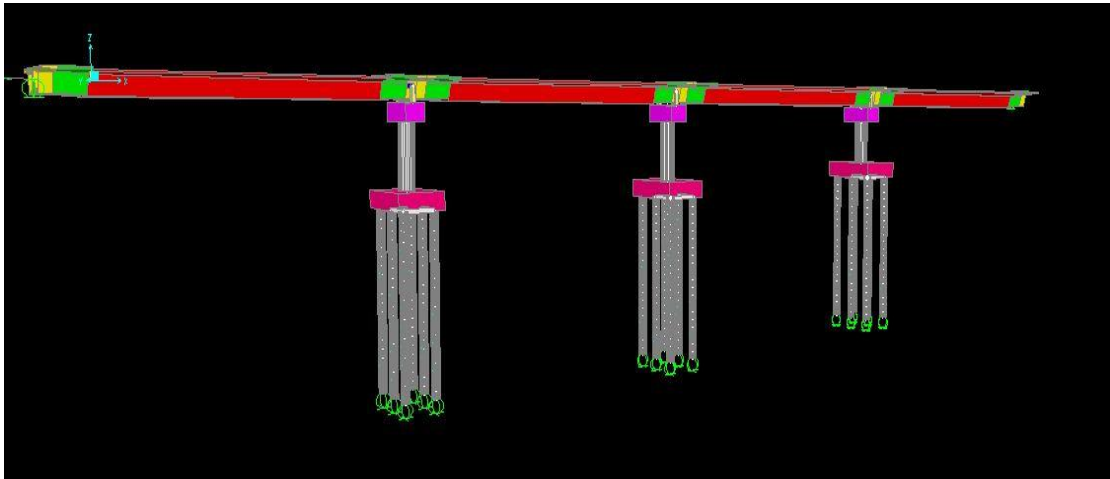




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ
ΓΕΦΥΡΑΣ ΕΙΡΗΝΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΚΑΛΟΓΕΡΗ ΙΩΑΝΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΒΗΣΣΑΡΙΩΝ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ

Οκτώβριος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΕΦΥΡΩΝ.....	5
1.1 ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ.....	5
1.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΛΑΒΗΣ.....	6
1.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ.....	7
1.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ (modal) ΑΝΑΛΥΣΗ.....	21
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (pushover analysis)....	23
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ATC-40.....	46
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	46
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ATC-40.....	52
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΟΡΕΑ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΚΑΤΑ FEMA 356.....	57
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ.....	62
6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΟΡΕΑ.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΕΥΤΕΡΑΣ ΤΑΞΗΣ (P-Δ effects).....	67
7.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	67
7.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΛΑΦΡΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΦΟΡΕΑ ΣΤΟ SAP2000 14.....	67
7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	68
7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το τέλος αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της. Αρχικά και κυρίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Παπαδόπουλο για την άψογη συνεργασία του καθ' όλη τη διάρκεια της προετοιμασίας της, το γενικότερο ενδιαφέρον του, την επιμονή και την υπομονή που επέδειξε. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Μίμογλου για το χρόνο που μου αφιέρωσε και τη βοήθεια του πάνω στη χρήση του λογισμικού SAP 2000, που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα διπλωματική.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε χώρες υψηλής σεισμικότητας, όπως η δική μας, είναι πρωτεύουσα η ανάγκη μια εθνικής στρατηγικής διαχείρισης σεισμικού κινδύνου. Στα πλαίσια ενός τέτοιου εγχειρήματος, σημαντικά έργα υποδομής, όπως είναι οι γέφυρες, πρέπει να αξιολογούνται ως προς τη συμπεριφορά τους έναντι ενδεχόμενου σεισμού. Αυτό σημαίνει ότι για αναμενόμενο επίπεδο σεισμικής καταπόνησης, που υιοθετείται για τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής γίνεται μια αποτίμηση της στάθμης βλάβης, που θα προκληθεί από το εν λόγω σεισμικό συμβάν.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε η οδική γέφυρα Ειρήνης της Εγνατίας Οδού, στο Νομό Ροδόπης στη Δυτική Θράκη.

Οι αναλύσεις του φορέα έγιναν στο λογισμικό Sap 2000 14. Πραγματοποιήθηκαν ανελαστικές αναλύσεις (pushover), ανά διεύθυνση, εγκάρσια και διαμήκη, από τις οποίες προέκυψαν οι καμπύλες αντίστασης του φορέα. Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πλαστικών αρθρώσεων (fiber hinges και flexural hinges) και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι καμπύλες αυτές μετασχηματίστηκαν σε φάσματα αντίστασης του φορέα σε όρους επιτάχυνσης-μετακίνησης (Sa-Sd), προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος των φασμάτων απαίτησης-αντίστασης (Capacity Spectrum Method). Ως φάσμα επιλέχθηκε το φάσμα του Ευρωκώδικα 2004. Αποτέλεσμα της εφαρμογής της παραπάνω μεθόδου ήταν ο προσδιορισμός της μετακίνησης συμπεριφοράς της γέφυρας, που έκρινε την αναμενόμενη στάθμη βλάβης, που θα προκαλέσει ο σεισμός σχεδιασμού στη γέφυρα.

Πέραν της μεθόδου των φασμάτων απαίτησης-μετακίνησης, εφαρμόστηκε και η μέθοδος των Συντελεστών κατά FEMA 356 με την οποία προσδιορίζεται μια τελική στοχευόμενη μετακίνηση για το φορέα, η οποία θα κρίνει το αναμενόμενο επίπεδο βλαβών έναντι του σεισμού σχεδιασμού.

Τέλος, επαναλάβαμε τις πιο πάνω αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση των φαινομένων δευτέρας τάξης (P-Δ effects) για το φορέα και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων.

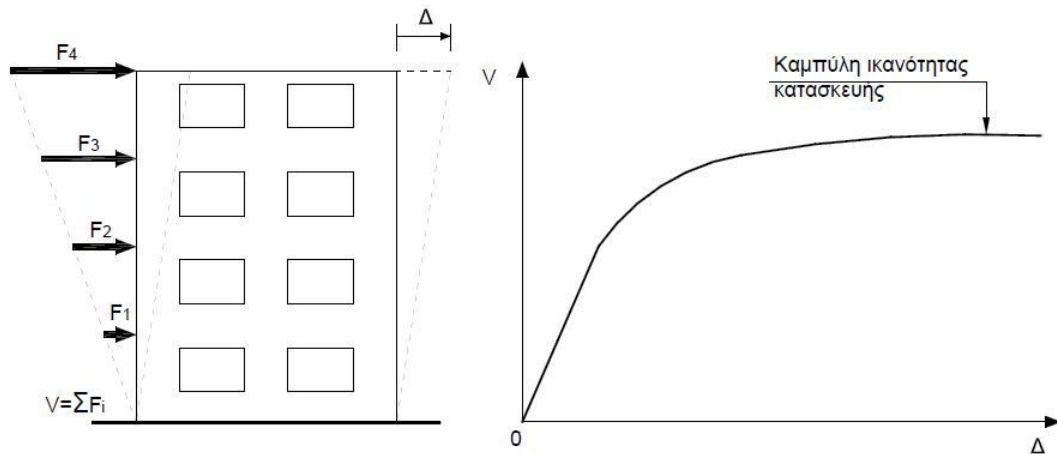
1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΕΦΥΡΩΝ

1.1 ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Δύο σημαντικές έννοιες, που σχετίζονται με την εφαρμογή της ανελαστικής ανάλυσης, είναι αυτές της απαίτησης και της ικανότητας. Η συμπεριφορά του φορέα «χαρακτηρίζεται» από τον τρόπο με τον οποίο η ικανότητα μπορεί να ανταποκρίνεται στην απαίτηση. Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή πρέπει να έχει την ικανότητα να αντιστέκεται στην απαίτηση σε μετακίνηση, που επιβάλλει η σεισμική δράση, έτσι ώστε η συμπεριφορά της να είναι συμβατή με τους στόχους της αποτίμησης.

Για τον προσδιορισμό των τριών βασικών παραμέτρων: της ικανότητας, της απαίτησης και της συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται η μέθοδος του σταδιακού ελέγχου των μετακινήσεων (pushover analysis). Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιεί μια σειρά από διαδοχικές ελαστικές αναλύσεις για την προσέγγιση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής κατά τη διάρκεια του σεισμικού συμβάντος. Κάθε μια από τις αναλύσεις αυτές αποτελεί και ένα ξεχωριστό υπολογιστικό βήμα και τα αποτελέσματα κάθε βήματος προστίθενται στα αποτελέσματα του προηγούμενου, έτσι ώστε να καταρτιστεί με όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση το ολικό διάγραμμα τέμνουσας βάσης V - μετακίνησης της κορυφής της κατασκευής, δ , η οποία ονομάζεται καμπύλη ικανότητας. Μετά από κάθε ελαστική ανάλυση (βήμα), το αναλυτικό προσομοίωμα της κατασκευής τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να ληφθεί υπόψη η πραγματική εντατική κατάσταση του φορέα και η μείωση της δυσκαμψίας του, λόγω των στοιχείων που διέρρευσαν στο προηγούμενο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου η κατασκευή καταστεί ασταθής ή η συνολική μετακίνηση γίνει ίση με μια προκαθορισμένη τιμή.

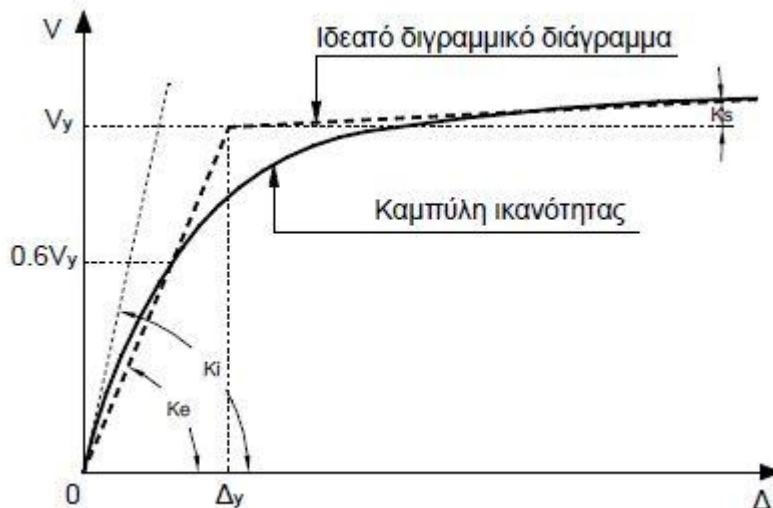
Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί την υπολογιστική διαδικασία της στατικής ανελαστικής ανάλυσης και από αυτή μπορεί να καταρτιστεί η καμπύλη ικανότητας του φορέα. Η καμπύλη αυτή έχει ενδεικτικά τη μορφή του παρακάτω σχήματος (σχ. 1.1) και καταγράφει τη μεταβολή της τέμνουσας βάσης καθώς μεταβάλλεται η μετακίνηση της κορυφής του φορέα για σταδιακή αύξηση του καθ' ύψος κατανεμημένου πλευρικού φορτίου κατά τη διάρκεια της σεισμικής καταπόνησης.



Σχ. 1.1: Καμπύλη ικανότητας

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΛΑΒΗΣ

Για να καθορίσουμε τις στάθμες βλάβης, πρέπει να ορίσουμε αρχικά πάνω στην καμπύλη ικανότητας τα συμβατικά όρια διαρροής δ_y και αστοχίας δ_u . Μετατρέπουμε, δηλαδή, την καμπύλη ικανότητας σε διγραμμικοποιημένη μορφή, η οποία αποτελείται από δύο κλάδους, τον ελαστικό κλάδο και τον μετελαστικό κλάδο (σχ. 1.2). Για τις γέφυρες, μετακίνηση αστοχίας δ_u θεωρείται αυτή για την οποία παρατηρείται πτώση της αντοχής μεγαλύτερη από 20%.



Σχ. 1.2: Γενική μορφή διγραμμικής καμπύλης ικανότητας

Στη διεθνή βιβλιογραφία καθορίζονται πέντε στάθμες βλάβης με βάση πραγματικά δεδομένα από σεισμικές σε γέφυρες:

Στάθμη 1: μηδενικές βλάβες

Στάθμη 2: μικρές βλάβες

Στάθμη 3: μέσες βλάβες

Στάθμη 4: εκτενείς βλάβες

Στάθμη 5: κατάρρευση

Η αναλυτική περιγραφή κάθε στάθμης βλάβης ξεχωριστά (που αποτελούν προτάσεις των Mander & Basoz) και οι προτεινόμενες τιμές του συντελεστή πλαστιμότητας $\mu(=\delta_{τελ}/\delta_y)$ φαίνονται στον πίνακα Π.1. Οι τελευταίες τιμές βασίζονται σε ερευνητικές εργασίες ομάδων του ΑΠΘ και παρόμοιες τιμές έχουν χρησιμοποιηθεί σε εργασίες σεισμικής αξιολόγησης κτιρίων.

α/α	Στάθμη βλάβης	Απαιτούμενες επισκευές	Διάρκεια επισκευής	δ/δ_y
1	Μηδενική βλάβη	Καμία		$\leq 0,7$
2	Μικρή βλάβη	Μικρή επιδιόρθωση	< 3 ημέρες	> 0,7
3	Μέση βλάβη	Επισκευή στοιχείων	< 3 εβδομάδες	> 1,5
4	Εκτενής βλάβη	Επανακατασκευή τμημάτων	< 3 μήνες	> 3
5	Κατάρρευση	Επανακατασκευή γέφυρας	> 3 μήνες	> μ

Πιν.1: Καθορισμός σταθμών βλάβης (επιτελεστικότητα)

1.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ

Ο προσδιορισμός της καμπύλης ικανότητας μια υφιστάμενης κατασκευής είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, διότι μας παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά αυτής και επομένως και για πιθανούς τρόπους ενίσχυσης της. Προκειμένου, όμως, να διαπιστωθεί αν η συγκεκριμένη κατασκευή πληροί τους στόχους αποτίμησης, που έχουν τεθεί, πρέπει να εκτιμηθεί η μέγιστη πιθανή μετακίνηση, που αντιστοιχεί στη δράση σχεδιασμού.

Οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της απαίτησης σε μετακίνηση για το σεισμό σχεδιασμού είναι οι ακόλουθες:

- Μέθοδος φάσματος ικανότητας (Capacity Spectrum Method)

- Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης (Displacement Coefficient Method)
- Μέθοδος των ίσων μετακινήσεων (Equal Displacement Method)

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε τις δύο πρώτες μεθόδους, η μεθοδολογία των οποίων παρουσιάζεται λεπτομερώς στα κεφάλαια 5 και 6 αντίστοιχα.

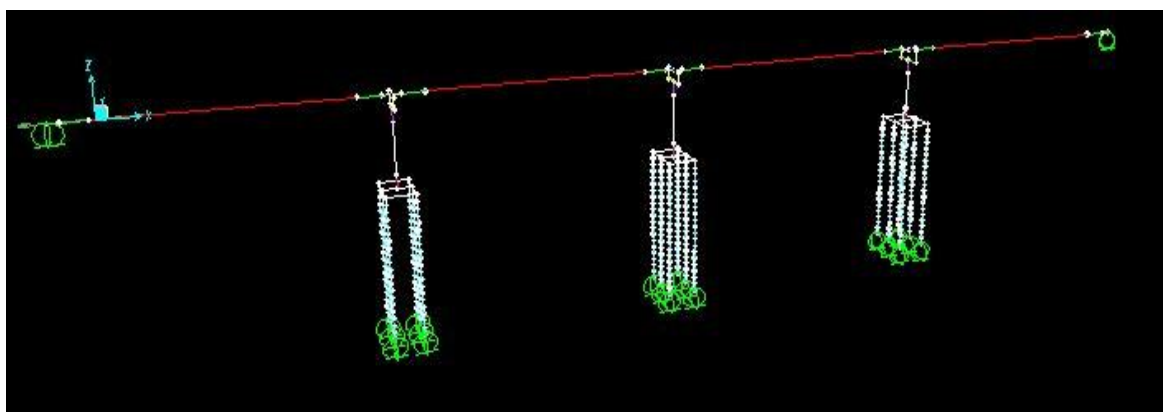
1.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Έχοντας υπολογίσει τη μετακίνηση συμπεριφοράς δ_p του φορέα με τη μέθοδο του φάσματος ικανότητας, ή εναλλακτικά τη στοχευόμενη μετακίνηση δ_t , προσδιορίζουμε το λόγο $\delta/\delta_y=\mu$, δηλαδή το συντελεστή πλαστιμότητας του φορέα, όπου $\delta= \delta_p$ ή δ_t και δ_y η μετακίνηση που αντιστοιχεί στην έναρξη της διαρροής και προσδιορίζεται από τη (διγγραμμικοποιημένη) καμπύλη ικανότητας του φορέα σε άξονες V- δ . Στη συνέχεια από τον Πίν. 1 καθορίζεται η κατηγορία του υπό αξιολόγηση φορέα που είναι και ο σκοπός αυτής της εργασίας.

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

ΓΕΝΙΚΑ

Ο φορέας της γέφυρας μοντελοποιήθηκε και επιλύθηκε (για κάθε τύπο ανάλυσης) με το λογισμικό SAP 2000 nonlinear 14. Η προσομοίωση των μελών έγινε με γραμμικά (ραβδωτά) στοιχεία για όλα τα μέλη και κάθε ράβδος προσομοιώθηκε με ράβδο που διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής της.



Σχ. 2.1: Τριδιάστατη προσομοίωση του φορέα

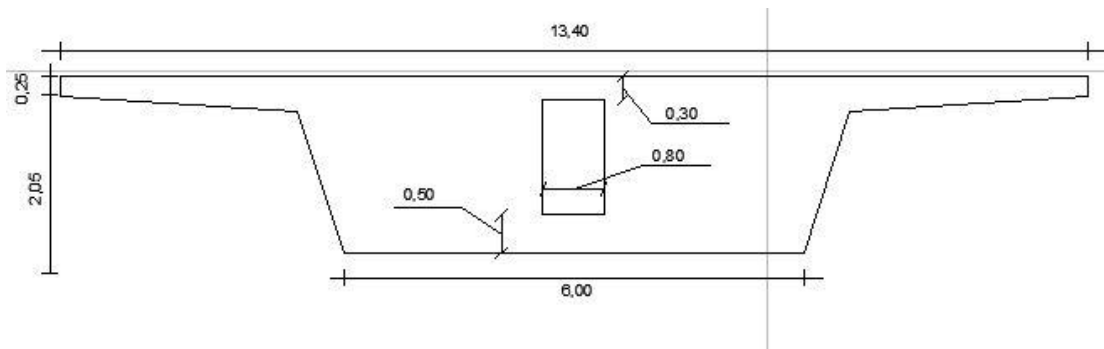
Ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Ο φορέας της ανωδομής είναι ευθύγραμμος οριζοντιογραφικά και κεκλιμένος υψομετρικά με κλίση 1,6%.
- Έχει συνολικό μήκος 180μ. και αποτελείται από 4 ανοίγματα μήκους 45μ. το καθένα.
- Το κατάστρωμα αποτελείται από κιβωτιοειδείς διατομές και το πλάτος τους είναι 13,40μ.
- Ο φορέας της ανωδομής στηρίζεται σε τρία ενδιάμεσα βάθρα από σπλισμένο σκυρόδεμα, ύψους 7,30μ. για το αριστερά και το μεσαίο βάθρο και 5,80 για το δεξιό βάθρο (βλ. σχ. 2.1).
- Κάθε μεσόβαθρο εδράζεται σε πασσαλομάδα αποτελούμενη από έξι πασσάλους ύψους 20 μ.

ΑΝΩΔΟΜΗ

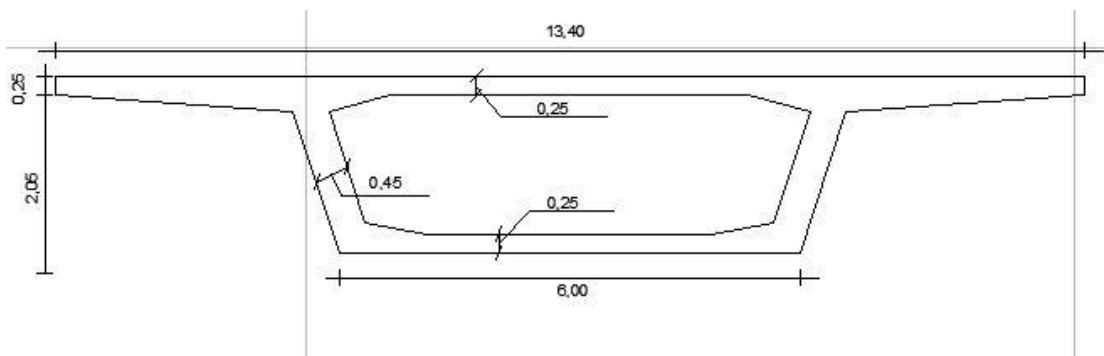
Ο φορέας της ανωδομής απαρτίζεται από τις ακόλουθες διατομές:

1) Διατομή στη στήριξη



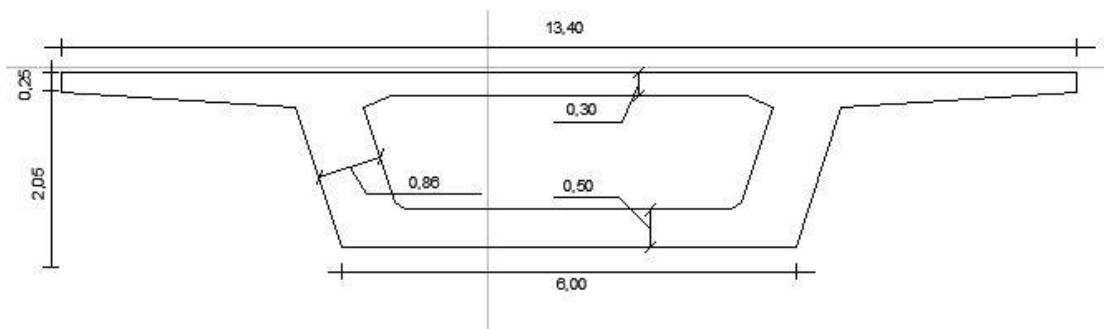
Σχ. 2.2

2) Διατομή στα ανοίγματα



Σχ. 2.3

3) Ενδιάμεση διατομή



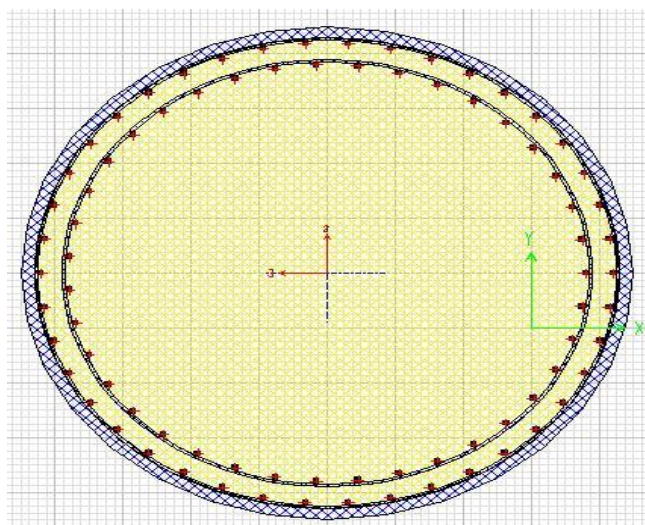
Σχ. 2.4

Η ανωδομή αποτελείται από σκυρόδεμα C30.

ΒΑΘΡΑ

Τα μεσόβαθρα αποτελούνται από κυκλική διατομή διαμέτρου 2,26μ. και οπλίζονται με 42 Φ25 στον εξωτερικό δακτύλιο και 39 Φ25 στον εσωτερικό. Η περίσφιγξη

αποτελείται από δακτύλιους $\Phi 12/10\text{cm}$ (εξωτερική σπείρα) και $\Phi 12/20\text{cm}$ (εσωτερική σπείρα) (σχ. 2.5).



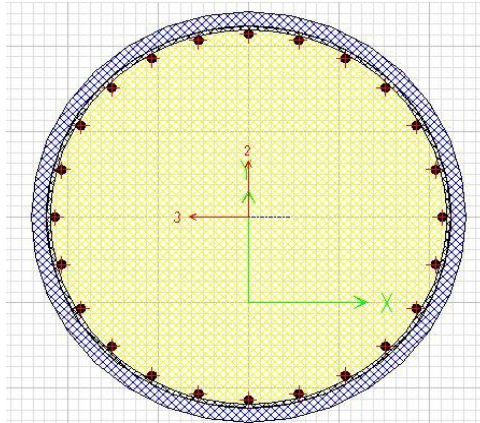
Σχ. 2.5: Διατομή μεσόβαθρου

Τα μεσόβάθρα αποτελούνται από σκυρόδεμα C20 και ο οπλισμός τους από χάλυβα S500.

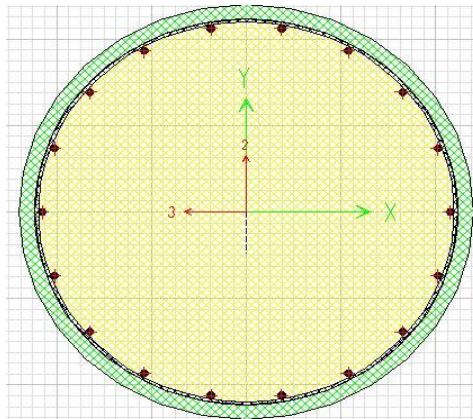
(Τα ακρόβαθρα έχουν προσομοιωθεί με κυλίση και ελατήρια κατά x και y δυσκαμψίας ίσης με τη δυσκαμψία των εφεδράνων τους.)

ΠΑΣΣΑΛΟΙ

Οι πάσσαλοι αποτελούνται από κυκλική διατομή διαμέτρου 1,20μ. και οπλίζονται με 24 $\Phi 25$ στην κρίσιμη περιοχή (μέχρι 2μ. κάτω από τον κεφαλοδεσμό της πασσαλομάδας) και περίσφιξη $\Phi 12/8\text{cm}$ (S500) (σχ. 2.6), ενώ στη μη κρίσιμη με 18 $\Phi 25$ και $\Phi 10/15\text{cm}$ (S220) (σχ. 2.7).



Σχ. 2.6: Διατομή πασσάλου στην κρίσιμη περιοχή

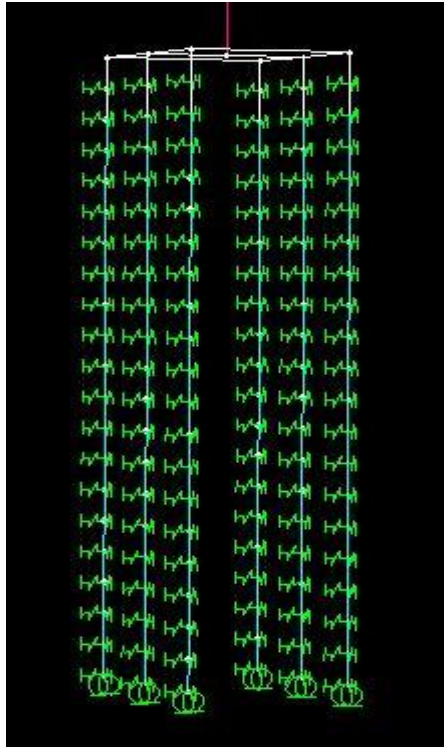


Σχ. 2.7: Διατομή πασσάλου στη μη κρίσιμη περιοχή

Για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου θεωρούμε την ύπαρξη ελατηρίων (και στις δυο διευθύνσεις, x,y) καθ' ύψος του πασσάλου (σχ. 2.8) με δυσκαμψία, που δίνεται σύμφωνα με την οδηγία E39/99 από τη σχέση:

$$K(y) = \frac{2,4 \cdot E_s \cdot y}{H^2} \cdot A$$

Όπου: E_s , το μέτρο συμπίεσης του εδάφους πίσω από τον πάσσαλο
 H , το ύψος του πασσάλου
 A , το εμβαδόν της φορτιζόμενης επιφάνειας του πασσάλου



Σχ. 2.8: Προσομοίωση αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου με ελατήρια

ΕΦΕΔΡΑΝΑ

Τα εφέδρανα είναι κοινά ελαστομεταλλικά εφέδρανα τύπου Neoprene, κυκλικής κάτοψης με διάμετρο $\Phi 900$ για τα μεσόβαθρα και $\Phi 700$ για τα ακρόβαθρα, και έχουν πάχη ελαστομερούς 113mm και 125mm αντίστοιχα.

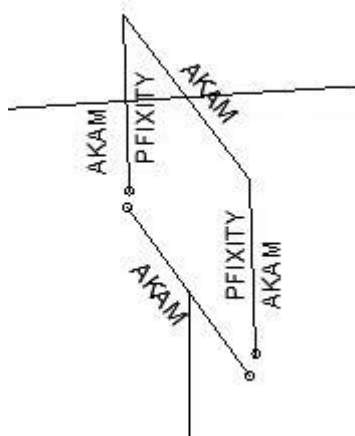
Για το μέτρο διάτμησης G των εφεδράνων λαμβάνουμε μια μέση τιμή $G=1,4\text{N/mm}^2$, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις γέφυρες E39/99 ισχύει: $1,2\text{N/mm}^2 \leq G \leq 1,6\text{N/mm}^2$.

Για τη μοντελοποίηση των κόμβων, που προσομοιώνουν τα εφέδρανα (στις κεφαλές των βάθρων και στις ακραίες στηρίξεις των ακροβάθρων), γίνονται οι εξής απλοποιητικές παραδοχές :

α) Όσον αφορά τις οριζόντιες μετατοπίσεις κατά τους δυο καθολικούς άξονες x και y , οι εν λόγω κόμβοι προσομοιώνονται με γραμμικά ελατήρια με αντίστοιχες γραμμικές ακαμψίες K_x και K_y , όπου $K_x=K_y=AG/h_{ef}$

Για τα μεσόβαθρα $K_x=K_y= 7882 \text{ kN}$ και για τα ακρόβαθρα $K_x=K_y=4310 \text{ kN}$.

β) Όσον αφορά τις στροφικές μετακινήσεις περίξ των δύο οριζόντιων αξόνων x και y , R_x και R_y αντίστοιχα, οι εν λόγω κόμβοι προσομοιώνονται με πλήρεις αρθρώσεις (μηδενική στροφική ακαμψία), ενώ όσον αφορά τη στροφή περίξ του καθολικού κατακόρυφου άξονα z , R_z , οι εν λόγω κόμβοι θεωρούνται απόλυτα άστρεπτοι ($R_z=0$), δηλαδή δεν θεωρούνται αρθρώσεις, αλλά συνέχεια των κατακόρυφων άκαμπτων μελών στα σημεία που βρίσκονται.



Σχ. 2.9: Προοπτική άποψη της κεφαλής βάρου

ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ

Θέσεις πιθανών πλαστικών αρθρώσεων αποτελούν οι βάσεις των μεσόβαθρων και οι κορυφές των πασσάλων, αφού εκεί εμφανίζονται μέγιστες καμπτικές ροπές κατά το σεισμό. Για το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πλαστικών αρθρώσεων. Η μια ανάλυση έγινε με “fiber hinges” (πλαστικές αρθρώσεις με πολυστρωματική θεώρηση του υλικού) και για συγκριτικούς σκοπούς η δεύτερη ανάλυση έγινε με “flexural hinges” (καμπτικές πλαστικές αρθρώσεις). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος καθορισμού των ιδιοτήτων και για τους δύο τύπους πλαστικών αρθρώσεων.

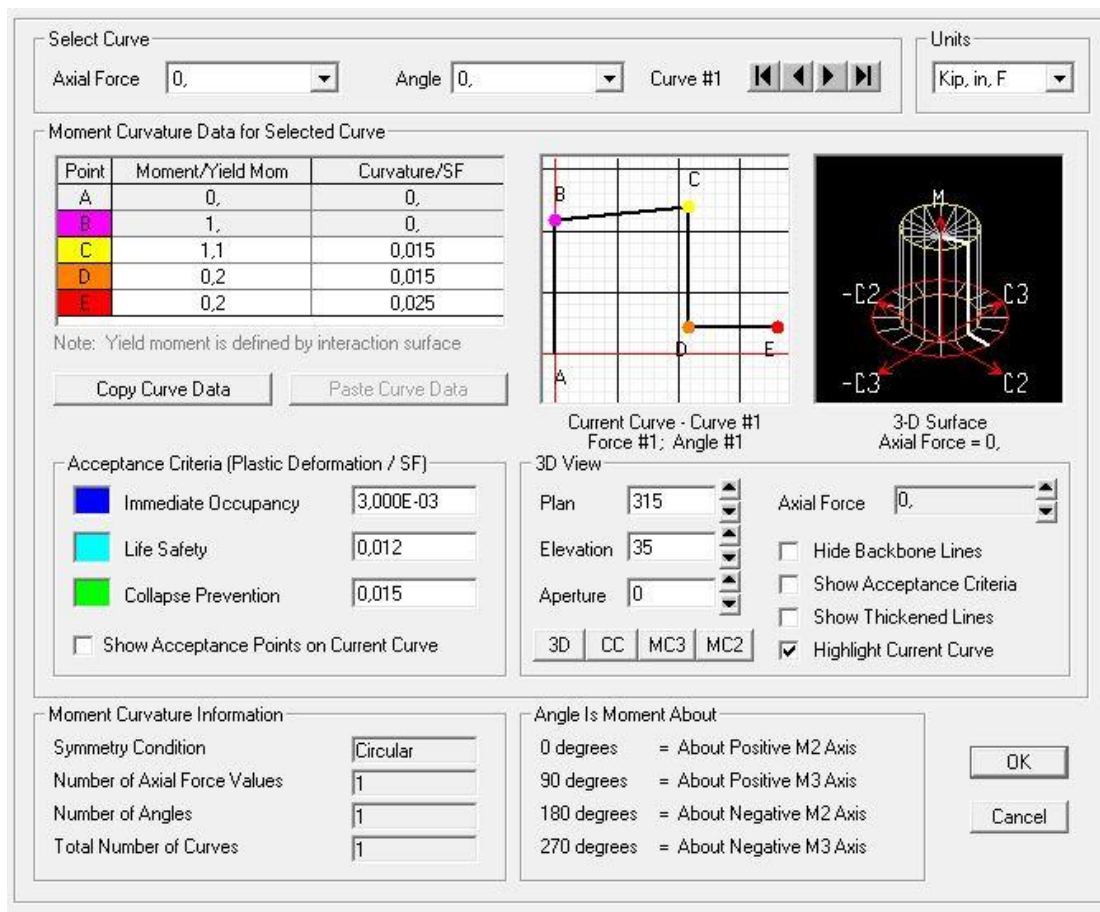
- **Fiber Hinges**

Στην περίπτωση των πλαστικών αρθρώσεων με πολυστρωματική θεώρηση το πρόγραμμα αυτόματα υπολογίζει της ιδιότητες της διατομής και τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης P-M2-M3 από το μενού “section designer”, στο οποίο σχεδιάσαμε αρχικά τη διατομή μας. Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη τη διγραμμικοποιημένη καμπύλη ροπής-στροφής για τη διατομή και με βάση αυτή παρακολουθείται η πορεία πλαστικοποίησης της διατομής. Τέλος, το μήκος της πλαστικοποιημένης ζώνης ορίζεται από το χρήστη και συγκεκριμένα στην περίπτωσή μας, εφόσον έχουμε κυκλικές διατομές και στα βάθρα και στους πασσάλους, αυτό λαμβάνεται ίσο με τη διάμετρο της εκάστοτε κυκλικής διατομής (Blume et. al. 1961).

- **Flexural Hinges**

Σε αυτή την περίπτωση η συμπεριφορά της πλαστικής ακολουθεί το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας (σχ.2.10) που εμείς ορίσαμε με βάση της ιδιότητες της διατομής από το “section designer”. Το διάγραμμα αυτό είναι ίδιο προς κάθε γωνία, εφόσον έχουμε

διατομή κυκλικής συμμετρίας. Οι καμπύλες αλληλεπίδρασης P-M2-M3 και εδώ λαμβάνονται αυτόματα από το λογισμικό, όπως επίσης αυτόματα γίνεται από το λογισμικό και η διάκριση των τριών σταδίων επιτελεστικότητας, ανάλογα με την ένταση (ροπή) καταπόνησης του εκάστοτε κόμβου. Να σημειωθεί ότι και σε αυτή την περίπτωση το μήκος της πλαστικής άρθρωσης έχει ληφθεί ίσο με τη διάμετρο D του στοιχείου.



Σχ. 2.10: Παραδοχές διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων για τις πλαστικές αρθρώσεις

ΦΟΡΤΙΑ

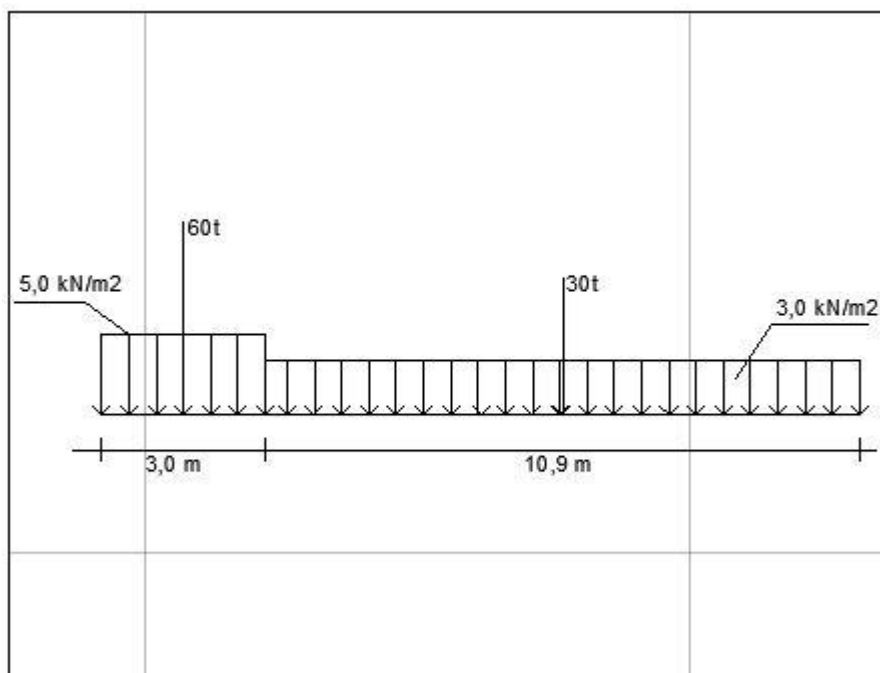
1) **Μόνιμα:** Ίδιο βάρος, $g_1=25,0 \cdot A$ kN/m

Τάπητας και στρώση κυκλοφορίας, $g_2=22,67$ kN/m

Σκυρόδεμα προστασίας, $g_3=12,60$ kN/m

Πεζοδρόμια, $g_4=20,50 \text{ kN/m}$

2) **Κινητά:** Η γέφυρα είναι κλάσης 60/30t. Με βάση τον DIN 1072 ο συρμός φόρτισης είναι αυτός που φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχ.5: Συρμός Επιφόρτισης 60/30t

Επομένως, τα κινητά φορτία θα είναι: $q = \frac{\{5,0 \cdot 3,0 + 3 \cdot (13,9 - 3,0)\} \cdot 180 + 900}{180} = 52,7 \text{ kN/m}$

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Σεισμικότητα περιοχής: I

Επιτάχυνση εδάφους: $A_0=0,16g$

Κατηγορία εδάφους: A

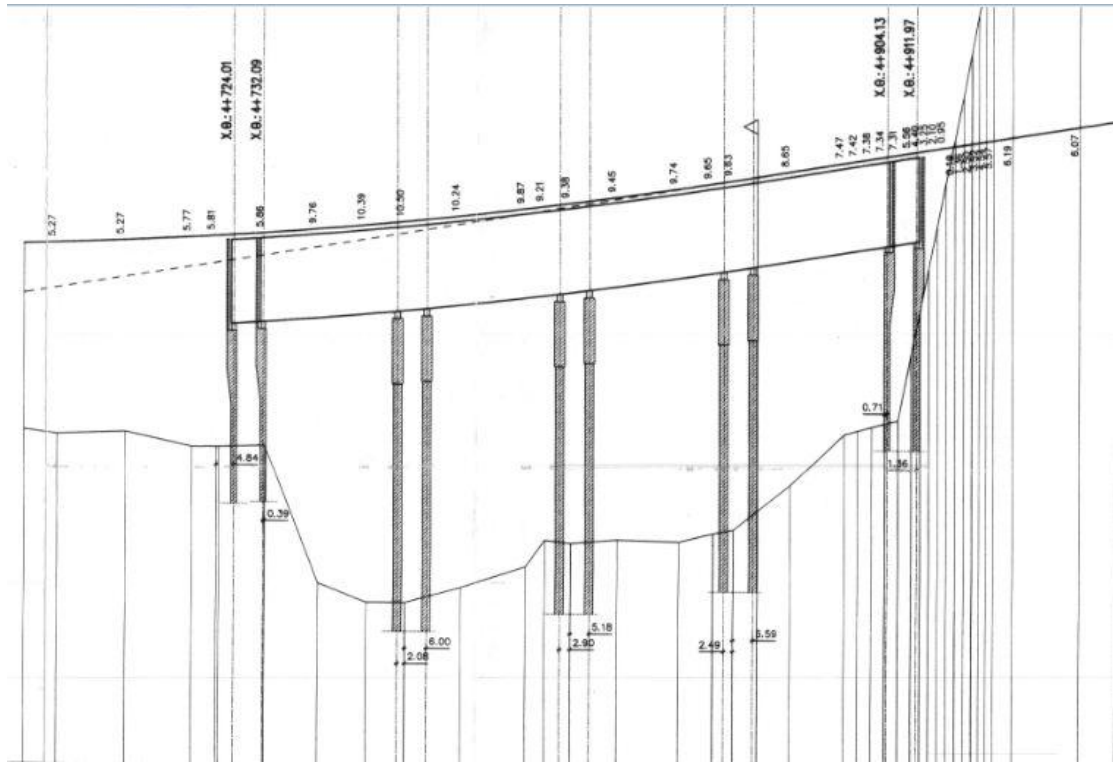
Συντελεστής σπουδαιότητας: $\gamma= 1,0$

Συντελεστής συμπεριφοράς: $q=1,0$

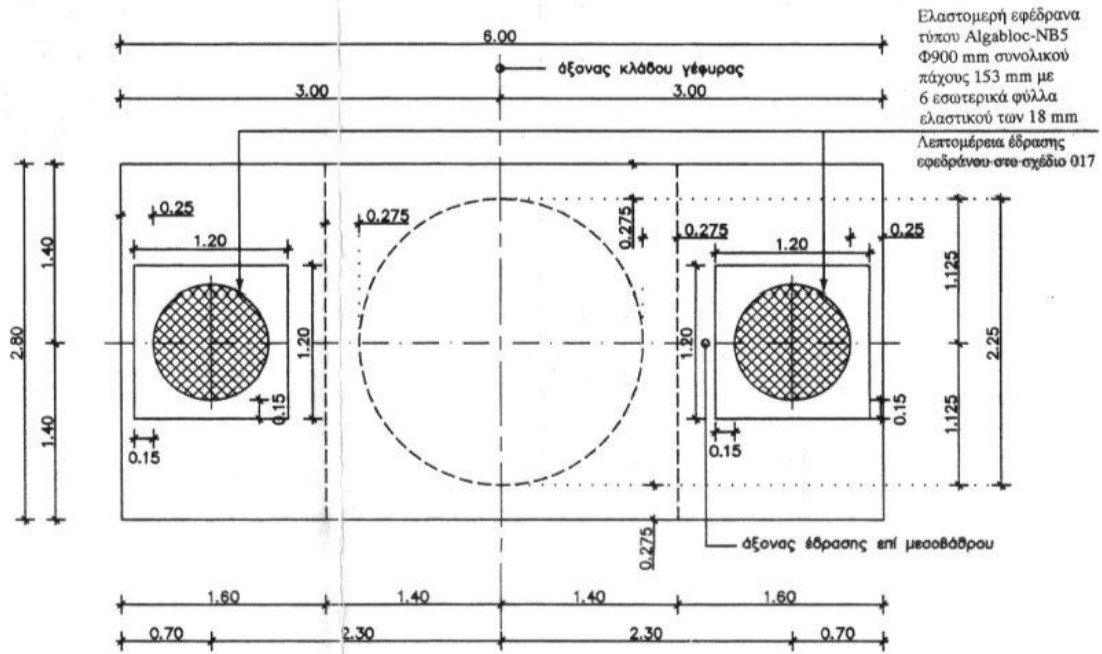
Συντελεστής θεμελίωσης: $\theta=1,0$

Κρίσιμη απόσβεση: $\zeta=0,05$

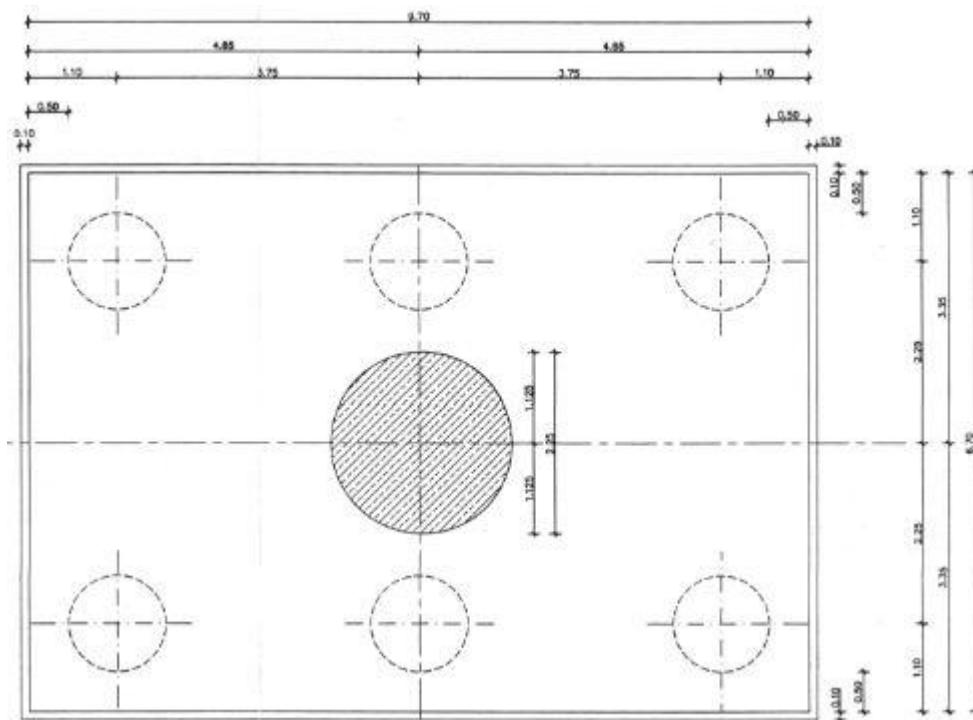
Συντελεστής κατώτερου ορίου: $\beta=0,2$



Σχ. 7.6: Πλάγια όψη γέφυρας



Σχ. 7.8: Κάτοψη μεσόβαθρου (δοκός έδρασης)



Σχ. 7.9: Κάτοψη κεφαλοδεσμού

3.ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ (MODAL) ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυναμική ιδιομορφική ανάλυση θα μας δώσει τις ιδιομορφές και τις αντίστοιχες ιδιοπεριόδους του Ισοδύναμου Συστήματος Μονοβάθμιων Ταλαντωτών (που εκτελούν ελεύθερη σε κάθε ιδιομορφή ταλάντωση χωρίς απόσβεση) και που προσδιορίζουν την κατανομή των σεισμικών φορτίων στο φορέα μας.

Τα φορτία, τα οποία θα ληφθούν υπόψη για την ιδιομορφική ανάλυση, είναι: Μόνιμα + 0,3Κινητά.

3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

	OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
▶	MODAL	Mode	1	3,061007	4,349E-17	0,81792	0
	MODAL	Mode	2	2,99899	0,85255	1,355E-16	000000004373
	MODAL	Mode	3	2,944816	8,545E-16	0,02706	0
	MODAL	Mode	4	1,214985	1,781E-19	0,00116	3,375E-16
	MODAL	Mode	5	0,725119	0,000008102	1,185E-17	0,0000002258
	MODAL	Mode	6	0,721604	0,05362	1,713E-17	0,0000004286
	MODAL	Mode	7	0,720064	9,701E-16	0,00923	2,947E-20
	MODAL	Mode	8	0,714728	1,64E-15	0,02478	0
	MODAL	Mode	9	0,710919	0,09184	6,578E-15	0,0000002509
	MODAL	Mode	10	0,706144	1,726E-15	0,11867	6,426E-19
	MODAL	Mode	11	0,511174	6,271E-19	000000006196	9,903E-17
	MODAL	Mode	12	0,318255	0,0000005793	0	0,0000006608
	MODAL	Mode	13	0,30211	0	0,00001022	4,663E-16
	MODAL	Mode	14	0,267848	0,00187	1,257E-16	0,0000004539
	MODAL	Mode	15	0,247243	1,611E-17	0,00109	1,692E-16
	MODAL	Mode	16	0,267395	1,592E-19	2,139E-16	0,82709

Π. 3.1: Πίνακας με αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της ελαστικής δυναμικής ιδιομορφικής ανάλυσης (βλ. Πιν. 3.1) έχουμε :

- 1) Στην 1^η ιδιομορφή μετάθεση κατά τον εγκάρσιο άξονα y με αντίστοιχη ιδιοπερίοδο (θεμελιώδη) $T_1= 3,060sec$
- 2) Στην 2^η ιδιομορφή μετάθεση κατά τον διαμήκη άξονα x με αντίστοιχη ιδιοπερίοδο $T_2= 2,999sec$

3) Στην 3^η ιδιομορφή μετάθεση κατά τον εγκάρσιο άξονα γ με αντίστοιχη ιδιοπερίοδο (θεμελιώδη) $T_1 = 2,945\text{sec}$

κ.ο.κ

Να σημειωθεί ότι επιλέχθηκαν να φαίνονται οι 16 πρώτες ιδιομορφές αν και κάποιες από αυτές είναι καθαρά θεωρητικές χωρίς πρακτική σημασία.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρούμε ότι στην πρώτη ιδιομορφή τον ποσοστό της δρώσας μάζας του φορέα σε αυτήν είναι 81,8%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για την ταλάντωση κατά τον διαμήκη άξονα x (2^η ιδιομορφή) είναι 85,3%.

Οι τιμές αυτές είναι αρκετά κοντά και αυτό είναι λογικό, διότι έχουμε κυκλικές διατομές σε βάθρα και πασσάλους, αποδίδοντας έτσι την ίδια δυσκαμψία και κατά x και κατά γ .

Επιπλέον, από τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης βλέπουμε, ότι η πρώτη αμιγώς στρωφική ιδιομορφή είναι η 16^η, κάτι που αποδίδεται και πάλι στο γεγονός ότι έχουμε παραπλήσιες δυσκαμψίες κατά x και γ .

4. ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER ANALYSIS)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της προσαυξητικής στατικής ανάλυσης είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της υπό εξέταση γέφυρας. Στη ΣΠΑ (pushover analysis) το αποτέλεσμα της σεισμικής δράσης προσομοιώνεται με στατικά επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ή στατικά επιβαλλόμενα φορτία μέχρι την κατάρρευση, εξάγωντας με αυτό τον τρόπο την καμπύλη ικανότητας του φορέα.

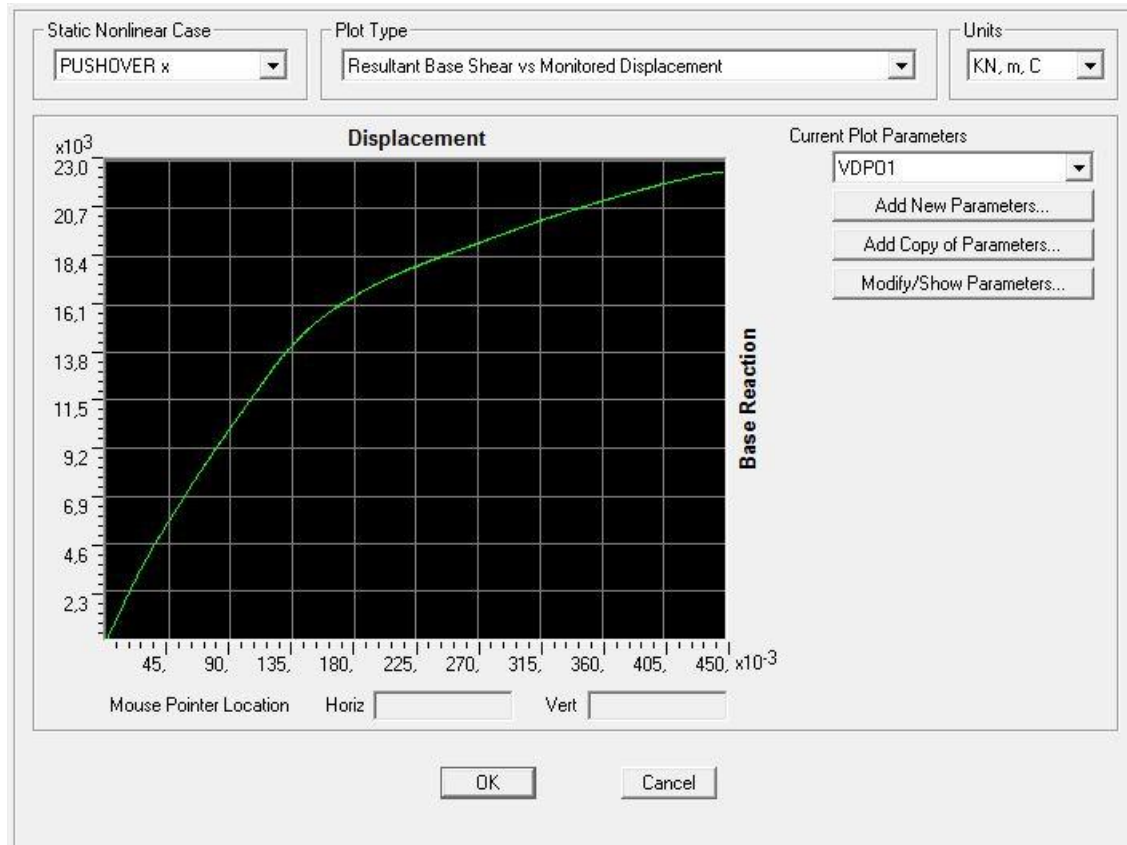
Η ανάλυση pushover για το φορέα θα διεξαχθεί για όλα τα στατικά φορτία, για τα οποία έγινε η modal ανάλυση και για οριζόντια δύναμη, η οποία στην πρώτη περίπτωση θα είναι διαμήκης (κατά x) και στη δεύτερη εγκάρσια (κατά y). Για την προσομοίωση των οριζόντιων φορτίων χρησιμοποιήθηκε πολύ-ιδιομορφική κατανομή σταθερής αναλογίας.

Για την παρακολούθηση της πορείας πλαστικοποίησης των κόμβων, που ορίστηκαν ως πλαστικές αρθρώσεις, επιλέγονται διαγράμματα ροπών-στροφών (για fiber hinges) , $M-\theta$, ή διαγράμματα των λόγων $M/M_y-\phi/\phi_y$ καθώς και από διαγράμματα ροπών-καμπυλότητας (για flexural hinges), όπως αυτά ορίστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο.

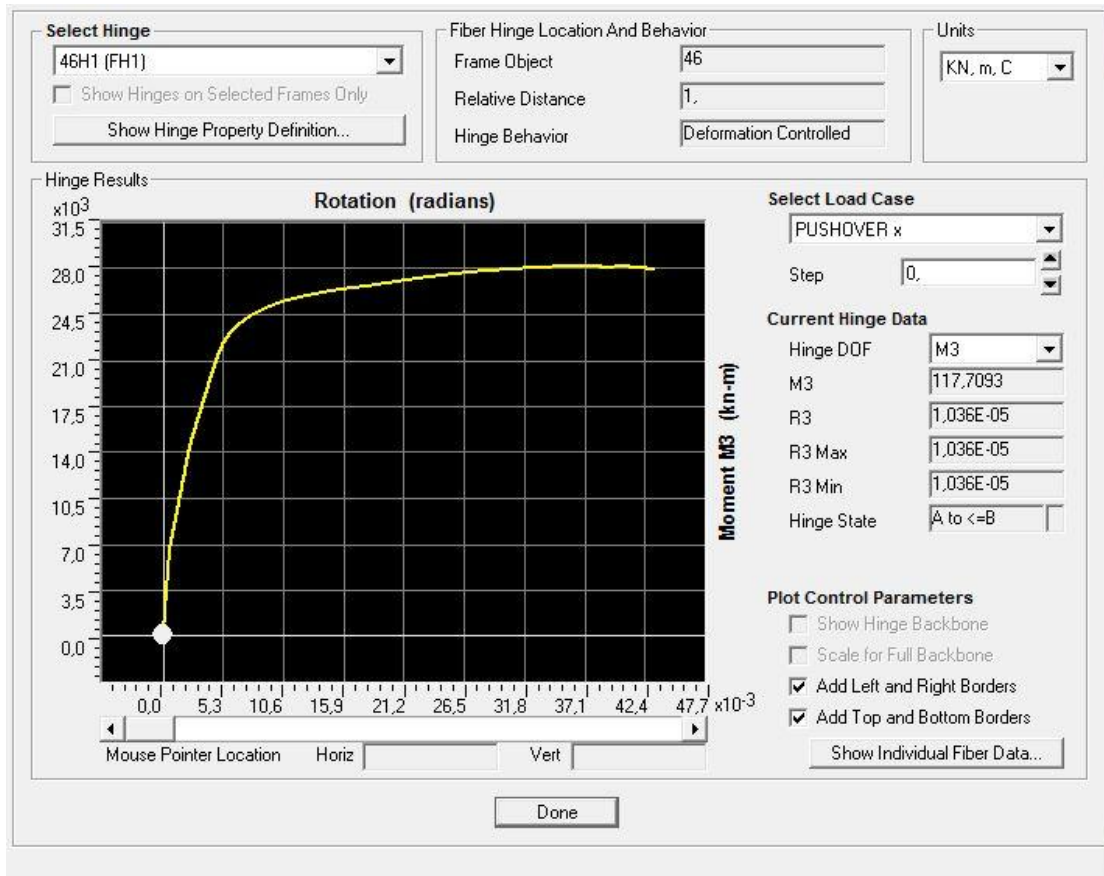
Στη συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το φορέα και για τις πλαστικές αρθρώσεις. Να σημειωθεί ότι για το φορέα έχει επιλεγεί ως κόμβος ελέγχου, ο κόμβος 39, που είναι η κεφαλή του μεσαίου βάθρου.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

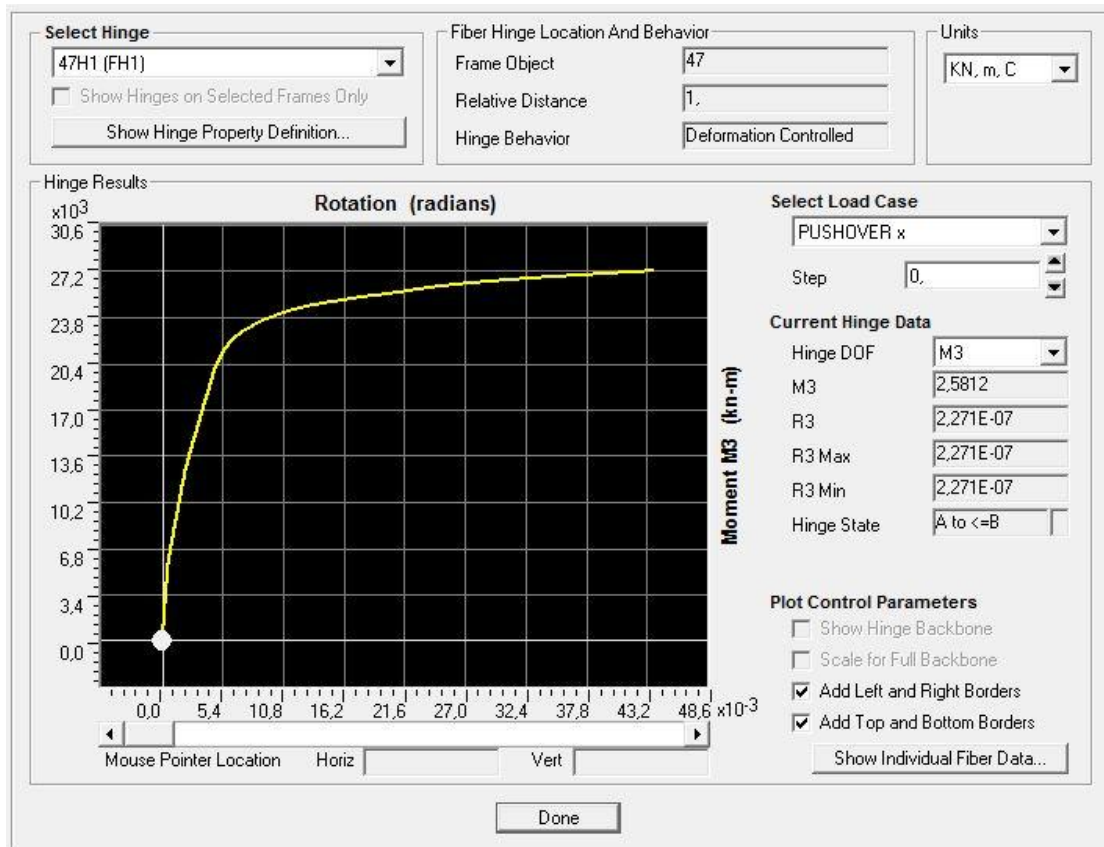
A) Pushover x με fiber hinges



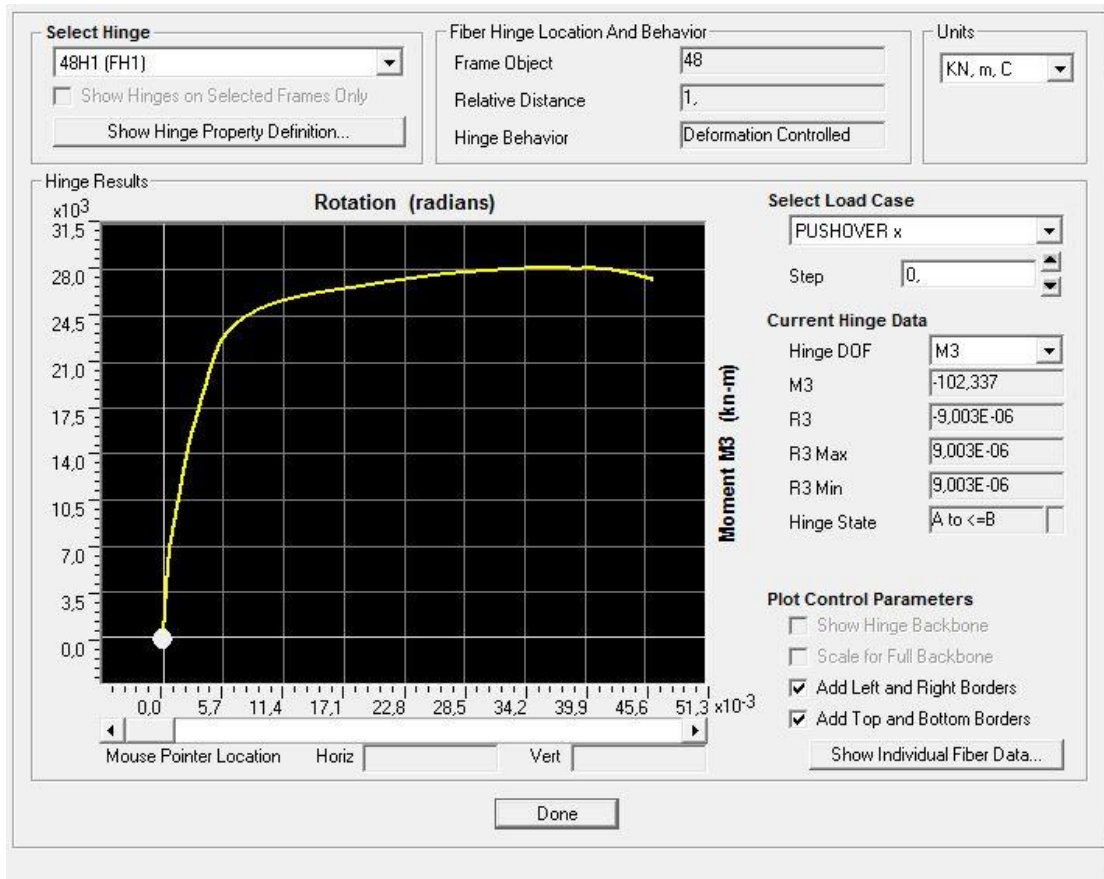
Σχ. 4.1: Καμπύλη ικανότητας φορέα σε Pushover κατά x



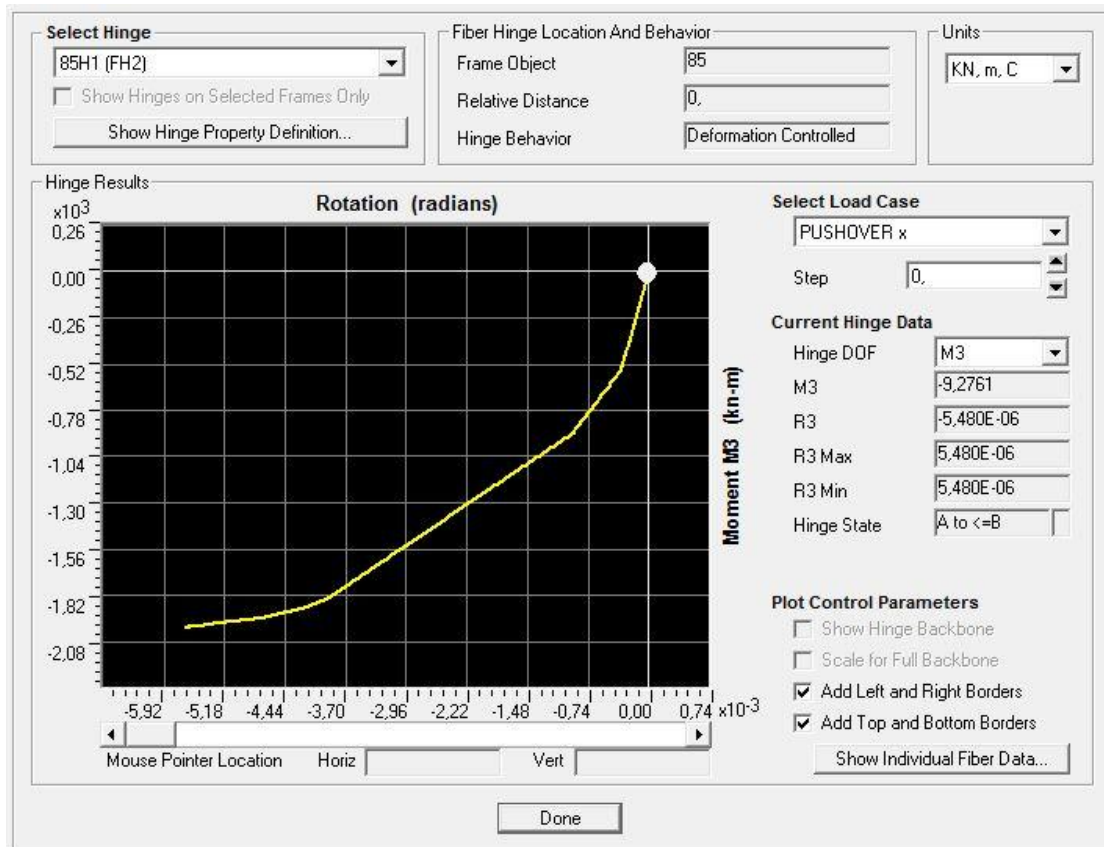
Σχ. 4.2: Διάγραμμα M3-θ του κόμβου 41 (βάση αριστερού βάρου)



Σχ. 4.3: Διάγραμμα M3-θ του κόμβου 42 (βάση μεσαίου βάθρου)



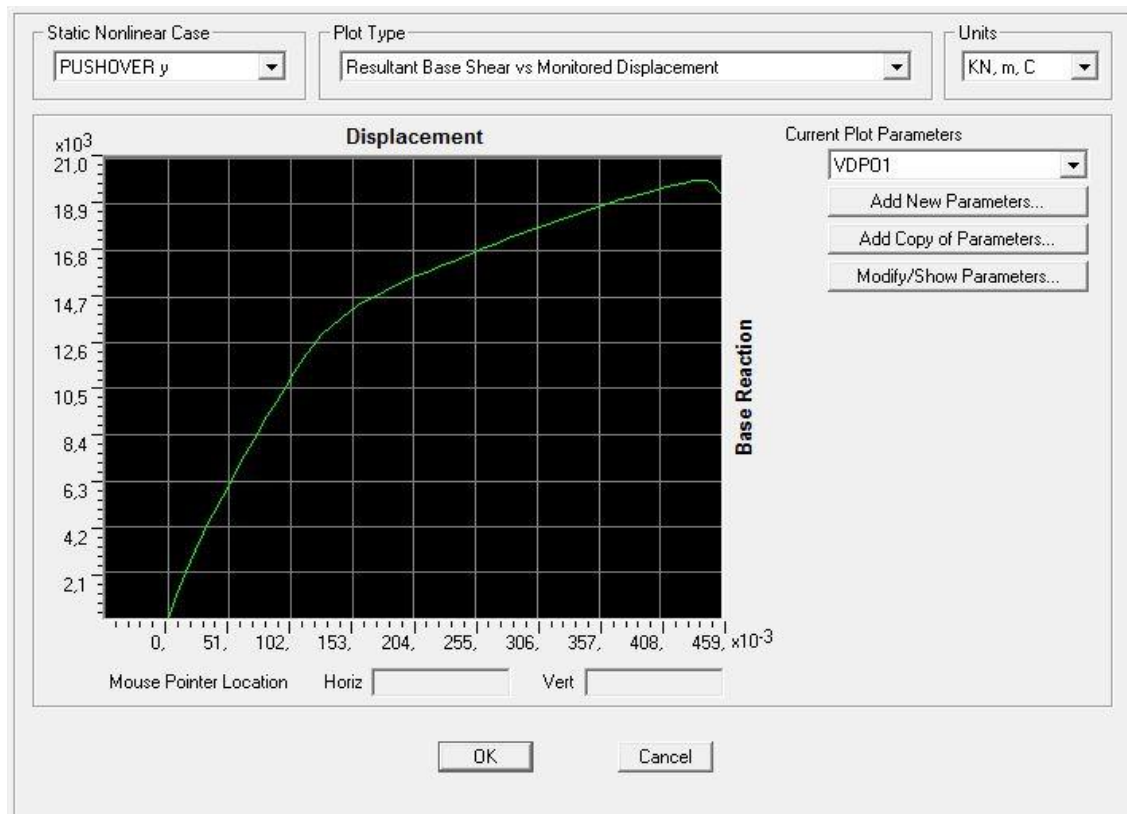
Σχ. 4.4: Διάγραμμα M3-θ του κόμβου 44 (βάση δεξιού βάρθρου)



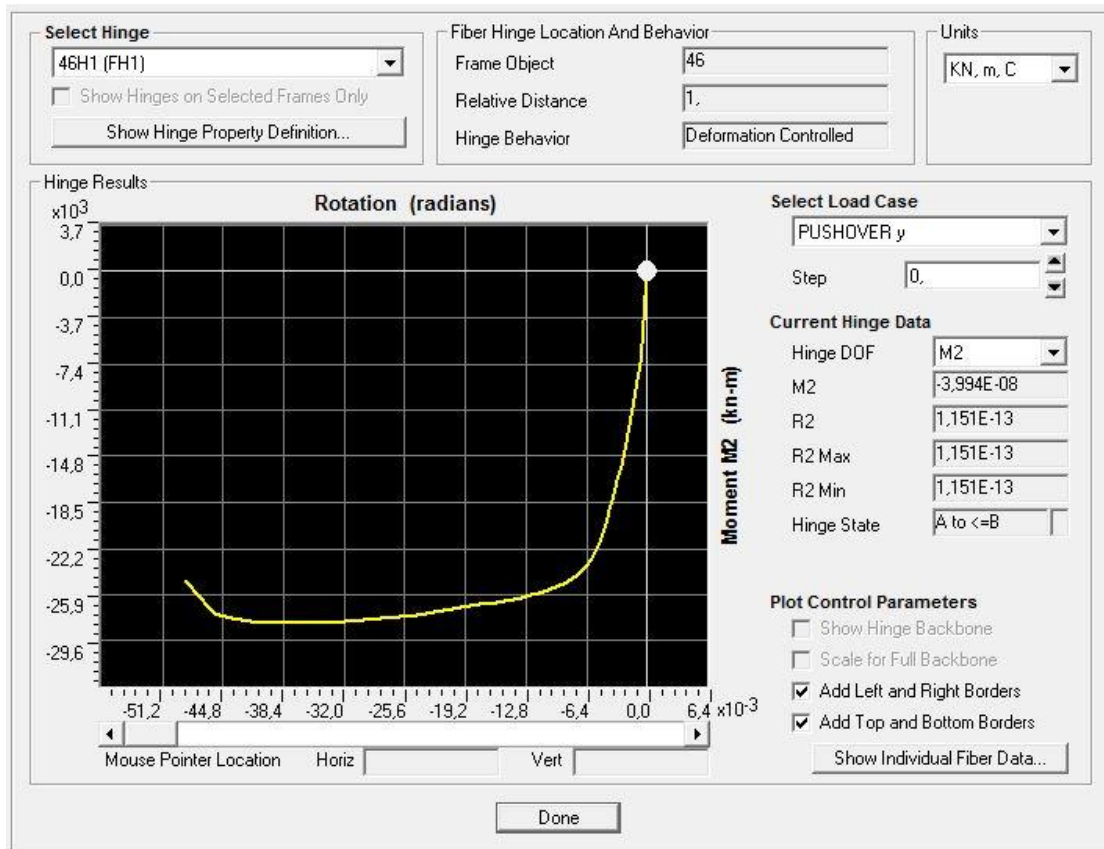
Σχ. 4.5: Διάγραμμα M_3 - θ κόμβου σε κορυφή πασσάλου

Χάριν συντομίας δεν παρουσιάζονται τα γραφήματα καταπόνησης όλων των κόμβων των πασσάλων, αφού όπως γίνεται φανερό και από το παραπάνω γράφημα η κατάρρευση του φορέα οφείλεται στις πλαστικές αρθρώσεις των βάθρων και όχι των πασσάλων.

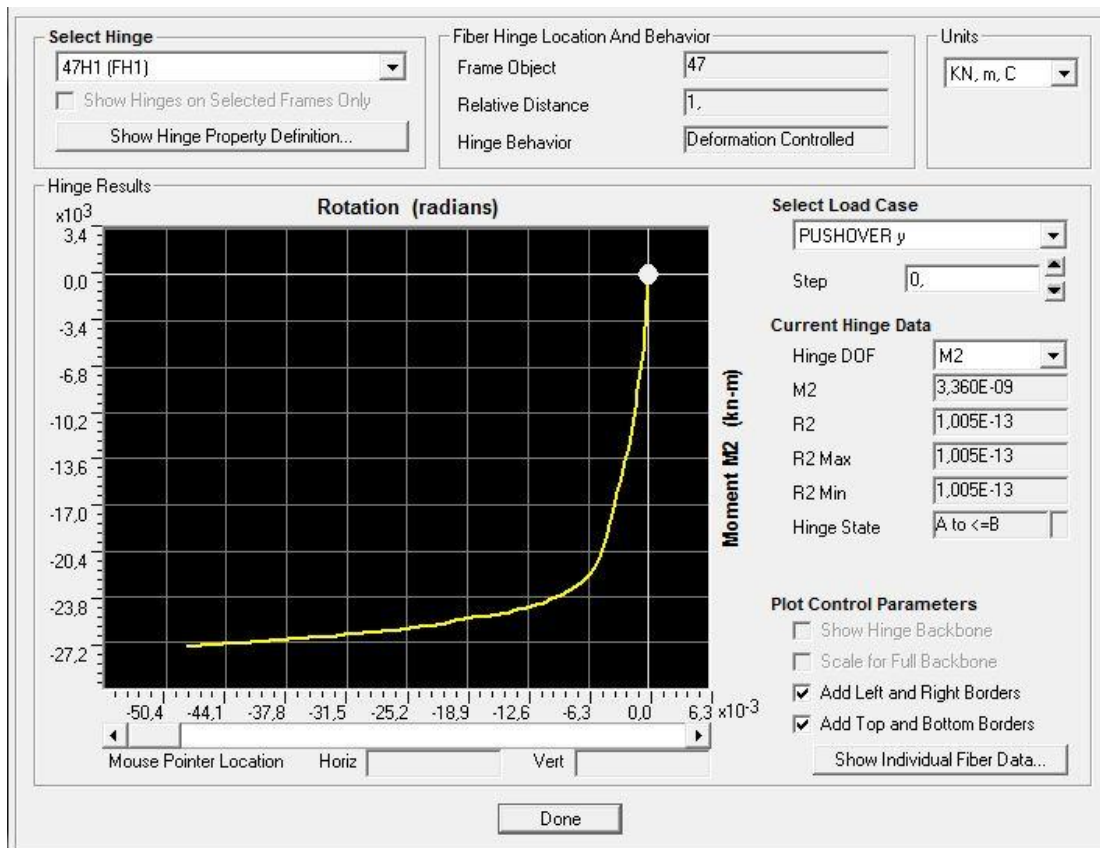
B) Pushover γ με fiber hinges



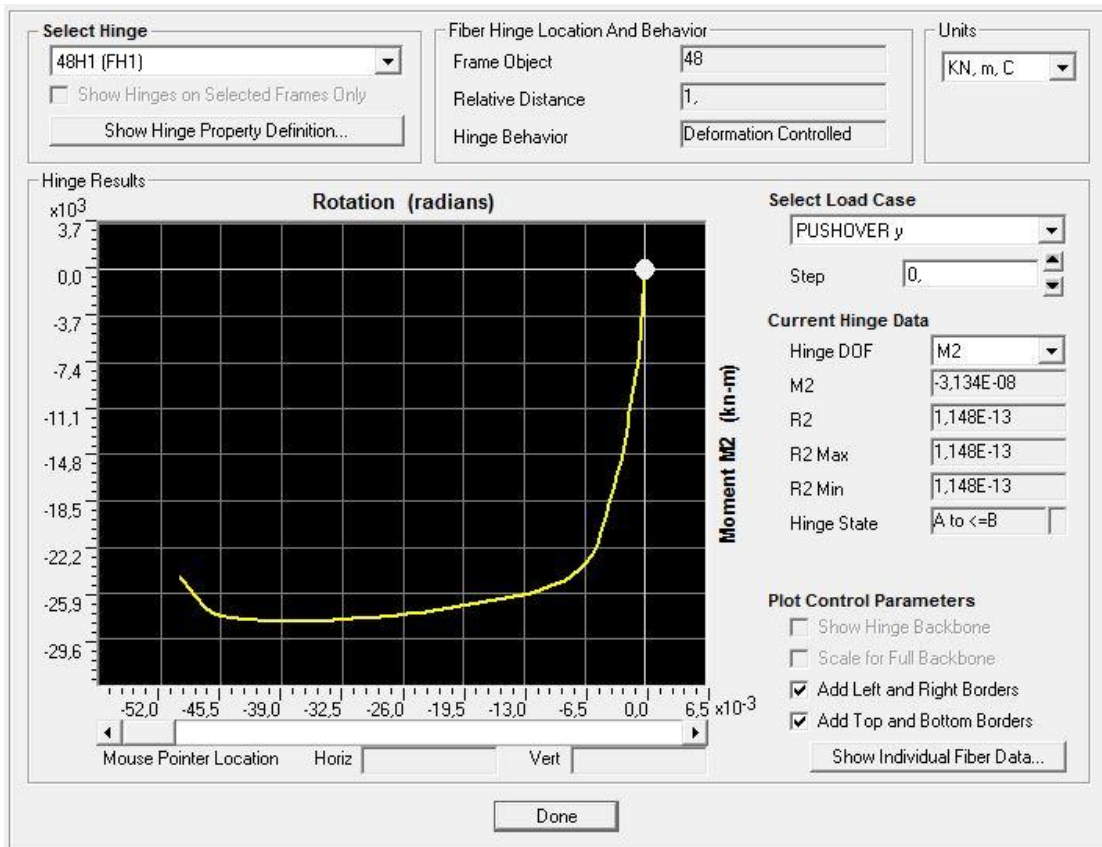
Σχ. 4.6: Καμπύλη ικανότητας φορέα σε pushover κατά γ



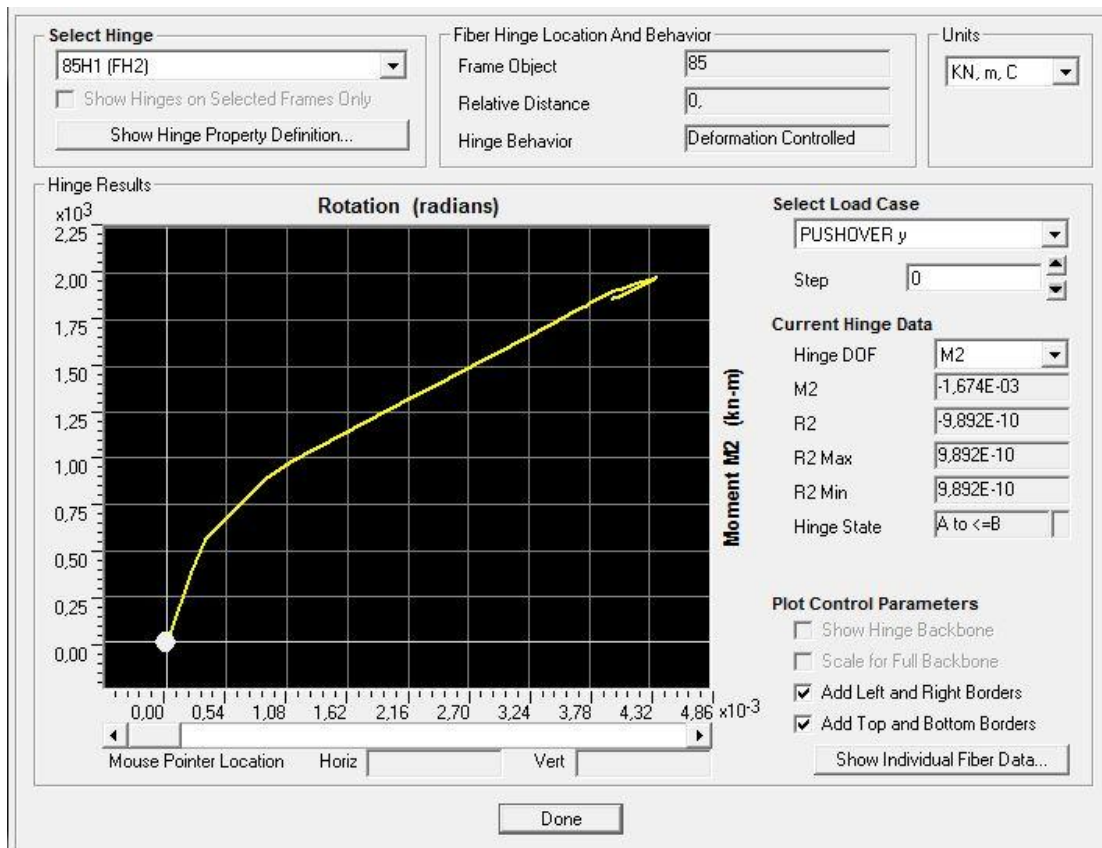
Σχ. 4.7: Διάγραμμα M2-θ του κόμβου 41 (βάση αριστερού βάθρου)



Σχ. 4.8: Διάγραμμα M2-θ του κόμβου 42 (βάση μεσαίου βάθρου)



Σχ. 4.9: Διάγραμμα M2-θ του κόμβου 44 (βάση δεξιού βάθρου)



Σχ. 4.10: Διάγραμμα M2-θ κόμβου σε κορυφή πασσάλου

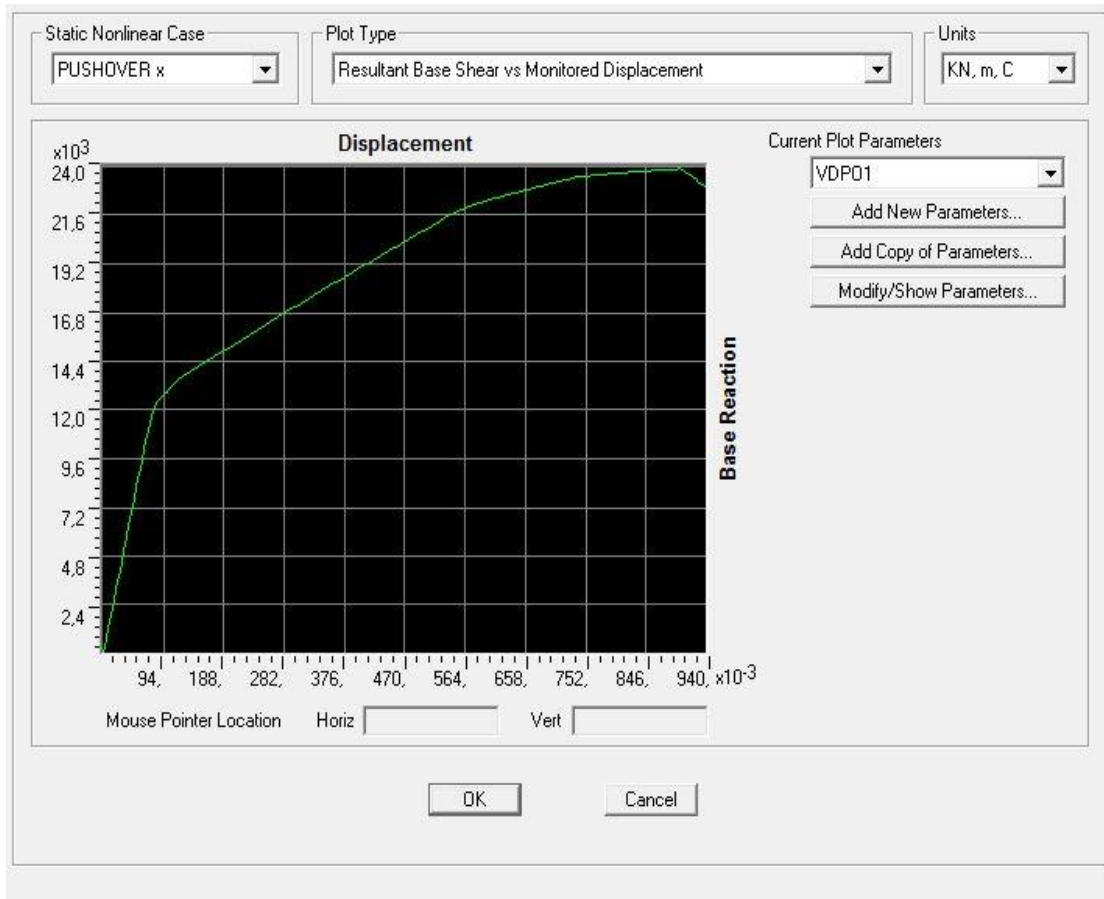
Γ) Pushover x με flexural hinges



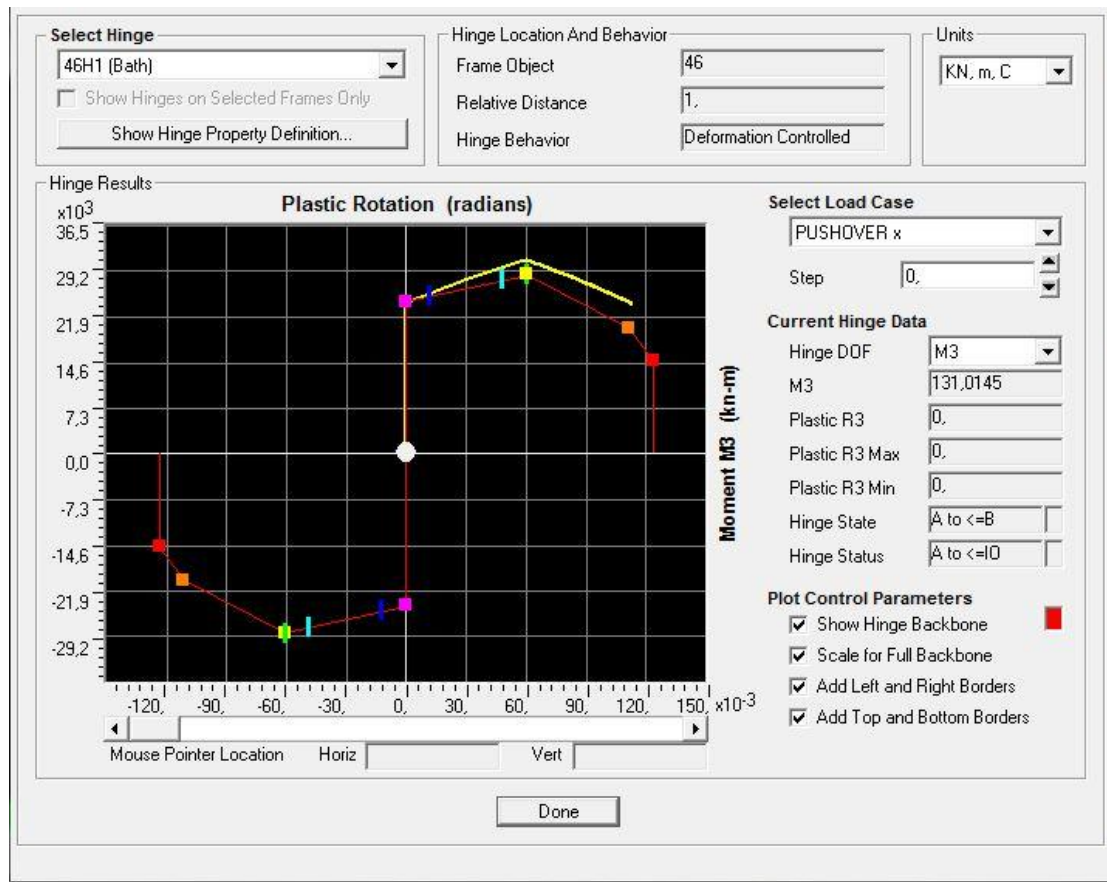
Σχ. 4.11: Παραμορφωμένος φορέας στο τέλος της pushover κατά x

Όπως γίνεται φανερό από την παραπάνω εικόνα, οι κόμβοι της βάσης και του αριστερά και του μεσαίου βάθρου έχουν καταρρεύσει (collapse state), ο κόμβος του δεξιά βάθρου έχει “διαλυθεί” πλήρως, ενώ οι κόμβοι στις κεφαλές των πασσάλων μόλις έχουν μπει στην πλαστική περιοχή.

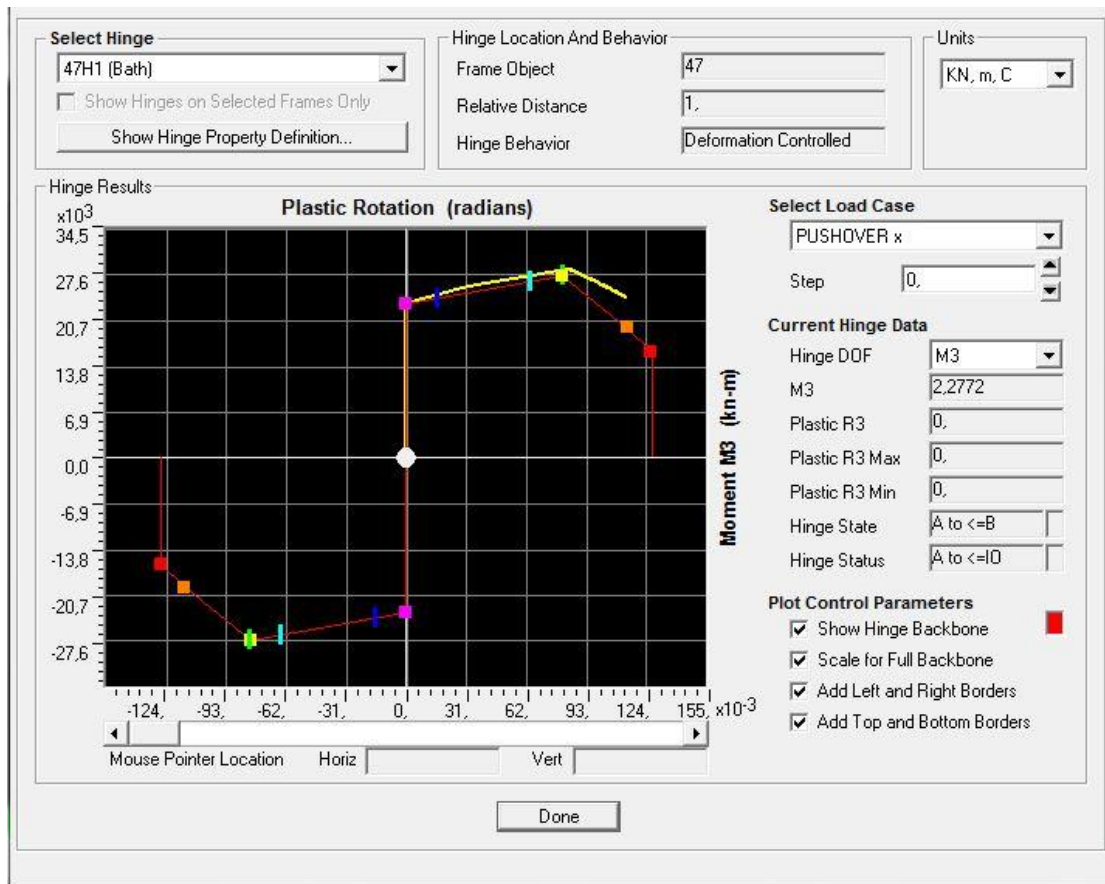
Οι παράμετροι σύγκλισης του προγράμματος ευθύνονται, για το γεγονός ότι οι δεν “διαλύονται” πλήρως οι κόμβοι στις βάσεις των βάθρων (κόκκινη περιοχή), αλλά οι αλλαγές στην καμπύλη ικανότητας είναι αμελητέες.



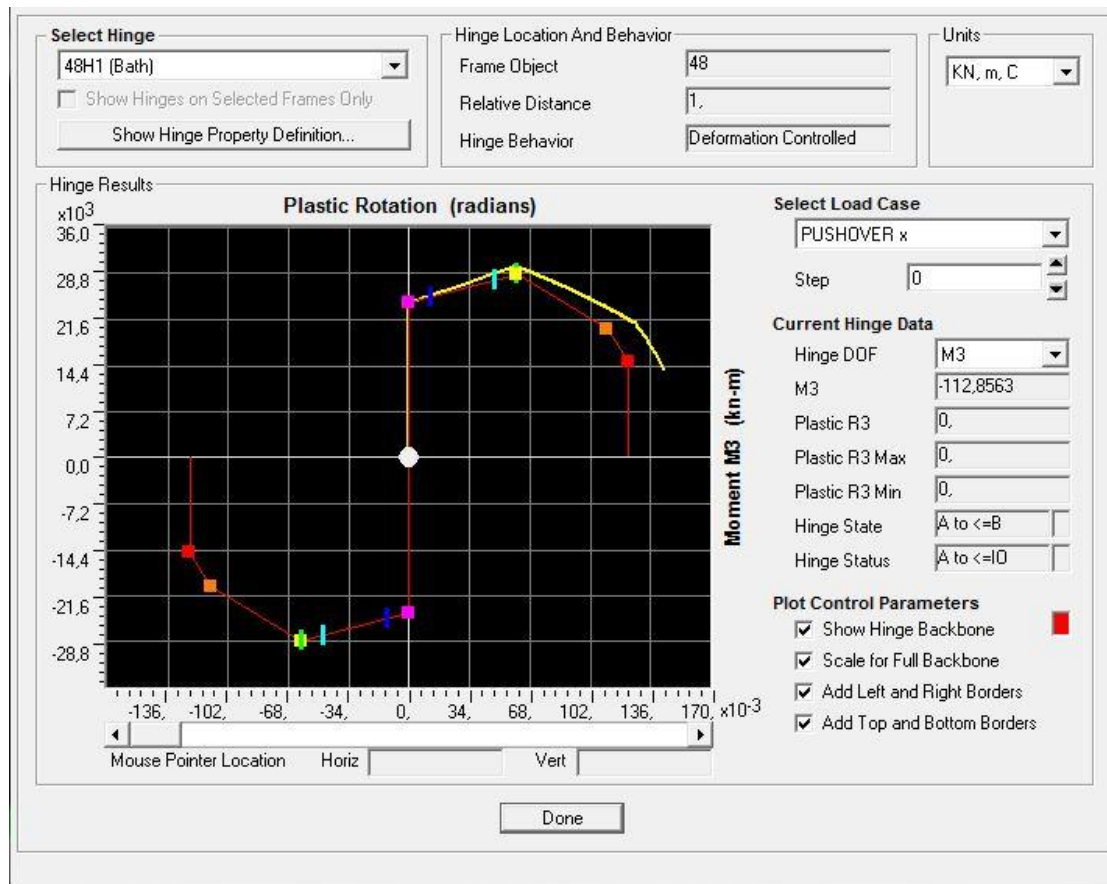
Σχ. 4.12: Καμπύλη ικανότητας φορέα σε Pushover κατά x



Σχ. 4.13: Διάγραμμα M3-θ του κόμβου 41 (βάση αριστερού βάρου)

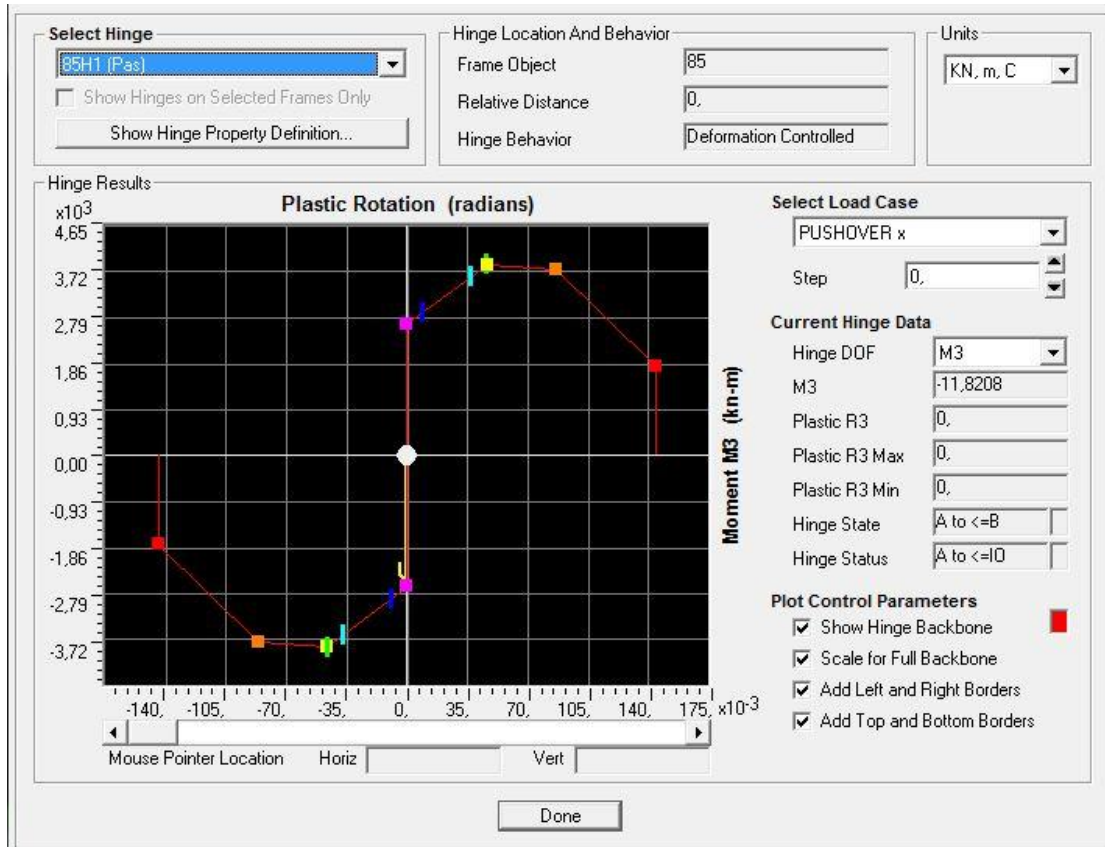


Σχ. 4.14: Διάγραμμα M3-θ του κόμβου 42 (βάση μεσαίου βάθρου)



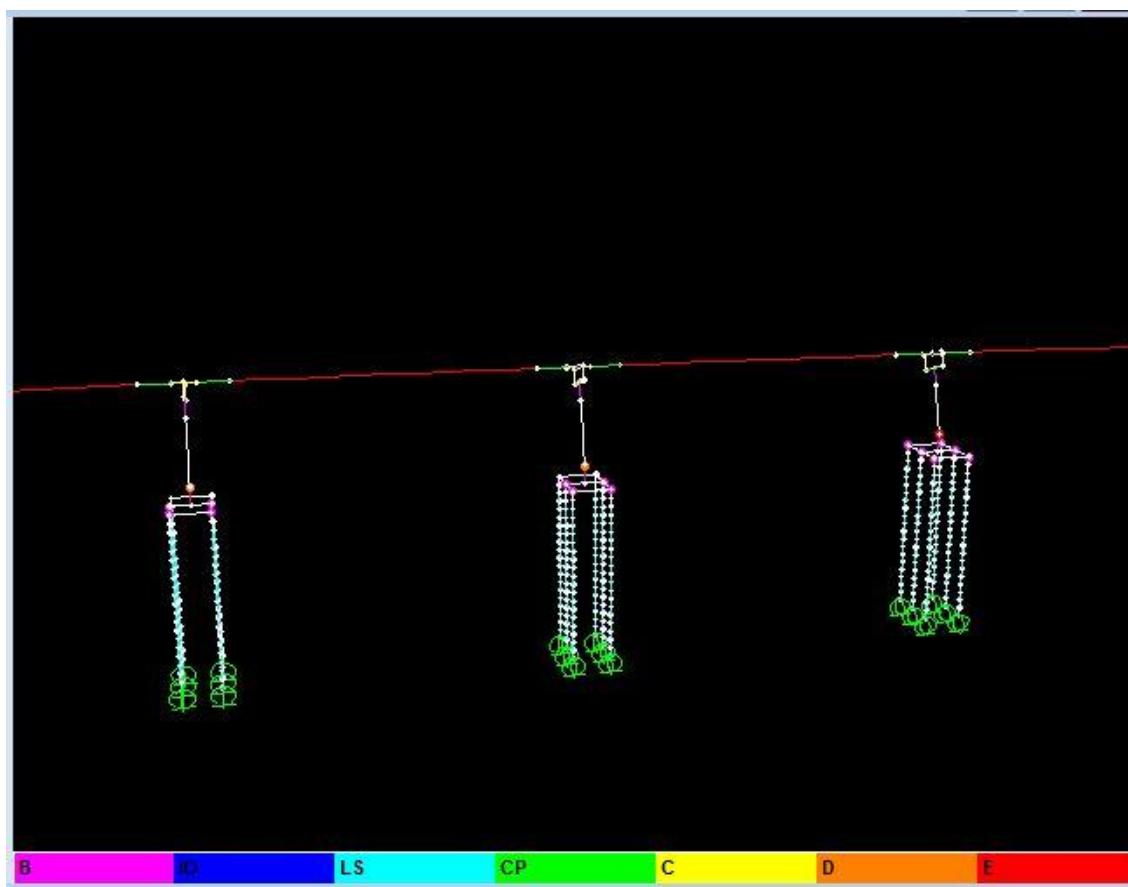
Σχ. 4.15: Διάγραμμα M3-θ του κόμβου 44 (βάση δεξιά βάρου)

Είναι αναμενόμενο για το δεξιά βάρου να υποστεί μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τα άλλα δύο, διότι είναι κοντύτερο σε σχέση με αυτά, με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία και επομένως να παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία.



Σχ. 4.16: Διάγραμμα M3-θ στην κορυφή πασσάλου

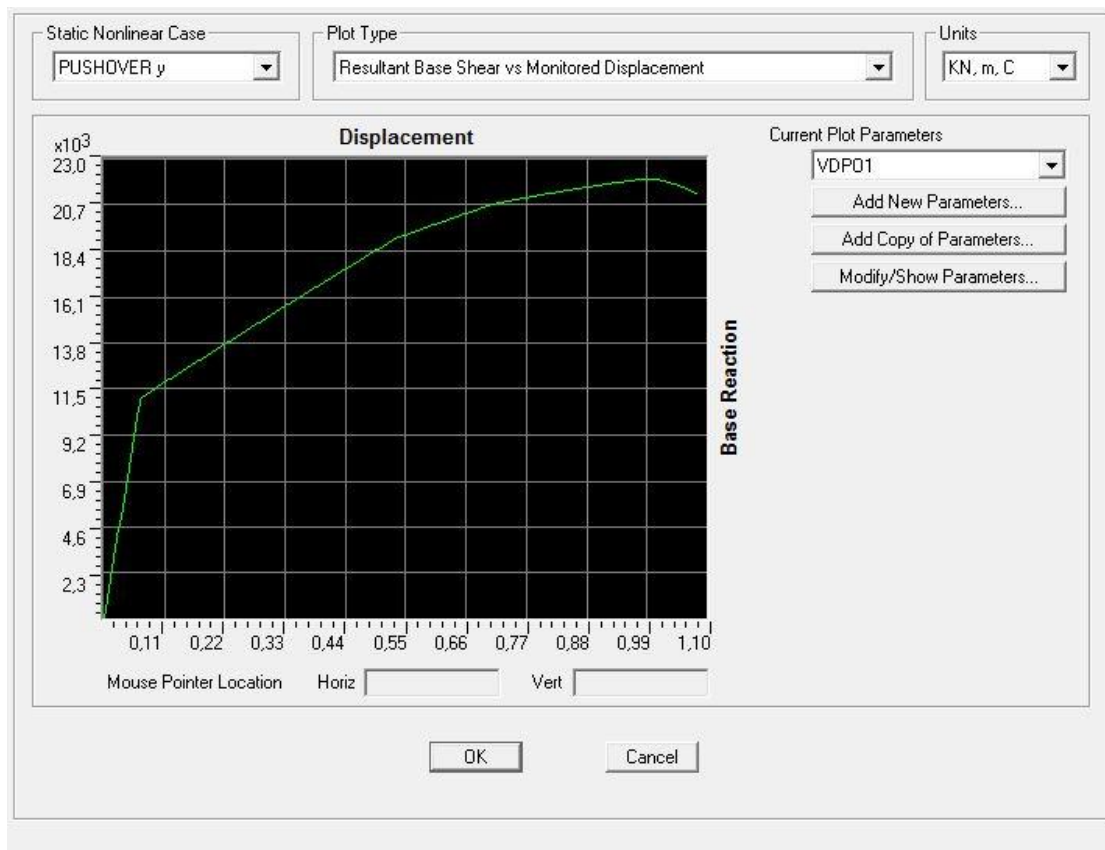
Δ) Pushover γ με flexural hinges



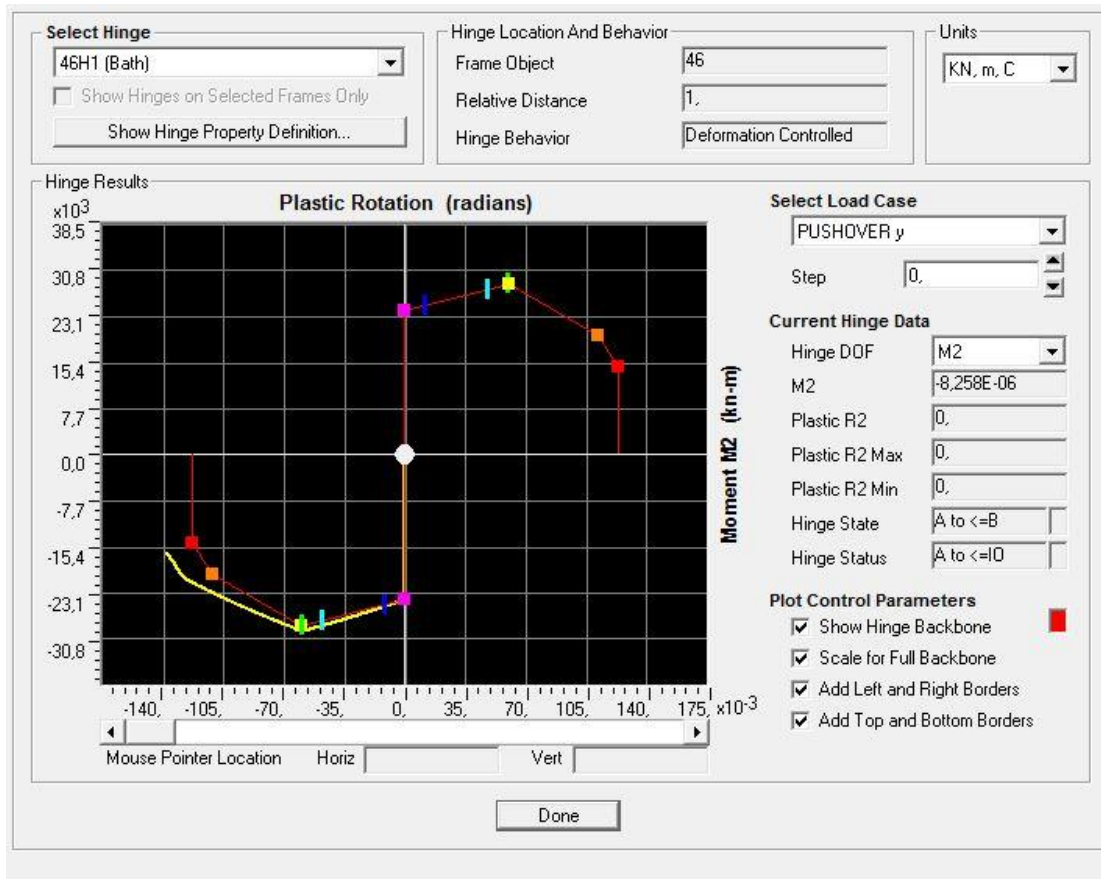
Σχ. 4.17: Παραμορφωμένος φορέας στο τέλος της pushover κατά γ

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι κόμβοι της βάσης του αριστερού και του μεσαίου βάρου έχουν «διαλυθεί», ο κόμβος του δεξιού βάρου βρίσκεται στην στάθμη της πλήρης κατάρρευσης (στάθμη με κόκκινο χρώμα), ενώ οι κόμβοι στις κορυφές των πασσάλων μόλις έχουν μπει στην πλαστική περιοχή.

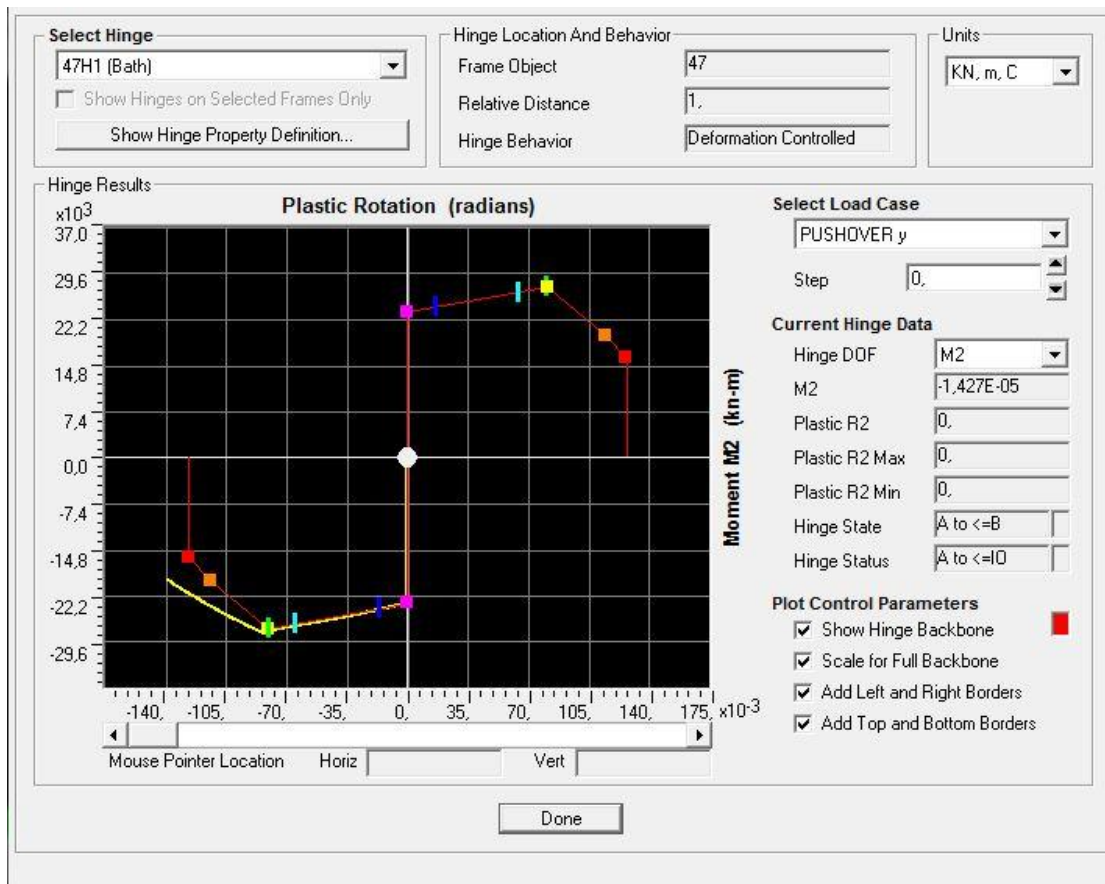
Και σε αυτή την περίπτωση, οι παράμετροι σύγκλισης του προγράμματος ευθύνονται, για το γεγονός ότι οι δεν “διαλύονται” πλήρως οι κόμβοι στις βάσεις των βάρων (κόκκινη περιοχή), αλλά όπως ανέφερα και πιο πριν, οι αλλαγές στην καμπύλη ικανότητας είναι αμελητέες.



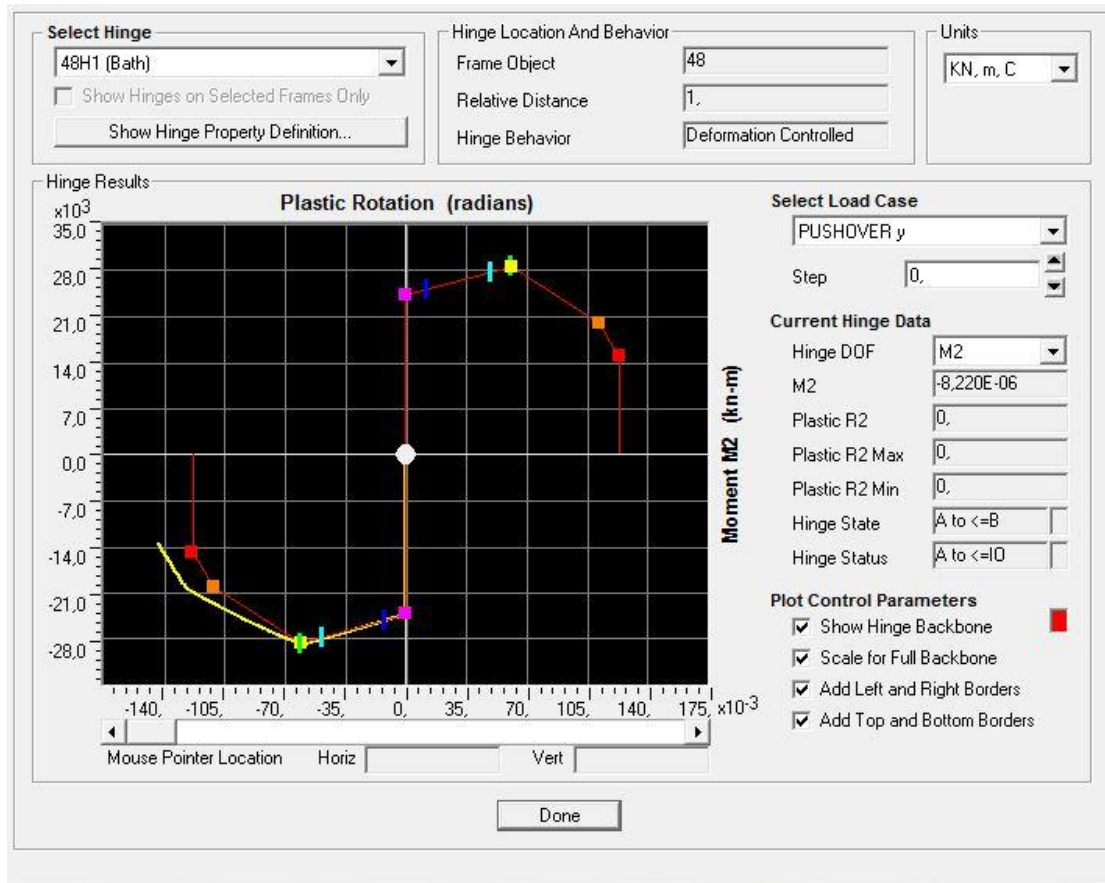
Σχ. 4.18: Καμπύλη ικανότητας φορέα σε Pushover κατά γ



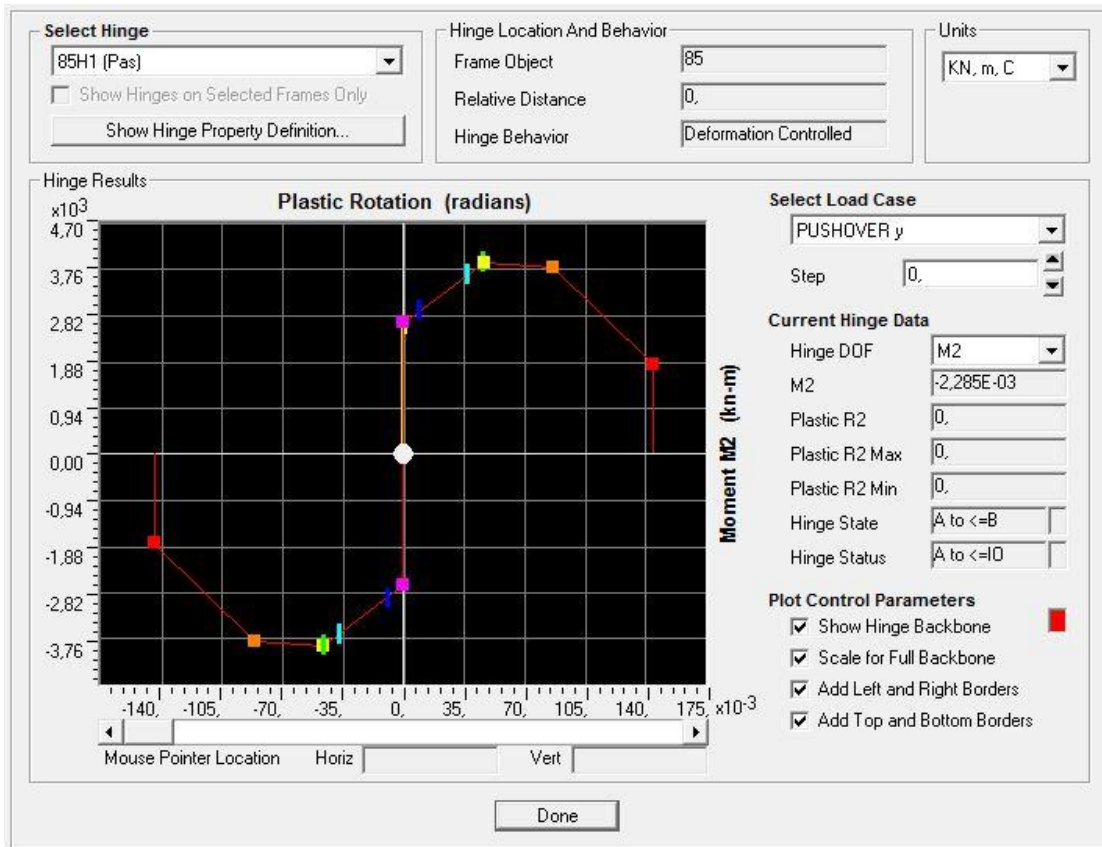
Σχ. 4.19: Διάγραμμα M2-θ του κόμβου 41 (βάση αριστερού βάρθου)



Σχ. 4.20: Διάγραμμα M2-θ του κόμβου 42 (βάση μεσαίου βάθρου)



Σχ. 4.21: Διάγραμμα M2-θ του κόμβου 44 (βάση δεξιά βάρου)



Σχ. 4.22: Διάγραμμα M2-θ στην κορυφή πασσάλου

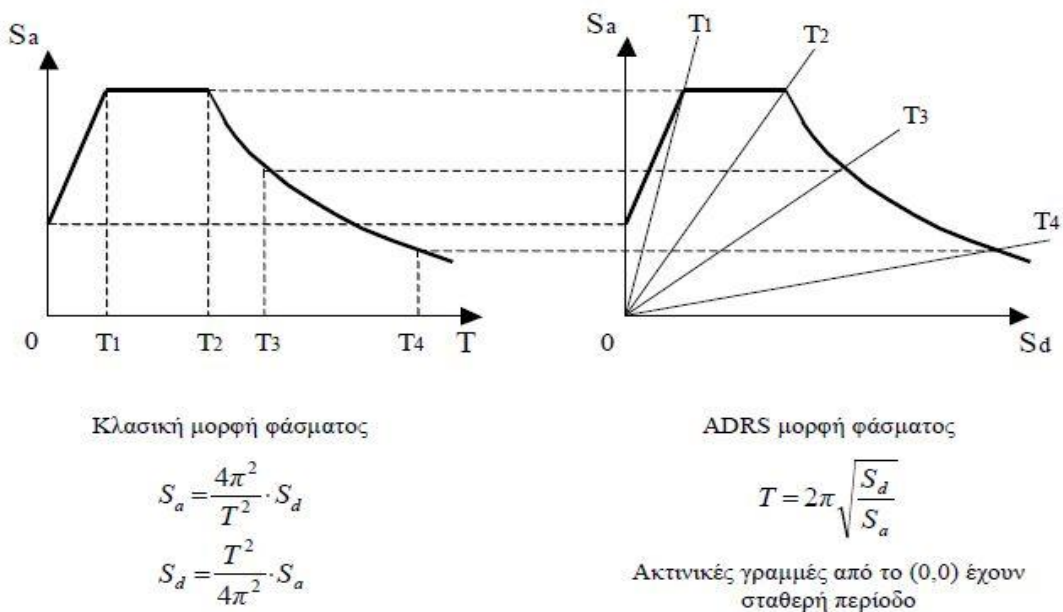
5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ATC-40

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος του φάσματος ικανότητας χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, προσδιορίζουμε το σημείο τομής του απομειωμένου (τελικού) φάσματος απαίτησης σε μετακίνηση (που προέκυψε από το αρχικό ελαστικό φάσμα σχεδιασμού) του φορέα με την καμπύλη του φάσματος ικανότητας (που με τη σειρά της προέκυψε από την καμπύλη ικανότητας) του φορέα. Το σημείο αυτό καλείται σημείο συμπεριφοράς και είναι ο δείκτης σεισμικής συμπεριφοράς της γέφυρας.

Τα βήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1: Μεταφορά του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για $\zeta=5\%$ στο πεδίο επιτάχυνση-μετακίνηση (μορφή ADRS) (σχ. 5.1).



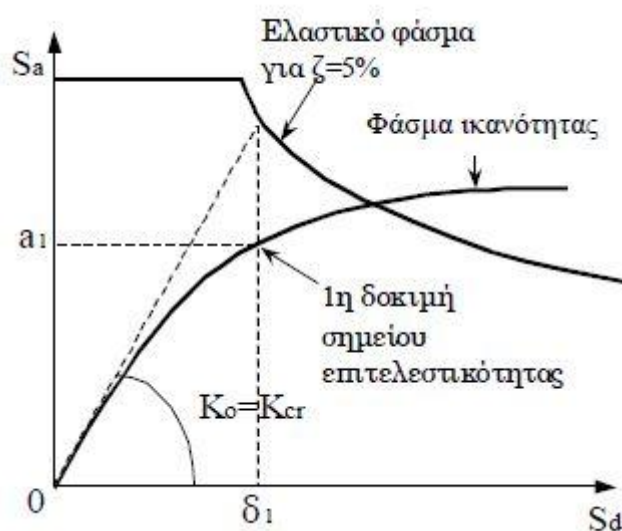
Σχ. 5.1: Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε ADRS μορφή

Βήμα 2: Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας (capacity curve) και του φάσματος ικανότητας (capacity spectrum).

Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται με υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές της τέμνουσας βάσης θεωρώντας κατανομή των φορτίων καθ' ύψος συμβατή με την αναμενόμενη μορφή μετακινήσεων. Στη συνέχεια, η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

Βήμα 3: Εύρεση $1^{ου}$ σημείου δοκιμών (σχ. 5.2).

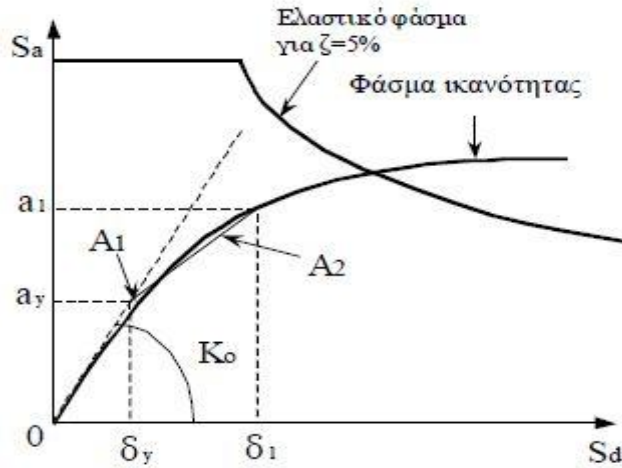
Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση $\zeta=5\%$ υπολογίζεται η μετακίνηση δ_1 για τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής). Για τη μετακίνηση δ_1 υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας πάνω στο φάσμα ικανότητας και η αντίστοιχη επιτάχυνση a_1 . Η μετακίνηση δ_1 είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και ανελαστικού συστήματος.



Σχ. 5.2: Εύρεση $1^{ου}$ σημείου δοκιμών

Βήμα 4: Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας (σχ. 5.3).

Από το $1^{ο}$ σημείο δοκιμής φέρνουμε ευθεία, έτσι ώστε τα εμβαδά A1 και A2 να είναι περίπου ίσα και ορίζουμε το σημείο τομής με την ευθεία που αντιστοιχεί στην αρχική δυσκαμψία. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη διαρροή σύμφωνα με τη διγραμμική καμπύλη συμπεριφοράς και η προβολή του στους άξονες S_a και S_d ορίζει την επιτάχυνση διαρροής, a_y και τη μετακίνηση διαρροής, δ_y αντίστοιχα.



Σχ. 5.3: Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας

Βήμα 5: Υπολογισμός ενεργούς απόσβεσης.

Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\zeta_{\text{eff}} = \zeta_{\text{ελ}} + \zeta_{\text{υστ}}$$

όπου: $\zeta_{\text{ελ}}$ = απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά (=0,05 για Ω.Σ.)

$\zeta_{\text{υστ}}$ = υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Η $\zeta_{\text{υστ}}$ υπολογίζεται από τον τύπο του Chopra (1995):

$$\zeta_{\text{υστ}} = \frac{0.637 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$$

Η σχέση του Chopra *υπερεκτιμά* την υστερητική απόσβεση για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλάσιμη συμπεριφορά. Γι' αυτό, στο ATC-40 προτείνεται η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή κ , ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση.

Θέτοντας στη σχέση του Chopra $a_u = a_1$ και $\delta_u = \delta_1$ προκύπτει:

$$\zeta_{\text{eff}} (\%) = 5 + \frac{63.7 \cdot \kappa \cdot (a_y \cdot \delta_1 - \delta_y \cdot a_1)}{a_1 \cdot \delta_1}$$

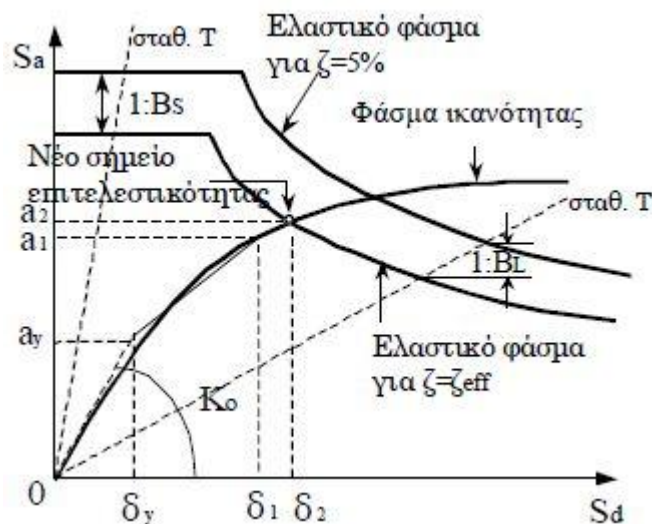
Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση $\zeta = \zeta_{\text{eff}}$ με πολλαπλασιασμό των τιμών του φάσματος για $\zeta = 5\%$ με τους συντελεστές SR_A και SR_V (Σχ. 5.4):

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

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

στα τμήματα που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση και σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα.

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



Σχ. 5.4: Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για $\zeta = \zeta_{eff}$ και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.

Τύποι συμπεριφοράς κτιρίων

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

Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ

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

Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης

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

Βήμα 6: Η μέθοδος βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Θεωρούμε ότι η σύγκλιση έχει επιτευχθεί εάν:
 $0.95 \cdot \delta_1 < \delta_2 < 1.05 \cdot \delta_1$

Εάν το κριτήριο δεν ικανοποιείται, θέτουμε $a_1 = a_2$ και $\delta_1 = \delta_2$ και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το 5^ο βήμα. Εάν το κριτήριο ικανοποιείται, η μετακίνηση δ_2 αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (στοχευόμενη μετακίνηση).

Βήμα 7: Στοχευόμενη μετακίνηση κατασκευής

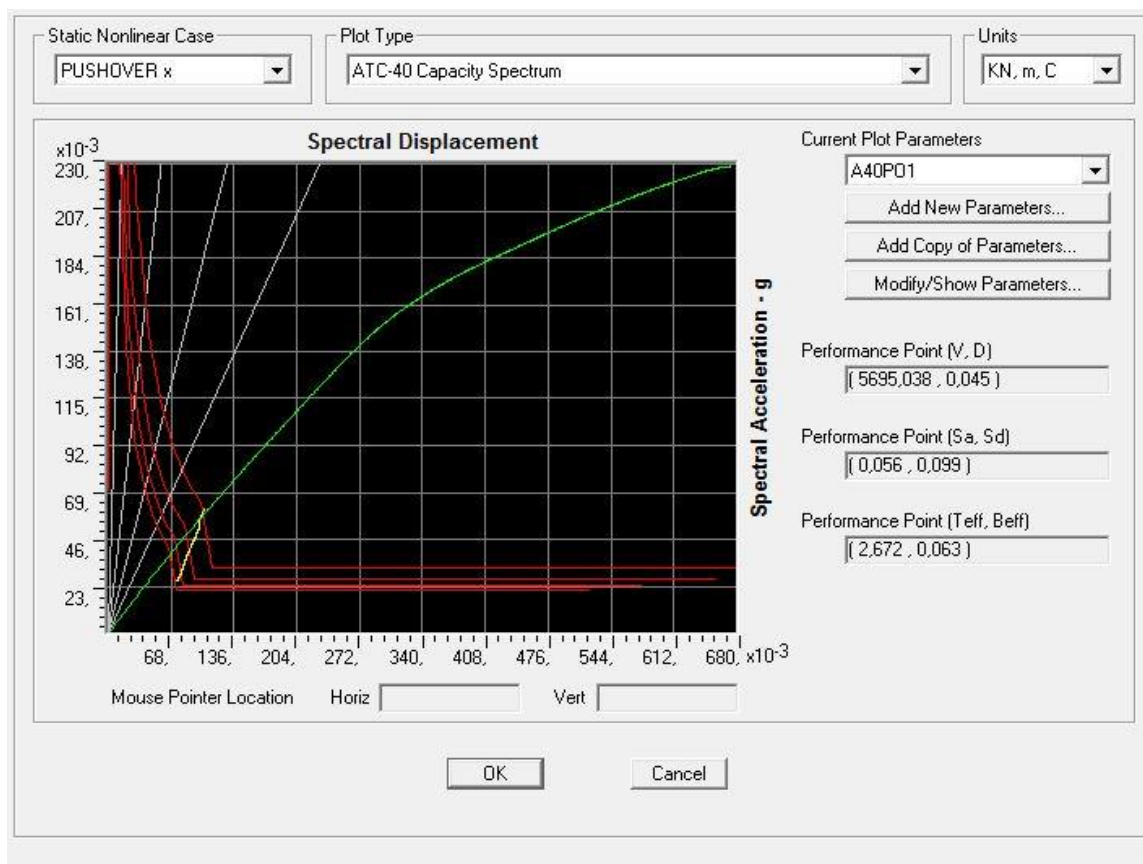
Η μετακίνηση της κορυφής, Δ , που αντιστοιχεί στη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad \left[\text{ή} \quad S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \varphi_{top}} \quad \text{εάν} \quad \varphi_{top} \neq 1 \right]$$

επιλύοντας ως προς Δ και θέτοντας $Sd = \delta^*$.

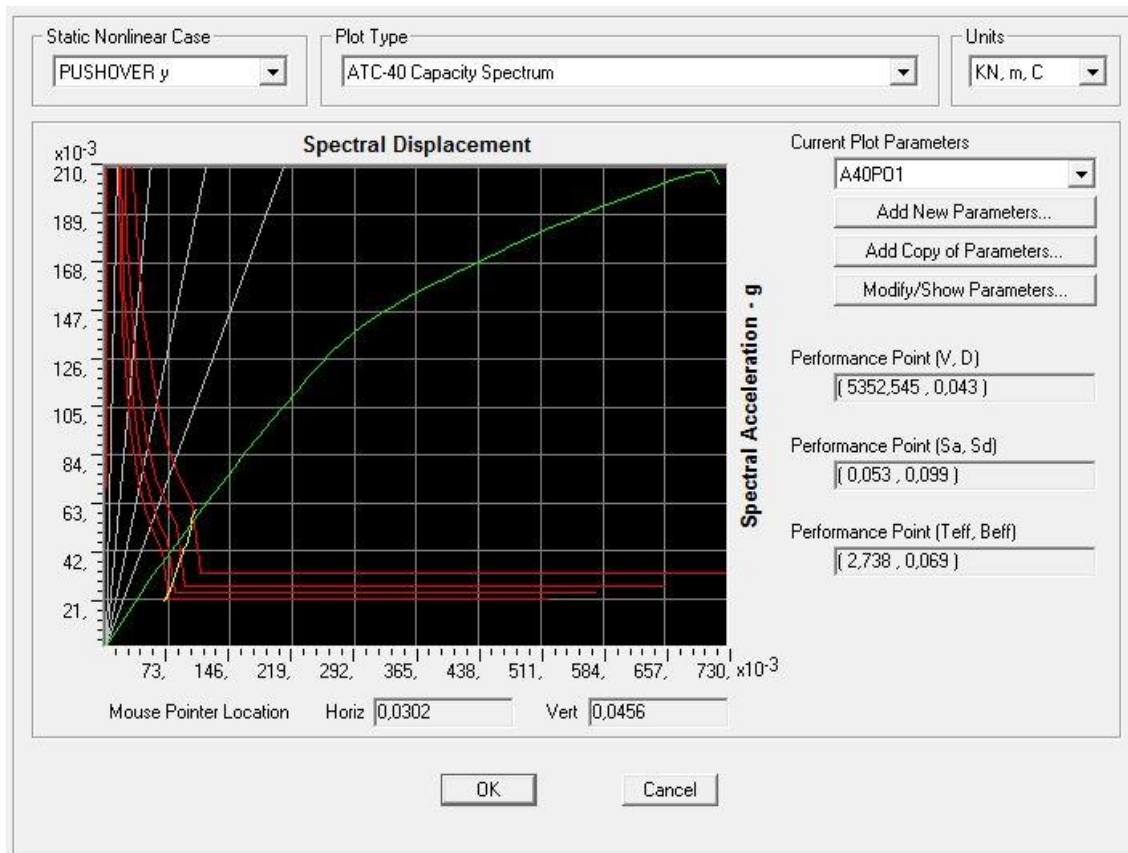
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ATC-40

Περίπτωση 1^η: Σεισμός κατά x με fiber hinges



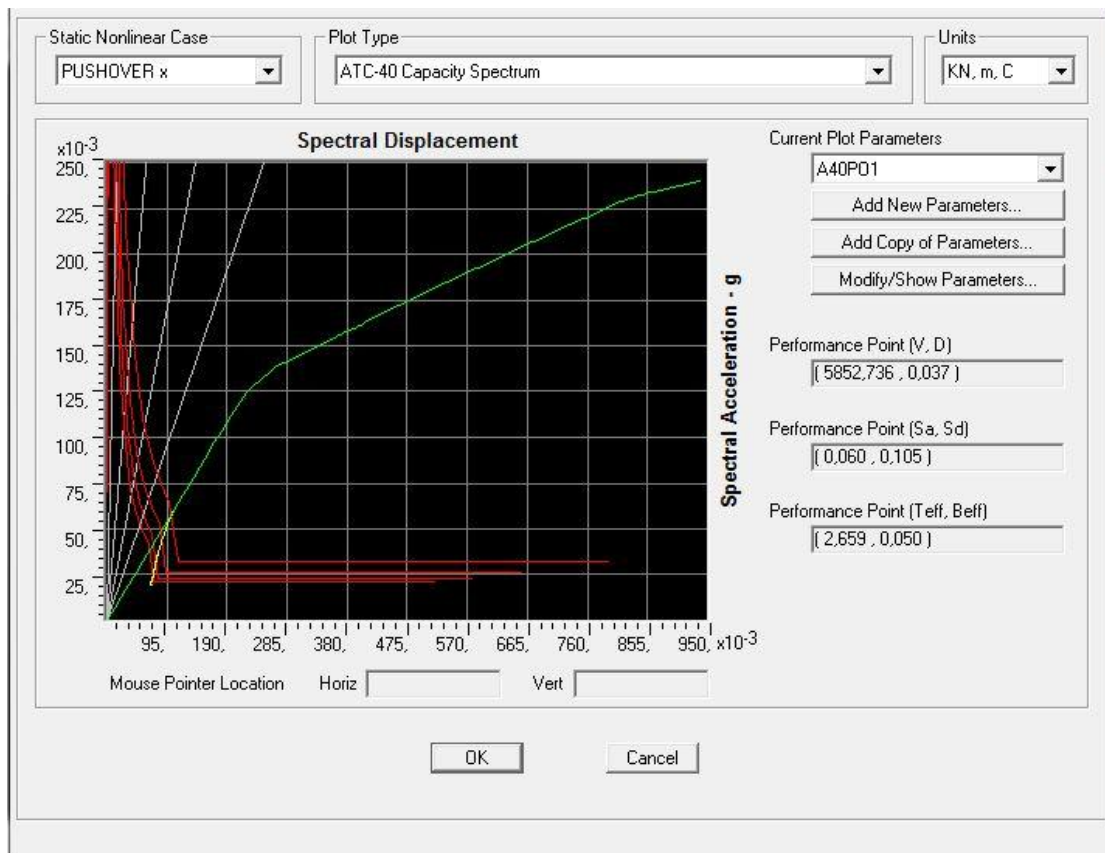
Σχ. 5.5: Καμπύλη φάσματος ικανότητας φορέα σε pushover κατά x

Περίπτωση 2^η: Σεισμός κατά γ με fiber hinges



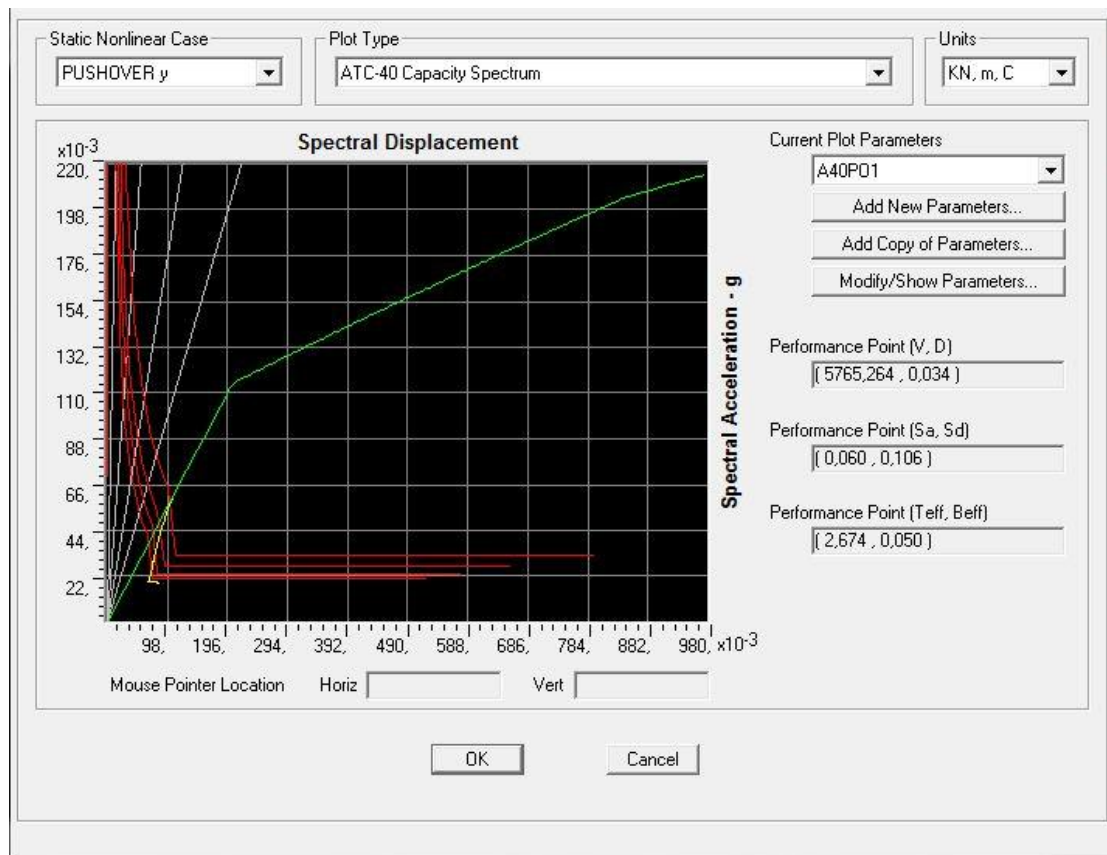
Σχ. 5.6: Καμπύλη φάσματος ικανότητας φορέα σε pushover κατά γ

Περίπτωση 3^η: Σεισμός κατά x με flexural hinges



Σχ. 5.7: Καμπύλη φάσματος ικανότητας φορέα σε pushover κατά x

Περίπτωση 4^η: Σεισμός κατά γ με flexural hinges



5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Για την 1^η περίπτωση προκύπτει $D=0,046\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ (μη φασματική μετακίνηση συμπεριφοράς) και η μετακίνηση διαρροής από την καμπύλη ικανότητας της ίδιας περίπτωσης είναι $\delta_{\gamma}=0,138\text{m}$ (σχ. 4.1).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,045/0,138 = 0,33 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1 (επιπέδων επιτελεστικότητας).
- Για τη 2^η περίπτωση προκύπτει $D=0,043\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_{\gamma}=0,132\text{m}$ (σχ. 4.6).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,043/0,132 = 0,33 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.
- Για τη 3^η περίπτωση προκύπτει $D=0,037\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_{\gamma}=0,078\text{m}$ (σχ. 4.12).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,037/0,078 = 0,47 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.
- Για τη 4^η περίπτωση προκύπτει $D=0,034\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_{\gamma}=0,065\text{m}$ (σχ. 4.18).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,034/0,065 = 0,52 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.

6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

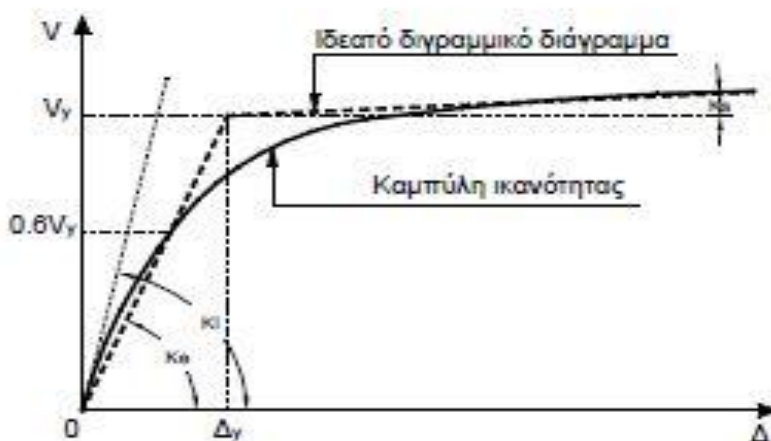
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής και περιγράφεται στη FEMA 356 και τον ATC-40. Και αυτή η μέθοδος βασίζεται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα, το οποίο όμως χρησιμοποιείται χωρίς να αναφέρεται ρητά.

Τα βήματα για αυτή τη μέθοδο είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1: Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος για την καμπύλη ικανότητας

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται κατ' αρχήν η μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε διγραμμικό διάγραμμα. Στον ATC-40 προτείνεται η εξής διαδικασία για τη μετατροπή (βλ. σχήμα 6.1):



Σχ.6.1 Κατασκευή ιδεατής διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης ικανότητας

- Κατασκευάζεται ο μετελαστικός κλάδος, ορίζοντας τη δυσκαμψία, K_s , κατά την κρίση του μηχανικού, και θεωρώντας ότι η αντίστοιχη ευθεία διέρχεται από το σημείο που η καμπύλη ικανότητας έχει γίνει περίπου οριζόντια.
- Ορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία, K_e , από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο πάνω στην καμπύλη ικανότητας που αντιστοιχεί στο 60% της τέμνουσας διαρροής, V_y . Επειδή αυτή η τιμή δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτούνται κάποιες δοκιμές.
- Ορίζεται η τέμνουσα διαρροής, V_y , από το σημείο τομής των ευθειών με κλίση K_e και K_s , που αντιστοιχούν στον ελαστικό και τον μετελαστικό κλάδο αντίστοιχα.

Βήμα 2: Υπολογισμός της ενεργούς θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, T_e

Από δυναμική ανάλυση υπολογίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής στη διεύθυνση που εξετάζεται, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική δυσκαμψία, K_i . Για να υπολογίσουμε την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο, που αντιστοιχεί σε δυσκαμψία K_e , χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$T_e = T_i \sqrt{K_i / K_e}$$

Βήμα 3: Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης, Δ_t .

Η στοχευόμενη μετακίνηση της κορυφής που αντιστοιχεί σε δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού (target displacement) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot T_e^2 / 4 \cdot \pi^2$$

Οι τιμές των παραμέτρων ορίζονται παρακάτω σύμφωνα με FEMA 356.

C_0 = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση της κορυφής, Δ , με τη φασματική μετακίνηση, S_d . Ισχύει: $\Delta = \Gamma \cdot S_d \cdot \phi_{top}$, όπου Γ ο συντελεστής συμμετοχής. Άρα, $C_0 = \Gamma \cdot \phi_{top}$. Εάν $\phi_{top} = 1$, τότε $C_0 = \Gamma$. Για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής μπορούν να χρησιμοποιούνται οι τιμές ϕ_i που αντιστοιχούν στην 1η ιδιομορφή ή οι τιμές που αντιστοιχούν στην παραμόρφωση της κατασκευής όταν συμβαίνει η στοχευόμενη μετακίνηση. Εναλλακτικά, η τιμή του συντελεστή C_0 μπορεί να λαμβάνεται απ' ευθείας από τους αντίστοιχους πίνακες.

C_1 = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$C_1 = 1.0 \quad \text{για } T_e \geq T_S$$

$$C_1 = \frac{1.0 + (R-1) \cdot T_S / T_e}{R} \quad \text{για } T_e < T_S$$

Επίσης ισχύει: $C_1 \leq 1.5$ για $T_e \leq 1.0$ sec και $C_1 \geq 1.0$.

Στις παραπάνω σχέσεις:

T_S = η περίοδος που ορίζεται από το σημείο τομής του τμήματος του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε σταθερή επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος), δηλαδή $T_S = T_2$ κατά EAK και $T_S = T_C$ κατά EC8.

R = ο συντελεστής συμπεριφοράς που εκφράζει το λόγο της ελαστικής απαίτησης προς τη δύναμη διαρροής, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{S_a/g}{V_y/W} \cdot C_m$$

όπου:

S_a = φασματική επιτάχυνση σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο, T_e .

V_y = τέμνουσα διαρροής σύμφωνα με τη διγραμμική απεικόνιση της καμπύλης ικανότητας.

W = συνολικό βάρος της κατασκευής

C_m = συντελεστής που δηλώνει την ενεργό μάζα σύμφωνα με αντίστοιχο πίνακα.

Εναλλακτικά, ο συντελεστής C_m μπορεί να λαμβάνεται ίσος με το λόγο της 1ης ιδιομορφικής μάζας προς τη συνολική μάζα.

C_2 = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μορφή των βρόχων υστέρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς. Η τιμή του προκύπτει από τους αντίστοιχους πίνακες. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή $C_2=1.0$

C_3 = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την αύξηση των μετακινήσεων λόγω επιρροής $P-\Delta$, που ορίζεται ως εξής:

$$C_3 = 1.0 \quad \text{για θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου ($K_2 > 0$)}$$

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha| \cdot (R-1)^{3/2}}{I_e} \quad \text{για αρνητική κλίση του μετελαστικού κλάδου ($K_2 < 0$)}$$

Όπου $\alpha = K_s/K_e$

Τιμές του διορθωτικού συντελεστή C_0

Αριθμός ορόφων	Διατμητικά κτήρια		Λοιπά κτήρια
	Τριγωνική κατανομή φορτίων	Ομοιόμορφη κατανομή φορτίων	Οποιαδήποτε κατανομή φορτίων
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

* Για τον υπολογισμό ενδιάμεσων τιμών επιτρέπεται γραμμική παρεμβολή

** Διατμητικά χαρακτηρίζονται τα κτήρια, στα οποία, για όλους τους ορόφους, η μετακίνηση μεταξύ των ορόφων μειώνεται με την αύξηση του ύψους. Χαρακτηρίζει κυρίως κτήρια με μικρό αριθμό τοιχωμάτων.

Τιμές του διορθωτικού συντελεστή C_m

Αριθμός ορόφων	Πλαισιακά κτήρια από Ω.Σ.	Τοιχωματικά κτήρια από Ω.Σ.	Κτήρια από Ω.Σ. τύπου ανεστρ. εκκρεμούς	Πλαίσια παραλαβής ροπών από χάλυβα	Πλαίσια από χάλυβα με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα	Πλαίσια από χάλυβα με έκκεντρους συνδέσμους	Άλλος τύπος
1 - 2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3+	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

(*) $C_m = 1.0$ για $T_e > 1.0$ sec.

Τιμές του διορθωτικού συντελεστή C_2

Στάθμη επιτελεσματικότητας	$T_e \leq 0.1 \text{ sec}$		$T_e \geq T_s$	
	Τύπος κτηρίου 1	Τύπος κτηρίου 2	Τύπος κτηρίου 1	Τύπος κτηρίου 2
Άμεση χρήση	1.0	1.0	1.0	1.0
Προστασία ζωής	1.3	1.0	1.1	1.0
Οιονεί κατάρρευση	1.5	1.0	1.2	1.0

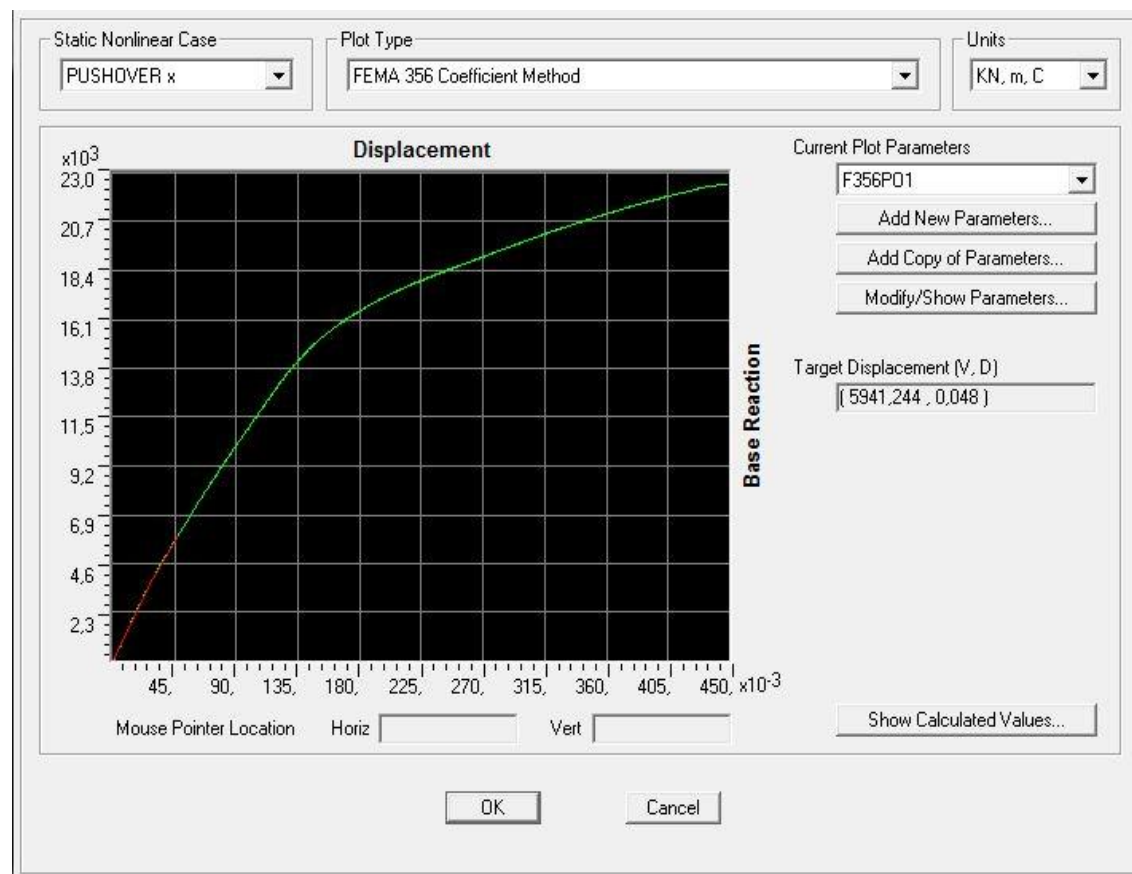
Επεξήγηση

Τύπος 1: Κατασκευές στις οποίες περισσότερο από το 30% της τέμνουσας σε κάθε όροφο αναλαμβάνεται από οποιονδήποτε συνδυασμό των εξής στοιχείων: Τυπικά πλαίσια παραλαβής ροπών, πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους, πλαίσια με ημιάκαμπτες συνδέσεις, πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους που παραλαμβάνουν μόνο εφελκυστικές δυνάμεις, άοπλη τοιχοποιία.

Τύπος 2: Κατασκευές που δεν ανήκουν στην κατηγορία 1

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

Περίπτωση 1^η: Σεισμός κατά x με fiber hinges

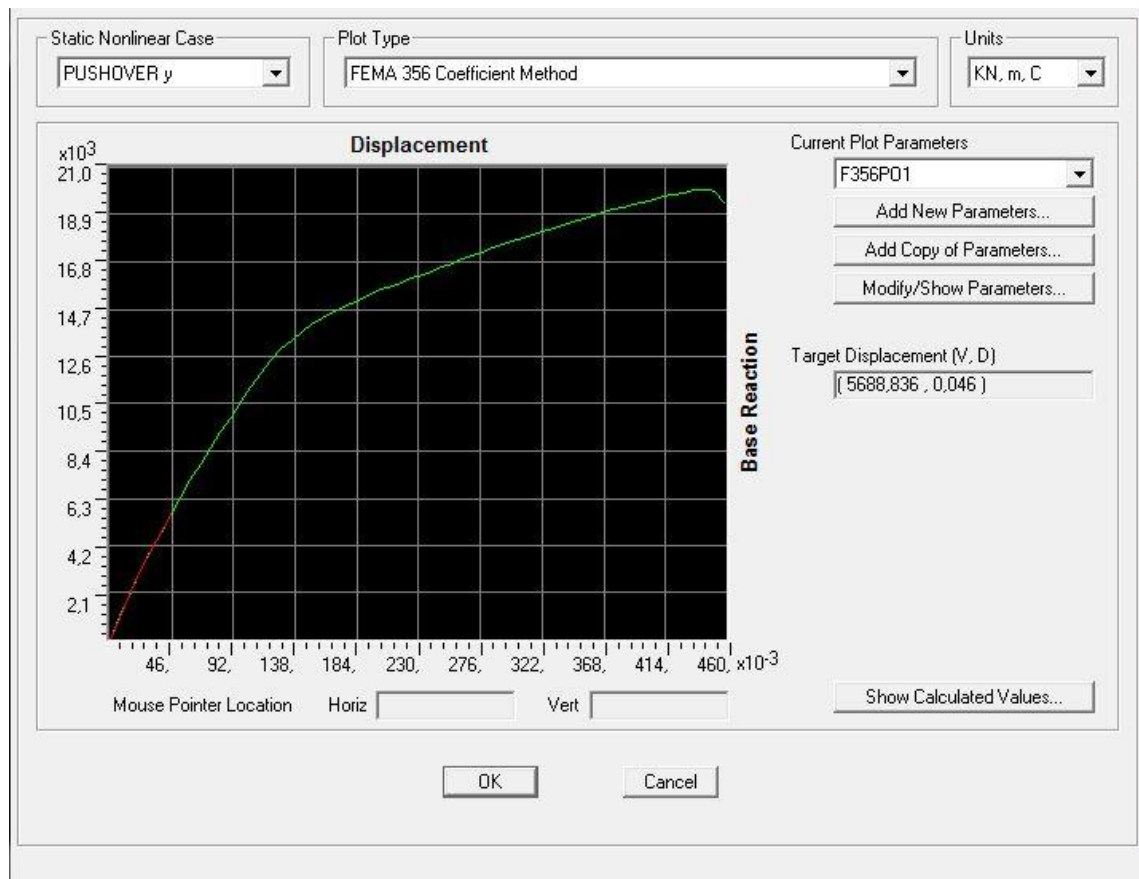


Σχ. 6.2: Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης σε pushover κατά x

C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,4565	1	1	1	0,0612	2,6092	2,6262

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
136579,9	138267	0,7929	2,2815	3504,16	113423,71	1

Περίπτωση 2^η: Σεισμός κατά γ με fiber hinges

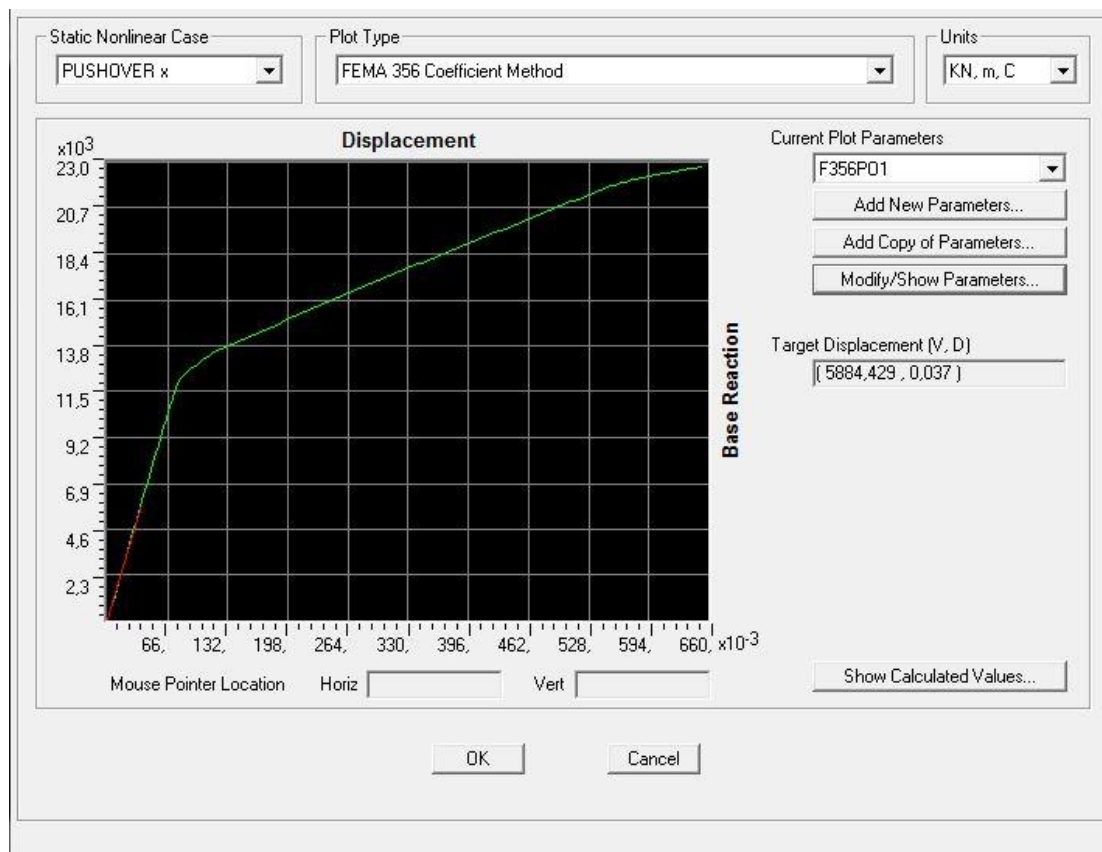


Σχ. 6.3: Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης σε pushover κατά γ

C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,4353	1	1	1	0,0598	2,6643	2,6643

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
141236,4	141236,4	0,7647	2,6215	2979,52	113423,71	1

Περίπτωση 3^η: Σεισμός κατά x με flexural hinges

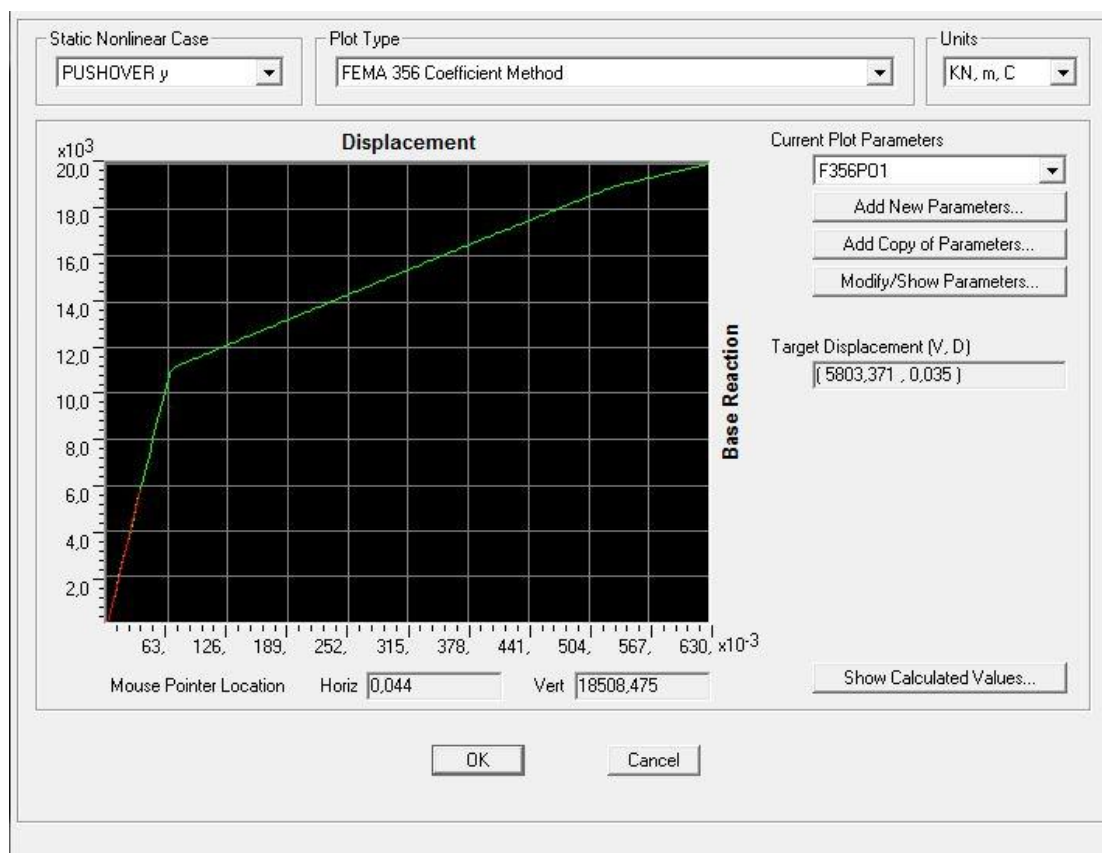


Σχ. 6.4: Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης σε pushover κατά x

C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,3521	1	1	1	0,06	2,6586	2,6586

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
157659,9	157659,9	1,0016	10,7675	631,62	113423,71	1

Περίπτωση 4^η: Σεισμός κατά γ με flexural hinges



Σχ. 6.5: Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης σε pushover κατά γ

C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,325	1	1	1	0,0596	2,6742	2,6742

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
167665	167665	1	14,43	503	113423,71	1

6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Για την 1^η περίπτωση προκύπτει $D=0,048\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ (στοχευόμενη μετακίνηση) και η μετακίνηση διαρροής από την καμπύλη ικανότητας της ίδιας περίπτωσης είναι $\delta_{\gamma}=0,138\text{m}$ (σχ. 4.1).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,048/0,138 = 0,35 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1 (επιπέδων επιτελεστικότητας).
- Για τη 2^η περίπτωση προκύπτει $D=0,046\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_{\gamma}=0,132\text{m}$ (σχ. 4.6).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,046/0,132 = 0,35 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.
- Για τη 3^η περίπτωση προκύπτει $D=0,037\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_{\gamma}=0,078\text{m}$ (σχ. 4.12).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,037/0,078 = 0,47 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.
- Για τη 4^η περίπτωση προκύπτει $D=0,035\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_{\gamma}=0,065\text{m}$ (σχ. 4.18).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_{\gamma} = 0,034/0,065 = 0,52 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.

7. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ P-Δ

7.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Η κίνηση της μάζας της κατασκευής σε μια παραμορφωμένη θέση, υποβαλλόμενη σε πλευρικές μετατοπίσεις, παράγει ροπές ανατροπής δευτέρας τάξης, που συνήθως δε συνυπολογίζονται στις στατικές και δυναμικές αναλύσεις. Αυτή η συμπεριφορά δευτέρας τάξης έχει ονομαστεί φαινόμενο P-Δ, αφού οι επιπρόσθετες ροπές ανατροπής στο κτήριο είναι ίσες με το γινόμενο του αθροίσματος των βαρών (P) επί τις πλευρικές μετακινήσεις (Δ). Αυτές οι ροπές ανατροπής προκαλούν και αυθαίρετες αλλαγές στην τέμνουσα βάσης της κατασκευής υποβαλλόμενη σε δυναμική φόρτιση, καθότι τότε προστίθενται και τότε αφαιρούνται από την τέμνουσα βάσης εναλλασσόμενου πρόσημου, που οφείλεται στη δυναμική φόρτιση.

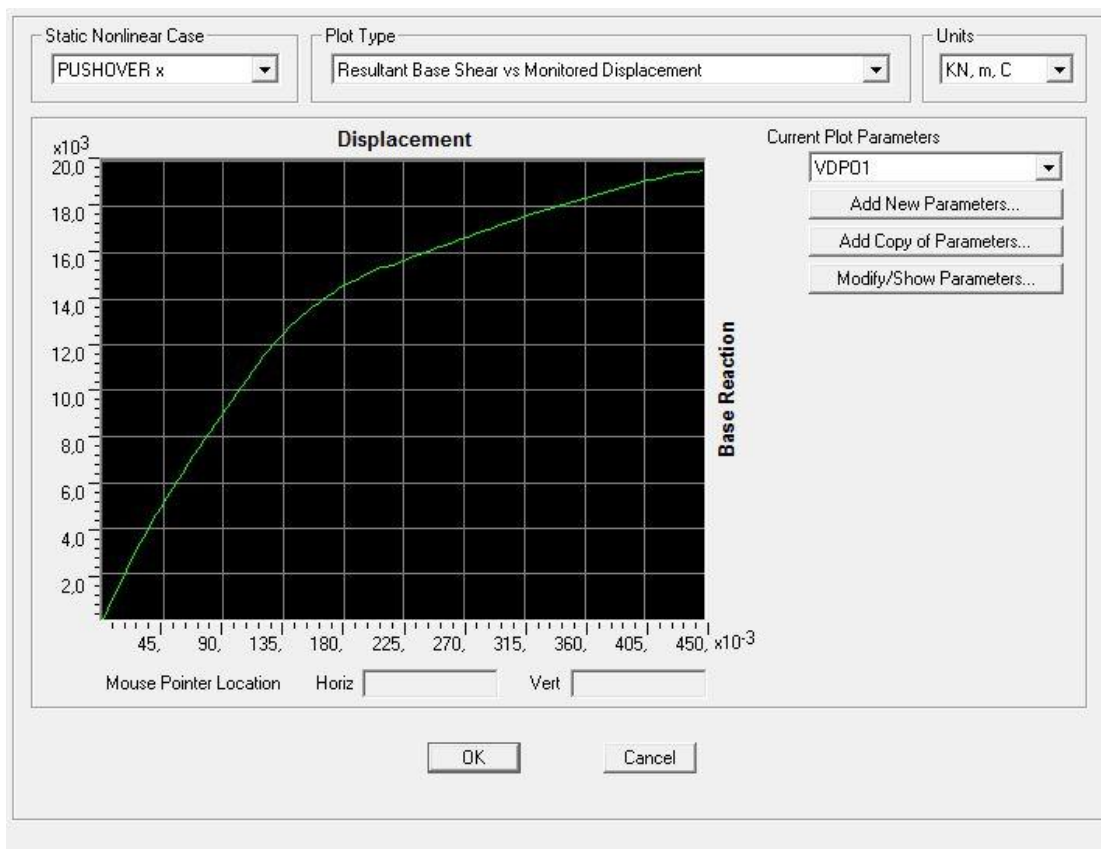
7.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΛΑΦΡΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΦΟΡΕΑ (P-Δ effect) στο SAP 2000.

Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή των φαινομένων P-Δ κατά την pushover ανάλυση στο SAP 2000 δεν θέτουμε τελική μετακίνηση τερματισμού (π.χ. 1,5μ.), όπως κάναμε προηγουμένως, αλλά αντ' αυτού λαμβάνουμε υπ' όψη μας τον ελαφρά παραμορφωμένο φορέα υπό το αρχικό φορτίο (μόνιμα + 0,3κινητά) κατά την έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας της pushover. Αυτό γίνεται θέτοντας απλά στο ίδιο μενού την πρόσθετη επιλογή P-Δ effect, ενώ ταυτόχρονα θέτουμε 0 την τελική μετακίνηση τερματισμού της διαδικασίας και στις δύο διευθύνσεις. Αυτό σημαίνει ότι ο φορέας θα φορτιστεί (για κάθε μια διεύθυνση), μέχρις ότου επέλθει αστάθεια λόγω φαινομένων δευτέρας τάξεως (π.χ. λυγισμού).

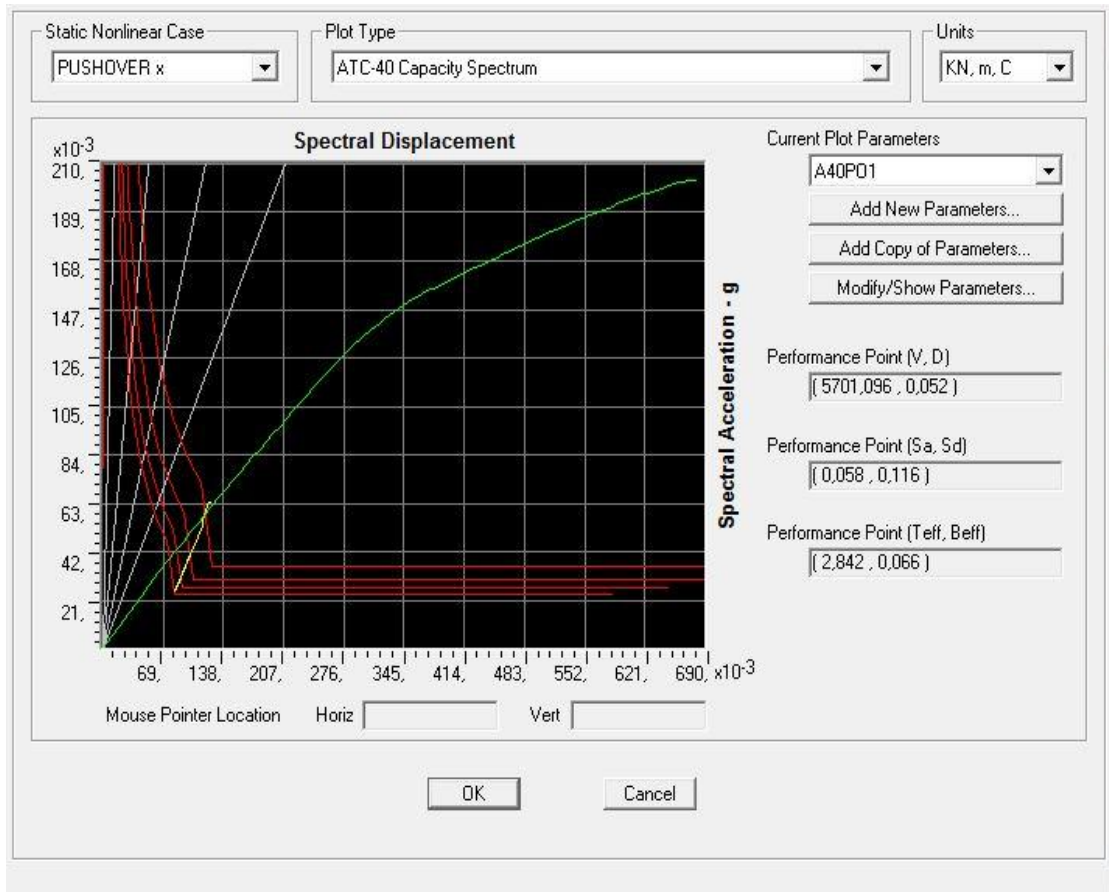
Στις επόμενες σελίδες φαίνονται οι σχετικές καμπύλες και προσδιορίζεται η συμπεριφορά του φορέα με βάσεις τις μεθόδους ATC-40 και των Συντελεστών.

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

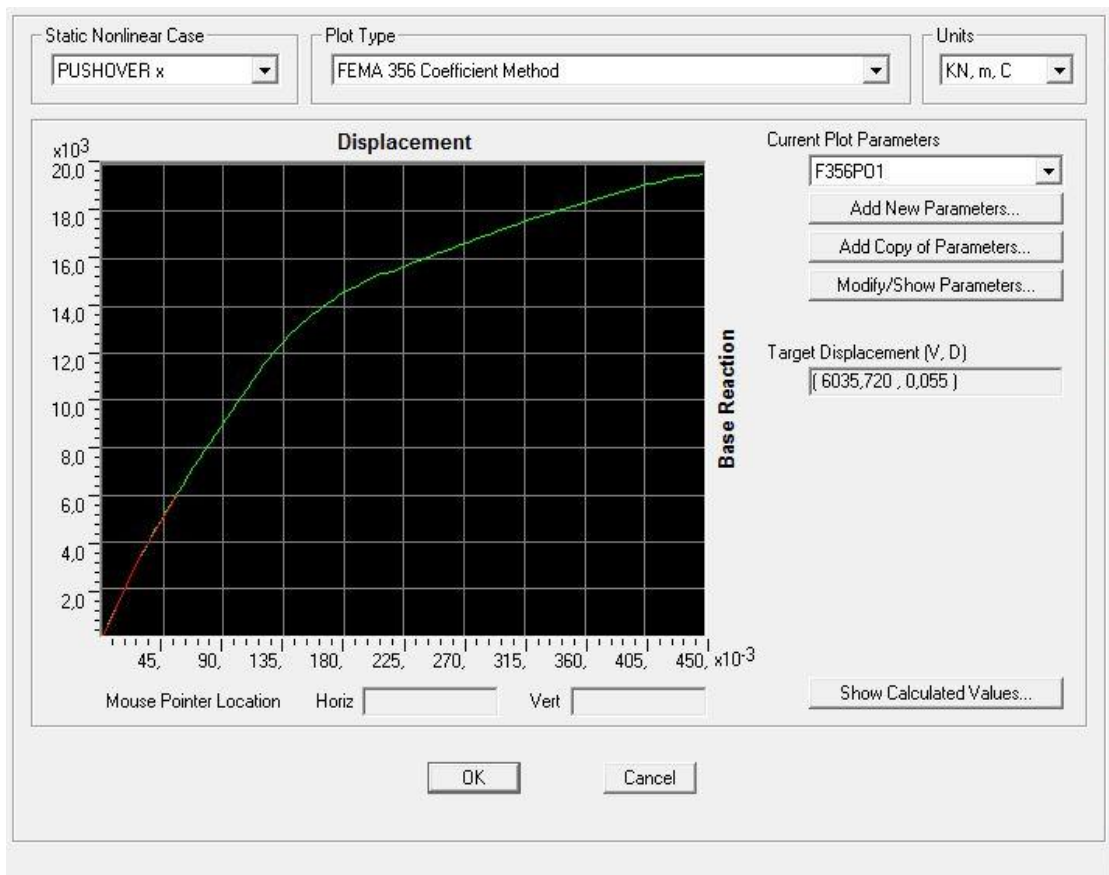
1^η Περίπτωση: pushover x με P-Δ effects και fiber hinges



Σχ. 7.1: Καμπύλη ικανότητας σε pushover κατά x



Σχ. 7.2: Μέθοδος ATC-40 σε pushover κατά x

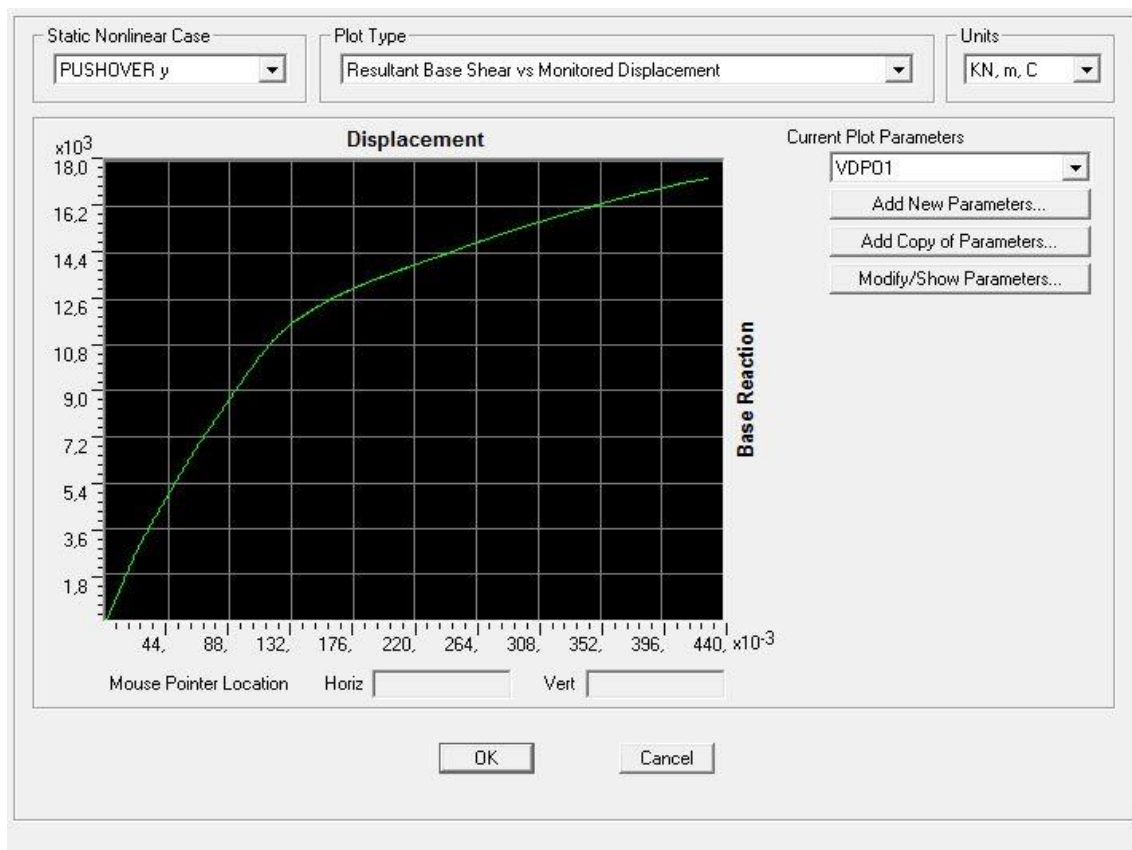


Σχ.7.3: Μέθοδος του Συντελεστή μετακίνησης σε pushover κατά x

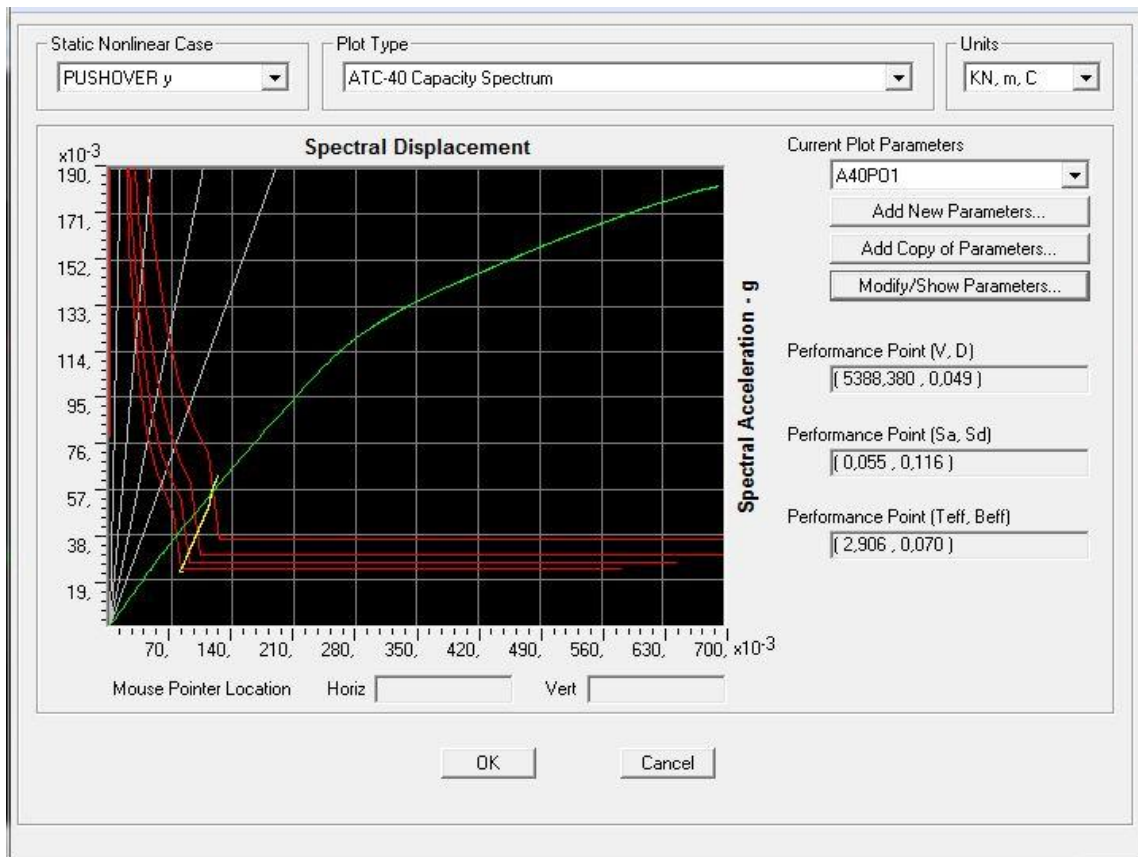
C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,449	1	1	1	0,0637	2,7815	2,7815

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
123624	123624	0,7738	2,1922	3296,07	113423,7	1

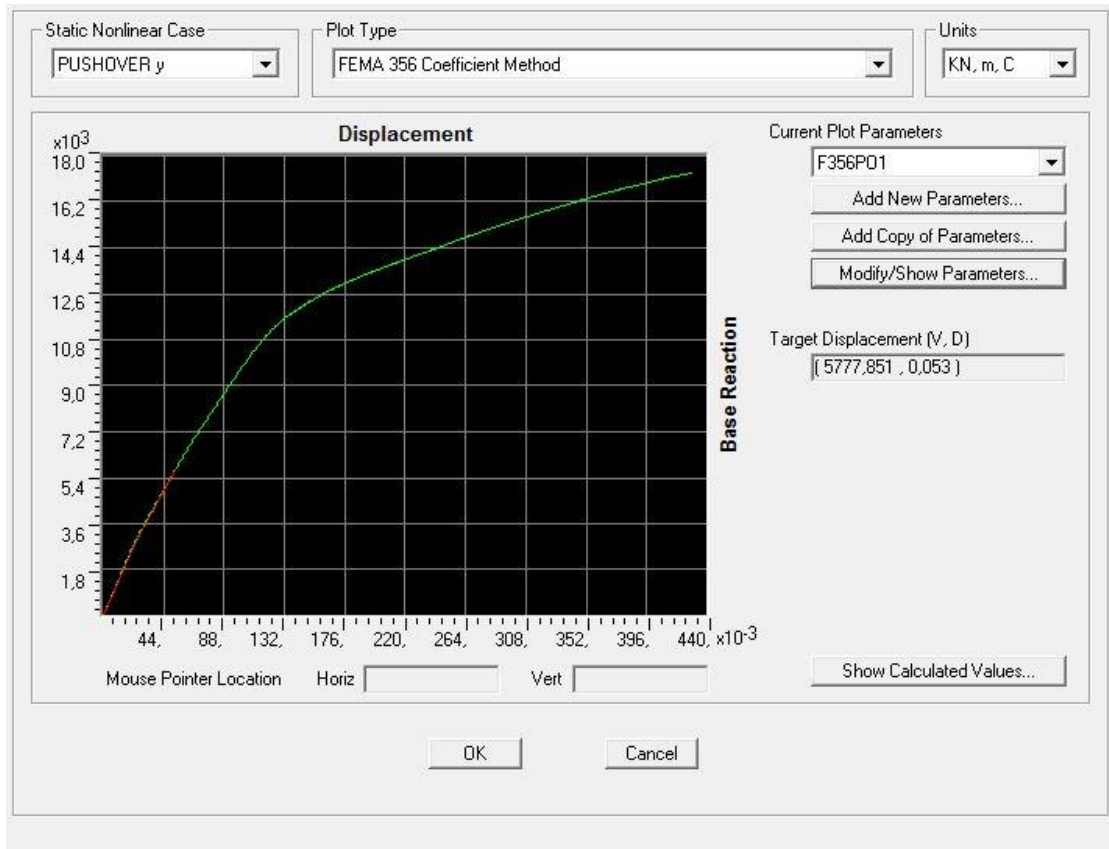
2^η Περίπτωση: pushover γ με P-Δ effects και fiber hinges



Σχ. 7.4: Καμπύλη ικανότητας σε pushover κατά γ



Σχ. 7.5: Μέθοδος ATC-40 σε pushover κατά γ



Σχ. 7.6: Μέθοδος των συντελεστών σε pushover κατά γ

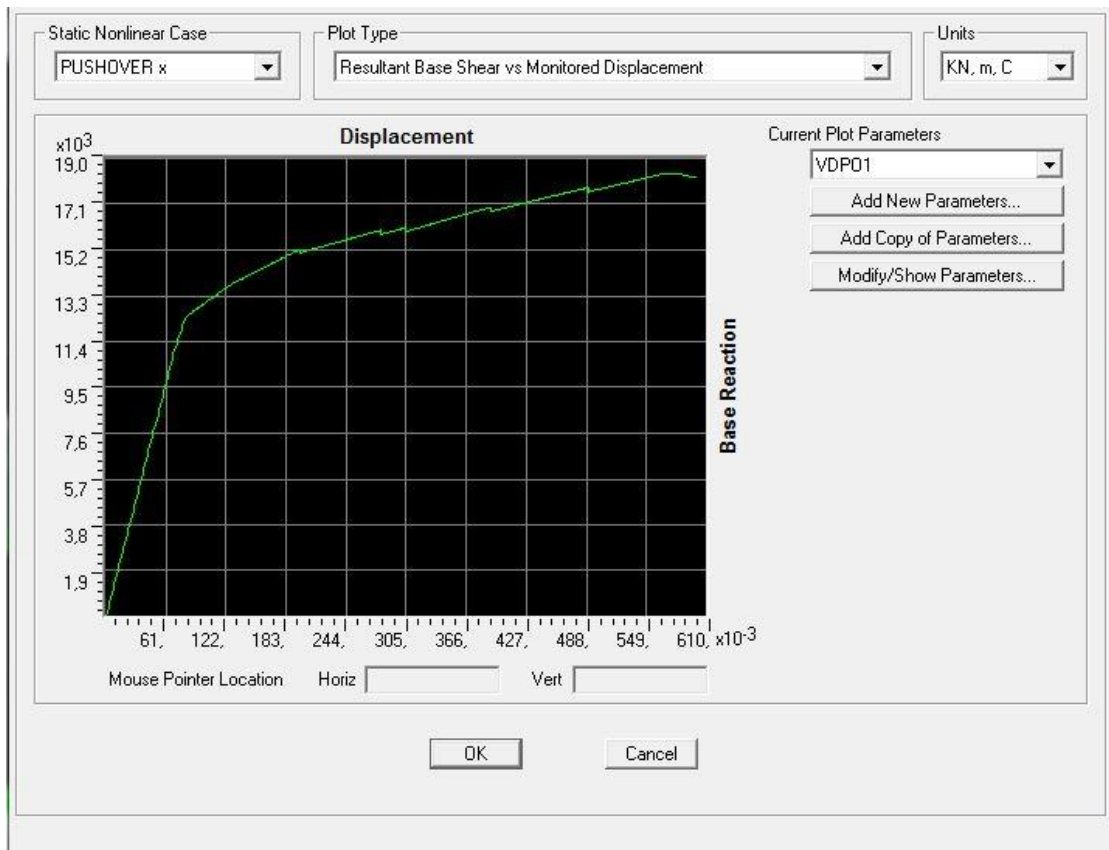
C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,427	1	1	1	0,0625	2,82	2,82

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
126432,8	126432,8	0,749	2,4029	2950,46	113423,7	1

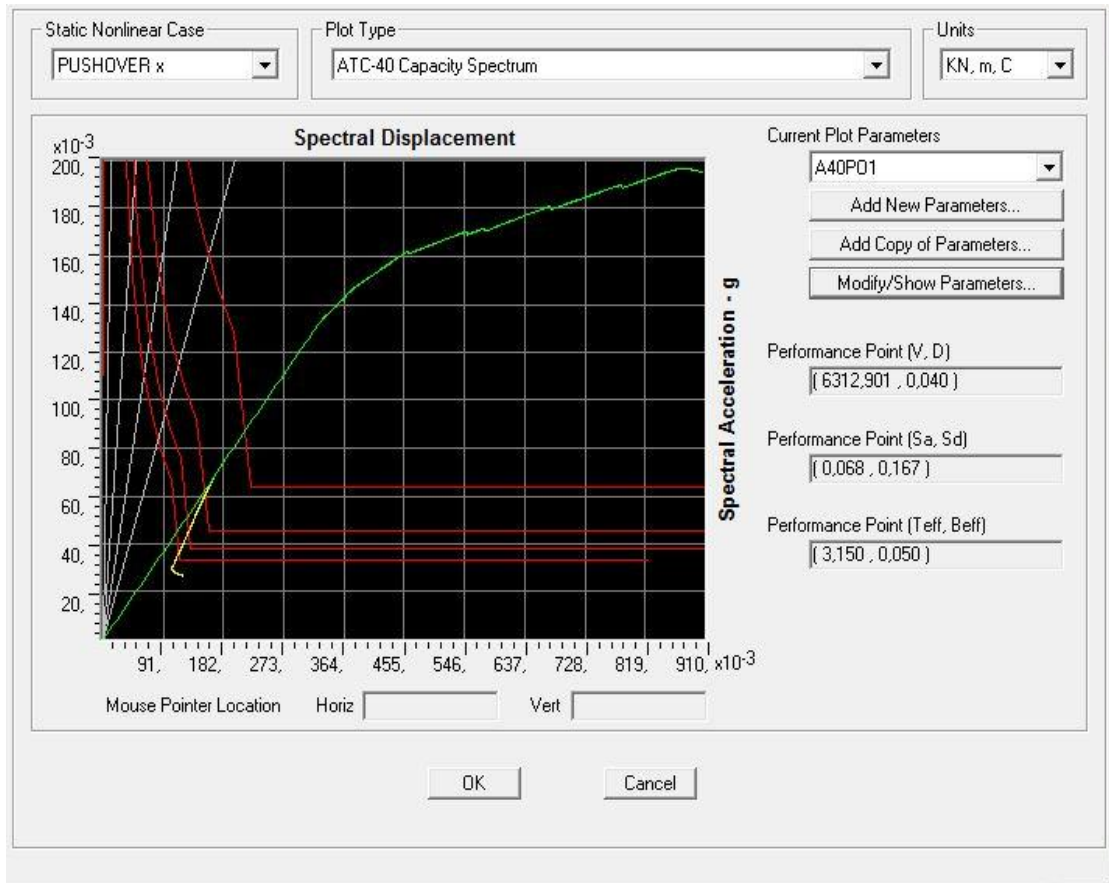
3^η Περίπτωση: Pushover x με P-Δ effects και flexural hinges



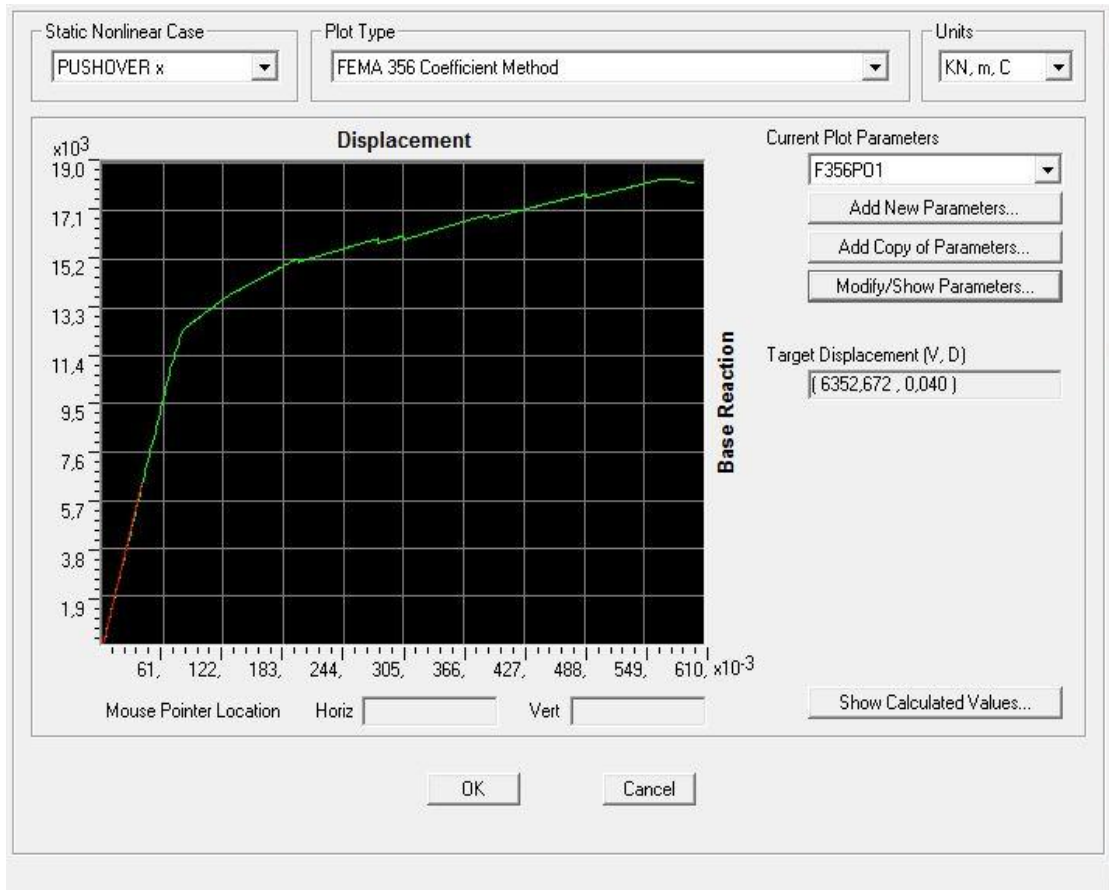
Σχ. 7.7: Παραμορφωμένος φορέας στο τέλος της pushover κατά x



Σχ. 7.8: Καμπύλη ικανότητας σε pushover κατά x



Σχ. 7.9: Μέθοδος ATC-40 σε pushover κατά x



Σχ 7.10: Μέθοδος Συντελεστών σε pushover κατά x

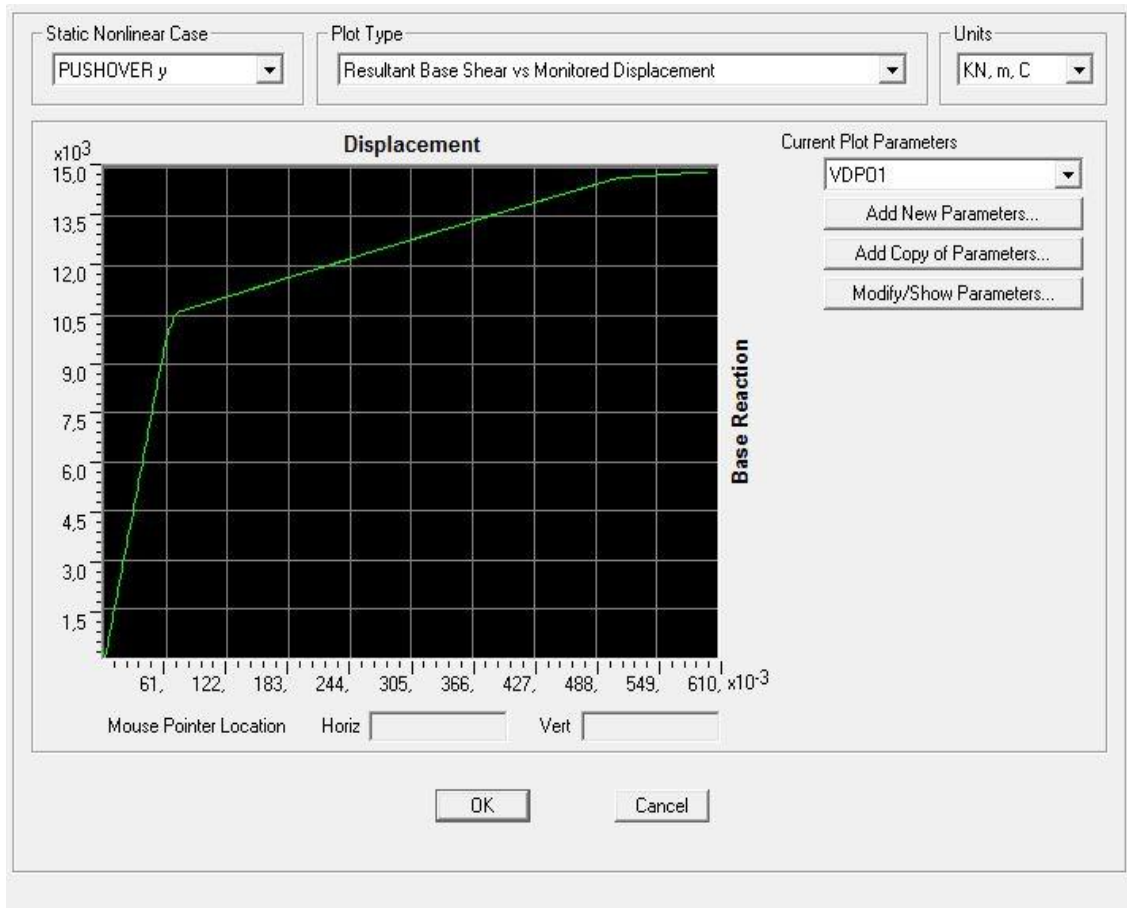
C0	C1	C2	C3	Sa	Te	Ti
0,2382	1	1	1	0,0676	3,1495	3,1495

Ki	Ke	Alpha	R	Vy	Weight	Cm
158218,4	158218,4	1,0051	47,3564	161,98	113423,7	1

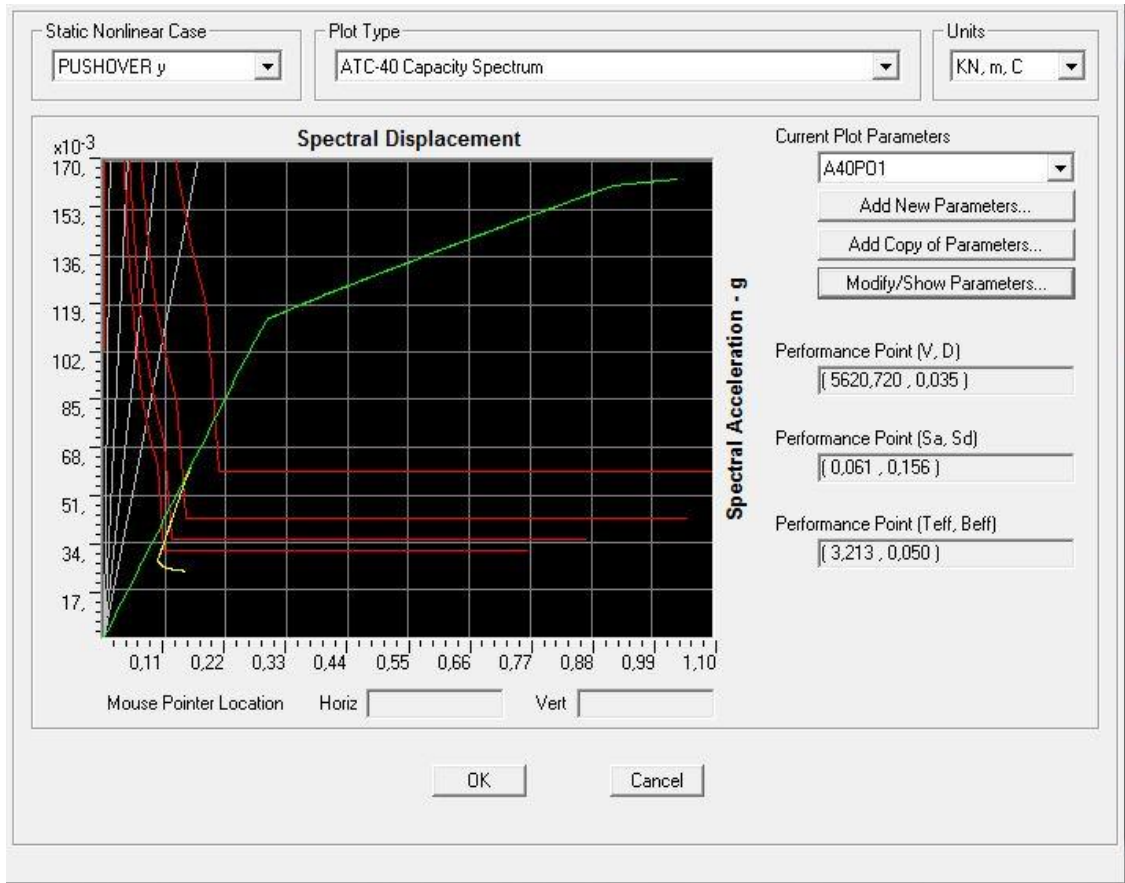
4^η Περίπτωση: Pushover γ με P-Δ effects και flexural hinges



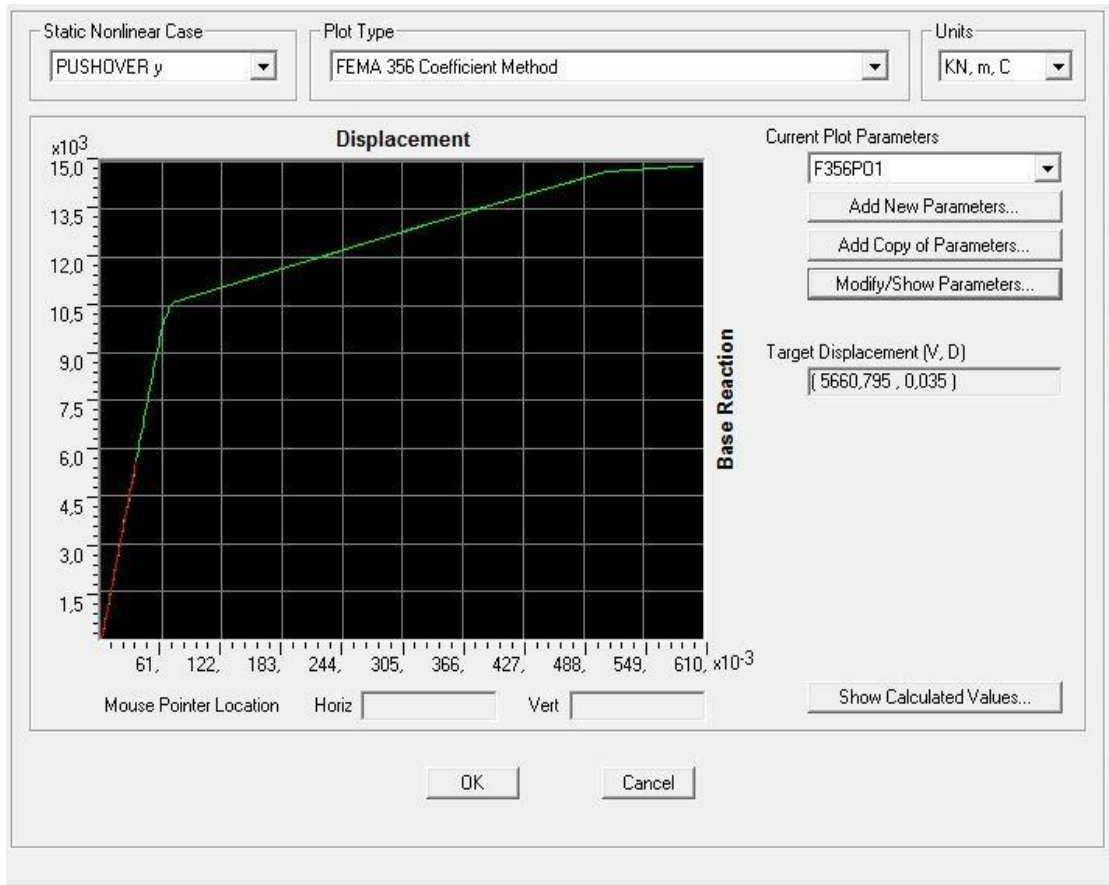
Σχ. 7.11: Παραμορφωμένος φορέας στο τέλος της pushover κατά γ



Σχ. 7.12: Καμπύλη ικανότητας σε pushover κατά γ



Σχ. 7.13: Μέθοδος ATC-40 για pushover κατά γ



Σχ. 7.14: Μέθοδος Συντελεστών για pushover κατά γ

C₀	C₁	C₂	C₃	S_a	T_e	T_i
0,2254	1	1	1	0,0606	3,2134	3,2134

K_i	K_e	Alpha	R	V_y	Weight	C_m
160351,5	160351,5	1	1,2869	5343,62	113423,7	1

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέθοδος ATC-40

- Για την 1^η περίπτωση προκύπτει $D=0,052m=\delta_{\text{τελ}}$ (μη φασματική μετακίνηση συμπεριφοράς) και η μετακίνηση διαρροής από την καμπύλη ικανότητας της ίδιας περίπτωσης είναι $\delta_y=0,120m$ (σχ. 7.1).

Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y=0,052/0,120=0,43<0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1 .

- Για τη 2^η περίπτωση προκύπτει $D=0,049m=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_y=0,117m$ (σχ. 7.4).

Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y=0,049/0,117=0,42<0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.

- Για την 3^η περίπτωση προκύπτει $D=0,040m=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής από την καμπύλη ικανότητας της ίδιας περίπτωσης είναι $\delta_y=0,078m$ (σχ. 7.8).

Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y=0,040/0,076=0,53<0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1 .

- Για τη 4^η περίπτωση προκύπτει $D=0,035m=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_y=0,063m$ (σχ. 7.12).

Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y=0,035/0,060=0,58<0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.

Μέθοδος Συντελεστών

- Για την 1^η περίπτωση προκύπτει $D=0,055m=\delta_{\text{τελ}}$ (μη φασματική μετακίνηση συμπεριφοράς) και η μετακίνηση διαρροής από την καμπύλη ικανότητας της ίδιας περίπτωσης είναι $\delta_y=0,120m$ (σχ. 7.1).

Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y=0,055/0,120=0,46<0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1 .

- Για τη 2^η περίπτωση προκύπτει $D=0,053m=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_y=0,117m$ (σχ. 7.4).

Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y=0,053/0,117=0,45<0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.

- Για την 3^η περίπτωση προκύπτει $D=0,040\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ (μη φασματική μετακίνηση συμπεριφοράς) και η μετακίνηση διαρροής από την καμπύλη ικανότητας της ίδιας περίπτωσης είναι $\delta_y=0,078\text{m}$ (σχ. 7.8).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y = 0,040/0,078 = 0,51 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1 .
- Για τη 4^η περίπτωση προκύπτει $D=0,035\text{m}=\delta_{\text{τελ}}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_y=0,027\text{m}$ (σχ. 7.12).
Άρα, ο συντελεστής πλαστιμότητας: $\mu = \delta_{\text{τελ}}/\delta_y = 0,035/0,063 = 0,56 < 0,7$ που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη βλαβών (μηδενικές βλάβες) του Πίνακα 1.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων συμπεραίνουμε τα εξής:

A) Ο φορέας συμπεριφέρεται ελαστικά για το σεισμό σχεδιασμού και στις δύο περιπτώσεις (δηλ. με και χωρίς P-Δ) και με τις δύο μεθόδους, γεγονός που ήταν αναμενόμενο σε κάποιο βαθμό, λόγω της μεγάλης ιδιοπεριόδου και των ιδιαίτερα ευμενών σεισμικών παραμέτρων.

B) Οι τελικές εκτιμώμενες μετακινήσεις με τη μέθοδο του φάσματος ικανότητας και της στοχευόμενης μετακίνησης είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη μεγάλη ιδιοπερίοδο του φορέα, αφού για ιδιοπεριόδους μεγαλύτερες του 1,0 sec οι δύο μέθοδοι δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα.

Γ) Παρά το γεγονός ότι το αριστερό και το μεσαίο βάθρο είναι ψηλότερα και ως εκ τούτου έχουν μικρότερη δυσκαμψία, η πλαστική άρθρωση που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση και φτάνει γρηγορότερα στην κατάρρευση είναι αυτή του δεξιού βάρου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι το κοντύτερο βάθρο έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία με αποτέλεσμα να αναλαμβάνει μεγαλύτερη σεισμική δύναμη.

Δ) Ο παραμορφωμένος φορέας αστοχεί για σε μικρότερο τελικό φορτίο σε σχέση με τον απαραμόρφωτο, όμως δεν παρατηρείται μεγάλη αλλαγή στις μετατοπίσεις. Επίσης, η στοχευόμενη μετακίνηση και η μετακίνηση συμπεριφοράς στον παραμορφωμένο φορέα είναι μεγαλύτερες από τον απαραμόρφωτο και η διαρροή εμφανίζεται σε μικρότερη μετατόπιση, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερο συντελεστή πλαστιμότητας. Ωστόσο, όπως γίνεται εμφανές και από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, η επιρροή των P-Δ effects είναι αρκετά μικρή και αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό ύψος των βάρων.

E) Η χρήση των fiber hinges έναντι των flexural μας δίνει μια πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα, καθώς η πλαστικοποίηση γίνεται σταδιακά για κάθε "ίνα" του υλικού, όταν αυτή φτάσει στην πλαστική αντοχή της. Από την σύγκριση των διαγραμμάτων για τους δύο τύπους πλαστικών αρθρώσεων βλέπουμε, ότι η τιμή του μέγιστου φορτίου είναι πολύ κοντά και για τις δυο προσομοιώσεις, ωστόσο διαφορές παρατηρούνται ως προς τη μετατόπιση, αλλά αυτές αποδίδονται στο γεγονός ότι με τη χρήση των fiber hinges έχουμε διγραμμικό διάγραμμα ροπής-στροφής χωρίς τον κατελθόντα κλάδο, που έχουμε στην περίπτωση των flexural hinges.

Z) Τα αποτελέσματα για τις αναλύσεις κατά x και y είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, εφόσον έχουμε βάρη κυκλικής συμμετρίας, τα οποία αποδίδουν την ίδια δυσκαμψία και κατά τις δυο διευθύνσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

FEMA (1997) NEHRP *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-273, Washington D.C. , Oct. 1997

Mander , J.B. , and Basoz , N. (1999) *Seismic Fragility Curve Theory for Highway bridges*

Chopra Anil, K. (1995) , *Δυναμική των Κατασκευών*

Leonhardt Fritz (1979), *Ολόσωμες Κατασκευές – Ολόσωμες Γέφυρες*

Παπαδρακάκης Μ. (1996), *Μαθήματα Στατικής V*

Ψυχάρης Ι. *Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας (Σημειώσεις Μαθήματος “Αντισεισμική Τεχνολογία 2”)*

Μπότσης Ι. *Αποτίμηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς της Σιδηροδρομικής Γέφυρας Αχλαδόκαμπου*

ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ ΤΕΕ (4/2000) *Οδηγίες για την αντισεισμική μελέτη γεφυρών (Ε.39/99)*

ΣΙΔΕΝΟΡ (2006) ΕΑΚ2000-2003

