμα απόκρισης για ένα ισοδύναμο σύστημα μας ελευθερίας κινήσεως.

Η σχέση μεταξύ των ανοιγμένων οριζόντιων δυνάμεων \bar{F}_i και των ανοιγμένων μετακινήσεων Φ_i έχει ως εξής:

$$\bar{F}_i = m_i \Phi_i \quad (1.13)$$

όπου m_i είναι η μάζα του ορόφου i και οι μετακινήσεις είναι ανοιγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε $\Phi_n=1$, όπου n είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί στον όροφο ελέγχου και συνήθως αναφερόμαστε στον ανώτερο όροφο.

Ακολούθως γίνεται μετατροπή σε ισοδύναμο Σύστημα Ενόσ Βαθμού Ελευθερίας. Η μάζα ισοδύναμου ΣΕΒΕ, m^* δίνεται από τον τύπο:

$$m^* = \sum m_i \Phi_i = \sum \bar{F}_i \quad (1.14)$$

και ο συντελεστής μετατροπής δίνεται από την σχέση:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{\sum \bar{F}_i}{\sum \left(\frac{\bar{F}_i^2}{m_i} \right)} \quad (1.15)$$

Η δύναμη F^* και η μετακίνηση d^* του ισοδύναμου ΣΕΒΕ υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad (1.16)$$

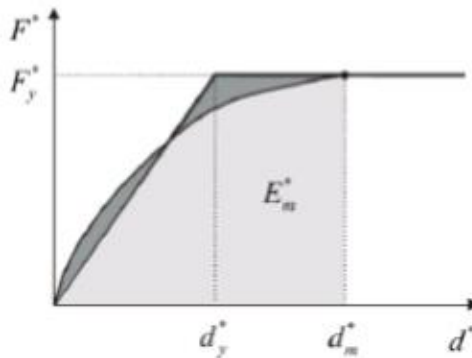
$$d^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad (1.17)$$

όπου F_b και d_n είναι, αντίστοιχα, η τέμνουσα δύναμη βάσης και η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου του πλήρους μοντέλου πολλών βαθμών ελευθερίας.

Στη συνέχεια προσδιορίζεται η ιδεατή πλήρης ελαστοπλαστική σχέση δύναμης – μετακίνησης (Σχ. 1.8). Η δύναμη διαρροής F_y^* , που εκφράζει την οριακή αντοχή του ιδεατού συστήματος ισούται με τη τέμνουσα δύναμη βάσεως στη δημιουργία του πλαστικού μηχανισμού. Η μετακίνηση διαρροής d_y^* του ιδεατού ΣΕΒΕ δίνεται από το τύπο:

$$d_y^* = 2 \left[d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right] \quad (1.18)$$

όπου E_m^* είναι η πραγματική ενέργεια παραμόρφωσης έως τη δημιουργία του πλαστικού μηχανισμού.



Σχήμα 1.8 Προσδιορισμός της ιδεατής πλήρους ελαστοπλαστικής σχέσης δύναμης – μετακίνησης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 [4].

Με βάση την ιδανική καμπύλη, η περίοδος T^* του ιδεατού ισοδύναμου ΣΕΒΕ προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} \quad (1.19)$$

Τελικά, η σχέση για το προσδιορισμό της μετακίνησης-στόχου φορέα με περίοδο T^* είναι η εξής:

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (1.20)$$

όπου $S_e(T^*)$ είναι η τιμή του ελαστικού φάσματος απόκρισης επιτάχυνσης στην περίοδο T^* .

Για τον προσδιορισμό της μετακίνησης-στόχος σε φορείς στην περιοχή βραχέων περιόδων και σε φορείς στις περιοχές μεσαίων και μακρών περιόδων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εκφράσεις:

α) $T^* < T_C$ (περιοχή βραχέων περιόδων):

Εάν $F_y^*/m^* \geq S_e(T^*)$, η απόκριση είναι ελαστική και επομένως:

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (1.21)$$

Εάν $F_y^*/m^* < S_e(T^*)$ η απόκριση είναι μη-γραμμική και

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*} \right) \geq d_{et}^* \quad (1.21)$$

όπου q_u είναι ο λόγος της επιτάχυνσης φορέα με απεριόριστα ελαστική συμπεριφορά $S_e(T^*)$ προς αυτήν ενός φορέα με περιορισμένη αντοχή F_y^*/m^* .

$$q_u = \frac{S_e(T^*)m^*}{F_y^*} \quad (1.22)$$

β) $T^* > T_C$ (περιοχή μεσαίων και μακρών περιόδων)

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (1.23)$$

Η περίοδος T^* αντιστοιχεί στην πολική ακτίνα από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων έως το σημείο του ελαστικού φάσματος απόκρισης που καθορίζεται από συντεταγμένες $d^* = S_e(T^*)(T^*/2\pi)^2$ και $S_e(T^*)$.

1.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της στατικής ανελαστικής ανάλυσης.

Τα πλεονεκτήματα της ανάλυσης pushover έχουν ως εξής [8]:

Σε σχέση με τις ελαστικές μεθόδους (ισοδύναμη στατική/δυναμική):

- Σαφής προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς.
- Πιο πολύ βασισμένη στις μετατοπίσεις.
- Συμβατό στον σχεδιασμό με κριτήρια επιτελεστικότητας.

Σε σχέση με την ανελαστική δυναμική ανάλυση:

- Απλή στη χρήση.
- Απλή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- Λιγότερο χρονοβόρα/δαπανηρή.

Τα μειονεκτήματά της ανάλυσης pushover είναι τα ακόλουθα [8]:

- Δεν υπάρχει στέρεο θεωρητικό υπόβαθρο.
- Απώλεια ακρίβειας σε κατασκευές με σημαντικές περισσότερες από μία ιδιομορφές.
- Δύσκολα προσομοιώνονται δομήματα με μη κανονικότητες στο χώρο και έντονα στρεπτικά φαινόμενα.

- Η σταδιακή μεταβολή της ακαμψίας, των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, των ιδιοπεριόδων και της αντίστοιχης φασματικής απόκρισης δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη.
- Λαμβάνει υπόψη μόνο το οριζόντιο σεισμικό φορτίο.
- Αγνοεί κινητική ενέργεια και απόσβεση της σεισμικής φόρτισης.
- Αγνοεί τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης και τη συσσώρευση σεισμικής ενέργειας.

Πολλά από τα μειονεκτήματα αυτά σχετίζονται και με τη διαφορά που έχει η οριζόντια φόρτιση μιας ανάλυσης pushover από την «πραγματική σεισμική φόρτιση»:

- Στη PUSHOVER το φορτίο αυξάνεται μονοτονικά.
- Ο σεισμός δημιουργεί δυνάμεις που μεταβάλλονται συνεχώς σε μέγεθος και διεύθυνση κατά την διάρκεια της διέγερσης.
- Στη PUSHOVER η φόρτιση είναι προκαθορισμένη.
- Η σεισμική φόρτιση είναι τυχαία και υπάρχει αλληλεξάρτηση σεισμικής απαίτησης και σεισμικής ικανότητας.

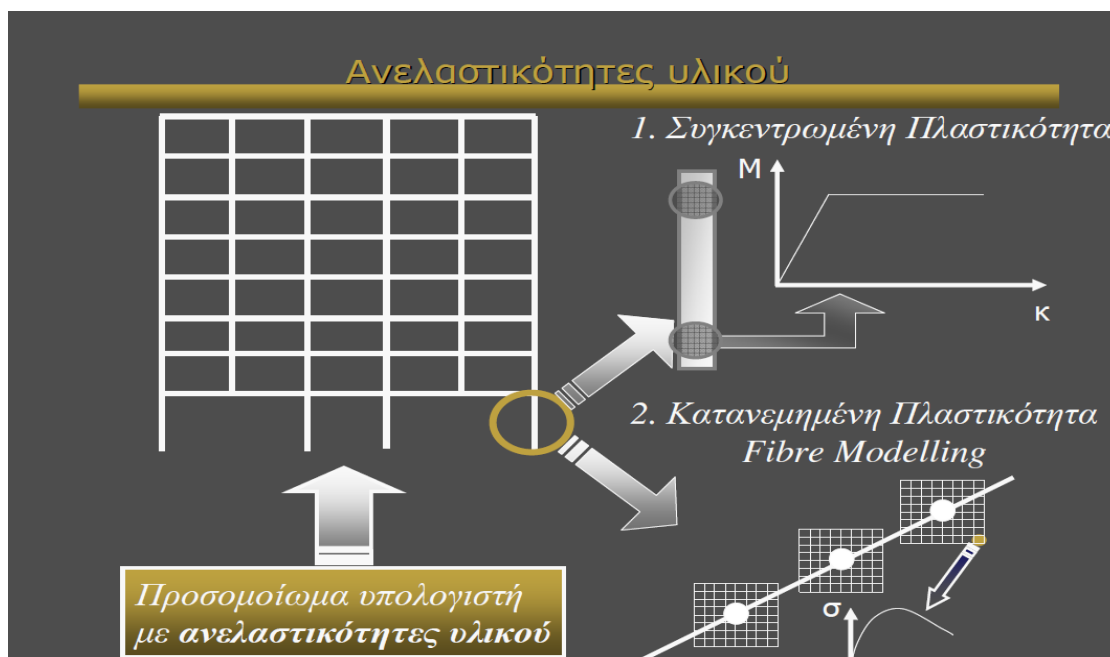
Συμπεραίνουμε ότι η στατική ανελαστική ανάλυση είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο που πρέπει όμως να χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες συνθήκες και με ιδιαίτερη προσοχή για να μην οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

0.1 ΓΕΝΙΚΑ.

Κατά την ανελαστική προσομοίωση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση στοιχείων δοκού - υποστυλώματος (beam – column elements) υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι θεώρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς: α) με συγκεντρωση πλαστικότητας ή β) με κατανεμημένη πλαστικότητα (Σχ. 2.1). Στην περίπτωση της συγκεντρωμένης πλαστικότητας οι πλαστικές αρθρώσεις θεωρούνται στα άκρα ενός ελαστικού μέλους και υπολογίζονται από τις σχέσεις ροπών – γωνιών στροφής των ακραίων διατομών για συγκεκριμένη αξονική δύναμη. Στην περίπτωση της κατανεμημένης πλαστικότητας είναι δυνατός ο σχηματισμός πλαστικών περιοχών σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του μέλους, ενώ παράλληλα η ανελαστικότητα εξετάζεται σε όρους τάσεων – ανοιγμένων παραμορφώσεων επιτρέποντας την αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης και ροπών.

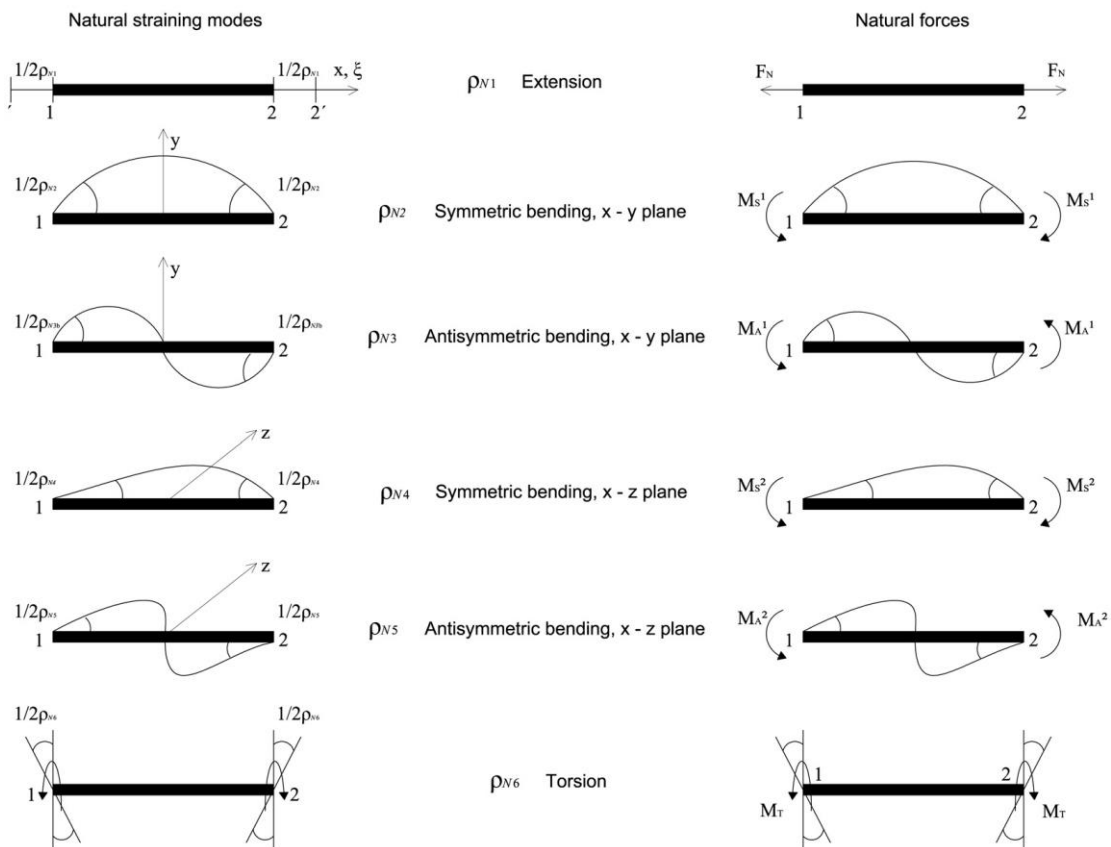
Το βασικό πλεονέκτημα του στοιχείου δυνάμεων είναι ότι απαιτείται μόνο ένα στοιχείο δοκού – υποστυλώματος για κάθε δομικό μέλος της κατασκευής (δοκός ή υποστύλωμα), προκειμένου να προσομοιωθεί η ανελαστική του συμπεριφορά, σε αντίθεση με τα στοιχεία μετατοπίσεων στα οποία απαιτείται πύκνωση του δικτύου στα σημεία όπου αναμένεται ο σχηματισμός πλαστικών περιοχών [3].



Σχήμα 2.1 Βασικά μοντέλα για την προσομοίωση της ανελαστικότητας σε συνήθεις κατασκευές [9].

Βασική αδυναμία των στοιχείων δοκού είναι ότι δεν μπορούν να προσεγγίσουν την συμπεριφορά στοιχείων που εμφανίζουν υψηλές διατμητικές τάσεις ή αστοχούν σε

διάτμηση πριν τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων. Στα πεπερασμένα στοιχεία δύο ή τριών διαστάσεων οι διατμητικές τάσεις υπολογίζονται κατευθείαν από τις συναρτήσεις Σχ. 2.2, στα στοιχεία δοκού όμως δεν υπάρχουν διατμητικές παραμορφώσεις (θεώρηση Euler- Bernoulli) ή είναι σταθερές για τα στοιχεία με διατμητικές παραμορφώσεις (θεώρηση Timoshenko). Αναλυτική περιγραφή της έρευνας των τελευταίων χρόνων στο συγκεκριμένο αντικείμενο έχει γίνει από την Ceresa (2007). Ο Petrangeli (1997) πρότεινε ένα στοιχείο δοκού – υποστυλώματος που λαμβάνει υπόψη τις διατμητικές παραμορφώσεις: ϵ_x και γ_{xy} υπολογίζονται από τις καταστατικές σχέσεις του στοιχείου, ενώ η εγκάρσια παραμόρφωση ϵ_y υπολογίζεται με ισορροπία μεταξύ των στρώσεων (fibers) χάλυβα και σκυροδέματος. Παρόμοια θεώρηση υπάρχει και από τον Saritas (2004) για την διατμητική ανάλυση πλαισίων από χάλυβα. Η Marini (2006) χρησιμοποίησε στοιχείο δοκού – υποστυλώματος με διατμητικές παραμορφώσεις, αλλά υιοθετώντας ξεχωριστό καταστατικό νόμο για τις διατμητικές τάσεις [7].



Σχήμα 2.2 Φυσικές μορφές παραμόρφωσης και φυσικές δυνάμεις τυπικών δοκών [10].

0.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ.

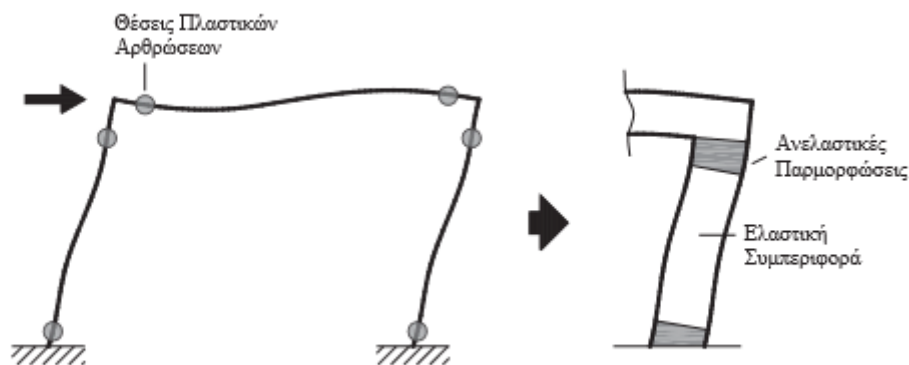
Η συμπεριφορά μιας κατασκευής που αποκρίνεται ελαστικά σε μια εξωτερική δράση περιγράφεται με ακρίβεια από την ελαστική θεωρία. Επομένως είναι δυνατή η κατασκευή λεπτομερών προσομοιωμάτων βάση των οποίων προβλέπεται η συμπεριφορά

κατασκευών με βασική προϋπόθεση πως θα παραμείνουν ελαστικές. Οι νέες κατασκευές δεν αναμένεται να συμπεριφερθούν ελαστικά, ιδιαίτερα για σεισμικές φορτίσεις αντίστοιχες με τον ισχυρό σεισμό βάσει του οποίου γίνεται ο σχεδιασμός του. Αντίθετα, προϋπόθεση του σχεδιασμού είναι η ανάπτυξη σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων στα μέλη, οι οποίες συμβάλουν στην «κατανάλωση» της ενέργειας που εισάγεται στην κατασκευή μέσω της σεισμικής διέγερσης. Είναι σκόπιμο στην αποτίμηση υφισταμένων κτιρίων πριν ή μετά την επέμβαση να λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα του υπό μελέτη κτιρίου να «καταναλώνει» ενέργεια μέσω των ανελαστικών παραμορφώσεων των μελών προκειμένου να προκύψουν ακριβή συμπεράσματα για την ικανότητα του. Θεωρείται γνωστό ότι, όσον αφορά τις ελαστικές μεθόδους, η ανελαστική συμπεριφορά των μελών της κατασκευής λαμβάνεται υπόψη έμμεσα μέσω της υιοθέτησης του δείκτη συμπεριφοράς q . Στις ανελαστικές αναλύσεις απαιτείται η άμεση προσομοίωση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων σε όλο το φάσμα της απόκρισής τους.

Κατά την επιβολή μιας αυξανόμενης έντασης σε μια κατασκευή, τα μέλη της σταδιακά αποκρίνονται και αναπτύσσουν ανελαστικές παραμορφώσεις. Η εμφάνιση των διαρροών συνδέεται με την αντοχή των μελών και την σχέση της με την αντίστοιχη ένταση σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του μέλους. Προφανώς, δεδομένου ότι η κατανομή των εντατικών μεγεθών κατά μήκος των δοκών και υποστυλωμάτων ενός κτιρίου που καταπονείται από τα κατακόρυφα φορτία του και τη δράση του σεισμού είναι γνωστή, είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι θέσεις όπου αναμένεται να αναπτυχθούν ανελαστικές παραμορφώσεις. Οι θέσεις αυτές μπορούν να εντοπιστούν στα άκρα (παρειές) των δοκών, στην κορυφή και στην βάση των υποστυλωμάτων.

Αρχικά ένα μέλος μπορεί να θεωρηθεί ότι διαρρέει στην ακραία διατομή του και αυτό συμβαίνει όταν η μέγιστη τιμή της έντασης στο συγκεκριμένο σημείο ξεπεράσει την αντίστοιχη αντοχή. Περαιτέρω αύξηση της έντασης οδηγεί σε υπέρβαση της αντοχής σε μεγαλύτερο τμήμα της ακραίας περιοχής του μέλους, όπου επεκτείνεται η ανάπτυξη των ανελαστικών παραμορφώσεων. Η λογική που παρουσιάστηκε αποτυπώνεται και στο σχεδιασμό νέων κατασκευών με την ύπαρξη κρίσιμων περιοχών σε δοκούς και υποστυλώματα, οι οποίες εκτείνονται σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τα άκρα (παρειές) των μελών και για τις οποίες λαμβάνονται αυξημένα μέτρα, με σκοπό να αντιμετωπιστούν οι αντίστοιχα αυξημένες απαιτήσεις παραμόρφωσης τους σε ακραίες περιπτώσεις σεισμικής έντασης (πύκνωση συνδετήρων).

Επομένως ένα μέλος μιας συνήθους κατασκευής που υποβάλλεται σε σεισμική φόρτιση αναμένεται να αναπτύξει ανελαστικές παραμορφώσεις σε περιοχές πεπερασμένου μήκους κοντά στα άκρα του. Εκτός των περιοχών αυτών η συμπεριφορά του μέλους εξακολουθεί να είναι ελαστική. Οι πεπερασμένου μήκους περιοχές στα άκρα ενός μέλους στα οποία αναπτύσσονται ανελαστικές παραμορφώσεις καλούνται πλαστικές αρθρώσεις (Σχ. 2.3).



Σχήμα 2.3 Θέσεις πιθανών πλαστικών αρθρώσεων σε μέλη απλής κατασκευής από σεισμική ένταση [6].

Στη λογική των πλαστικών αρθρώσεων βασίζεται η ανάπτυξη των προσομοιωμάτων συμπεριφοράς μελών τα οποία έχουν συμπεριληφθεί στα κανονιστικά σχέδια για την αποτίμηση και τις επεμβάσεις σε υφιστάμενα κτίρια. Γνωρίζοντας ότι θεωρητικά οι ανελαστικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται σε μικρού μήκους περιοχές στα άκρα των δομικών στοιχείων, για τις ανάγκες της ανάλυσης απαιτείται ο εντοπισμός αυτών των περιοχών στο προσομοίωμα του κτιρίου αλλά και η περιγραφή της συμπεριφοράς τους. Τελικά η κατανομημένη ανελαστικότητα προσομοιώνεται με χρήση ενός στροφικού ελατηρίου όποιο βρίσκεται στο μέσον της πλαστικής άρθρωσης και οι ιδιότητες του καθορίζονται από διαγράμματα έντασης - παραμόρφωσης.

Η μορφή του διαγράμματος είναι τέτοια, ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατότερο την περιβάλλουσα των βρόχων υστέρησης κατά την επιβολή ανακυκλιζόμενης έντασης στο υπόψιν μέλος. Για την ανάγκη της προσομοίωσης τελικά υιοθετείται ένα πολυγραμμικό διάγραμμα, με αρχικό ελαστικό κλάδο που εκτείνεται για μέλη σκυροδέματος μέχρι τη θεωρητική διαρροή της κρίσιμης διατομής και στη συνέχεια έναν ευθύγραμμο κλάδο που εκφράζει την ανελαστική απόκριση και εκτείνεται μέχρι τη θεωρητική αστοχία του μέλους, η οποία αντιστοιχεί σε απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας μεγαλύτερη του 20% της αρχικής.

Τα προσομοιώματα συμπεριφοράς που έχουν αναπτυχθεί παρέχουν εκφράσεις που καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό των ζευγών έντασης-παραμόρφωσης που απαιτούνται για την κατασκευή των διαγραμμάτων. Ειδικά για καμπτόμενα μέλη ιδιαίτερα διαδεδομένα είναι η περιγραφή της συμπεριφοράς σε όρους ροπών, M – καμπυλοτήτων, $(1/r)$, καθώς με γνωστούς τους νόμους τάσης-παραμόρφωσης των υλικών είναι σχετικά απλή η κατασκευή του διαγράμματος $M - (1/r)$ μέχρι την αστοχία και για σταθερή τιμή της αξονικής δύναμης. Ωστόσο σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος η καμπυλότητα χάνει το φυσικό της νόημα μετά τη ρηγμάτωση, λόγω της διακριτής φύσης της ρηγμάτωσης και του γεγονότος ότι ο λυγισμός των ράβδων και η θλιπτική αστοχία του απερίσφικτου ή του περισφιγμένου σκυροδέματος συμβαίνουν σε ένα πεπερασμένο μήκος του μέλους. Σκόπιμο είναι στις τιμές της παραμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στο διάγραμμα να λαμβάνεται υπόψιν η συνύπαρξη καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων, αλλά και φαινόμενα όπως η εξόλκευση των ράβδων οπλισμού. Για τον λόγο αυτό, στα σύγχρονα προσομοιώματα συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται μεγέθη όπως η

γωνία στροφής πλαστικής άρθρωσης (θ_{pl}) και η γωνία στροφής χορδής, τα οποία καλύπτουν τις προηγούμενες απαιτήσεις.

0.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ.

Έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω πως η συμπεριφορά της κρίσιμης περιοχής ενός δομικού στοιχείου περιγράφεται, για τις ανάγκες της προσομοίωσης, μέσω απλοποιημένου πολυγραμμικού διαγράμματος έντασης-παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα ο **ΚΑΝ.ΕΠΕ.** (ΚΑΝονισμός ΕΠΕμβάσεων) υιοθετεί μια πολυγραμμική καμπύλη με ευθύγραμμο ανελαστικό κλάδο, δηλαδή δεν λαμβάνεται υπόψη πιθανή αύξηση της αντοχής μετά τη θεωρητική διαρροή του μέλους (Σχ. 2.4). Επομένως απαιτείται ο προσδιορισμός των τιμών έντασης και παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε δύο χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος, τη θεωρητική διαρροή και την εξάντληση της φέρουσας ικανότητας της υπόψιν κρίσιμης περιοχής.



Σχήμα 2.4 Θεωρητική καμπύλη εντατικού μεγέθους- παραμόρφωσης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. [6].

Για μέλη οπλισμένου σκυροδέματος το μέγεθος έντασης που επιλέγεται συνήθως είναι η ροπή, M , η οποία μπορεί να είναι η μέγιστη ροπή που αντιστοιχεί στην καμπτική ή τη διατμητική αστοχία στις κρίσιμες περιοχές του στοιχείου. Δεδομένου ότι στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνεται η υιοθέτηση οριζόντιου μετελαστικού κλάδου στο πολυγραμμικό διάγραμμα έντασης - παραμόρφωσης που περιγράφει την συμπεριφορά των δομικών μελών, ουσιαστικά απαιτείται ο προσδιορισμός της τιμής της ροπής M_y που αντιστοιχεί στη θεωρητική διαρροή της κρίσιμης διατομής. Η M_y μπορεί να υπολογιστεί κατά τα γνωστά για τον υπολογισμό της αντοχής μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Εναλλακτικά μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη σχέση με δεδομένη την αντίστοιχη τιμή της καμπυλότητας στη διαρροή $(1/r)_y$ [6]:

$$\frac{M_y}{bd^3} = (1/r)_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0.5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right) + (1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6} (1 - \delta')(1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right\} \quad (2.1)$$

όπου η καμπυλότητα στη διαρροή $(1/r)_y$ προσδιορίζεται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)d} \quad (2.2)$$

αν η διαρροή διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, ενώ αν οφείλεται σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος, τότε:

$$(1/r)_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1.8f_c}{E_c \xi_y d} \quad (2.3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:

ρ, ρ', ρ_v τα ποσοστά του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού αντίστοιχα (ανηγμένα στο bd)

$\delta' = d'/d$ όπου d' η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα και d το στατικό ύψος

f_c η αντοχή του σκυροδέματος

f_y η τάση διαρροής του χάλυβα

E_s, E_c τα μέτρα ελαστικότητας χάλυβα και σκυροδέματος αντίστοιχα

ξ_y το ύψος θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή ανηγμένο στο στατικό ύψος, για τον υπολογισμό του οποίου διατίθενται σχέσεις στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Για την παραμόρφωση το μέγεθος που υιοθετείται πρέπει να είναι αντίστοιχο έργου με τη ροπή, ώστε το εμβαδόν της καμπύλης που προκύπτει να εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται μέσω των ανελαστικών παραμορφώσεων στη συγκεκριμένη θέση του μέλους. Επιπλέον, η ακριβέστερη προσέγγιση της συμπεριφοράς επιβάλλει να λαμβάνεται υπόψη η καμπτοδιατμητική φύση του φαινομένου, δηλαδή η συνύπαρξη καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και η εξόλκευση των ράβδων οπλισμού. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ως παραμόρφωση στη θεωρητική καμπύλη συμπεριφοράς των μελών χρησιμοποιείται η τιμή της γωνίας στροφής χορδής, δηλαδή της γωνίας μεταξύ της χορδής που συνδέει τα δύο άκρα με την εφαπτόμενη στην υπόψη θέση του μέλους στην παραμορφωμένη κατάσταση (Σχ. 2.5).



Σχήμα 2.5 Γωνία στροφής χορδής [12].

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ο υπολογισμός της τιμής της γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική διαρροή της κρίσιμης περιοχής ενός μέλους μπορεί να προσδιορίζεται με χρήση των ακόλουθων εκφράσεων [2]:

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_V z}{3} + 0.00135 \left(1 + 0.15 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d_I} \frac{d_b f_y}{6 \sqrt{f_c}} \quad (2.4)$$

για δοκούς και υποστυλώματα, ενώ για τοιχώματα η αντίστοιχη έκφραση είναι η ακόλουθη:

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_V z}{3} + 0.002 \left(1 - 0.135 \frac{L_s}{h} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d_I} \frac{d_b f_y}{6 \sqrt{f_c}} \quad (2.5)$$

Εναλλακτικά, σε δοκούς και υποστυλώματα χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_V z}{3} + 0.0013 \left(1 + 0.15 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{(1/r)_y d_b f_y}{8 \sqrt{f_c}} \quad (2.6)$$

και σε τοιχώματα η εξίσωση:

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_V z}{3} + 0.002 \left(1 - 0.125 \frac{L_s}{h} \right) + \frac{(1/r)_y d_b f_y}{8 \sqrt{f_c}} \quad (2.7)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις:

$L_s = M/V$, το μήκος διάτμησης του στοιχείου

α_V είναι ίσο με 1 αν αναμένεται διατμητική ρηγμάτωση του στοιχείου, διαφορετικά είναι ίσο με το 0

z ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων

ε_y η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα του οπλισμού

d_b η μέση διάμετρος ράβδου του εφελκυσμένου οπλισμού

Οι τιμές των f_y και f_c τίθενται σε MPa.

Οι εξισώσεις (2.4) και (2.6) που αφορούν δοκούς και υποστυλώματα είναι απόλυτα ισοδύναμες και οδηγούν στον προσδιορισμό της ίδιας τιμής για το θ_y . Προφανώς το ίδιο ισχύει και για τις εκφράσεις (2.5) και (2.7) που αφορούν τοιχώματα. Από τους τρεις όρους των παραπάνω σχέσεων, ο πρώτος εκφράζει τη συμβολή των καμπτικών παραμορφώσεων στη προσδιοριζόμενη θ_y . Ο δεύτερος όρος εκφράζει τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος L_s , ενώ ο τρίτος όρος εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου.

Με χρήση των τιμών που προκύπτουν για την γωνία στροφής χορδής κατά την καμπτική διαρροή ενός δομικού στοιχείου θ_y και την ροπή διαρροής M_y προσδιορίζεται η ενεργός δυσκαμψία του μήκους L_s του στοιχείου, η οποία λαμβάνεται υπόψη στο μαθηματικό προσομοίωμα της κατασκευής που χρησιμοποιείται για την διενέργεια των ανελαστικών αναλύσεων. Η ενεργός δυσκαμψία προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [7]:

$$K = M_y L_s / 3\theta_y \quad (2.8)$$

Η τελική τιμή της ενεργού δυσκαμψίας K για κάθε μέλος λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των τεσσάρων τιμών που προκύπτουν στα άκρα του για αρνητικές και θετικές ροπές σε αντισυμμετρική κάμψη. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα προγράμματα H/Y που χρησιμοποιείται για τη διενέργεια ανελαστικών αναλύσεων, όπως και το SAP 2000 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, συνήθως περιλαμβάνουν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δομικών μελών το μοντέλο συνιστώσας (one component model). Σύμφωνα με αυτό η συμπεριφορά των σημειακών πλαστικών αρθρώσεων περιγράφεται από το μετελαστικό τμήμα του διαγράμματος συμπεριφοράς, ενώ πριν τη διαρροή του μέλους η παραμόρφωση τους είναι μηδενική. Ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη διαρροή θ_y γίνεται έμμεσα, μέσω της εισαγωγής στο προσομοίωμα της ενεργού δυσκαμψίας των μελών που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.8) και της αντίστοιχης ροπής M_y που προκύπτει από την εξίσωση (2.1).

Οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω αφορούν την «χάραξη» του ελαστικού τμήματος της καμπύλης που περιγράφει η συμπεριφορά της κρίσιμης περιοχής ενός δομικού στοιχείου, σύμφωνα με το προσομοίωμα που προτείνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Για τον υπολογισμό της διαθέσιμης τιμής της γωνίας στροφής χορδής την επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εμπειρική σχέση [7]:

$$\theta_{um} = \varepsilon_u \cdot 0.016 \cdot (0.3^v) \left[\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.225} (a_s)^{0.35} 25^{(ap_s \frac{f_{yw}}{f_c})} (1.25^{100\rho_d}) \quad (2.9)$$

Αντίστοιχη έκφραση για το πλαστικό τμήμα της μέσης γωνίας στροφής χορδής κατά την

αστοχία στοιχείου προκύπτει η σχέση:

$$\theta_{um}^{pl} = \varepsilon_p \cdot 0.0145 \cdot (0.25^v) \left[\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} \right]^{0.3} (f_c)^{0.2} (a_s)^{0.35} 25^{\left(ap_s \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.275^{100 \rho_d}) \quad (2.10)$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις:

$\alpha_s = M/Vh = L_s/h$, ο λόγος διάτμησης

ω, ω' , μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού αντίστοιχα

$\rho_s = A_{sx}/b_w s_n$ γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης

$v = N/bhf_c$, το ανηγμένο αξονικό φορτίο

ρ_d , γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού.

f_{yw}, f_c , οι αντοχές του χάλυβα συνδετήρων και σκυροδέματος αντίστοιχα (σε MPa)

Οι σχέσεις αυτές αφορούν στοιχεία που έχουν κατασκευασθεί με τις μετά το 1985 αντιλήψεις και με χρήση νευροχαλύβων. Για μέλη παλαιότερων κατασκευών οι τιμές που προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.9) και (2.10) διαιρούμενες με 1.2. Οι συντελεστές ε_u και ε_p αφορούν τη χρήση λείων ράβδων οπλισμού και παίρνουν τιμή 0.9 στις εξισώσεις. Τέλος για τοιχώματα το δεύτερο μέλος της εξίσωσης (2.9) πολλαπλασιάζεται επί 0.625 και το αντίστοιχο της εξίσωσης (2.10) επί 0.6.

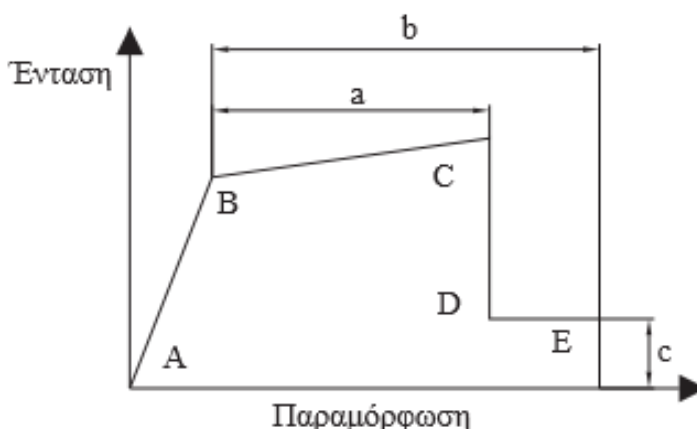
Είναι εμφανές ότι με την χρήση των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί πλήρως το διάγραμμα συμπεριφοράς (Σχ. 2.4) για τις κρίσιμες περιοχές όλων των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής και να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο προσομοίωμα για τη διεξαγωγή ανελαστικών αναλύσεων.

0.4 ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. η προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των μελών γίνεται με θεώρηση του πολυγραμμικού διαγράμματος (Σχ. 2.4) σε όρους ροπών - γωνιών στροφής χορδής, οι οποίες υπολογίζονται με χρήση των εμπειρικών εκφράσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η γωνία στροφής χορδής υιοθετείται και από τον Ευρωκώδικα 8 ως το μέγεθος παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την χάραξη των διαγραμμάτων που προσομοιώνουν την ανελαστική συμπεριφορά δομικών μελών σε μη-γραμμικές αναλύσεις.

Ωστόσο, στα σχέδια κανονισμών που αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α (FEMA 356, ATC-40) ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση ως προς το μέγεθος της παραμόρφωσης

που λαμβάνεται υπόψη για την κατασκευή των διαγραμμάτων που εκφράζουν τη συμπεριφορά των μελών. Πιο συγκεκριμένα, όπως και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ., το μέγεθος της έντασης που επιλέγεται είναι η ροπή M , της οποίας οι χαρακτηριστικές τιμές υπολογίζονται σύμφωνα με όσα ορίζονται στους κανονισμούς για νέα κτίρια σχετικά με την ροπή αντίστασης μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι συχνά απαιτείται ο προσδιορισμός δύο χαρακτηριστικών τιμών της ροπής M που αντιστοιχούν στη διαρροή και την αστοχία στην κρίσιμη διατομή του μέλους, οι οποίες είναι διαφορετικές. Επίσης, προτείνεται να λαμβάνεται υπόψη η κράτυνση στο διάγραμμα συμπεριφοράς, δηλαδή η μικρή αύξηση της ροπής αντίστασης μετά τη διαρροή (Σχ. 2.6).



Σχήμα 2.6 Θεωρητική καμπύλη εντατικού μεγέθους-παραμόρφωσης σύμφωνα με το FEMA 356 [12]:

Το μέγεθος της παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι η γωνία στροφής πλαστικής άρθρωσης θ_{pl} (Σχ. 2.7), της οποίας η διαθέσιμη τιμή για την κρίσιμη περιοχή ενός μέλους προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση μέσω των αντίστοιχων καμπυλοτήτων [12]:

$$\theta_{pl}^u = [(1/r)_u - (1/r)_y] L_{pl} \quad (2.11)$$

όπου $(1/r)_u$ και $(1/r)_y$ οι καμπυλότητες στην αστοχία και τη διαρροή αντίστοιχα και L_{pl} το μήκος της πλαστικής άρθρωσης, στο οποίο θεωρείται ότι συγκεντρώνονται οι ανελαστικές παραμορφώσεις. Όπως γίνεται αντιληπτό, το μήκος L_{pl} είναι ένα ιδεατό μέγεθος, ο ορισμός του οποίου αποσκοπεί στη σύνδεση των καμπυλοτήτων που υπολογίζονται σε επίπεδο διατομής με τις ανελαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε περιοχή του μέλους και όχι σημειακά. Οι διατιθέμενες σχέσεις υπολογισμού είναι κυρίως εμπειρικές και λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα όπως η εξόλκευση των ράβδων οπλισμού. Ωστόσο η χρήση τέτοιων εκφράσεων φαίνεται εκφράσεων φαίνεται να εισάγει ανεπιθύμητη αβεβαιότητα στις τιμές των προσδιοριζόμενων μεγεθών [12].



Σχήμα 2.7 Γωνία στροφής πλαστικής άρθρωσης [5].

Επιπλέον η καμπυλότητα αστοχίας, $(1/r)_u$, μιας διατομής υπολογίζεται μέσω μακροσκελών εκφράσεων, οι οποίες θεωρούνται δύσχρηστες σε σχέση με τις εξισώσεις (2.9) και (2.10), όπου το ζητούμενο προκύπτει συναρτήσει των γνωστών γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του υπόψιν μέλους και του οπλισμού του [12]. Βέβαια, τόσο στο FEMA 356 όσο και στον ATC-40 οι απαιτούμενες για την προσομοίωση τιμές της διαθέσιμης τιμής της θ_{pl} προσδιορίζονται με χρήση πινάκων, ανάλογα με τον οπλισμό του μέλους, την πιθανότητα ρηγμάτωσης και την διάταξη των συνδετήρων. Συγκεκριμένα από τους πίνακες προκύπτουν οι τιμές των μεγεθών A, B και C που σημειώνονται στο διάγραμμα συμπεριφοράς (Σχ. 2.6) και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση, καθώς και οι τιμές παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στα κριτήρια επιτελεσματικότητας με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι αντίστοιχοι έλεγχοι.

Η χρήση των πινάκων αυτών αν και απλοποιεί τη διαδικασία υπολογισμού, εισάγει επιπλέον αβεβαιότητα, καθώς οι τιμές που θα προκύψουν (π.χ. από γραμμικές παρεμβολές μεταξύ ακραίων τιμών) δεν είναι αντίστοιχα ακριβείς με αυτές που προκύπτουν μέσα από κλειστές εκφράσεις. Συνεπώς, η χρήση του προσομοιώματος που προτείνεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., φαίνεται να οδηγεί σε ακριβέστερη προσέγγιση της συμπεριφοράς των δομικών μελών, άρα και της κατασκευής ως σύνολο [12].

Όσον αφορά τη σχέση των μεγεθών της γωνίας στροφής χορδής, συγκεκριμένα του πλαστικού τμήματος αυτής, με την γωνία στροφής πλαστικής άρθρωσης, μπορεί να αποδεχθεί ότι είναι περίπου ίσες, δηλαδή ισχύει:

$$\theta_{pl}^u = \theta_{um}^{pl} \quad (2.12)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος πλαστική θ_{pl} για να εκφράσει τόσο τη διαθέσιμη τιμή της γωνίας στροφής πλαστικής άρθρωσης, όσο και το πλαστικό τμήμα της αντίστοιχης γωνίας στροφής χορδής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της τιμής της θ_{pl} , η οποία έχει προκύψει από την αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μηχανισμούς που συνεισφέρουν στην κατανάλωση ενέργειας κατά την ανάπτυξη ανελαστικών παραμορφώσεων στην κρίσιμη περιοχή ενός δομικού μέλους [12]:

$$\theta_{pl} = \left\{ k_1 \beta \frac{\alpha_s}{2} \left(1 - \frac{f_y}{\sigma_{sn}} \right) + k_2 \frac{f_y}{f_c} \left[\frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{sn}} + \left(1 - \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{sn}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_m}{f_y} - 1 \right) \right] \cdot \frac{d_s}{h} \right\} \cdot \frac{\varepsilon_{sn}}{1 - \xi_{sn}} \quad (2.13)$$

Όπου:

$k_1=1.5$ για στατικές φορτίσεις, 1.2 για σεισμό

$k_2=1.2$ για στάθμη επιτελεστικότητας A και 2 για B

$\beta=1.2$

σ_{su} , f_{su} , εκφράζουν τη διαθέσιμη απόκριση του εφελκυσμένου χάλυβα και μπορούν να υπολογιστούν από κατάλληλες σχέσεις.

Σε μια συγκριτική εφαρμογή των σχέσεων προέκυψε ότι τα αποτελέσματα του αναλυτικού προσομοιώματος φαίνεται να προσεγγίζουν αυτά που προκύπτουν από τις εμπειρικές εκφράσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ., ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρούνται αποκλίσεις που απαιτείται να διερευνηθούν.

Τελικά, το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ., φαίνεται να αποτελεί την πλέον ολοκληρωμένη πρόταση για την προσέγγιση της συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε ανελαστικές αναλύσεις, σε σχέση με τα αντίστοιχα προσομοιώματα που συναντώνται σε άλλους κανονισμούς (FEMA 356, ATC-40).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

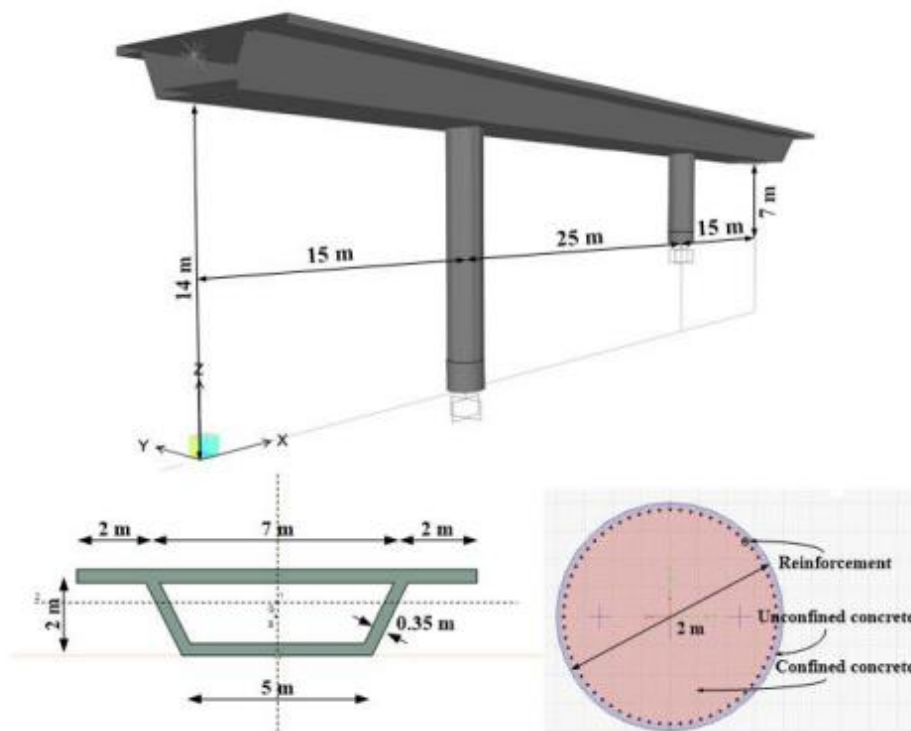
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΛΥΕΤΑΙ.

Η κατασκευή την οποία αναλύεται είναι μία συνεχής γέφυρα τριών ανοιγμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, με συνολικό μήκος $15,0\text{ m}+25,0\text{ m}+15,0\text{ m}=55\text{ m}$ (Σχ. 3.1).

Στο κεντρικό τμήμα, η δοκός στηρίζεται σε βάθρα διαφορετικού ύψους (14 m και 7 m, Σχ. 3.1), άκαμπτες στερεωμένες στα θεμέλια (πάκτωση), ενώ τα άκρα των δοκών απλά εδράζονται σε κάθετη και εγκάρσια κατεύθυνση (κυλίσεις).

Τα βάθρα είναι συμπαγούς κυκλικής διατομής, με διάμετρο 2,0 m. Οι κυκλικές διατομές έχουν την ίδια αντοχή και δυσκαμψία σε κάθε οριζόντια κατεύθυνση, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για κολώνες που λειτουργούν ως κατακόρυφοι πρόβολοι και προς τις δύο διευθύνσεις. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C30/37 και του χαλύβδινου οπλισμού B500C, με χαρακτηριστική αντοχή $f_{yk}=500\text{ MPa}$.



Σχήμα 3.1 Γενικά στοιχεία της κατασκευής που αναλύεται [5].

3.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.

Για την προσομοίωση και την ανάλυση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε εκπαιδευτική έκδοση του προγράμματος SAP 2000.

Πριν τον καθορισμό της γεωμετρίας του φορέα είναι βασικό να οριστούν οι μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εισαγωγή των δεδομένων. Οι μονάδες μέτρησης συνήθως επιλέγονται στην αρχή της εισαγωγής των δεδομένων σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης και καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα εισαχθούν τα δεδομένα στην συνέχεια. Στην περίπτωση που εξετάζεται οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι kN και m.

Στην συνέχεια ορίζεται ένα γενικό σύστημα συντεταγμένων. Η θέση του κάθε κόμβου, άρα και γραμμικού στοιχείου, στον φορέα, ορίζεται πάντα από τις συντεταγμένες του βάσει του γενικού συστήματος συντεταγμένων που στα περισσότερα προγράμματα είναι άμεσα ορατό στον χρήστη. Καθώς είναι γνωστή η γεωμετρία του φορέα, οι θέσεις των γραμμών του κανάβου μπορούν να καθοριστούν μέσω κατάλληλης εντολής (μενού επιλογής).

Στο Σχ. 3.2 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες του κανάβου όπως προέκυψαν για την κατασκευή μας.

The screenshot shows the 'Grid Data' dialog box in SAP 2000, which is used to define the grid for the model. It consists of three tables for X, Y, and Z coordinates, and a control panel on the right.

X Grid Data

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	x0	0,	Primary	Show	Start	
2	x1	15,	Primary	Show	Start	
3	x2	40,	Primary	Show	Start	
4	x3	55,	Primary	Show	Start	
5						
6						
7						
8						

Y Grid Data

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

Z Grid Data

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	z0	0,	Primary	Show	Start	
2	z1	7,	Primary	Show	Start	
3	z2	14,	Primary	Show	Start	
4						
5						
6						
7						
8						

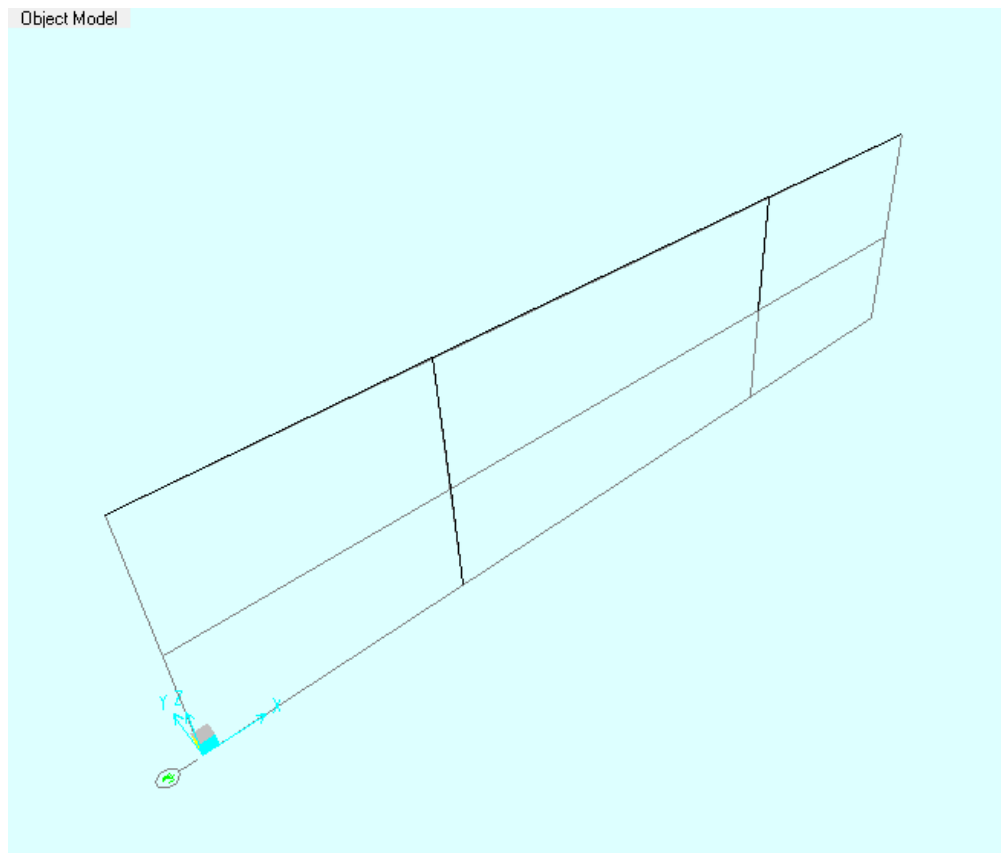
Control Panel:

- Display Grids as: Ordinates Spacing
- Hide All Grid Lines
- Glue to Grid Lines
- Bubble Size:
- Reset to Default Color
- Reorder Ordinates
- OK
- Cancel

Σχήμα 3.2 Συντεταγμένες των γραμμών κανάβου.

Στη συνέχεια, ακολουθώντας τις γραμμές κανάβου, εισάγονται τα γραμμικά στοιχεία

τύπου δοκού που αντιπροσωπεύουν. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η γενική γεωμετρία του φορέα όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3.



Σχήμα 3.3 Η γενική γεωμετρία του φορέα που αναλύθηκε.

3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.

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

- Ένα όνομα και προαιρετικά ένα χρώμα για το υλικό (Material name and display Color).
- Ο τύπος του υλικού (Concrete, Rebar).
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (Modulus of Elasticity, E) σε kPa (για μονάδες kN,m).
- Το ειδικό βάρος του υλικού (Weight per Unit Volume) το οποίο λαμβάνεται ίσο με την πυκνότητα επί την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας, μέσω του οποίου το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει το βάρος των δομικών στοιχείων του φορέα.
- Την πυκνότητα του υλικού (Mass per Unit Volume) από την οποία μπορεί το πρόγραμμα να καθορίσει την μάζα των δομικών στοιχείων του φορέα.
- Ο λόγος Poisson (Poisson's Ratio, U).
- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής (Coefficient of Thermal Expansion,A)

χρησιμοποιείται μόνο σε περίπτωση που δίνονται θερμοκρασιακές μεταβολές ως φορτία.

- Το μέτρο διάτμησης (Shear Modulus, G) υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα.
- Δεδομένα αντοχής του υλικού που χρησιμοποιούνται μόνο στην διαστασιολόγηση ή στους ελέγχους κατά την ανελαστική στατική ανάλυση, όπως:
 - ❖ Η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη (Specified Concrete Compressive Strength, f'_s)
 - ❖ Η ελάχιστη τάση διαρροής του οπλισμού (Minimum Yield Stress, f_y)
 - ❖ Η ελάχιστη τάση αστοχίας του οπλισμού σε εφεκκυσμό (Minimum Tensile Stress, f_u)
 - ❖ Η αναμενόμενη τάση διαρροής του οπλισμού (Expected Yield Stress, f_{ye})
 - ❖ Η αναμενόμενη τάση αστοχίας του οπλισμού σε εφεκκυσμό (Expected Tensile Stress, f_{ue})

Στην παρούσα εργασία έγινε υπόθεση δύο ομάδων υλικών για λόγους σύγκρισης: α) Σκυρόδεμα C30 και χάλυβας B500C και β) σκυρόδεμα C20 και χάλυβας S400. Οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών παρουσιάζονται στον Πίν. 3.1.

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

ΘΕΤΙΚΗ ΦΟΡΑ		
	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C30	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C20
Material Type	Concrete	Concrete
Weight per Unit Volume	25	25
Mass per Unit Volume	2,5493	2,5493
Modulus of Elasticity, E	30000000	29000000
Poisson's Ratio, U	0,2	0,2
Coefficient of Thermal Expansion, A	9,90E-06	9,90E-06
Shear Modulus, G	12500000	12083333
Specified Concrete Compressive Strength, f'_s	38000	28000
ΧΑΛΥΒΑΣ B500C		
	ΧΑΛΥΒΑΣ B500C	ΧΑΛΥΒΑΣ S400
Material Type	Rebar	Rebar
Weight per Unit Volume	76,9729	76,9729
Mass per Unit Volume	7,849	7,849
Modulus of Elasticity, E	2,00E+08	2,00E+08
Poisson's Ratio, U	0,3	0,3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,17E-05	1,17E-05
Shear Modulus, G	76903069	76903069
Minimum Yield Stress, F_y	500000	400000
Minimum Tensile Stress, F_u	575000	460000
Expected Yield Stress, F_{ye}	500000	400000
Expected Tensile Stress, F_{ue}	575000	460000

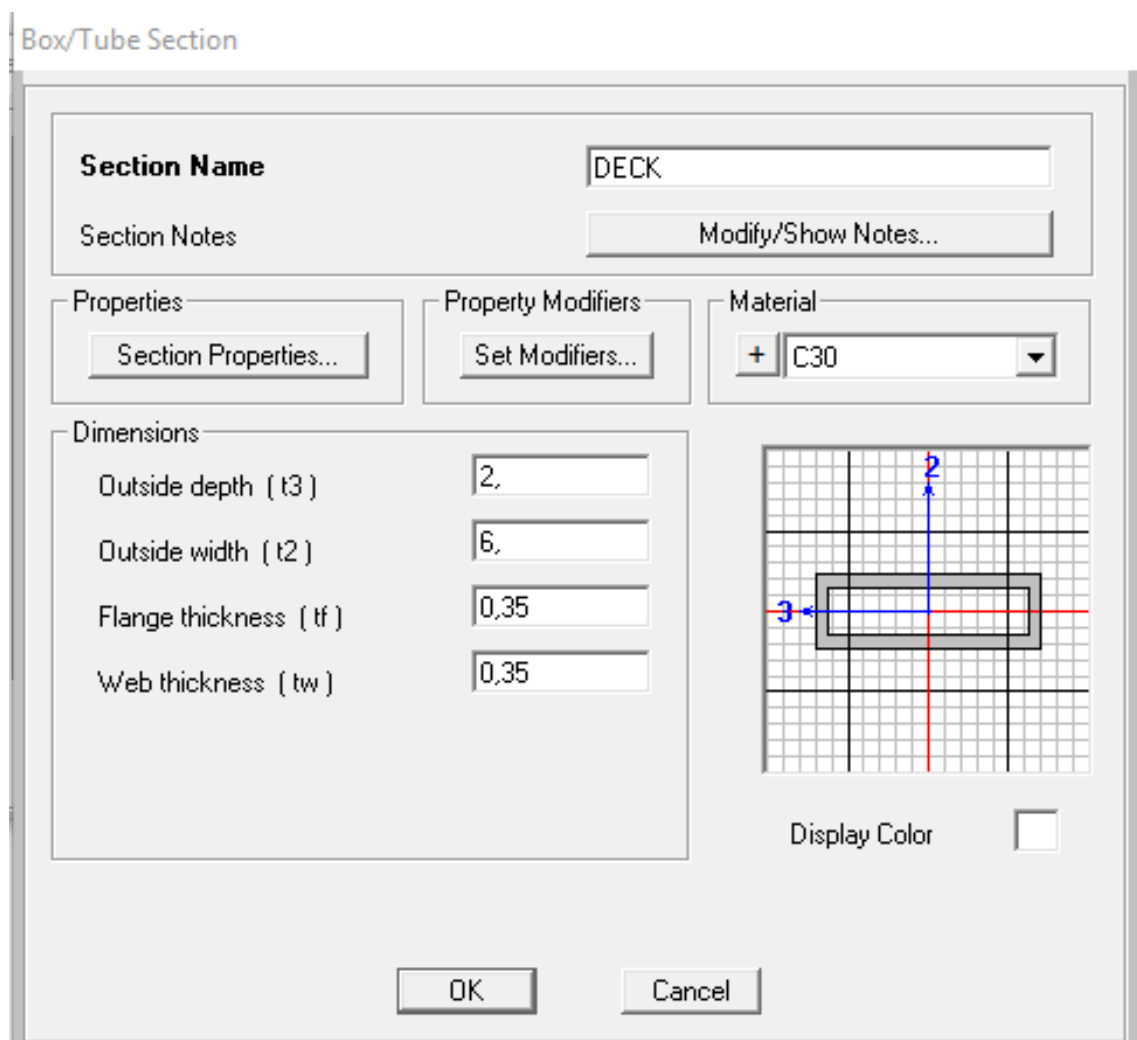
3.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.

Το πρόγραμμα SAP 2000 διαθέτει βιβλιοθήκη διατομών για τις οποίες, αφού δοθούν οι απαραίτητες διαστάσεις, προσδιορίζονται αυτόματα τα απαραίτητα γεωμετρικά μεγέθη (εμβαδόν διατομής, ροπές αδράνειας κλπ.). Οι διατομές συνδέονται επίσης με ένα υλικό, ώστε να υπολογισθούν οι δυσκαμψίες των μελών. Στις διατομές για τις οποίες «δηλώνεται» ότι κατασκευάζονται από σκυρόδεμα υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής του

διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού τους ώστε να υπολογισθούν αυτόματα μεγέθη (π.χ. ροπή αντοχής) που χρειάζονται για τη στατική ανελαστική ανάλυση.

Για το κατάστρωμα της γέφυρας, για λόγους απλοποίησης χρησιμοποιήθηκε διατομή κιβωτίου χωρίς πτερύγια. Η επιλογή του τύπου της διατομής οδηγεί στην καρτέλα ορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Αυτά για την περίπτωση του καταστρώματος είναι τα ακόλουθα (Σχ. 3.4):

- Ένα όνομα για την διατομή (Section name) για την περίπτωση μας έχει ονομαστεί «DECK».
- Το υλικό (C30 ή C20, λίστα Material).
- Το ύψος δοκού τίθεται στο πεδίο Depth το οποίο ισούται με 2,0 και το πλάτος δοκού τίθεται στο πεδίο Width το οποίο ισούται με 6,0.
- Το πάχος του πέλματος 0,35 (Flange thickness, t_f) και το πάχος του κορμού 0,35 αντίστοιχα (Web thickness, t_w).



Σχήμα 3.4 Καθορισμός των ιδιοτήτων της διατομής του καταστρώματος.

Για τα κυκλικά βάθρα της γέφυρας, οι επιλογές των χαρακτηριστικών της διατομής έχουν ως εξής (Σχ. 3.5):

- Ένα όνομα για την διατομή (Section name) για την περίπτωση μας έχει ονομαστεί D200.
- Το υλικό (C30 ή C20, λίστα Material).
- Την διάμετρο που ισούται με 2,0 (diameter, t_3 , δηλαδή η διάσταση κάθετα στον άξονα 3 που φαίνεται στο σκαρίφημα).

Circle Section

Σχήμα 3.5 Καθορισμός των ιδιοτήτων της διατομής των βάρων.

Στα βάρια, για να μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των ανελαστικών ιδιοτήτων τους, δηλώθηκε και ο διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός του μέσω της καρτέλας Concrete Reinforcement (Σχ. 3.6).

Reinforcement Data

Rebar Material

Longitudinal Bars B500C

Confinement Bars (Ties) B500C

Design Type

Column (P-M2-M3 Design)

Beam (M3 Design Only)

Reinforcement Configuration

Rectangular

Circular

Confinement Bars

Ties

Spiral

Longitudinal Bars - Circular Configuration

Concrete Cover to Rebar Center

Number of Longitudinal Bars

Longitudinal Bar Size 25d

Confinement Bars

Confinement Bar Size 16d

Longitudinal Spacing of Confinement Bars

Check/Design

Reinforcement to be Checked

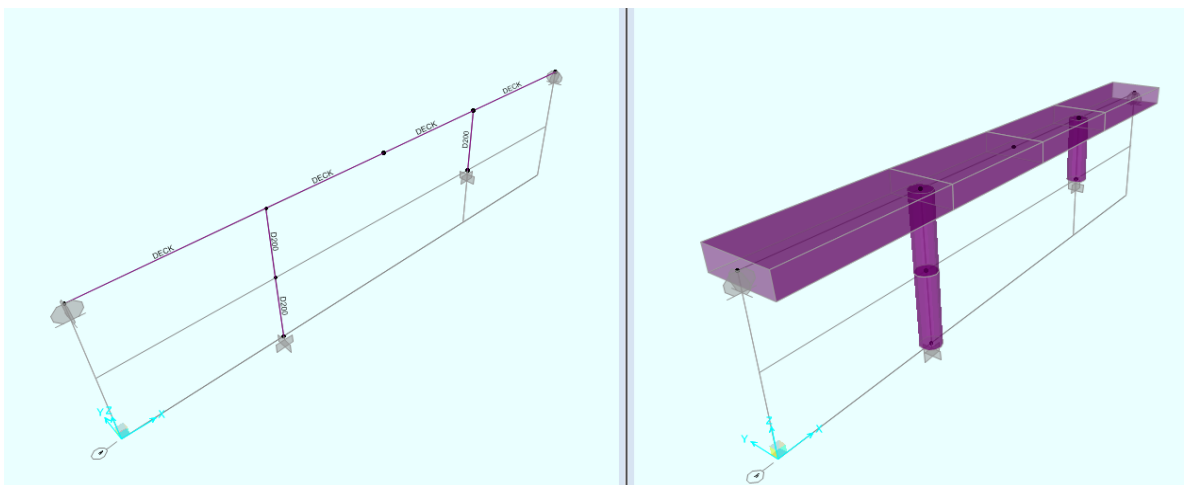
Reinforcement to be Designed

OK

Cancel

Σχήμα 3.6 Καθορισμός του οπλισμού των βάθρων.

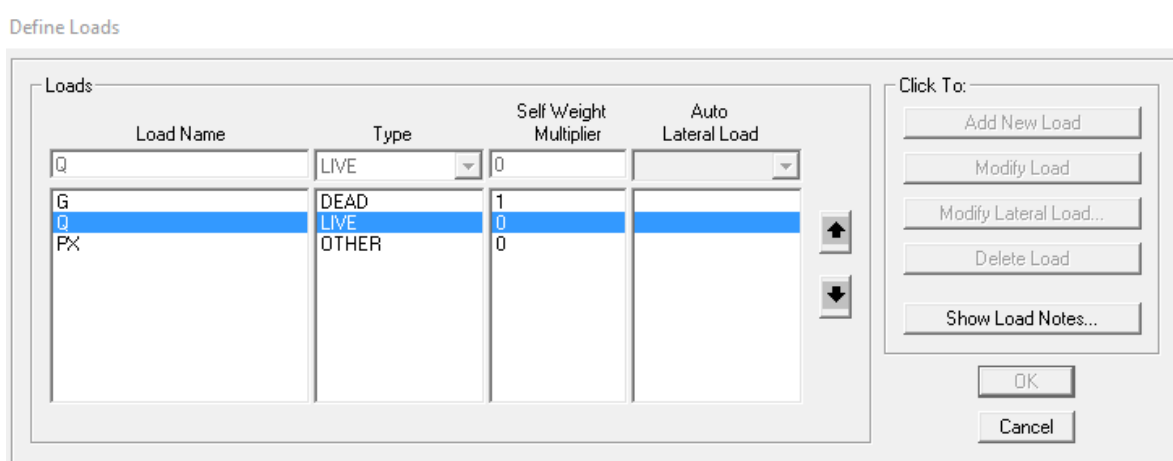
Στη συνέχεια ορίζεται για κάθε γραμμικό μέλος του προσομοιώματος η διατομή του, επιλέγοντας την κατάλληλη από αυτές που δημιουργήθηκαν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία. Η τελική μορφή του φορέα με ορισμένες τις διατομές παρουσιάζεται στο Σχ. 3.7. Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται και οι στηρίξεις που ορίστηκαν: πακτώσεις στη βάση των βάθρων και κυλίσεις στην αρχή και το πέρας του καταστρώματος.



Σχήμα 3.7 Το προσομοίωμα μετά τον καθορισμό των διατομών και την εισαγωγή των στηρίξεων.

3.5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.

Τα φορτία που ασκούνται στο φορέα διακρίνονται, ανάλογα με το χαρακτήρα τους, σε κατηγορίες (ή περιπτώσεις) φορτίων (Load Cases), π.χ. μόνιμα, κινητά, σεισμικά κλπ. Για την περίπτωση της γέφυρας που αναλύθηκε οι περιπτώσεις φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχ. 3.8.



Σχήμα 3.8 Περιπτώσεις φόρτισης για το φορέα που αναλύθηκε.

Πέραν από τα μόνιμα φορτία (G) ορίστηκαν τα κινητά φορτία (Q) στα οποία για λόγους απλότητας συμπεριλήφθηκαν και τα φορτία κυκλοφορίας (ως ομοιόμορφο φορτίο, δεν έγινε δηλαδή αναλυτικός υπολογισμός λωρίδων), ενώ η σεισμική περίπτωση PX αφορά την οριζόντια δύναμη της ανάλυσης pushover.

Οι περιπτώσεις ανάλυσης καθορίζονται από το μενού Define Analysis Cases και αντιπροσωπεύουν τις επιλύσεις που θα πραγματοποιηθούν. Πέραν από τις ανεξάρτητες περιπτώσεις φόρτισης, ως περιπτώσεις ανάλυσης καθορίζονται οι απαραίτητοι συνδυασμοί στατικών φορτίων (π.χ. G+0,50Q, Σχ. 3.9) καθώς και οι παράμετροι της ανελαστικής ανάλυσης pushover (π.χ. PX_NL, Σχ. 3.9).

Case Name	Case Type
G	Linear Static
Q	Linear Static
G+0,5Q	Linear Static
PX	Linear Static
MODAL	Modal
GRAV_NL	Nonlinear Static
PX_NL	Nonlinear Static
PX_NL_PD	Nonlinear Static

Σχήμα 3.9 Περιπτώσεις ανάλυσης που πραγματοποιήθηκαν.

Ειδικά για τη μη γραμμική στατική ανάλυση απαιτείται ο ορισμός μιας σειράς παραμέτρων όπως τα συνολικά βήματα της ανάλυσης και η μέγιστη μετακίνηση στην οποία αυτή τερματίζεται (Σχ. 3.10).

Analysis Case Data - Nonlinear Static

Analysis Case Name: FX_NL

Notes: Modify/Show...

Analysis Case Type: Static

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case: GRAV_NL

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Analysis Case:
All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load	PX	1.
Load	PX	1.

Buttons: Add, Modify, Delete

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear
- Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters:

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

Buttons: OK, Cancel

Σχήμα 3.10 Καθορισμός παραμέτρων για την ανάλυση Pushover.

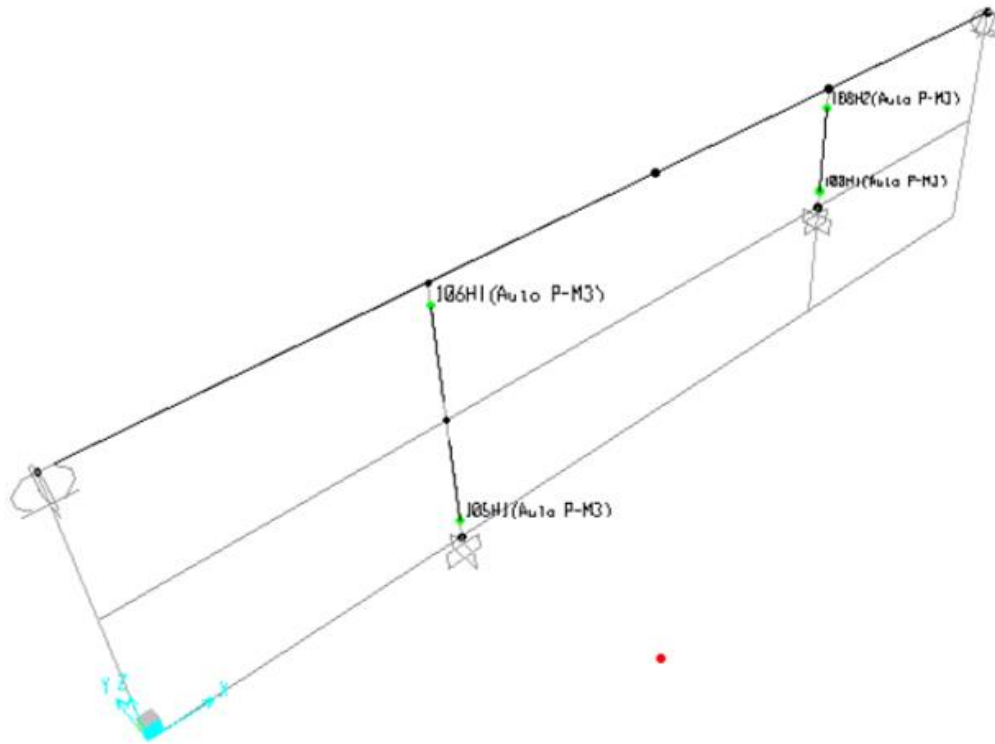
3.6 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.

Με βάση τις ιδιότητες των υλικών και την αναλυτική περιγραφή των διατομών που δόθηκαν στα προηγούμενα βήματα το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει αυτόματα τις ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων και τις οριακές τιμές παραμόρφωσης που απαιτούνται για τους ελέγχους. Ο αυτόματος υπολογισμός βασίζεται στη διαδικασία του FEMA 356 που παρουσιάστηκε παραπάνω. Αν και υπάρχουν πιο σύγχρονες μέθοδοι, στην εργασία για λόγους απλότητας χρησιμοποιήθηκε η ενσωματωμένη στο πρόγραμμα.

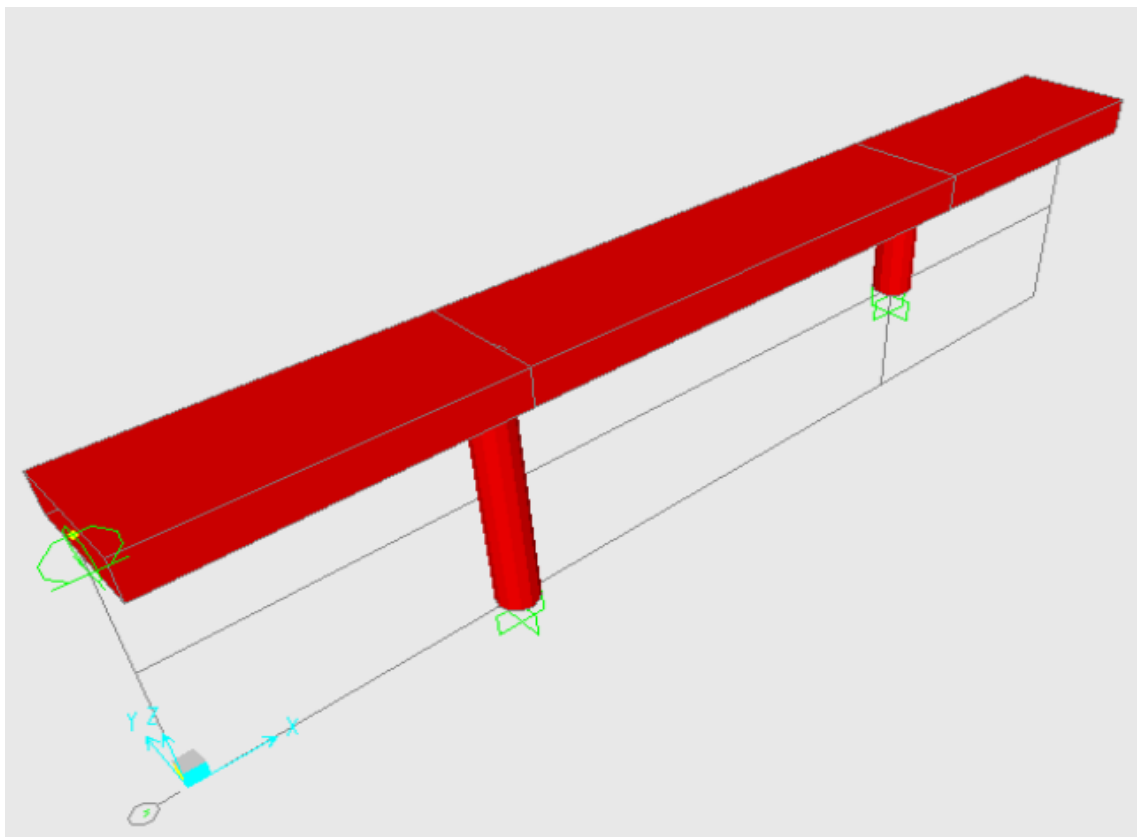
Για τις «αυτόματες» πλαστικές αρθρώσεις που υπολογίζονται από το μενού Assign Frame Hinges απαιτείται να επιλεγεί ο τύπος τους, που για κατακόρυφα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος που καταπονούνται σε κάμψη με αξονική δύναμη ορίζεται ως P - M3 (μονοαξονική κάμψη καθώς η κατασκευή επιλύεται στο επίπεδο), ενώ ζητείται η τιμή της τέμνουσας για τον έλεγχο πρόωρης διατμητικής αστοχίας από λοξή ρηγμάτωση που λαμβάνεται από τον συνδυασμό $G+0,5Q$.

Ως θέσεις πιθανής ανάπτυξης πλαστικών αρθρώσεων ορίζονται οι διατομές στην αρχή και στο τέλος των δομικών στοιχείων, καθώς πρόκειται για τα σημεία του φορέα όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές κατά την σεισμική φόρτιση. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται στο προσομοίωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11.

Με την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω δημιουργείται ένα έτοιμο προς επίλυση προσομοίωμα μιας απλής γέφυρας, όπου λαμβάνεται υπόψη η ανελαστική συμπεριφορά μόνο των στύλων (Σχ. 3.9). Η υπόθεση αυτή είναι λογική καθώς σε τέτοιους είδους κατασκευές οι βλάβες είναι πιθανόν να εντοπιστούν στις θέσεις μονολιθικής σύνδεσης των βάρων με το κατάστρωμα της γέφυρας. Υπενθυμίζεται ότι όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο επίπεδο, οπότε πριν την επίλυση επιλέχθηκαν ως ενεργοί βαθμοί ελευθερίας οι μετατοπίσεις UX και UZ και η στροφή RY (Σχ. 3.12).



Σχήμα 3.11 Θέσεις πλαστικών αρθρώσεων στο προσομοίωμα της κατασκευής.

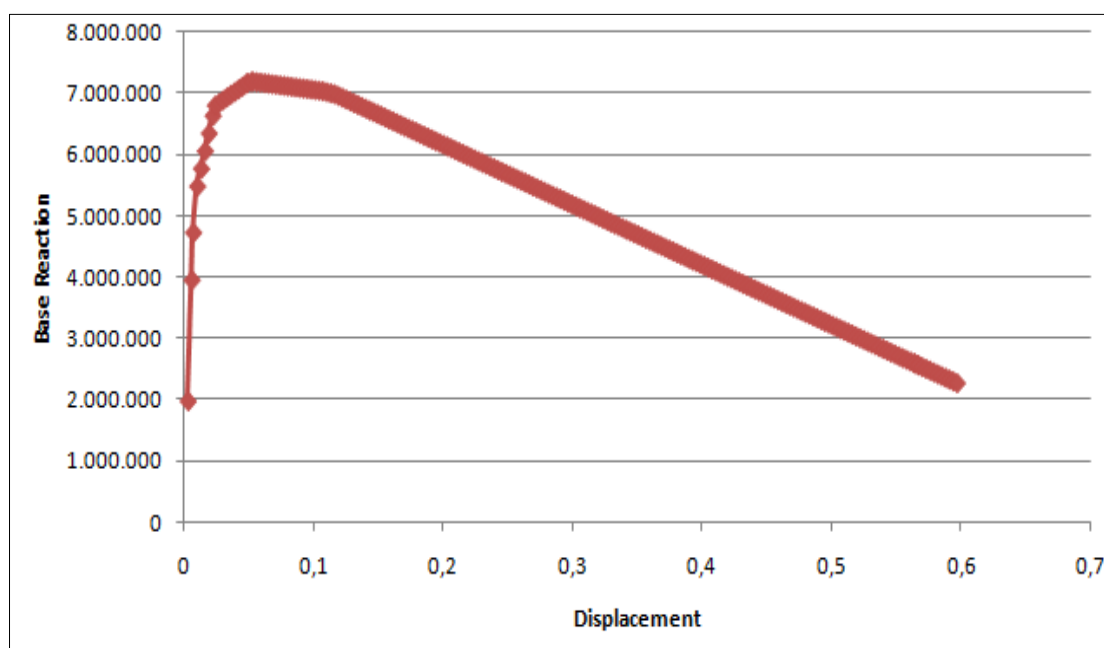


Σχήμα 3.12 Τρισδιάστατη απεικόνιση της τελικής μορφής του προσομοιώματος.

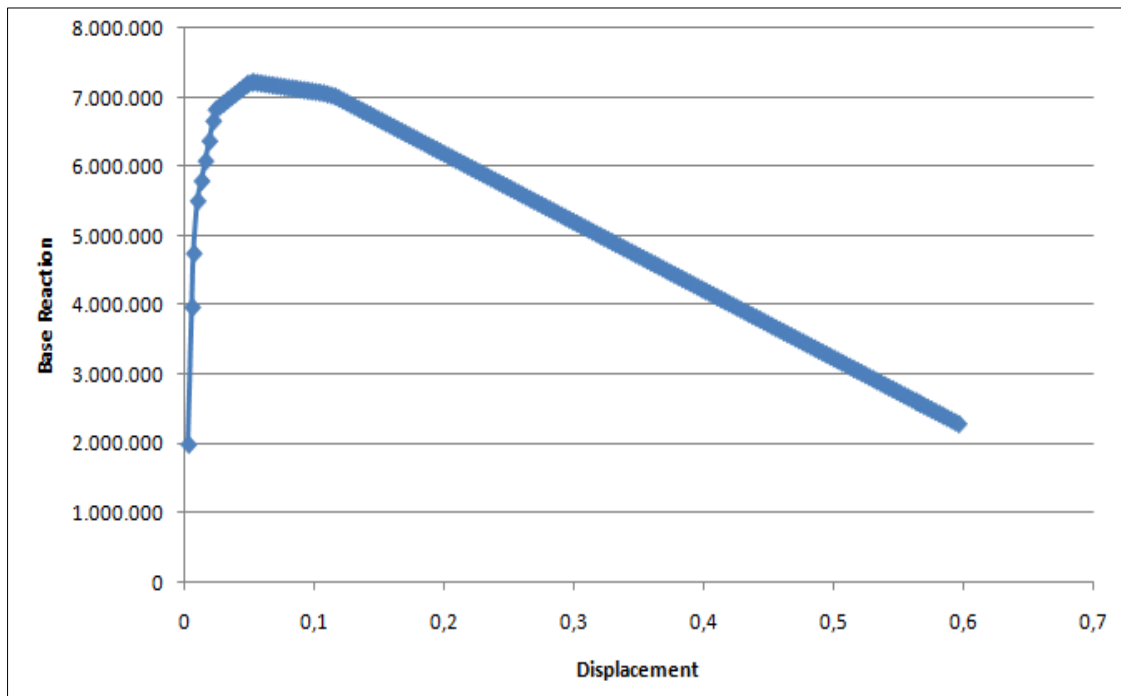
3.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για το «βασικό» μοντέλο της γέφυρας με την πρώτη ομάδα υλικών (C30, B500c, Πιν. 3.1). Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας της επίλυσης, το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα την καμπύλη αντίστασης (Pushover curve) του φορέα. Η καμπύλη αυτή αντιστοιχεί στο διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης στην κορυφή και, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για το μηχανικό, καθώς δίνει άμεσα και με εποπτικό τρόπο χρήσιμες πληροφορίες για την σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν μεγέθη δυνάμεων (π.χ. διαθέσιμη αντοχή, υπεραντοχή κτλ), μεγέθη παραμορφώσεων (π.χ. διαθέσιμη πλαστιμότητα), ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση δεικτών όπως ο διαθέσιμος συντελεστής συμπεριφοράς μ .

Τα αποτελέσματα, συγκεκριμένα οι καμπύλες αντίστασης παρουσιάζονται στα Σχ. 3.13 και 3.14. Οι δύο καμπύλες αντιστοιχούν στην επιβολή της οριζόντιας φόρτισης κατά τη θετική και την αρνητική φορά του άξονα x αντιστοίχως. Αυτό απαιτείται ούτως ή άλλως από τους κανονισμούς και έχει ενδιαφέρον στην περίπτωση που εξετάστηκε καθώς η συμπεριφορά των διαφορετικού ύψους βάθρων είναι πιθανό να επηρεάζεται από τη διεύθυνση των σεισμικών φορτίων.



Σχήμα 3.13 Καμπύλη αντίστασης από την ανάλυση του μοντέλου για την πρώτη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική θετική φορά.

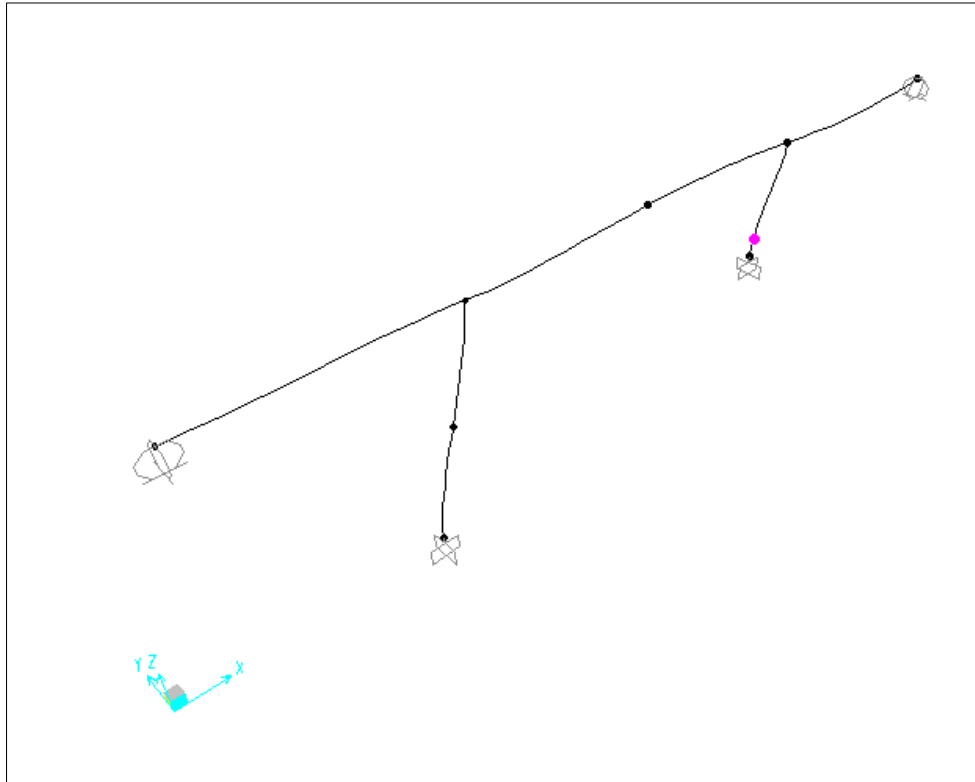


Σχήμα 3.14 Καμπύλη αντίστασης από την ανάλυση του μοντέλου για την πρώτη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική αρνητική φορά.

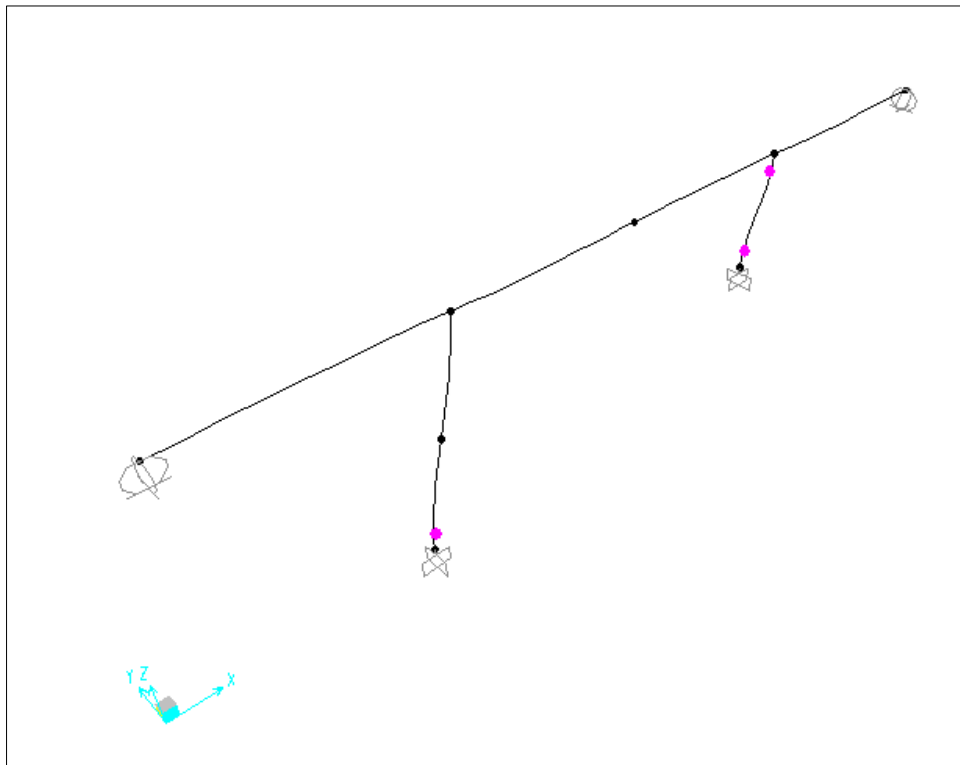
Οι τιμές τέμνουσας βάσης και μετατόπισης του καταστρώματος με βάση τις οποίες σχεδιάστηκαν τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται, για πληρότητα στον σχετικό πίνακα του παραρτήματος.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, ο φορέας συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι μια τιμή της τέμνουσας βάσης της τάξης των 5500 kN. Ακολούθως, μετά τη διάρροή στην κρίσιμη περιοχή ενός βάρου και λόγω ανακατανομής των εντατικών μεγεθών αναπτύσσει υπεραντοχή αναλαμβάνοντας επιπλέον τέμνουσα βάσης έως περίπου την τιμή των 7200 kN. Ακολούθως η καμπύλη εμφανίζει ένα πλατό φτάνοντας σε μετατόπιση της τάξης των 15 cm με περίπου σταθερή τέμνουσα και στη συνέχεια ο φορέας αστοχεί, χάνοντας σταδιακά τη φέρουσα ικανότητά όπως δείχνει ο πτωτικός κλάδος των καμπυλών (Σχ. 3.13 και 3.14).

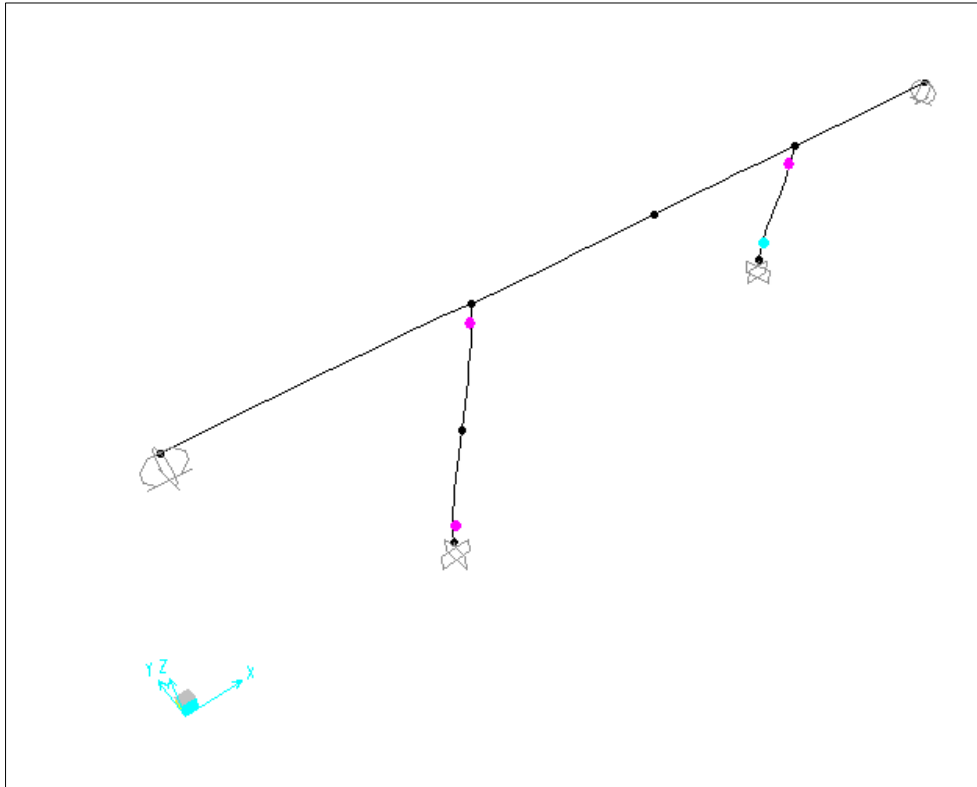
Η συμπεριφορά που περιγράφεται παραπάνω αποτυπώνεται από το πρόγραμμα σε σκαριφήματα που απεικονίζουν βήματα της ανάλυσης και τα αποτελέσματα από τους ελέγχους παραμορφώσεων στις πλαστικές αρθρώσεις. Ενδεικτικά σκαριφήματα από την ανάλυση με οριζόντια φόρτιση κατά τη θετική φορά του x-άξονα παρουσιάζονται στα Σχ. 3.15 έως 3.21.



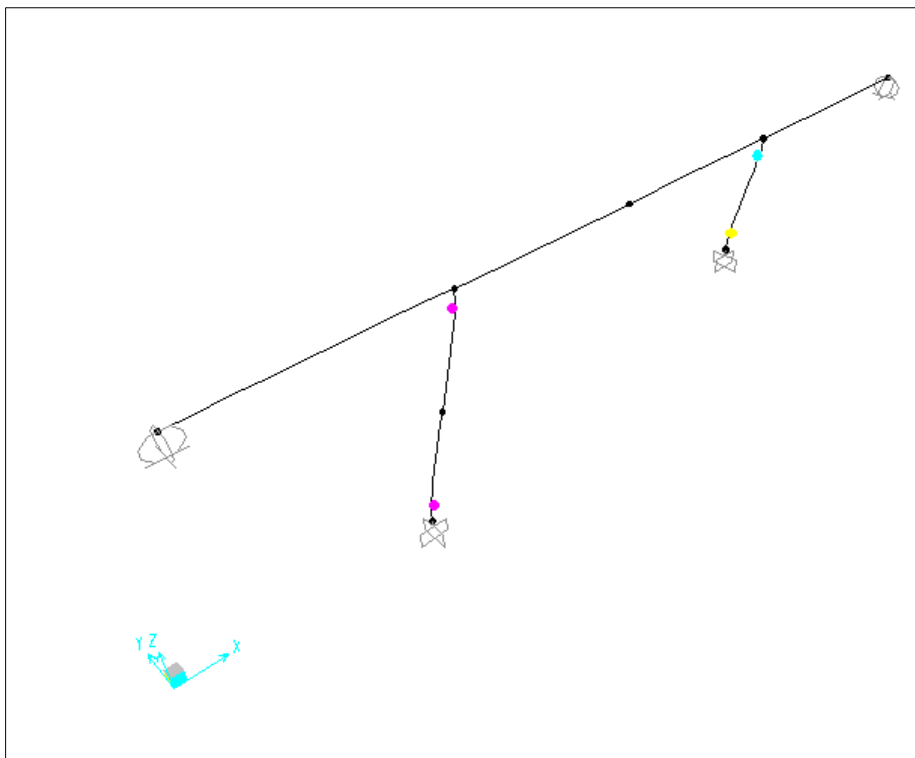
Σχήμα 3.15 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: πρώτη διαρροή στο κοντό βάθρο στο βήμα 3 για μετατόπιση 7,128 mm.



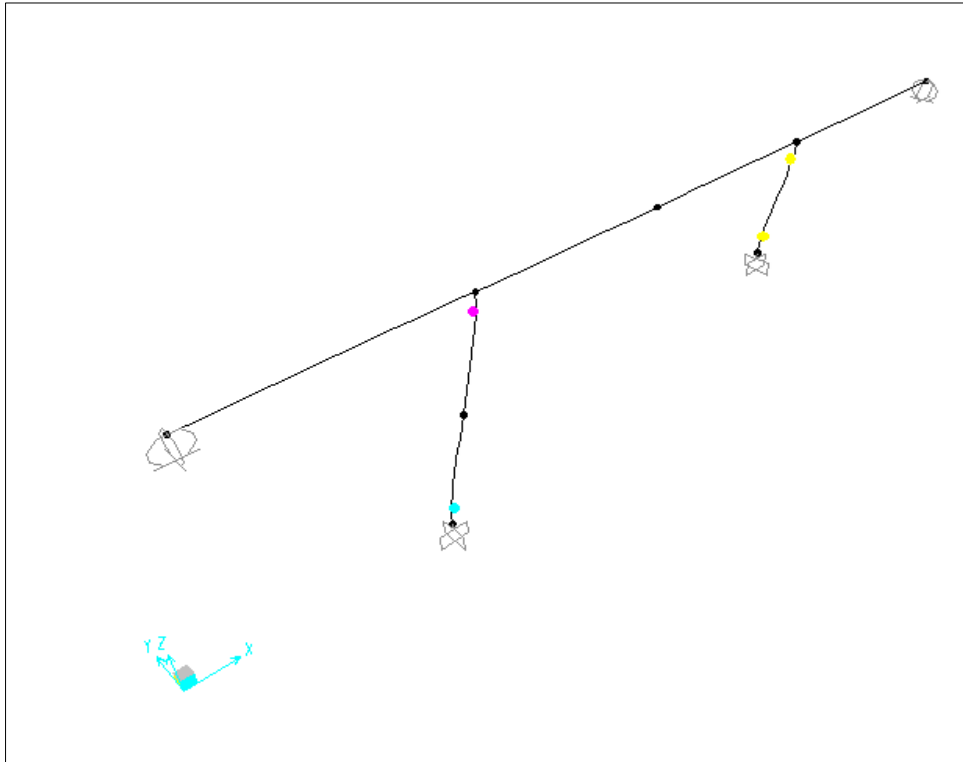
Σχήμα 3.16 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: πρώτη διαρροή στο ψηλό βάθρο στο βήμα 10 για μετατόπιση 25,581 mm.



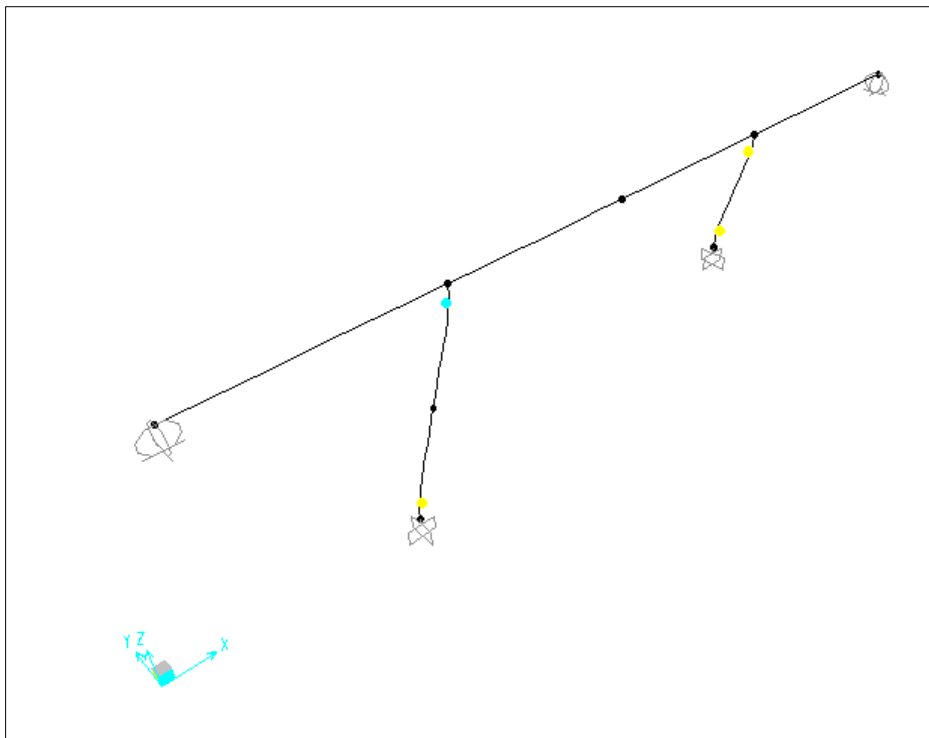
Σχήμα 3.17 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Ασφάλειας Ζωής» στο κοντό βάθρο στο βήμα 16 για μετατόπιση 43,581 mm.



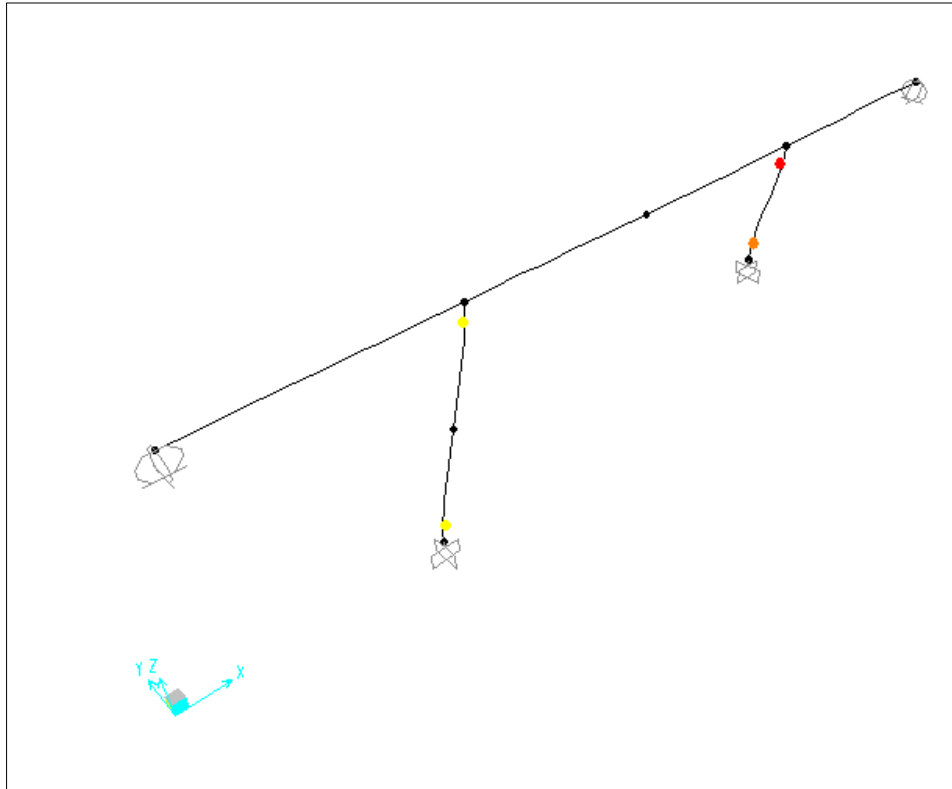
Σχήμα 3.18 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Αποφυγής Κατάρρευσης» στο κοντό βάθρο στο βήμα 18 για μετατόπιση 49,381 mm.



Σχήμα 3.19 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Ασφάλειας Ζωής» στο ψηλό βάθρο στο βήμα 35 για μετατόπιση 98,778 mm.



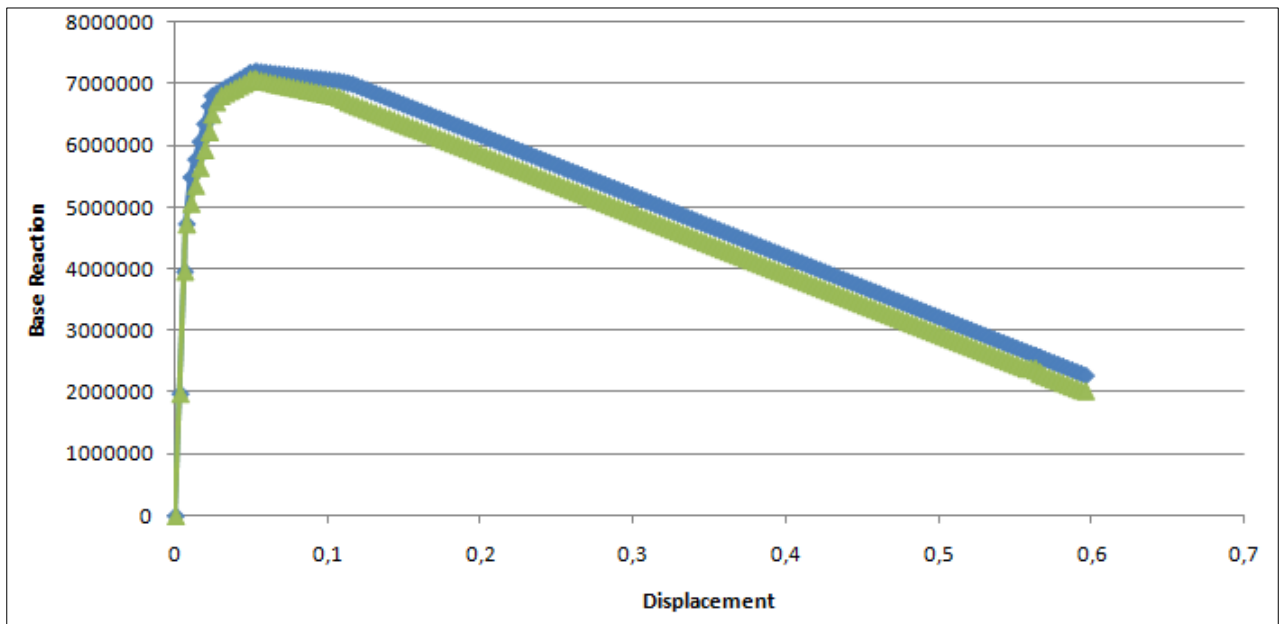
Σχήμα 3.20 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Αποφυγής κατάρρευσης» στο ψηλό βάθρο στο βήμα 39 για μετατόπιση 110,778 mm.



Σχήμα 3.21 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για την πρώτη ομάδα υλικών: πλήρης απώλεια φέρουσας ικανότητας στο ψηλό κοντό στο βήμα 190 για μετατόπιση 563,185 mm.

3.7.1 Αξιολόγηση της επιρροής της φοράς του οριζόντιου φορτίου.

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες των Σχ. 3.13 και 3.14, η φορά του οριζόντιου φορτίου δε φαίνεται στην περίπτωση αυτή να επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Αυτό προκύπτει και από τη συγκριτική απεικόνιση των δύο διαγραμμάτων που παρουσιάζεται στο Σχ. 3.22.

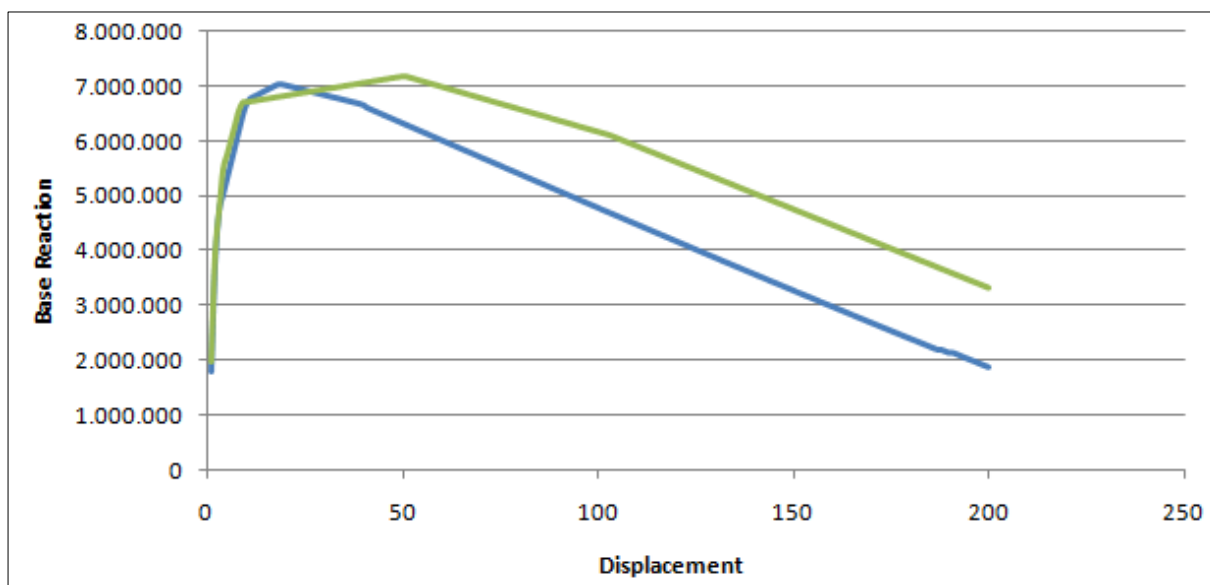


Σχήμα 3.22 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών αντίστασης για τις δύο συμβατικές φορές του οριζόντιου φορτίου: μπλε: αρνητική, πράσινο: θετική.

Η μικρή αύξηση της αντοχής για την περίπτωση της φόρτισης κατά την αρνητική φορά του x-άξονα αποδίδεται στην επιπλέον, «σεισμική» θλιπτική δύναμη στο ψηλό βάθος που του δίνει τη δυνατότητα να αναπτύξει, στην περίπτωση αυτή, μεγαλύτερη υπεραντοχή.

3.7.2 Φαινόμενα P-Δ και μεγάλες μετατοπίσεις.

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν από αναλύσεις του προσομοιώματος χωρίς να συνυπολογίζονται φαινόμενα P-Δ και μεγάλων μετατοπίσεων. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά μιας κατασκευής με ψηλά και λυγρά κατακόρυφα στοιχεία. Το πρόγραμμα SAP 2000 που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις δίνει τη δυνατότητα, μέσω κατάλληλης επιλογής, να ληφθεί υπόψη η επιρροή των φαινομένων αυτών κατά τη στατική ανελαστική ανάλυση. Για λόγους σύγκρισης έγινε ανάλυση pushover του φορέα που εξετάζεται υπολογίζοντας και τα φαινόμενα αυτά. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής συγκρίνονται (για τη συμβατική θετική φορά του οριζόντιου φορτίου) με τα προηγούμενα, χωρίς φαινόμενα μεγάλων μετατοπίσεων, στο Σχ. 3.23.



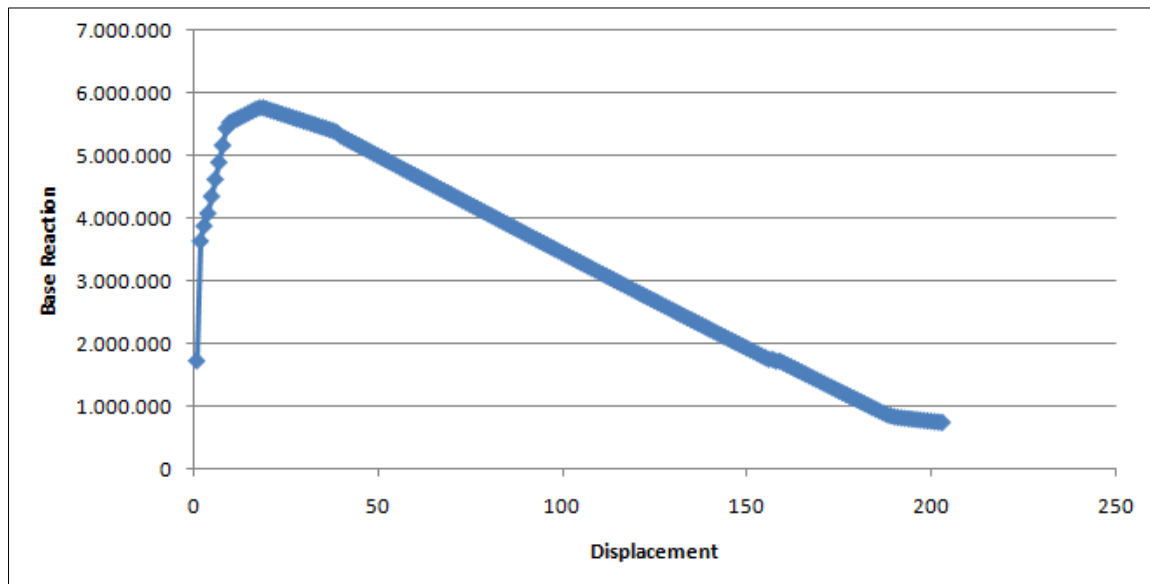
Σχήμα 3.23 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης pushover με (μπλε) και χωρίς (πράσινο) να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα λόγω μεγάλων μετατοπίσεων.

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι, αν και η αντοχή (μέγιστη τέμνουσα βάσης) μένει πρακτικά ανεπηρέαστη, ο συνυπολογισμός των φαινομένων P-Δ οδηγεί σε ταχύτερη απώλεια της φέρουσας ικανότητας των βάρων άρα και του φορέα συνολικά (μικρότερο πλατό, πιο απότομη κλίση του φθίνοντα κλάδου της καμπύλης). Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω της πρόσθετης δράσης (ροπή) άρα και της αυξημένης καταπόνησης των βάρων για σχετικά μεγάλες τιμές της οριζόντιας μετατόπισης που οφείλεται στα φαινόμενα αυτά.

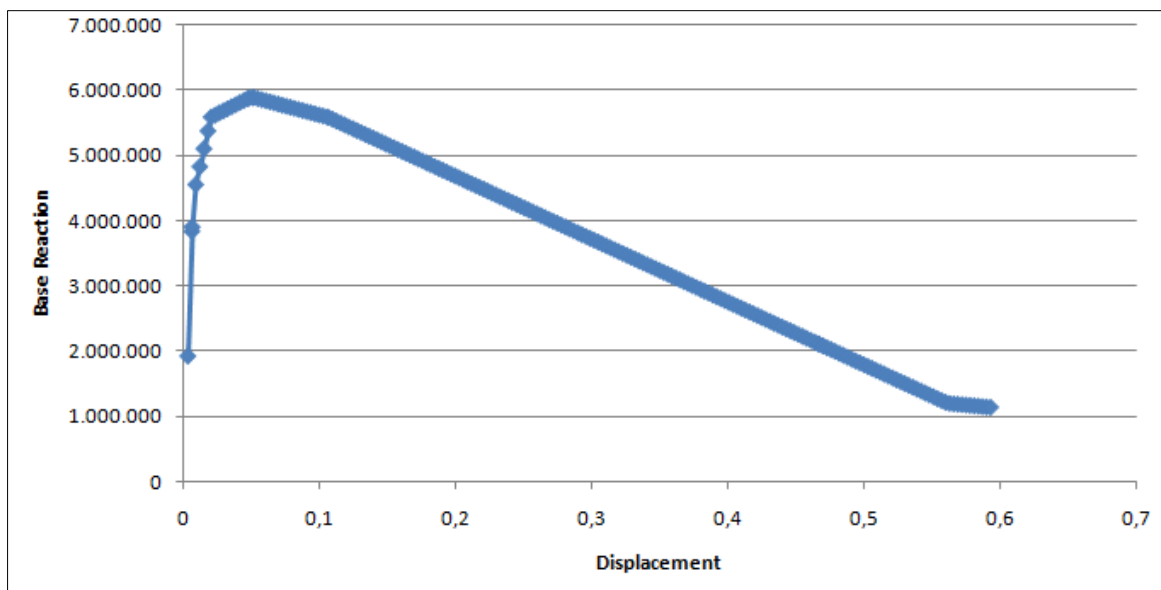
3.7.3 Αξιολόγηση της επιρροής της ποιότητας των υλικών.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για λόγους πληρότητας και σύγκριση, έγιναν αναλύσεις του μοντέλου της γέφυρας θεωρώντας υποβαθμισμένες ποιότητες υλικών (C20, S400, Πιν. 3.1). Στόχος ήταν να μελετηθεί η επιρροή τους στα αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα (καμπύλες ικανότητας της κατασκευής) από τις αναλύσεις για τη δεύτερη ομάδα υλικών παρουσιάζονται στα διαγράμματα των Σχ. 3.24 και 3.25.

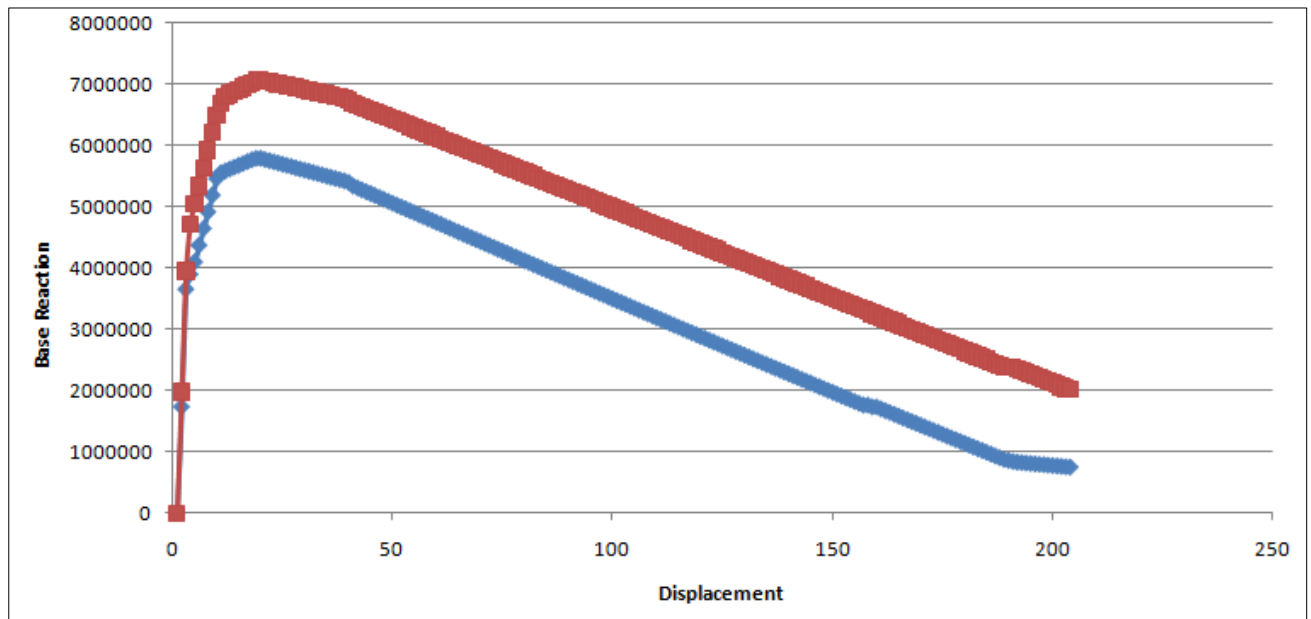


Σχήμα 3.24 Καμπύλη αντίστασης από την ανάλυση του μοντέλου για τη δεύτερη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική θετική φορά.



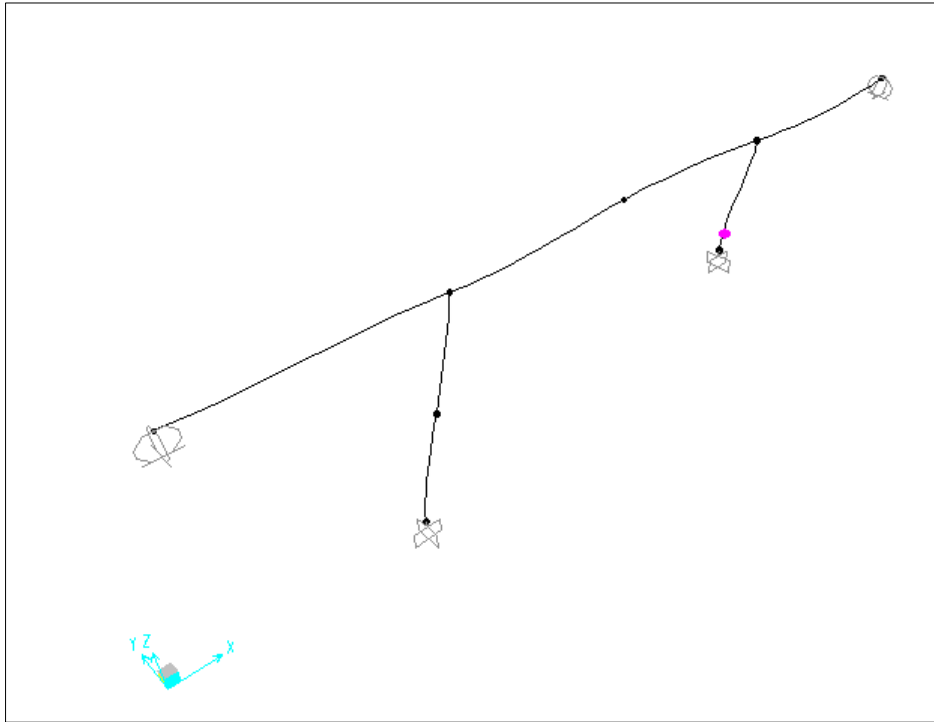
Σχήμα 3.25 Καμπύλη αντίστασης από την ανάλυση του μοντέλου για τη δεύτερη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική αρνητική φορά.

Προφανώς η χρήση «χειρότερων» υλικών οδηγεί σε μείωση της αντοχής (μέγιστη τέμνουσα βάσης) της κατασκευής. Η πρώτη διαρροή συμβαίνει πλέον για τιμή της τέμνουσας βάσης περίπου ίση με 4000 kN, ενώ η μέγιστη τέμνουσα περιορίζεται σε 6000 kN, μειωμένη κατά 18% σε σχέση με το αρχικό μοντέλο (πρώτη ομάδα υλικών, Σχ. 3.13 και 3.14). Η διαφορά στα αποτελέσματα για τις δύο ομάδες υλικών αποτυπώνεται καλύτερα στο συγκριτικό διάγραμμα του Σχ. 3.26.

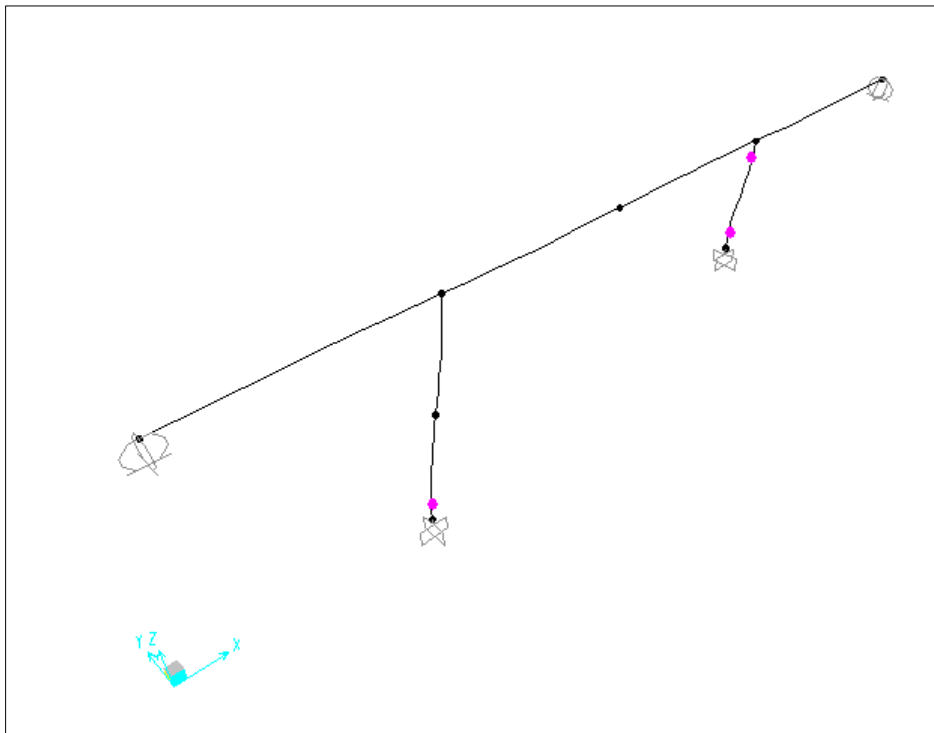


Σχήμα 3.26 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης pushover για την πρώτη (κόκκινο) και δεύτερη (μπλε) ομάδα υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

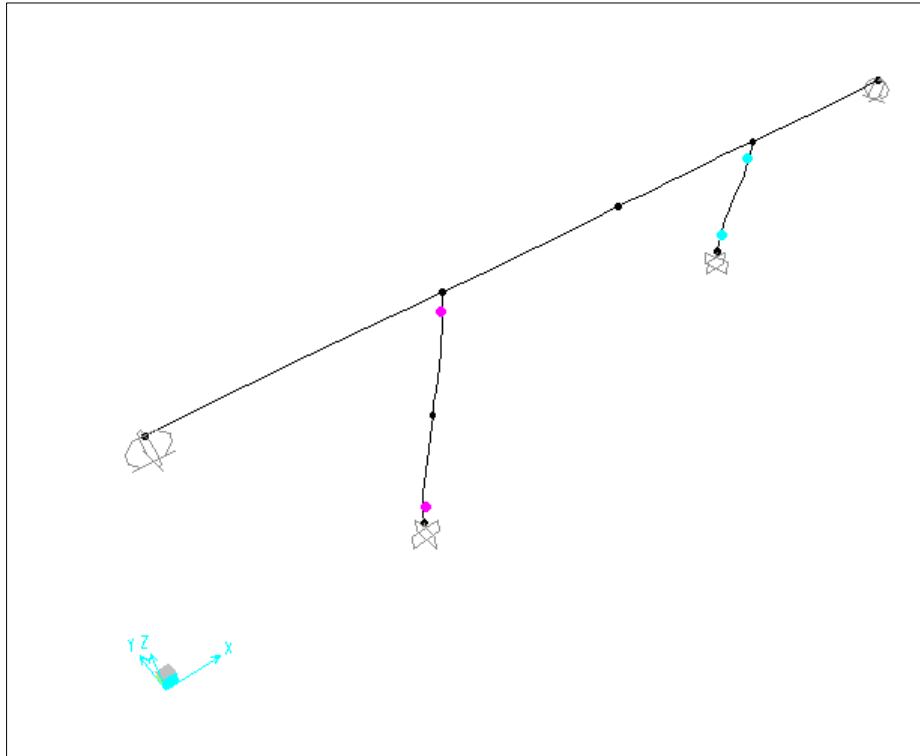
Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται στα Σχ. 3.27 έως 3.32 σκαριφήματα που απεικονίζουν τους ελέγχους των πλαστικών αρθρώσεων σε διάφορα βήματα της ανάλυσης για τη δεύτερη ομάδα υλικών. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι στην περίπτωση αυτή η υπέρβαση των οριακών παραμορφώσεων «συμβαίνει» για μικρότερες τιμές της οριζόντιας μετατόπισης του καταστρώματος.



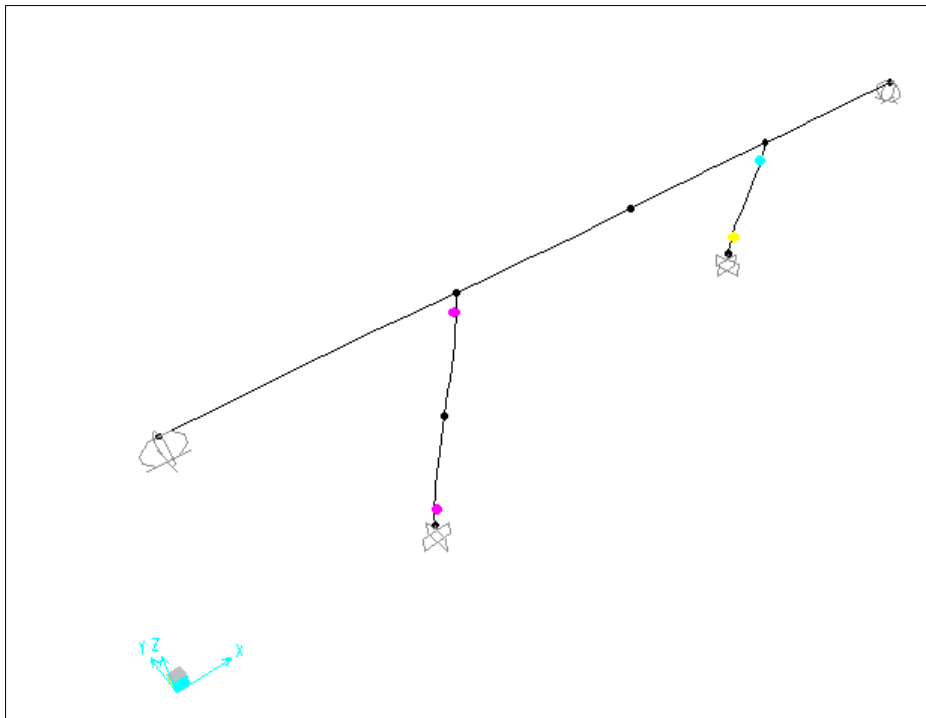
Σχήμα 3.27 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για τη δεύτερη ομάδα υλικών: πρώτη διαρροή στο κοντό βάθρο στο βήμα 3 για μετατόπιση 6,065 mm.



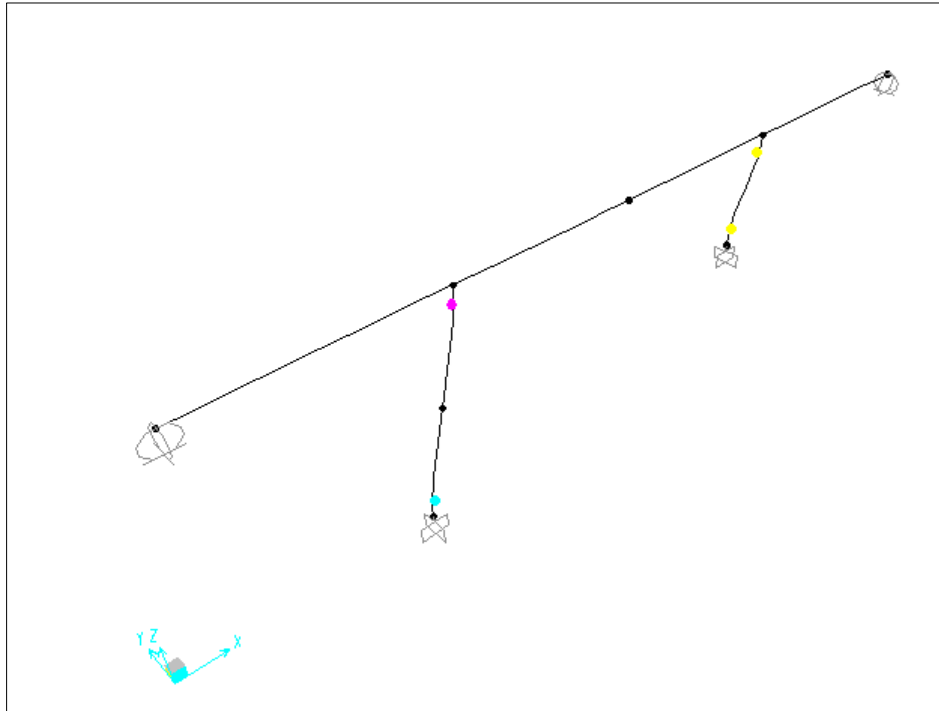
Σχήμα 3.28 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για τη δεύτερη ομάδα υλικών: πρώτη διαρροή στο ψηλό βάθρο στο βήμα 9 για μετατόπιση 21,892 mm.



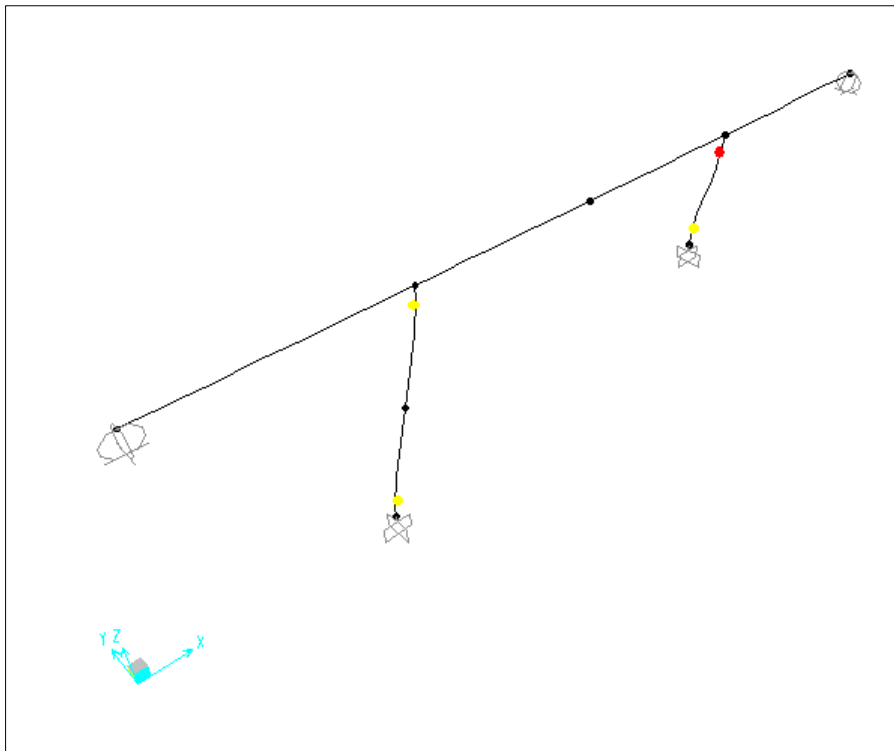
Σχήμα 3.29 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για τη δεύτερη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Ασφάλειας Ζωής» στο κοντό βάθρο στο βήμα 17 για μετατόπιση 45,892 mm.



Σχήμα 3.30 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για τη δεύτερη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Αποφυγής Κατάρρευσης» στο κοντό βάθρο στο βήμα 18 για μετατόπιση 48,359 mm.



Σχήμα 3.31 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για τη δεύτερη ομάδα υλικών: παραμορφώσεις επιπέδου «Ασφάλειας Ζωής» στο ψηλό βάθρο στο βήμα 34 για μετατόπιση 94,212 mm.



Σχήμα 3.32 Αποτελέσματα ανάλυσης του προσομοιώματος για τη δεύτερη ομάδα υλικών: απώλεια φέρουσας ικανότητας στο ψηλό κοντό στο βήμα 160 για μετατόπιση 463,051 mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΣΥΝΤΟΜΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάσθηκαν οι βασικές αρχές των ανελαστικών αναλύσεων και ιδιαίτερα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, γνωστής και ως *rushover*. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα «δημοφιλής» τα τελευταία χρόνια και εφαρμόζεται κυρίως σε προβλήματα αποτίμησης υπαρχόντων, παλαιών κατασκευών. Στην εργασία αυτή η ανάλυση *rushover* χρησιμοποιήθηκε, με κάποιες απλοποιητικές παραδοχές, για τη μελέτη ενός απλού φορέα γέφυρας.

Το βασικό συμπέρασμα από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε είναι ότι η χρήση της στατικής ανελαστικής ανάλυσης μπορεί να δώσει στο μελετητή μηχανικό μια ιδιαίτερα αναλυτική εικόνα για τη σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι πέραν της συνολικής αντοχής της κατασκευής ο μηχανικός παίρνει πληροφορίες για τις παραμορφώσεις, δηλαδή τις βλάβες του φορέα, σε διάφορες θέσεις και για διάφορες στάθμες της σεισμικής έντασης (τιμές της τέμνουσας βάσης). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το σχεδιασμό, «επεμβαίνοντας» στις περιοχές όπου αναμένεται να «πληγούν» περισσότερο. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η συνολική συμπεριφορά του φορέα αποτυπώνεται εποπτικά στο διάγραμμα τέμνουσας βάσης – μετατόπισης, δηλαδή στην καμπύλη αντίστασης που προκύπτει από την ανάλυση.

Η πρόοδος των εξειδικευμένων λογισμικών όπως το SAP 2000 που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή έχει απλοποιήσει σε μεγάλο βαθμό την εφαρμογή της ανάλυσης *rushover*. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε μία σειρά παραμέτρων που πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν, χάριν απλότητας, οι αυτοματοποιημένες δυνατότητες του λογισμικού ανάλυσης. Αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται στην πράξη, όπου απαιτείται προσεκτικός έλεγχος όλων των δεδομένων που εισάγονται σε ένα πρόγραμμα και των αποτελεσμάτων που αυτό εξάγει, ώστε να σημαντικά σφάλματα που ενδέχεται να προκύψουν κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό των κατασκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χ. Κοτανίδης, «15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη».
2. Κανονισμός Επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ.
3. Ανδρέας Ι. Κάππος, «3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας», 2008.
4. Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1998-1:2004 Ευρωκώδικας 8.
5. University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, «Pushover analysis of RC bridge designed according to EN 1998-2».
6. Ε.Ι. Σαπουτζάκης, Διδάσκων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, «Ειδικά θέματα Δυναμικής των Κατασκευών και Σεισμικής Μηχανικής».
7. Μ. Παπαδρακάκης, Διδάσκων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, «Πλαστική ανάλυση ραβδωτών φορέων, Σύγχρονες Μέθοδοι (Μέρος ΙΙ)».
8. Διονύσιος Ε. Μπισκίνης, Διδάσκων Ανώτατου Τεχνολογικού Ιδρύματος Πατρών, «Γεφυροποιία: Είδη γεφυρών και μέθοδοι κατασκευής».
9. LH Λογισμική, πρόγραμμα FESPA, «Στατική Ανελαστική Ανάλυση, (μέθοδος ελέγχου μετατοπίσεων, μέθοδος pushover)».
10. Μ. Παπαδρακάκης, Διδάσκων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, «Προσομοίωση ανελαστικής συμπεριφοράς κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με θεώρηση διατμητικών παραμορφώσεων».
11. Εμμανουήλ Κίρτας, Γεώργιος Παναγόπουλος, «Προσομοίωση Κατασκευών σε Προγράμματα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή - Εφαρμογές με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP2000».
12. Δημήτριος Μπάρος, Ακαδ. Υπότροφος, Διδάσκων Ανώτατου Τεχνολογικού Ιδρύματος Πατρών, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:
ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πιν Π.1 Αποτελέσματα από την ανάλυση του μοντέλου για την πρώτη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική θετική φορά

Step	Displacement m	BaseForce KN	AtoB	BtoD	IDtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0,000307	0,000	4	0	0	0	0	0	0	0	4
1	0,002693	1980,004	4	0	0	0	0	0	0	0	4
2	0,005693	3960,008	4	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0,006854	4726,478	3	1	0	0	0	0	0	0	4
4	0,008186	5062,435	2	2	0	0	0	0	0	0	4
5	0,011186	5350,692	2	2	0	0	0	0	0	0	4
6	0,014186	5639,001	2	2	0	0	0	0	0	0	4
7	0,017186	5927,377	2	2	0	0	0	0	0	0	4
8	0,020186	6215,818	2	2	0	0	0	0	0	0	4
9	0,023186	6504,324	2	2	0	0	0	0	0	0	4
10	0,025231	6701,036	1	3	0	0	0	0	0	0	4
11	0,028231	6805,655	0	4	0	0	0	0	0	0	4
12	0,031231	6844,436	0	4	0	0	0	0	0	0	4
13	0,034231	6883,206	0	4	0	0	0	0	0	0	4
14	0,037231	6921,977	0	4	0	0	0	0	0	0	4
15	0,040231	6960,746	0	4	0	0	0	0	0	0	4
16	0,043231	6999,515	0	3	0	1	0	0	0	0	4
17	0,046231	7038,283	0	2	0	2	0	0	0	0	4
18	0,049054	7074,758	0	2	0	1	0	0	1	0	4
19	0,050644	7080,448	0	2	0	0	0	0	2	0	4
20	0,053644	7064,847	0	2	0	0	0	0	2	0	4
21	0,056644	7049,237	0	2	0	0	0	0	2	0	4
22	0,059644	7033,625	0	2	0	0	0	0	2	0	4
23	0,062644	7018,011	0	2	0	0	0	0	2	0	4
24	0,065644	7002,395	0	2	0	0	0	0	2	0	4
25	0,068644	6986,778	0	2	0	0	0	0	2	0	4
26	0,071644	6971,159	0	2	0	0	0	0	2	0	4
27	0,074644	6955,538	0	2	0	0	0	0	2	0	4
28	0,077644	6939,915	0	2	0	0	0	0	2	0	4
29	0,080644	6924,290	0	2	0	0	0	0	2	0	4
30	0,083644	6908,664	0	2	0	0	0	0	2	0	4
31	0,086644	6893,035	0	2	0	0	0	0	2	0	4
32	0,089644	6877,405	0	2	0	0	0	0	2	0	4
33	0,092644	6861,773	0	2	0	0	0	0	2	0	4
34	0,095644	6846,140	0	2	0	0	0	0	2	0	4
35	0,098644	6830,504	0	1	0	1	0	0	2	0	4
36	0,101644	6814,867	0	0	0	2	0	0	2	0	4
37	0,104644	6799,227	0	0	0	2	0	0	2	0	4
38	0,107644	6783,586	0	0	0	2	0	0	2	0	4
39	0,113429	6746,243	0	0	0	1	0	0	3	0	4
40	0,118325	6702,733	0	0	0	0	0	0	4	0	4
41	0,121325	6673,648	0	0	0	0	0	0	4	0	4
42	0,124325	6644,562	0	0	0	0	0	0	4	0	4
43	0,127325	6615,475	0	0	0	0	0	0	4	0	4
44	0,130325	6586,388	0	0	0	0	0	0	4	0	4
45	0,133325	6557,300	0	0	0	0	0	0	4	0	4
46	0,136325	6528,212	0	0	0	0	0	0	4	0	4
47	0,139325	6499,122	0	0	0	0	0	0	4	0	4
48	0,142325	6470,033	0	0	0	0	0	0	4	0	4
49	0,145325	6440,942	0	0	0	0	0	0	4	0	4
50	0,148325	6411,851	0	0	0	0	0	0	4	0	4
51	0,151325	6382,760	0	0	0	0	0	0	4	0	4
52	0,154325	6353,667	0	0	0	0	0	0	4	0	4

53	0,157325	6324,575	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
54	0,160325	6295,481	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
55	0,163325	6266,387	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
56	0,166325	6237,292	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
57	0,169325	6208,197	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
58	0,172325	6179,101	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
59	0,175325	6150,004	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
60	0,178325	6120,907	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
61	0,181325	6091,809	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
62	0,184325	6062,711	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
63	0,187325	6033,611	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
64	0,190325	6004,512	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
65	0,193325	5975,411	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
66	0,196325	5946,310	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
67	0,199325	5917,209	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
68	0,202325	5888,106	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
69	0,205325	5859,003	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
70	0,208325	5829,900	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
71	0,211325	5800,796	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
72	0,214325	5771,691	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
73	0,217325	5742,585	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
74	0,220325	5713,479	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
75	0,223325	5684,373	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
76	0,226325	5655,265	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
77	0,229325	5626,158	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
78	0,232325	5597,049	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
79	0,235325	5567,940	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
80	0,238325	5538,830	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
81	0,241325	5509,720	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
82	0,244325	5480,609	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
83	0,247325	5451,497	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
84	0,250325	5422,385	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
85	0,253325	5393,272	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
86	0,256325	5364,158	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
87	0,259325	5335,044	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
88	0,262325	5305,929	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
89	0,265325	5276,814	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
90	0,268325	5247,698	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
91	0,271325	5218,581	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4

92	0,274325	5189,464	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
93	0,277325	5160,346	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
94	0,280325	5131,227	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
95	0,283325	5102,108	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
96	0,286325	5072,988	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
97	0,289325	5043,868	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
98	0,292325	5014,747	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
99	0,295325	4985,625	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
100	0,298325	4956,503	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
101	0,301325	4927,380	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
102	0,304325	4898,256	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
103	0,307325	4869,132	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
104	0,310325	4840,007	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
105	0,313325	4810,882	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
106	0,316325	4781,756	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
107	0,319325	4752,629	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
108	0,322325	4723,502	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
109	0,325325	4694,374	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
110	0,328325	4665,245	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
111	0,331325	4636,116	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
112	0,334325	4606,987	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
113	0,337325	4577,856	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
114	0,340325	4548,725	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
115	0,343325	4519,593	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
116	0,346325	4490,461	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
117	0,349325	4461,328	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
118	0,352325	4432,195	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
119	0,355325	4403,061	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
120	0,358325	4373,926	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
121	0,361325	4344,791	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
122	0,364325	4315,655	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
123	0,367325	4286,518	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
124	0,370325	4257,381	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
125	0,373325	4228,243	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
126	0,376325	4199,104	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
127	0,379325	4169,965	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
128	0,382325	4140,825	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
129	0,385325	4111,685	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
130	0,388325	4082,544	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
131	0,391325	4053,402	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
132	0,394325	4024,260	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
133	0,397325	3995,117	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
134	0,400325	3965,974	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
135	0,403325	3936,830	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
136	0,406325	3907,685	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
137	0,409325	3878,540	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
138	0,412325	3849,394	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
139	0,415325	3820,247	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
140	0,418325	3791,100	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
141	0,421325	3761,952	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
142	0,424325	3732,804	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
143	0,427325	3703,655	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
144	0,430325	3674,505	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
145	0,433325	3645,355	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4

146	0,436325	3616,204	0	0	0	0	0	4	0	0	4
147	0,439325	3587,052	0	0	0	0	0	4	0	0	4
148	0,442325	3557,900	0	0	0	0	0	4	0	0	4
149	0,445325	3528,747	0	0	0	0	0	4	0	0	4
150	0,448325	3499,594	0	0	0	0	0	4	0	0	4
151	0,451325	3470,440	0	0	0	0	0	4	0	0	4
152	0,454325	3441,285	0	0	0	0	0	4	0	0	4
153	0,457325	3412,130	0	0	0	0	0	4	0	0	4
154	0,460325	3382,974	0	0	0	0	0	4	0	0	4
155	0,463325	3353,818	0	0	0	0	0	4	0	0	4
156	0,466325	3324,661	0	0	0	0	0	4	0	0	4
157	0,469325	3295,503	0	0	0	0	0	4	0	0	4
158	0,472325	3266,344	0	0	0	0	0	4	0	0	4
159	0,475325	3237,185	0	0	0	0	0	4	0	0	4
160	0,478325	3208,026	0	0	0	0	0	4	0	0	4
161	0,481325	3178,866	0	0	0	0	0	4	0	0	4
162	0,484325	3149,705	0	0	0	0	0	4	0	0	4
163	0,487325	3120,543	0	0	0	0	0	4	0	0	4
164	0,490325	3091,381	0	0	0	0	0	4	0	0	4
165	0,493325	3062,219	0	0	0	0	0	4	0	0	4
166	0,496325	3033,055	0	0	0	0	0	4	0	0	4
167	0,499325	3003,891	0	0	0	0	0	4	0	0	4
168	0,502325	2974,727	0	0	0	0	0	4	0	0	4
169	0,505325	2945,562	0	0	0	0	0	4	0	0	4
170	0,508325	2916,396	0	0	0	0	0	4	0	0	4
171	0,511325	2887,230	0	0	0	0	0	4	0	0	4
172	0,514325	2858,062	0	0	0	0	0	4	0	0	4
173	0,517325	2828,895	0	0	0	0	0	4	0	0	4
174	0,520325	2799,727	0	0	0	0	0	4	0	0	4
175	0,523325	2770,558	0	0	0	0	0	4	0	0	4
176	0,526325	2741,388	0	0	0	0	0	4	0	0	4
177	0,529325	2712,218	0	0	0	0	0	4	0	0	4
178	0,532325	2683,047	0	0	0	0	0	4	0	0	4
179	0,535325	2653,876	0	0	0	0	0	4	0	0	4
180	0,538325	2624,704	0	0	0	0	0	4	0	0	4
181	0,541325	2595,532	0	0	0	0	0	4	0	0	4
182	0,544325	2566,358	0	0	0	0	0	4	0	0	4
183	0,547325	2537,185	0	0	0	0	0	4	0	0	4
184	0,550325	2508,010	0	0	0	0	0	4	0	0	4
185	0,553325	2478,835	0	0	0	0	0	4	0	0	4
186	0,556325	2449,659	0	0	0	0	0	4	0	0	4
187	0,559325	2420,483	0	0	0	0	0	4	0	0	4
188	0,562325	2391,306	0	0	0	0	0	2	2	0	4
189	0,562325	2391,306	0	0	0	0	0	2	1	1	4
193	0,571325	2303,772	0	0	0	0	0	2	0	2	4
194	0,574325	2274,592	0	0	0	0	0	2	0	2	4
195	0,577325	2245,412	0	0	0	0	0	2	0	2	4
196	0,580325	2216,232	0	0	0	0	0	2	0	2	4
197	0,583325	2187,051	0	0	0	0	0	2	0	2	4
198	0,586325	2157,869	0	0	0	0	0	2	0	2	4
199	0,589325	2128,686	0	0	0	0	0	2	0	2	4
200	0,592325	2099,503	0	0	0	0	0	2	0	2	4
201	0,595325	2070,320	0	0	0	0	0	2	0	2	4
202	0,598325	2041,135	0	0	0	0	0	2	0	2	4
203	0,599693	2027,829	0	0	0	0	0	2	0	2	4

Πιν Π.2 Αποτελέσματα από την ανάλυση του μοντέλου για την πρώτη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική αρνητική φορά

Step	Displacemer m	BaseForce KN	AtoB	BtoD	ItoLS	LstoCP	CptoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0,000307	0,000	4	0	0	0	0	0	0	0	4
1	-0,003307	1980,004	4	0	0	0	0	0	0	0	4
2	-0,006307	3960,008	4	0	0	0	0	0	0	0	4
3	-0,007481	4735,241	3	1	0	0	0	0	0	0	4
4	-0,010481	5492,096	2	2	0	0	0	0	0	0	4
5	-0,013481	5780,595	2	2	0	0	0	0	0	0	4
6	-0,016481	6069,000	2	2	0	0	0	0	0	0	4
7	-0,019481	6357,345	2	2	0	0	0	0	0	0	4
8	-0,022481	6645,624	2	2	0	0	0	0	0	0	4
9	-0,024206	6811,283	0	4	0	0	0	0	0	0	4
10	-0,027206	6856,155	0	4	0	0	0	0	0	0	4
11	-0,030206	6900,997	0	4	0	0	0	0	0	0	4
12	-0,033206	6945,852	0	4	0	0	0	0	0	0	4
13	-0,036206	6990,699	0	4	0	0	0	0	0	0	4
14	-0,039206	7035,556	0	4	0	0	0	0	0	0	4
15	-0,042206	7080,406	0	3	0	1	0	0	0	0	4
16	-0,045206	7125,265	0	3	0	1	0	0	0	0	4
17	-0,048206	7170,117	0	2	0	2	0	0	0	0	4
18	-0,049126	7183,885	0	2	0	1	0	1	0	0	4
19	-0,052126	7201,082	0	2	0	1	0	1	0	0	4
20	-0,053109	7206,710	0	2	0	0	0	2	0	0	4
21	-0,056109	7197,965	0	2	0	0	0	2	0	0	4
22	-0,059109	7189,211	0	2	0	0	0	2	0	0	4
23	-0,062109	7180,463	0	2	0	0	0	2	0	0	4
24	-0,065109	7171,714	0	2	0	0	0	2	0	0	4
25	-0,068109	7162,970	0	2	0	0	0	2	0	0	4
26	-0,071109	7154,225	0	2	0	0	0	2	0	0	4
27	-0,074109	7145,485	0	2	0	0	0	2	0	0	4
28	-0,077109	7136,745	0	2	0	0	0	2	0	0	4
29	-0,080109	7128,009	0	2	0	0	0	2	0	0	4
30	-0,083109	7119,273	0	2	0	0	0	2	0	0	4
31	-0,086109	7110,542	0	2	0	0	0	2	0	0	4
32	-0,089109	7101,810	0	2	0	0	0	2	0	0	4
33	-0,092109	7093,083	0	2	0	0	0	2	0	0	4
34	-0,095109	7084,355	0	1	0	1	0	2	0	0	4
35	-0,098109	7075,632	0	1	0	1	0	2	0	0	4
36	-0,101109	7066,910	0	1	0	1	0	2	0	0	4
37	-0,104109	7058,192	0	0	0	2	0	2	0	0	4
38	-0,107109	7049,474	0	0	0	1	0	3	0	0	4
39	-0,110109	7033,295	0	0	0	1	0	3	0	0	4
40	-0,113109	7017,112	0	0	0	1	0	3	0	0	4
41	-0,116109	7000,932	0	0	0	0	0	4	0	0	4
42	-0,119109	6971,363	0	0	0	0	0	4	0	0	4
43	-0,122109	6941,793	0	0	0	0	0	4	0	0	4
44	-0,125109	6912,224	0	0	0	0	0	4	0	0	4
45	-0,128109	6882,655	0	0	0	0	0	4	0	0	4
46	-0,131109	6853,087	0	0	0	0	0	4	0	0	4
47	-0,134109	6823,520	0	0	0	0	0	4	0	0	4
48	-0,137109	6793,952	0	0	0	0	0	4	0	0	4
49	-0,140109	6764,386	0	0	0	0	0	4	0	0	4
50	-0,143109	6734,820	0	0	0	0	0	4	0	0	4
51	-0,146109	6705,255	0	0	0	0	0	4	0	0	4
52	-0,149109	6675,690	0	0	0	0	0	4	0	0	4
53	-0,152109	6646,126	0	0	0	0	0	4	0	0	4

54	-0,155109	6616,562	0	0	0	0	0	4	0	0	4
55	-0,158109	6586,999	0	0	0	0	0	4	0	0	4
56	-0,161109	6557,436	0	0	0	0	0	4	0	0	4
57	-0,164109	6527,874	0	0	0	0	0	4	0	0	4
58	-0,167109	6498,313	0	0	0	0	0	4	0	0	4
59	-0,170109	6468,752	0	0	0	0	0	4	0	0	4
60	-0,173109	6439,191	0	0	0	0	0	4	0	0	4
61	-0,176109	6409,632	0	0	0	0	0	4	0	0	4
62	-0,179109	6380,072	0	0	0	0	0	4	0	0	4
63	-0,182109	6350,514	0	0	0	0	0	4	0	0	4
64	-0,185109	6320,956	0	0	0	0	0	4	0	0	4
65	-0,188109	6291,398	0	0	0	0	0	4	0	0	4
66	-0,191109	6261,841	0	0	0	0	0	4	0	0	4
67	-0,194109	6232,285	0	0	0	0	0	4	0	0	4
68	-0,197109	6202,729	0	0	0	0	0	4	0	0	4
69	-0,200109	6173,173	0	0	0	0	0	4	0	0	4
70	-0,203109	6143,619	0	0	0	0	0	4	0	0	4
71	-0,206109	6114,064	0	0	0	0	0	4	0	0	4
72	-0,209109	6084,511	0	0	0	0	0	4	0	0	4
73	-0,212109	6054,958	0	0	0	0	0	4	0	0	4
74	-0,215109	6025,405	0	0	0	0	0	4	0	0	4
75	-0,218109	5995,853	0	0	0	0	0	4	0	0	4
76	-0,221109	5966,302	0	0	0	0	0	4	0	0	4
77	-0,224109	5936,751	0	0	0	0	0	4	0	0	4
78	-0,227109	5907,201	0	0	0	0	0	4	0	0	4
79	-0,230109	5877,651	0	0	0	0	0	4	0	0	4
80	-0,233109	5848,102	0	0	0	0	0	4	0	0	4
81	-0,236109	5818,553	0	0	0	0	0	4	0	0	4
82	-0,239109	5789,005	0	0	0	0	0	4	0	0	4
83	-0,242109	5759,458	0	0	0	0	0	4	0	0	4
84	-0,245109	5729,911	0	0	0	0	0	4	0	0	4
85	-0,248109	5700,364	0	0	0	0	0	4	0	0	4
86	-0,251109	5670,819	0	0	0	0	0	4	0	0	4
87	-0,254109	5641,273	0	0	0	0	0	4	0	0	4
88	-0,257109	5611,729	0	0	0	0	0	4	0	0	4
89	-0,260109	5582,185	0	0	0	0	0	4	0	0	4
90	-0,263109	5552,641	0	0	0	0	0	4	0	0	4
91	-0,266109	5523,098	0	0	0	0	0	4	0	0	4
92	-0,269109	5493,556	0	0	0	0	0	4	0	0	4
93	-0,272109	5464,014	0	0	0	0	0	4	0	0	4
94	-0,275109	5434,472	0	0	0	0	0	4	0	0	4
95	-0,278109	5404,932	0	0	0	0	0	4	0	0	4

96	-0,281109	5375,392	0	0	0	0	0	4	0	0	4
97	-0,284109	5345,852	0	0	0	0	0	4	0	0	4
98	-0,287109	5316,313	0	0	0	0	0	4	0	0	4
99	-0,290109	5286,774	0	0	0	0	0	4	0	0	4
100	-0,293109	5257,236	0	0	0	0	0	4	0	0	4
101	-0,296109	5227,699	0	0	0	0	0	4	0	0	4
102	-0,299109	5198,162	0	0	0	0	0	4	0	0	4
103	-0,302109	5168,626	0	0	0	0	0	4	0	0	4
104	-0,305109	5139,090	0	0	0	0	0	4	0	0	4
105	-0,308109	5109,555	0	0	0	0	0	4	0	0	4
106	-0,311109	5080,021	0	0	0	0	0	4	0	0	4
107	-0,314109	5050,487	0	0	0	0	0	4	0	0	4
108	-0,317109	5020,953	0	0	0	0	0	4	0	0	4
109	-0,320109	4991,420	0	0	0	0	0	4	0	0	4
110	-0,323109	4961,888	0	0	0	0	0	4	0	0	4
111	-0,326109	4932,356	0	0	0	0	0	4	0	0	4
112	-0,329109	4902,825	0	0	0	0	0	4	0	0	4
113	-0,332109	4873,294	0	0	0	0	0	4	0	0	4
114	-0,335109	4843,764	0	0	0	0	0	4	0	0	4
115	-0,338109	4814,235	0	0	0	0	0	4	0	0	4
116	-0,341109	4784,706	0	0	0	0	0	4	0	0	4
117	-0,344109	4755,177	0	0	0	0	0	4	0	0	4
118	-0,347109	4725,650	0	0	0	0	0	4	0	0	4
119	-0,350109	4696,122	0	0	0	0	0	4	0	0	4
120	-0,353109	4666,596	0	0	0	0	0	4	0	0	4
121	-0,356109	4637,070	0	0	0	0	0	4	0	0	4
122	-0,359109	4607,544	0	0	0	0	0	4	0	0	4
123	-0,362109	4578,019	0	0	0	0	0	4	0	0	4
124	-0,365109	4548,495	0	0	0	0	0	4	0	0	4
125	-0,368109	4518,971	0	0	0	0	0	4	0	0	4
126	-0,371109	4489,447	0	0	0	0	0	4	0	0	4
127	-0,374109	4459,925	0	0	0	0	0	4	0	0	4
128	-0,377109	4430,403	0	0	0	0	0	4	0	0	4
129	-0,380109	4400,881	0	0	0	0	0	4	0	0	4
130	-0,383109	4371,360	0	0	0	0	0	4	0	0	4
131	-0,386109	4341,839	0	0	0	0	0	4	0	0	4
132	-0,389109	4312,320	0	0	0	0	0	4	0	0	4
133	-0,392109	4282,800	0	0	0	0	0	4	0	0	4
134	-0,395109	4253,281	0	0	0	0	0	4	0	0	4
135	-0,398109	4223,763	0	0	0	0	0	4	0	0	4
136	-0,401109	4194,246	0	0	0	0	0	4	0	0	4
137	-0,404109	4164,728	0	0	0	0	0	4	0	0	4
138	-0,407109	4135,212	0	0	0	0	0	4	0	0	4
139	-0,410109	4105,696	0	0	0	0	0	4	0	0	4
140	-0,413109	4076,181	0	0	0	0	0	4	0	0	4
141	-0,416109	4046,666	0	0	0	0	0	4	0	0	4
142	-0,419109	4017,152	0	0	0	0	0	4	0	0	4
143	-0,422109	3987,638	0	0	0	0	0	4	0	0	4
144	-0,425109	3958,125	0	0	0	0	0	4	0	0	4
145	-0,428109	3928,612	0	0	0	0	0	4	0	0	4
146	-0,431109	3899,100	0	0	0	0	0	4	0	0	4
147	-0,434109	3869,589	0	0	0	0	0	4	0	0	4
148	-0,437109	3840,078	0	0	0	0	0	4	0	0	4
149	-0,440109	3810,568	0	0	0	0	0	4	0	0	4

150	-0,443109	3781,058	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
151	-0,446109	3751,549	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
152	-0,449109	3722,040	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
153	-0,452109	3692,532	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
154	-0,455109	3663,025	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
155	-0,458109	3633,518	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
156	-0,461109	3604,011	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
157	-0,464109	3574,506	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
158	-0,467109	3545,000	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
159	-0,470109	3515,496	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
160	-0,473109	3485,992	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
161	-0,476109	3456,488	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
162	-0,479109	3426,985	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
163	-0,482109	3397,483	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
164	-0,485109	3367,981	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
165	-0,488109	3338,480	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
166	-0,491109	3308,979	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
167	-0,494109	3279,479	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
168	-0,497109	3249,980	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
169	-0,500109	3220,481	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
170	-0,503109	3190,982	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
171	-0,506109	3161,485	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
172	-0,509109	3131,987	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
173	-0,512109	3102,491	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
174	-0,515109	3072,995	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
175	-0,518109	3043,499	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
176	-0,521109	3014,004	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
177	-0,524109	2984,510	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
178	-0,527109	2955,016	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
179	-0,530109	2925,523	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
180	-0,533109	2896,030	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
181	-0,536109	2866,538	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
182	-0,539109	2837,046	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
183	-0,542109	2807,555	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
184	-0,545109	2778,065	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
185	-0,548109	2748,575	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
186	-0,551109	2719,086	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
187	-0,554109	2689,597	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
188	-0,557109	2660,109	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
189	-0,560109	2630,621	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
190	-0,563109	2601,134	0	0	0	0	0	0	3	1	0	4
191	-0,563109	2601,134	0	0	0	0	0	0	3	0	1	4
192	-0,566109	2571,648	0	0	0	0	0	0	2	1	1	4
193	-0,566109	2571,648	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
194	-0,569109	2542,162	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
195	-0,572109	2512,677	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
196	-0,575109	2483,192	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
197	-0,578109	2453,708	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
198	-0,581109	2424,224	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
199	-0,584109	2394,741	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
200	-0,587109	2365,259	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
201	-0,590109	2335,777	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
202	-0,593109	2306,296	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
203	-0,596109	2276,815	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4

Πιν Π.3 Αποτελέσματα από την ανάλυση του μοντέλου για τη δεύτερη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική θετική φορά

Step	Displacement m	BaseForce KN	AtoB	BtoI0	I0toLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0,000317	0,000	4	0	0	0	0	0	0	0	4
1	0,002683	1736,041	4	0	0	0	0	0	0	0	4
2	0,005683	3648,228	4	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0,006065	3891,630	3	1	0	0	0	0	0	0	4
4	0,006892	4091,544	2	2	0	0	0	0	0	0	4
5	0,009892	4363,867	2	2	0	0	0	0	0	0	4
6	0,012892	4635,841	2	2	0	0	0	0	0	0	4
7	0,015892	4907,805	2	2	0	0	0	0	0	0	4
8	0,018892	5179,756	2	2	0	0	0	0	0	0	4
9	0,021892	5451,693	1	3	0	0	0	0	0	0	4
10	0,024892	5544,850	0	4	0	0	0	0	0	0	4
11	0,027892	5574,703	0	4	0	0	0	0	0	0	4
12	0,030892	5604,544	0	4	0	0	0	0	0	0	4
13	0,033892	5634,387	0	4	0	0	0	0	0	0	4
14	0,036892	5664,228	0	4	0	0	0	0	0	0	4
15	0,039892	5694,069	0	4	0	0	0	0	0	0	4
16	0,042892	5723,909	0	2	0	2	0	0	0	0	4
17	0,045892	5753,747	0	2	0	2	0	0	0	0	4
18	0,048359	5778,081	0	2	0	1	0	1	0	0	4
19	0,049212	5779,150	0	2	0	0	0	2	0	0	4
20	0,052212	5760,005	0	2	0	0	0	2	0	0	4
21	0,055212	5740,703	0	2	0	0	0	2	0	0	4
22	0,058212	5721,400	0	2	0	0	0	2	0	0	4
23	0,061212	5702,095	0	2	0	0	0	2	0	0	4
24	0,064212	5682,789	0	2	0	0	0	2	0	0	4
25	0,067212	5663,481	0	2	0	0	0	2	0	0	4
26	0,070212	5644,172	0	2	0	0	0	2	0	0	4
27	0,073212	5624,861	0	2	0	0	0	2	0	0	4
28	0,076212	5605,550	0	2	0	0	0	2	0	0	4
29	0,079212	5586,237	0	2	0	0	0	2	0	0	4
30	0,082212	5566,924	0	2	0	0	0	2	0	0	4
31	0,085212	5547,610	0	2	0	0	0	2	0	0	4
32	0,088212	5528,296	0	2	0	0	0	2	0	0	4
33	0,091212	5508,981	0	2	0	0	0	2	0	0	4
34	0,094212	5489,667	0	1	0	1	0	2	0	0	4
35	0,097212	5470,352	0	1	0	1	0	2	0	0	4
36	0,100212	5451,038	0	0	0	2	0	2	0	0	4
37	0,103212	5431,723	0	0	0	2	0	2	0	0	4
38	0,106212	5412,410	0	0	0	1	0	3	0	0	4
39	0,109212	5386,565	0	0	0	1	0	3	0	0	4
40	0,115051	5330,629	0	0	0	0	0	4	0	0	4
41	0,118051	5299,235	0	0	0	0	0	4	0	0	4
42	0,121051	5267,847	0	0	0	0	0	4	0	0	4
43	0,124051	5236,465	0	0	0	0	0	4	0	0	4
44	0,127051	5205,089	0	0	0	0	0	4	0	0	4
45	0,130051	5173,720	0	0	0	0	0	4	0	0	4
46	0,133051	5142,357	0	0	0	0	0	4	0	0	4
47	0,136051	5111,001	0	0	0	0	0	4	0	0	4
48	0,139051	5079,651	0	0	0	0	0	4	0	0	4
49	0,142051	5048,308	0	0	0	0	0	4	0	0	4
50	0,145051	5016,973	0	0	0	0	0	4	0	0	4
51	0,148051	4985,644	0	0	0	0	0	4	0	0	4
52	0,151051	4954,323	0	0	0	0	0	4	0	0	4
53	0,154051	4923,009	0	0	0	0	0	4	0	0	4

54	0,157051	4891,703	0	0	0	0	0	4	0	0	4
55	0,160051	4860,404	0	0	0	0	0	4	0	0	4
56	0,163051	4829,113	0	0	0	0	0	4	0	0	4
57	0,166051	4797,829	0	0	0	0	0	4	0	0	4
58	0,169051	4766,554	0	0	0	0	0	4	0	0	4
59	0,172051	4735,287	0	0	0	0	0	4	0	0	4
60	0,175051	4704,028	0	0	0	0	0	4	0	0	4
61	0,178051	4672,778	0	0	0	0	0	4	0	0	4
62	0,181051	4641,536	0	0	0	0	0	4	0	0	4
63	0,184051	4610,303	0	0	0	0	0	4	0	0	4
64	0,187051	4579,078	0	0	0	0	0	4	0	0	4
65	0,190051	4547,862	0	0	0	0	0	4	0	0	4
66	0,193051	4516,656	0	0	0	0	0	4	0	0	4
67	0,196051	4485,458	0	0	0	0	0	4	0	0	4
68	0,199051	4454,270	0	0	0	0	0	4	0	0	4
69	0,202051	4423,091	0	0	0	0	0	4	0	0	4
70	0,205051	4391,922	0	0	0	0	0	4	0	0	4
71	0,208051	4360,762	0	0	0	0	0	4	0	0	4
72	0,211051	4329,612	0	0	0	0	0	4	0	0	4
73	0,214051	4298,472	0	0	0	0	0	4	0	0	4
74	0,217051	4267,342	0	0	0	0	0	4	0	0	4
75	0,220051	4236,223	0	0	0	0	0	4	0	0	4
76	0,223051	4205,113	0	0	0	0	0	4	0	0	4
77	0,226051	4174,014	0	0	0	0	0	4	0	0	4
78	0,229051	4142,926	0	0	0	0	0	4	0	0	4
79	0,232051	4111,848	0	0	0	0	0	4	0	0	4
80	0,235051	4080,781	0	0	0	0	0	4	0	0	4
81	0,238051	4049,725	0	0	0	0	0	4	0	0	4
82	0,241051	4018,680	0	0	0	0	0	4	0	0	4
83	0,244051	3987,646	0	0	0	0	0	4	0	0	4
84	0,247051	3956,623	0	0	0	0	0	4	0	0	4
85	0,250051	3925,612	0	0	0	0	0	4	0	0	4
86	0,253051	3894,613	0	0	0	0	0	4	0	0	4
87	0,256051	3863,625	0	0	0	0	0	4	0	0	4
88	0,259051	3832,649	0	0	0	0	0	4	0	0	4
89	0,262051	3801,685	0	0	0	0	0	4	0	0	4
90	0,265051	3770,734	0	0	0	0	0	4	0	0	4
91	0,268051	3739,794	0	0	0	0	0	4	0	0	4
92	0,271051	3708,867	0	0	0	0	0	4	0	0	4
93	0,274051	3677,952	0	0	0	0	0	4	0	0	4
94	0,277051	3647,050	0	0	0	0	0	4	0	0	4

95	0,280051	3616,161	0	0	0	0	0	4	0	0	4
96	0,283051	3585,284	0	0	0	0	0	4	0	0	4
97	0,286051	3554,421	0	0	0	0	0	4	0	0	4
98	0,289051	3523,570	0	0	0	0	0	4	0	0	4
99	0,292051	3492,733	0	0	0	0	0	4	0	0	4
100	0,295051	3461,910	0	0	0	0	0	4	0	0	4
101	0,298051	3431,100	0	0	0	0	0	4	0	0	4
102	0,301051	3400,303	0	0	0	0	0	4	0	0	4
103	0,304051	3369,521	0	0	0	0	0	4	0	0	4
104	0,307051	3338,752	0	0	0	0	0	4	0	0	4
105	0,310051	3307,997	0	0	0	0	0	4	0	0	4
106	0,313051	3277,257	0	0	0	0	0	4	0	0	4
107	0,316051	3246,531	0	0	0	0	0	4	0	0	4
108	0,319051	3215,819	0	0	0	0	0	4	0	0	4
109	0,322051	3185,122	0	0	0	0	0	4	0	0	4
110	0,325051	3154,440	0	0	0	0	0	4	0	0	4
111	0,328051	3123,773	0	0	0	0	0	4	0	0	4
112	0,331051	3093,120	0	0	0	0	0	4	0	0	4
113	0,334051	3062,483	0	0	0	0	0	4	0	0	4
114	0,337051	3031,861	0	0	0	0	0	4	0	0	4
115	0,340051	3001,254	0	0	0	0	0	4	0	0	4
116	0,343051	2970,663	0	0	0	0	0	4	0	0	4
117	0,346051	2940,088	0	0	0	0	0	4	0	0	4
118	0,349051	2909,528	0	0	0	0	0	4	0	0	4
119	0,352051	2878,984	0	0	0	0	0	4	0	0	4
120	0,355051	2848,457	0	0	0	0	0	4	0	0	4
121	0,358051	2817,945	0	0	0	0	0	4	0	0	4
122	0,361051	2787,450	0	0	0	0	0	4	0	0	4
123	0,364051	2756,971	0	0	0	0	0	4	0	0	4
124	0,367051	2726,509	0	0	0	0	0	4	0	0	4
125	0,370051	2696,064	0	0	0	0	0	4	0	0	4
126	0,373051	2665,635	0	0	0	0	0	4	0	0	4
127	0,376051	2635,224	0	0	0	0	0	4	0	0	4
128	0,379051	2604,830	0	0	0	0	0	4	0	0	4
129	0,382051	2574,452	0	0	0	0	0	4	0	0	4
130	0,385051	2544,093	0	0	0	0	0	4	0	0	4
131	0,388051	2513,751	0	0	0	0	0	4	0	0	4
132	0,391051	2483,426	0	0	0	0	0	4	0	0	4
133	0,394051	2453,120	0	0	0	0	0	4	0	0	4
134	0,397051	2422,831	0	0	0	0	0	4	0	0	4
135	0,400051	2392,560	0	0	0	0	0	4	0	0	4
136	0,403051	2362,308	0	0	0	0	0	4	0	0	4
137	0,406051	2332,074	0	0	0	0	0	4	0	0	4
138	0,409051	2301,859	0	0	0	0	0	4	0	0	4
139	0,412051	2271,662	0	0	0	0	0	4	0	0	4
140	0,415051	2241,484	0	0	0	0	0	4	0	0	4
141	0,418051	2211,324	0	0	0	0	0	4	0	0	4
142	0,421051	2181,184	0	0	0	0	0	4	0	0	4
143	0,424051	2151,063	0	0	0	0	0	4	0	0	4
144	0,427051	2120,962	0	0	0	0	0	4	0	0	4
145	0,430051	2090,879	0	0	0	0	0	4	0	0	4
146	0,433051	2060,817	0	0	0	0	0	4	0	0	4
147	0,436051	2030,774	0	0	0	0	0	4	0	0	4

148	0,439051	2000,751	0	0	0	0	0	4	0	0	4
149	0,442051	1970,748	0	0	0	0	0	4	0	0	4
150	0,445051	1940,765	0	0	0	0	0	4	0	0	4
151	0,448051	1910,803	0	0	0	0	0	4	0	0	4
152	0,451051	1880,861	0	0	0	0	0	4	0	0	4
153	0,454051	1850,939	0	0	0	0	0	4	0	0	4
154	0,457051	1821,038	0	0	0	0	0	4	0	0	4
155	0,460051	1791,158	0	0	0	0	0	4	0	0	4
156	0,463051	1761,299	0	0	0	0	0	3	1	0	4
157	0,463051	1761,299	0	0	0	0	0	3	0	1	4
158	0,466051	1731,462	0	0	0	0	0	2	1	1	4
159	0,466051	1731,462	0	0	0	0	0	2	0	2	4
160	0,469051	1701,645	0	0	0	0	0	2	0	2	4
161	0,472051	1671,850	0	0	0	0	0	2	0	2	4
162	0,475051	1642,076	0	0	0	0	0	2	0	2	4
163	0,478051	1612,324	0	0	0	0	0	2	0	2	4
164	0,481051	1582,594	0	0	0	0	0	2	0	2	4
165	0,484051	1552,886	0	0	0	0	0	2	0	2	4
166	0,487051	1523,200	0	0	0	0	0	2	0	2	4
167	0,490051	1493,536	0	0	0	0	0	2	0	2	4
168	0,493051	1463,895	0	0	0	0	0	2	0	2	4
169	0,496051	1434,276	0	0	0	0	0	2	0	2	4
170	0,499051	1404,680	0	0	0	0	0	2	0	2	4
171	0,502051	1375,106	0	0	0	0	0	2	0	2	4
172	0,505051	1345,556	0	0	0	0	0	2	0	2	4
173	0,508051	1316,029	0	0	0	0	0	2	0	2	4
174	0,511051	1286,525	0	0	0	0	0	2	0	2	4
175	0,514051	1257,044	0	0	0	0	0	2	0	2	4
176	0,517051	1227,587	0	0	0	0	0	2	0	2	4
177	0,520051	1198,153	0	0	0	0	0	2	0	2	4
178	0,523051	1168,744	0	0	0	0	0	2	0	2	4
179	0,526051	1139,358	0	0	0	0	0	2	0	2	4
180	0,529051	1109,997	0	0	0	0	0	2	0	2	4
181	0,532051	1080,659	0	0	0	0	0	2	0	2	4
182	0,535051	1051,346	0	0	0	0	0	2	0	2	4
183	0,538051	1022,058	0	0	0	0	0	2	0	2	4
184	0,541051	992,794	0	0	0	0	0	2	0	2	4
185	0,544051	963,556	0	0	0	0	0	2	0	2	4
186	0,547051	934,342	0	0	0	0	0	2	0	2	4
187	0,550051	905,153	0	0	0	0	0	2	0	2	4
188	0,553051	875,989	0	0	0	0	0	2	0	2	4
189	0,554581	860,770	0	0	0	0	0	2	0	2	4
190	0,557581	843,132	0	0	0	0	0	2	0	2	4
191	0,559502	831,614	0	0	0	0	0	2	0	2	4
192	0,562502	824,854	0	0	0	0	0	2	0	2	4
193	0,565502	818,107	0	0	0	0	0	2	0	2	4
194	0,568502	811,374	0	0	0	0	0	2	0	2	4
195	0,571502	804,656	0	0	0	0	0	2	0	2	4
196	0,574502	797,954	0	0	0	0	0	2	0	2	4
197	0,577502	791,266	0	0	0	0	0	2	0	2	4
198	0,580502	784,594	0	0	0	0	0	2	0	2	4
199	0,583502	777,937	0	0	0	0	0	2	0	2	4
200	0,586502	771,295	0	0	0	0	0	2	0	2	4
201	0,589502	764,669	0	0	0	0	0	2	0	2	4
202	0,592502	758,058	0	0	0	0	0	2	0	2	4
203	0,595502	751,463	0	0	0	0	0	2	0	2	4

Πιν Π.4 Αποτελέσματα από την ανάλυση του μοντέλου για τη δεύτερη ομάδα υλικών και οριζόντια φορτία κατά τη συμβατική αρνητική φορά

Step	Displacement m	BaseForce KN	AtoB	BtoID	IDtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0,000317	0,000	4	0	0	0	0	0	0	0	4
1	-0,003317	1914,004	4	0	0	0	0	0	0	0	4
2	-0,006317	3828,007	4	0	0	0	0	0	0	0	4
3	-0,006424	3895,749	3	1	0	0	0	0	0	0	4
4	-0,009099	4544,787	2	2	0	0	0	0	0	0	4
5	-0,012099	4819,091	2	2	0	0	0	0	0	0	4
6	-0,015099	5093,307	2	2	0	0	0	0	0	0	4
7	-0,018099	5367,463	2	2	0	0	0	0	0	0	4
8	-0,020420	5579,517	0	4	0	0	0	0	0	0	4
9	-0,023420	5611,231	0	4	0	0	0	0	0	0	4
10	-0,026420	5642,923	0	4	0	0	0	0	0	0	4
11	-0,029420	5674,623	0	4	0	0	0	0	0	0	4
12	-0,032420	5706,323	0	4	0	0	0	0	0	0	4
13	-0,035420	5738,023	0	4	0	0	0	0	0	0	4
14	-0,038420	5769,725	0	4	0	0	0	0	0	0	4
15	-0,041420	5801,428	0	3	0	1	0	0	0	0	4
16	-0,044420	5833,132	0	3	0	1	0	0	0	0	4
17	-0,047420	5864,837	0	2	0	2	0	0	0	0	4
18	-0,048079	5871,792	0	2	0	1	0	1	0	0	4
19	-0,051079	5878,530	0	2	0	1	0	1	0	0	4
20	-0,051637	5879,779	0	2	0	0	0	2	0	0	4
21	-0,054637	5863,102	0	2	0	0	0	2	0	0	4
22	-0,057637	5846,422	0	2	0	0	0	2	0	0	4
23	-0,060637	5829,745	0	2	0	0	0	2	0	0	4
24	-0,063637	5813,071	0	2	0	0	0	2	0	0	4
25	-0,066637	5796,399	0	2	0	0	0	2	0	0	4
26	-0,069637	5779,729	0	2	0	0	0	2	0	0	4
27	-0,072637	5763,061	0	2	0	0	0	2	0	0	4
28	-0,075637	5746,397	0	2	0	0	0	2	0	0	4
29	-0,078637	5729,734	0	2	0	0	0	2	0	0	4
30	-0,081637	5713,074	0	2	0	0	0	2	0	0	4
31	-0,084637	5696,416	0	2	0	0	0	2	0	0	4
32	-0,087637	5679,761	0	2	0	0	0	2	0	0	4
33	-0,090637	5663,108	0	2	0	0	0	2	0	0	4
34	-0,093637	5646,457	0	0	0	2	0	2	0	0	4
35	-0,096637	5629,809	0	0	0	2	0	2	0	0	4
36	-0,099637	5613,163	0	0	0	2	0	2	0	0	4
37	-0,102637	5596,520	0	0	0	2	0	2	0	0	4
38	-0,105637	5579,879	0	0	0	2	0	2	0	0	4
39	-0,106518	5574,989	0	0	0	0	0	4	0	0	4
40	-0,109518	5545,989	0	0	0	0	0	4	0	0	4
41	-0,112518	5516,989	0	0	0	0	0	4	0	0	4
42	-0,115518	5487,990	0	0	0	0	0	4	0	0	4
43	-0,118518	5458,992	0	0	0	0	0	4	0	0	4
44	-0,121518	5429,995	0	0	0	0	0	4	0	0	4
45	-0,124518	5400,998	0	0	0	0	0	4	0	0	4
46	-0,127518	5372,002	0	0	0	0	0	4	0	0	4
47	-0,130518	5343,007	0	0	0	0	0	4	0	0	4
48	-0,133518	5314,013	0	0	0	0	0	4	0	0	4
49	-0,136518	5285,019	0	0	0	0	0	4	0	0	4
50	-0,139518	5256,026	0	0	0	0	0	4	0	0	4
51	-0,142518	5227,034	0	0	0	0	0	4	0	0	4
52	-0,145518	5198,043	0	0	0	0	0	4	0	0	4
53	-0,148518	5169,052	0	0	0	0	0	4	0	0	4

54	-0,151518	5140,062	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
55	-0,154518	5111,073	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
56	-0,157518	5082,085	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
57	-0,160518	5053,097	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
58	-0,163518	5024,111	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
59	-0,166518	4995,125	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
60	-0,169518	4966,139	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
61	-0,172518	4937,155	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
62	-0,175518	4908,171	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
63	-0,178518	4879,188	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
64	-0,181518	4850,206	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
65	-0,184518	4821,225	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
66	-0,187518	4792,244	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
67	-0,190518	4763,264	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
68	-0,193518	4734,285	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
69	-0,196518	4705,306	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
70	-0,199518	4676,329	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
71	-0,202518	4647,352	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
72	-0,205518	4618,376	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
73	-0,208518	4589,401	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
74	-0,211518	4560,426	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
75	-0,214518	4531,452	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
76	-0,217518	4502,479	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
77	-0,220518	4473,507	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
78	-0,223518	4444,535	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
79	-0,226518	4415,565	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
80	-0,229518	4386,595	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
81	-0,232518	4357,626	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
82	-0,235518	4328,657	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
83	-0,238518	4299,689	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
84	-0,241518	4270,723	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
85	-0,244518	4241,756	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
86	-0,247518	4212,791	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
87	-0,250518	4183,826	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
88	-0,253518	4154,863	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
89	-0,256518	4125,900	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
90	-0,259518	4096,937	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
91	-0,262518	4067,976	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
92	-0,265518	4039,015	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
93	-0,268518	4010,055	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
94	-0,271518	3981,096	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
95	-0,274518	3952,137	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
96	-0,277518	3923,180	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
97	-0,280518	3894,223	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
98	-0,283518	3865,266	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4

99	-0,286518	3836,311	0	0	0	0	0	4	0	0	4
100	-0,289518	3807,356	0	0	0	0	0	4	0	0	4
101	-0,292518	3778,403	0	0	0	0	0	4	0	0	4
102	-0,295518	3749,449	0	0	0	0	0	4	0	0	4
103	-0,298518	3720,497	0	0	0	0	0	4	0	0	4
104	-0,301518	3691,546	0	0	0	0	0	4	0	0	4
105	-0,304518	3662,595	0	0	0	0	0	4	0	0	4
106	-0,307518	3633,645	0	0	0	0	0	4	0	0	4
107	-0,310518	3604,695	0	0	0	0	0	4	0	0	4
108	-0,313518	3575,747	0	0	0	0	0	4	0	0	4
109	-0,316518	3546,799	0	0	0	0	0	4	0	0	4
110	-0,319518	3517,852	0	0	0	0	0	4	0	0	4
111	-0,322518	3488,906	0	0	0	0	0	4	0	0	4
112	-0,325518	3459,961	0	0	0	0	0	4	0	0	4
113	-0,328518	3431,016	0	0	0	0	0	4	0	0	4
114	-0,331518	3402,072	0	0	0	0	0	4	0	0	4
115	-0,334518	3373,129	0	0	0	0	0	4	0	0	4
116	-0,337518	3344,187	0	0	0	0	0	4	0	0	4
117	-0,340518	3315,245	0	0	0	0	0	4	0	0	4
118	-0,343518	3286,304	0	0	0	0	0	4	0	0	4
119	-0,346518	3257,364	0	0	0	0	0	4	0	0	4
120	-0,349518	3228,425	0	0	0	0	0	4	0	0	4
121	-0,352518	3199,487	0	0	0	0	0	4	0	0	4
122	-0,355518	3170,549	0	0	0	0	0	4	0	0	4
123	-0,358518	3141,612	0	0	0	0	0	4	0	0	4
124	-0,361518	3112,676	0	0	0	0	0	4	0	0	4
125	-0,364518	3083,741	0	0	0	0	0	4	0	0	4
126	-0,367518	3054,806	0	0	0	0	0	4	0	0	4
127	-0,370518	3025,872	0	0	0	0	0	4	0	0	4
128	-0,373518	2996,939	0	0	0	0	0	4	0	0	4
129	-0,376518	2968,007	0	0	0	0	0	4	0	0	4
130	-0,379518	2939,075	0	0	0	0	0	4	0	0	4
131	-0,382518	2910,144	0	0	0	0	0	4	0	0	4
132	-0,385518	2881,214	0	0	0	0	0	4	0	0	4
133	-0,388518	2852,285	0	0	0	0	0	4	0	0	4
134	-0,391518	2823,357	0	0	0	0	0	4	0	0	4
135	-0,394518	2794,429	0	0	0	0	0	4	0	0	4
136	-0,397518	2765,502	0	0	0	0	0	4	0	0	4
137	-0,400518	2736,576	0	0	0	0	0	4	0	0	4
138	-0,403518	2707,651	0	0	0	0	0	4	0	0	4
139	-0,406518	2678,726	0	0	0	0	0	4	0	0	4
140	-0,409518	2649,802	0	0	0	0	0	4	0	0	4
141	-0,412518	2620,879	0	0	0	0	0	4	0	0	4
142	-0,415518	2591,957	0	0	0	0	0	4	0	0	4
143	-0,418518	2563,035	0	0	0	0	0	4	0	0	4
144	-0,421518	2534,115	0	0	0	0	0	4	0	0	4
145	-0,424518	2505,195	0	0	0	0	0	4	0	0	4
146	-0,427518	2476,276	0	0	0	0	0	4	0	0	4
147	-0,430518	2447,357	0	0	0	0	0	4	0	0	4
148	-0,433518	2418,440	0	0	0	0	0	4	0	0	4
149	-0,436518	2389,523	0	0	0	0	0	4	0	0	4
150	-0,439518	2360,607	0	0	0	0	0	4	0	0	4
151	-0,442518	2331,691	0	0	0	0	0	4	0	0	4

152	-0.445518	2302,777	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
153	-0.448518	2273,863	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
154	-0.451518	2244,950	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
155	-0.454518	2216,038	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
156	-0.457518	2187,126	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
157	-0.460518	2158,216	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
158	-0.463518	2129,306	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4
159	-0.466518	2100,397	0	0	0	0	0	0	3	1	0	4
160	-0.466518	2100,397	0	0	0	0	0	0	3	0	1	4
161	-0.469518	2071,488	0	0	0	0	0	0	2	1	1	4
162	-0.469518	2071,488	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
163	-0.472518	2042,581	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
164	-0.475518	2013,674	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
165	-0.478518	1984,768	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
166	-0.481518	1955,863	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
167	-0.484518	1926,958	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
168	-0.487518	1898,055	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
169	-0.490518	1869,152	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
170	-0.493518	1840,250	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
171	-0.496518	1811,348	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
172	-0.499518	1782,448	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
173	-0.502518	1753,548	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
174	-0.505518	1724,649	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
175	-0.508518	1695,751	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
176	-0.511518	1666,853	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
177	-0.514518	1637,957	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
178	-0.517518	1609,061	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
179	-0.520518	1580,166	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
180	-0.523518	1551,271	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
181	-0.526518	1522,378	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
182	-0.529518	1493,485	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
183	-0.532518	1464,593	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
184	-0.535518	1435,702	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
185	-0.538518	1406,811	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
186	-0.541518	1377,922	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
187	-0.544518	1349,033	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
188	-0.547518	1320,145	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
189	-0.550518	1291,257	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
190	-0.553518	1262,371	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
191	-0.556518	1233,485	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
192	-0.559518	1204,600	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
193	-0.562518	1187,250	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
194	-0.565518	1181,349	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
195	-0.568518	1175,448	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
196	-0.571518	1169,546	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
197	-0.574518	1163,645	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
198	-0.577518	1157,743	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
199	-0.580518	1151,841	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
200	-0.583518	1145,939	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
201	-0.586518	1140,036	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
202	-0.589518	1134,133	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
203	-0.592518	1128,230	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4