

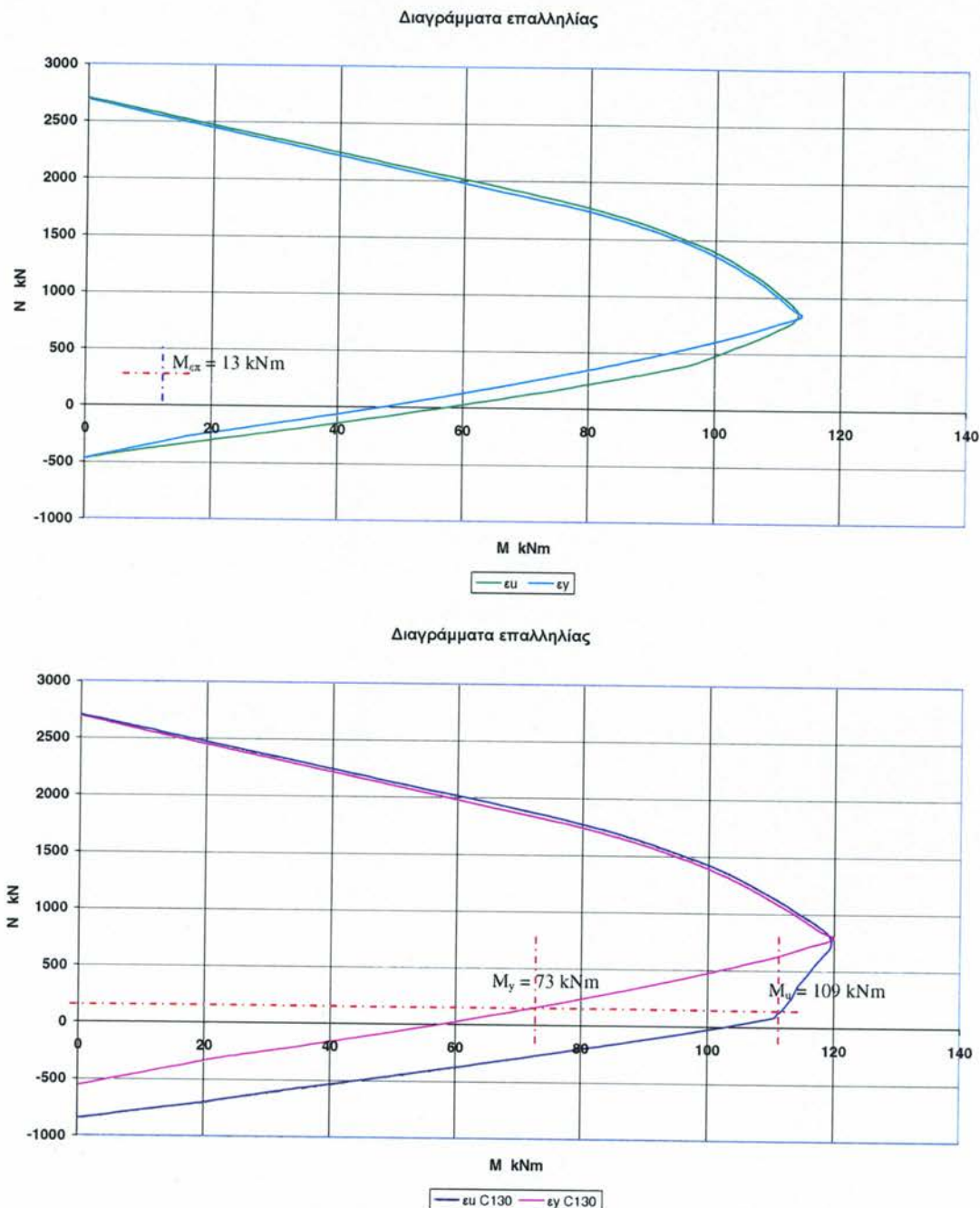
6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

6.1 Αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς των διατομών

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των διατομών των υποστυλωμάτων που ελέγχονται στην παρούσα εργασία υπολογίσθηκαν με το λογισμικό ανελαστικής ανάλυσης διατομών από οπλισμένο σκυρόδεμα, χάλυβα ή πολυμερή XTRACT (Chadwell, 2000). Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης διατομών πολλαπλών υλικών διαφόρων καταστατικών εξισώσεων, τυχαίου σχήματος. Η ανάλυση των διατομών βασίζεται στην παραδοχή ότι διατομές πριν την κάμψη παραμένουν επίπεδες και μετά την κάμψη (παραδοχή Bernoulli). Ως εκ τούτου, οι ανηγμένες παραμορφώσεις κατανέμονται γραμμικά στη διατομή συναρτήσει της καμπυλότητας και της κεντροβαρικής παραμόρφωσης. Οι αντίστοιχες τάσεις, βάσει προδιαγεγραμμένων καταστατικών νόμων για την κάθε ένα υπολογίζονται συναρτήσει της ιστορίας φόρτισης και ολοκληρώνονται για την αποτίμηση των εντατικών μεγεθών αντίστασης της διατομής σε αξονική και κάμψη. Το λογισμικό υπολογίζει γενικευμένη αξονική – διαξονική καταπόνηση των διατομών, σε συνδυασμούς, με χρήση διαδοχικών επιλύσεων ισορροπίας εξωτερικού και εσωτερικού αξονικού.

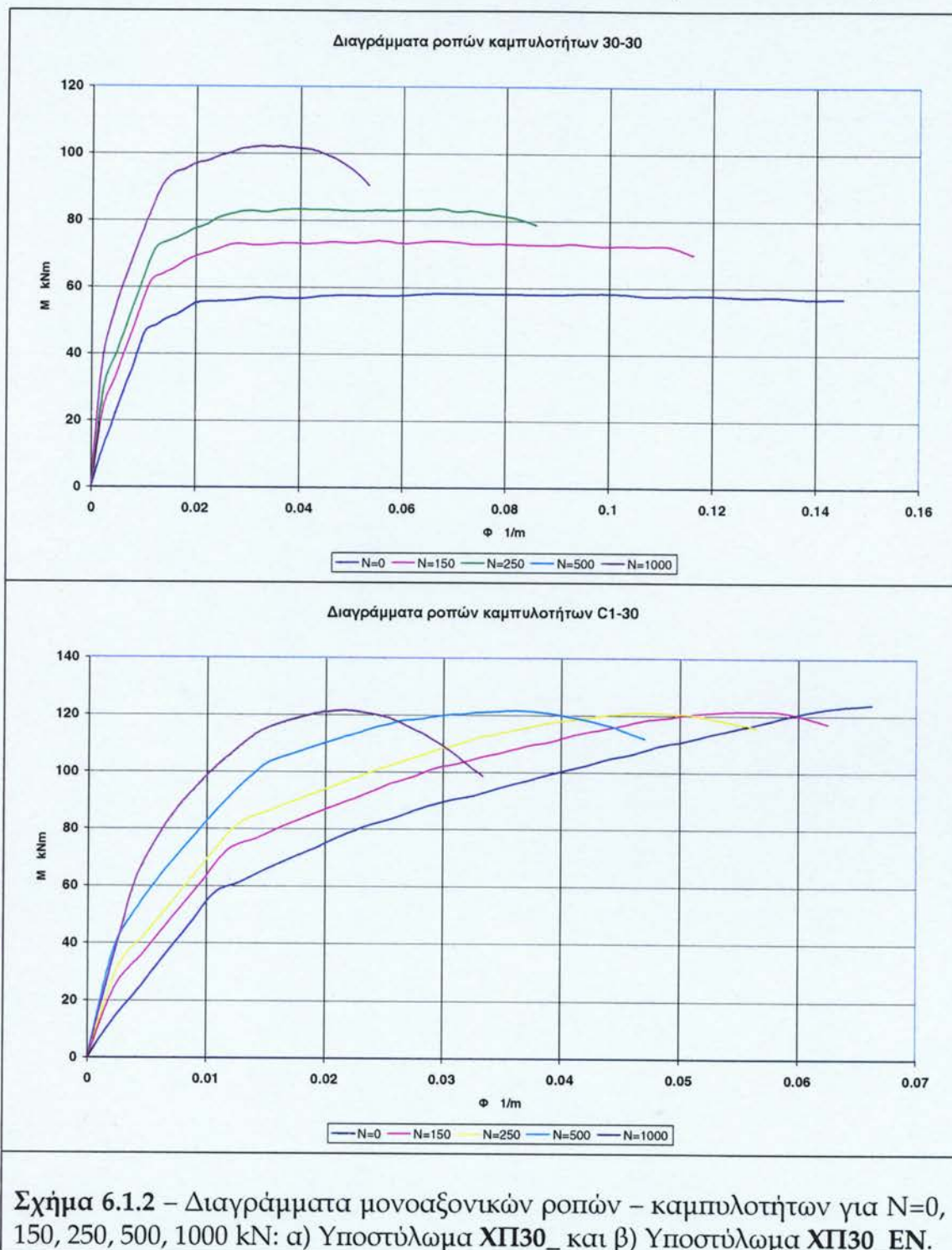
Για όλες τις αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές που εκτιμήθηκαν πειραματικά όπως δίδονται στο Κεφάλαιο 3 της παρούσης. Οι δυνατότητες προσομοίωσης των υλικών που διατίθενται από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι α) η διγραμμική, με δευτεροβάθμια κράτυνση, συμμετρική σχέση τάσεων παραμορφώσεων για το χάλυβα και β) μια δευτεροβάθμια θλιπτική (φθίνουσα) με γραμμικό εφελκυσμό σχέση τάσεων παραμορφώσεων για το οπλισμένο σκυρόδεμα, με καθορισμό της περίσφιγξης βάσει του προσομοιώματος Mander, Priestley and Park (1983). Και στις δύο περιπτώσεις οι καταστατικοί νόμοι ακολουθούν μονοτονική μόνον συμπεριφορά, χωρίς δυνατότητα υστερετικής αποφόρτισης. Για την ανάλυση

γενικευμένων διατομών βάσει του προσομοιώματος ινών με δυνατότητα υστερετικής συμπεριφοράς, έχουν προταθεί αντίστοιχα λογισμικά (Zeris and Mahin, 1988) με δυνατότητα ανάλυσης διατομών σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με χαρακτηριστικά αποφόρτισης και φθίνοντα κλάδου.



Σχήμα 6.1.1 – Διάγραμμα επαλληλίας μονοαξονικής ροπής – αξονικής δύναμης και επιτρεπόμενη ροπή σχεδιασμού : α) Υποστυλώμα ΧΠ30_ και β) Υποστυλώμα ΧΠ30_EN.

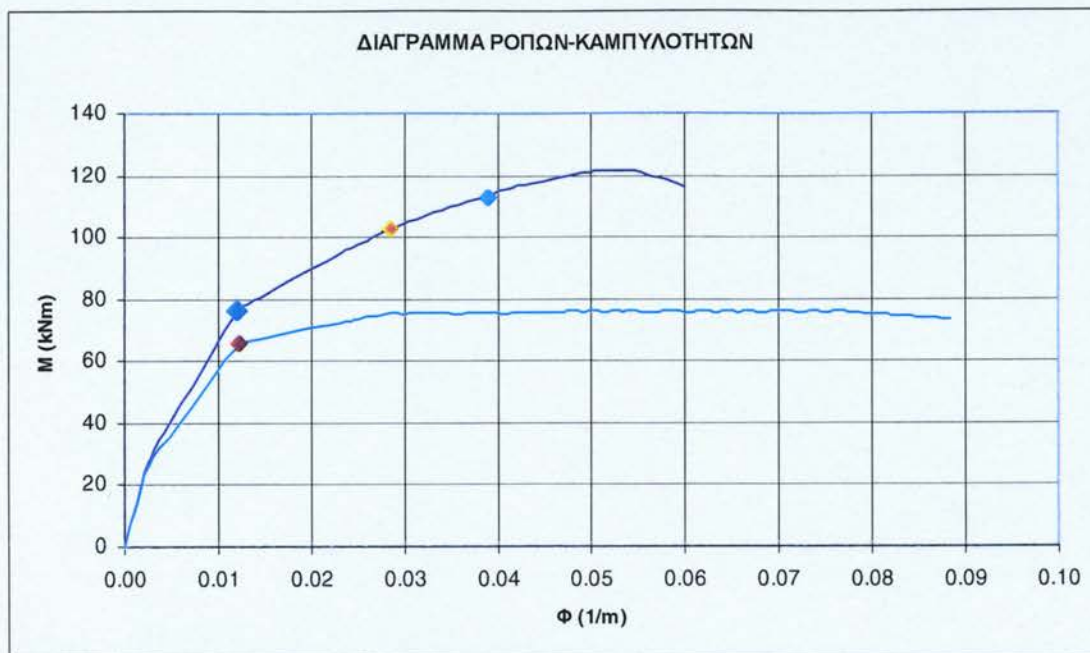
Με βάση τα παραπάνω, υπολογίζονται και συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της τυπικής διατομής του υφιστάμενου υποστυλώματος ΧΠ30_ και του τυπικού ενισχυμένου, ΧΠ30_EN, που είναι παρόμοια αλλά έχει ενισχυθεί με μία στρώση διάμετρικες ΙΝΟΠ ινών άνθρακα σε κάθε παρειά.



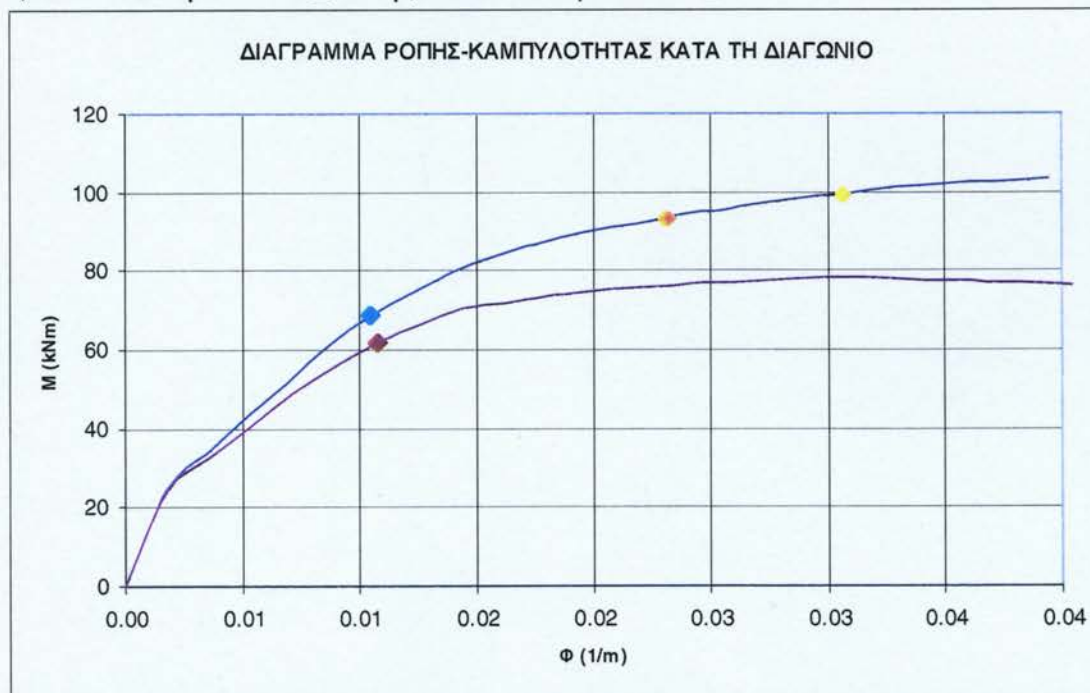
Η συγκριτική ανάλυση – πρόβλεψη των πειραματικών δεδομένων περιλαμβάνει:

1) διαγράμματα επαλληλίας σε μονοαξονική κάμψη για τις δύο χαρακτηριστικές διατομές που ελέγχθηκαν (Σχήμα 6.1.1).

2) τα διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων σε μονοαξονική κάμψη και σε



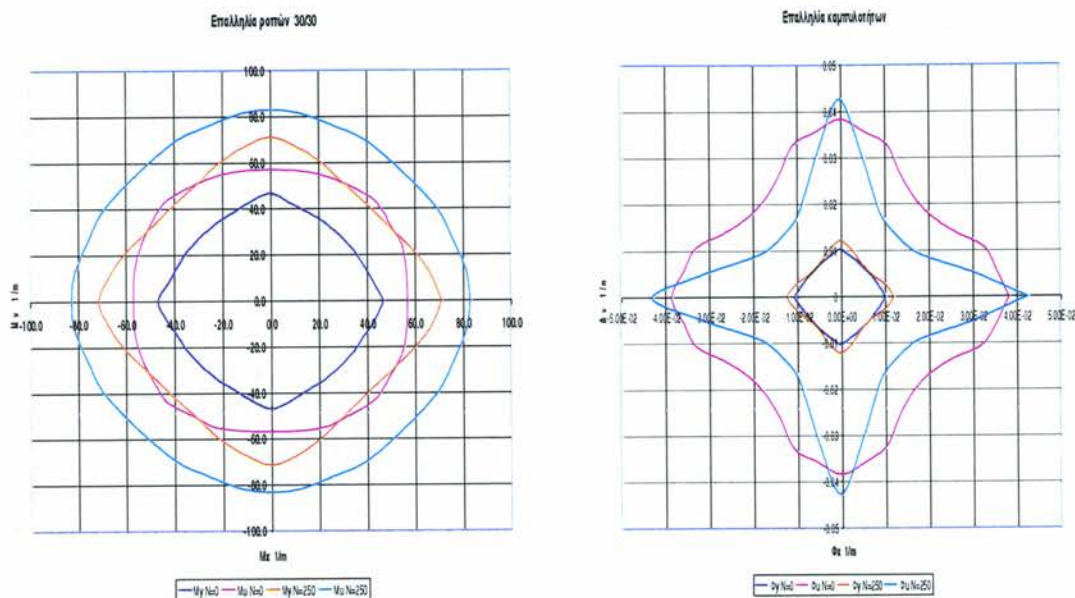
Σχήμα 6.1.3 Μονοαξονικό διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων για $N=190$ kN: α) Υποστύλωμα ΧΠ30_ και β) Υποστύλωμα ΧΠ30_EN.



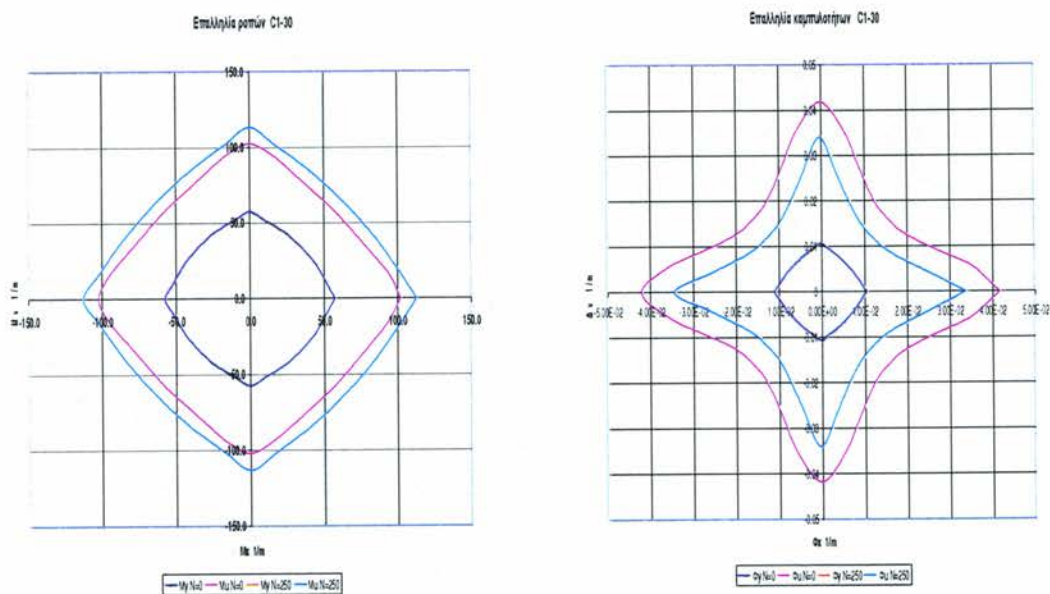
Σχήμα 6.1.4 Διαγράμματα ροπών – καμπυλοτήτων σε 45° για $N=190$ kN: α) Υποστύλωμα ΧΠ30_ και β) Υποστύλωμα ΧΠ30_EN.

προβολή κατά τον κύριο άξονα σε διαξονική κάμψη κατά τη διεύθυνση της διαγωνίου (Σχήματα 6.1.3 και 6.1.4), για τα ΧΠ30_ και ΧΠ30_EN,

3) τα διαγράμματα επαλληλίας κατά τις δύο κύριες συμμετρικές διευθύνσεις καθώς και τις ενδιάμεσες μεταξύ τους, για δύο επίπεδα αξονικής δύναμης (0 και 250 kN) που περικλείουν το αξονικό του πειράματος, σε διαξονική κάμψη, με κριτήρια την πρώτη διαρροή του χάλυβα και την αστοχία (Σχήμα 6.1.5).



Σχήμα 6.1.5 – Υποστυλώμα ΧΠ30_: Διαγράμματα επαλληλίας για αξονικές $N=0$ και $N=250$ kN: α) Ροπές και β) Καμπυλότητες σε πρώτη διαρροή και οριακή αστοχία.



Σχήμα 6.1.6 – Υποστυλώμα ΧΠ30_EN: Διαγράμματα επαλληλίας για αξονικές $N=0$ και $N=250$ kN: α) Ροπές και β) Καμπυλότητες σε πρώτη διαρροή και οριακή αστοχία.

4) Ομοίως, τα διαγράμματα διαξονικής επαλληλίας για τις καμπυλότητες φ_x και φ_y σε πρώτη διαρροή και στην αστοχία της κάθε μίας διατομής (Σχήμα 6.1.6). Η αναλογία των καμπυλοτήτων σε διαρροή και οριακή αντοχή, υπό σταθερό αξονικό N , αποδίδει και την παρεχόμενη πλαστιμότητα μ_φ της διατομής, για δεδομένη γωνία προσιπτώσεως.

6.2 Συγκριτικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών των διατομών

Από τη σύγκριση των μονοαξονικών διαγραμμάτων επαλληλίας του Σχήματος 6.1.1(α) και (β) φαίνεται ότι η μονοαξονική ροπή πρώτης διαρροής (M_y) σε αξονικό $N=190$ kN είναι 66 kNm πριν και 73,5 kNm μετά την ενίσχυση, ενώ η μέγιστη καμπτική αντοχή (M_u) του υφιστάμενου υποστυλώματος είναι 73,2 kNm πριν και 109,4 kNm μετά την ενίσχυση ($\varepsilon_f = 8\%$). Όπως δείχνεται στο Σχ.6.1.1, η ροπή σχεδιασμού του εν λόγω υποστυλώματος στο δεδομένο αξονικό των 180 kN, υπό φορτία λειτουργίας και σεισμικό συντελεστή 4% ήταν 13.0 kNm, χωρίς επαύξηση 1,20, λόγω του συνδυασμού που περιλαμβάνει το σεισμό (Ζέρης, 2001). Παρέχεται άρα λόγω της απαίτησης ελάχιστου οπλισμού στα γωνιακά και της αυξημένης αντοχής του χάλυβα, όπως μετρήθηκε πειραματικά, μία αύξηση του συντελεστή ασφαλείας από το επίπεδο σχεδιασμού (ανηγγμένο σε οριακή αντοχή με το συντελεστή 1,70) στην πραγματική αντοχή διαρροής του ΧΠ30_ της τάξης του 3,6. Επί πλέον, η εφαρμογή μίας στρώσης ΙΝΟΠ παρέχει μια αύξηση της «πραγματικής μέσης» μέγιστης καμπτικής αντοχής σε μονοαξονική κάμψη ίση με 1.50, καθώς και μια αύξηση της υπεραντοχής από τη διαρροή στην αστοχία 149% (ΧΠ30_EN), συγκρινόμενη με την αντίστοιχη αύξηση 111% για το μη ενισχυμένο ΧΠ30_EN, όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων των Σχημάτων 6.1.3 και 6.1.4.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων σε αξονικά φορτία μεγαλύτερα του φορτίου ισορροπίας καθίσταται προφανές ότι λόγω της έλλειψης συμμετοχής σε θλίψη του ΙΝΟΠ, η αύξηση της αντοχής της ΧΠ30_EN μειώνεται δραστικά σε επίπεδα αξονικού πέραν του φορτίου ισορροπίας. Η έλλειψη αυτή σημαντικής συνεισφοράς έχει σημασία κατά την ενίσχυση υφισταμένων

υποστυλωμάτων με ΙΝΟΠ, για τα οποία, λόγω οικονομικότητας και έλλειψης σχετικών απαγορευτικών διατάξεων κατά το σχεδιασμό τους, λειτουργούν εν γένει και πέραν του φορτίου ισορροπίας (κυρίως τα εσωτερικά υποστυλώματα).

Αναφορικά με τα προβλεπόμενα διαγράμματα μονοαξονικής και διαξονικής (διαγώνια) ροπής-καμπυλότητας κάθετα στον εκάστοτε διαγώνιο άξονα κάμψης, του Σχ. 6.1.3 και 6.1.4, φαίνεται ότι η εφαρμογή των ΙΝΟΠ αυξάνει και τη, επιβατική (*secant*) καμπτική δυσκαμψία στο Στάδιο ΙΙ σε σχέση με το ΧΠ30_, ενώ παρέχει μια ομοιόμορφη μέγιστη διαξονική καμπτική αντοχή περίπου 120 kNm σε όλα τα αξονικά φορτία που υπολογίσθηκαν (έως την ισορροπία): η οριοθέτηση αυτής της συμπεριφοράς μέχρι τα μέγιστα επίπεδα συμμετοχής του ΙΝΟΠ (ανηγμένη παραμόρφωση 6‰ και 8‰) δείχνει τα πραγματικά αναμενόμενα επίπεδα καμπτικής (υπερ)αντοχής που παρέχει η διατομή ΧΠ30_EN, τα οποία, εν τούτοις, απέχουν σημαντικά από τα πειραματικά αποτελέσματα που μετρήθηκαν στα δοκίμια ΧΠ302EN (140 kNm) και ΧΠ303EN (116 kNm) διορθωμένα για τα φαινόμενα 2ας τάξης. Τα παραπάνω μεγέθη, όπως αναλύεται και στα σχετικά Κεφάλαια, πλησιάζουν αντίστοιχες τιμές καμπτικής αντοχής έχοντας λάβει υπόψη στη κρίσιμη διατομή την αυξημένη συνεισφορά του ΕΜΑCΟ, με ελάχιστη θλιπτική αντοχή 40 ΜΡα, οπότε η συνεισφορά του ΙΝΟΠ πλησιάζει τις τιμές 14 και 8‰, για το ΧΠ302EN και ΧΠ303EN αντίστοιχα.

Η επιρροή της διαξονικότητας στην απόκριση και τους δείκτες αστοχίας φαίνεται στα διαξονικά διαγράμματα επαλληλίας αντοχών και καμπυλοτήτων διαρροής και αστοχίας, υπολογισμένα σε δύο επίπεδα αξονικού φορτίου που περικλείουν το αξονικό φορτίο N του πειράματος (190 kN) στα Σχήματα 6.1.4 και 6.1.5, για τις διατομές ΧΠ30_ και ΧΠ30_EN, αντίστοιχα.

Ποιοτικά, τα διαγράμματα επαλληλίας της αντοχής ακολουθούν και στις δύο περιπτώσεις κυρτές διπλά συμμετρικές καμπύλες, που για μεν την υφιστάμενη διατομή έχουν σχήμα ρόμβου στην πρώτη διαρροή (M_y), ενώ

Πίνακας 6.1 Θεωρητική πρόβλεψη μηχανικών χαρακτηριστικών των κρίσιμων διατομών των πειραμάτων υποστυλωμάτων ($N = 190 \text{ kN}$)

	$\Theta=0^\circ$	$\Theta=45^\circ$
ΧΠ301-4		
$\varphi_y, 1/\text{m}$	$11,7 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
$\varphi_u, 1/\text{m}$	$88,4 \cdot 10^{-3}$	$42,5 \cdot 10^{-3}$
μ_φ	7,6	4,9
M_y, kNm	66,0	52,6
M_u, kNm	73,2	72,7
Ω	1,11	1,38
ΧΠ302_3ΕΝ		
$\varphi_y, 1/\text{m}$	$12,0 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$
$\varphi_u, 1/\text{m}$	$55,9 \cdot 10^{-3}$	$38,0 \cdot 10^{-3}$
$\varphi_{u0,6}, 1/\text{m}$	$29,8 \cdot 10^{-3}$	$23,2 \cdot 10^{-3}$
$\varphi_{u0,8}, 1/\text{m}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$	$31,6 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{\varphi u0,8}$	3,3	3,6
M_y, kNm	73,5	61,2
$M_{u0,6}, \text{kNm}$	100,6	88,9
$M_{u0,8}, \text{kNm}$	109,4	95,0
M_u, kNm	109,4	95,0
Ω	1,49	1,55
ΧΠ304_5ΕΠ		
$\varphi_y, 1/\text{m}$	$10,4 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$
$\varphi_u, 1/\text{m}$	$565,0 \cdot 10^{-3}$	$190,0 \cdot 10^{-3}$
μ_φ	54,3	22,6
M_y, kNm	63,0	57,2
M_u, kNm	89,7	93,4
Ω	1,42	1,63
ΧΠ305		
$\varphi_y, 1/\text{m}$	$12,4 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$

$\varphi_u, 1/m$	$70,8 \cdot 10^{-3}$	$39,7 \cdot 10^{-3}$
μ_φ	5,7	4,7
M_y, kNm	61,8	47,3
M_u, kNm	66,1	67,8
Ω	1,07	1,43
ΥΠ301_2ΑΠ		
$\varphi_y, 1/m$	$11,9 \cdot 10^{-3}$	$10,3 \cdot 10^{-3}$
$\varphi_u, 1/m$	$98,6 \cdot 10^{-3}$	$43,8 \cdot 10^{-3}$
μ_φ	8,3	5,1
M_y, kNm	58,5	58,0
M_u, kNm	74,3	74,9
Ω	1,27	1,44

μετεξελίσσονται σε κυκλικό σχήμα στην οριακή αντοχή (M_u), κυρίως στο μεγαλύτερο αξονικό ($N = 190 \text{ kN}$). Τα διαγράμματα αντοχής της ενισχυμένης διατομής **ΧΡ30_EN** έχουν σε κάθε περίπτωση – διαρροή και μέγιστη κάμψη – καθαρά ρομβική μορφή.

Τα διαγράμματα επαλληλίας καμπυλοτήτων, σε αντίθεση με τις αντοχές, ακολουθούν και στις δύο περιπτώσεις, για μεν την καμπυλότητα πρώτης διαρροής (φ_y) ένα κυρτό ρομβικό σχήμα, για δε την μέγιστη καμπυλότητα αστοχίας (φ_u) κοίλες διπλά συμμετρικές καμπύλες, με διαφορετική κοιλότητα συναρτήσει της αξονικής N για την υφιστάμενη και την ενισχυμένη διατομή: στην περίπτωση της **ΧΠ30_EN**, η επαλληλία εμφανίζει μια παράλληλη μετάθεση προς το κέντρο για αύξηση της αξονικής, ενώ για την **ΧΠ30_**, επί πλέον, αλλάζει και το σχήμα της επαλληλίας με αύξηση της κοιλότητας, γεγονός που σημαίνει μείωση της παρεχόμενης πλαστιμότητας (σε διανυσματικά μεγέθη κατά τη διαγώνιο) για αύξηση της αξονικής (βλ. και Σχήμα 6.1.4, Πίνακα 6.1).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διατομών όσον αφορά τις προβλεπόμενες αντοχές σε διαρροή και αστοχία (M_y και M_u), καμπυλότητες

διαρροής και αστοχίας σκυροδέματος και ΙΝΟΠ (φ_y , φ_u και οι αντίστοιχα μεγέθη σε παραμόρφωση του διαμήκους ΙΝΟΠ ίση με 0,6% και 0,8%, $\varphi_{u0,8}$ $\varphi_{u0,6}$), οι πλαστιμότητες καμπυλοτήτων ($\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$), οι λόγοι υπεραντοχής ($\Omega = M_u / M_y$) και ο λόγος της επιβατικής ακαμψίας $EI_s / 1/2 EI_g$ (όπου η επιβατική ακαμψία υπολογίζεται στο 60% της μέγιστης αντοχής, $EI_s = 0,6 M_u / \Phi_{0,6 M_u}$) συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1 για όλες τις χαρακτηριστικές διατομές των πειραμάτων σε υποστυλώματα.

6.3 Αριθμητική πρόβλεψη της συνολικής συμπεριφοράς των δοκιμίων

6.3.1 Προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς

Πέραν της αριθμητικής πρόβλεψης της συμπεριφοράς των διατομών, γίνεται και μια αριθμητική εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς των υποστυλωμάτων πριν και μετά την ενίσχυση, με χρήση προσομοιομάτων πεπερασμένων στοιχείων και στατικών ανελαστικών μεθόδων υπολογισμού, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό Η/Υ ευρείας χρήσεως για τον σκοπό αυτό.

Για τις αναλύσεις που εκπονήθηκαν χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα DRAIN-2DX (Allahabadi και G.Powell, 1988), το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο του Berkeley για την στατική και δυναμική επίλυση επιπέδων δομικών συστημάτων στην ανελαστική περιοχή. Το λογισμικό διατίθεται σε μορφή ελεύθερου πηγαίου κώδικα στο δικτυακό χώρο του National Information Service of Earthquake Engineering (NISEE) – www.nisee.org.

Για την προσομοίωση των δοκιμίων (τόσο το ελεγχόμενο όσο και το μη ελεγχόμενο τμήμα) χρησιμοποιούνται οι εξής δύο τύποι πεπερασμένων στοιχείων:

- Στοιχείο τύπου 01 (ελκυστήρας - θλιπτήρας), με γραμμική συμπεριφορά, για την εφαρμογή ελέγχου μετατοπίσεων (Σχ. 6.3.1) και
- Στοιχείο τύπου 15 (ανελαστικό στοιχείο ραβδόμορφων στοιχείων δοκών / υποστυλωμάτων με κατανεμημένη βλάβη κατά μήκος του στοιχείου και διακριτή προσομοίωση των διατομών με ίνες) (Σχ. 6.3.2).

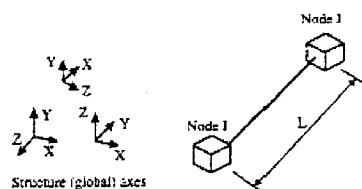
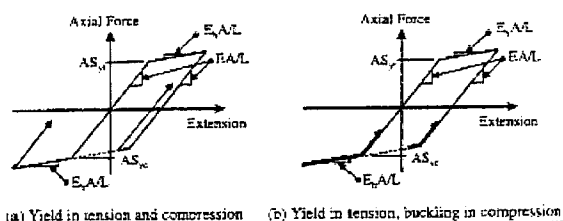
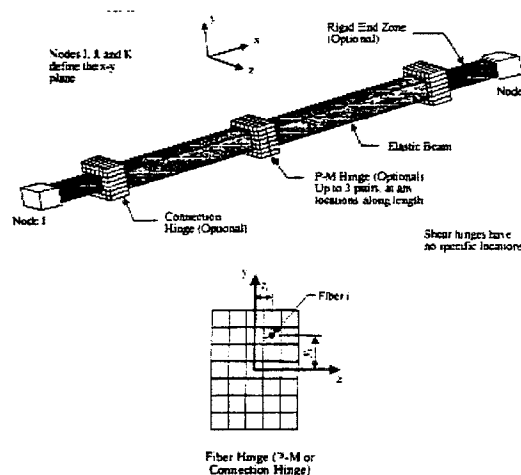


FIGURE 6.3.1 ELEMENT GEOMETRY



(a) Yield in tension and compression (b) Yield in tension, buckling in compression



Fiber Hinge (P-M or Connection Hinge)

Σχήμα 6.3.1 Το στοιχείο τύπου 01.

Σχήμα 6.3.2 Το στοιχείο τύπου 15.

Το στοιχείο τύπου 15 (Σχ. 6.3.2) είναι ραβδόμορφο στοιχείο με δυνατότητα διακριτοποίησης του σε εσωτερικές διατομές ελέγχου, όπου κάθε μία εκ των διατομών καθορίζεται από ίνες υλικού δεδομένων ανελαστικών καταστατικών νόμων τάσεων – παραμορφώσεων. Τα χαρακτηριστικά των διατομών ελέγχου καθορίζονται από τη σχέση τάσεων παραμορφώσεων των υλικών (χάλυβας, σκυρόδεμα περισφιγμένο και απερίσφιγκτο και FRP), όπως περιγράφηκαν ήδη στην επίλυση των διατομών, με διακριτοποίηση ινών.

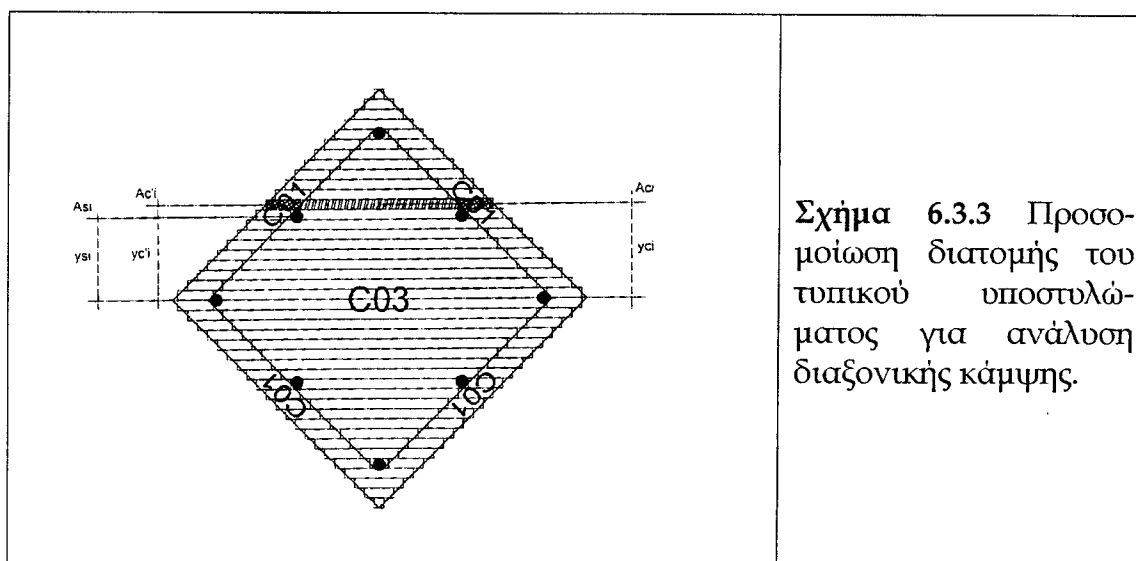
Το στοιχείο προσομοιώνει την εσωτερική κατανεμημένη βλάβη στο υποστύλωμα (αρχικά ρηγμάτωση στις κρίσιμες περιοχές, ακολουθούμενη από διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και τέλος θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος), με κατανεμημένο τρόπο, ελέγχοντας το εσωτερικό του πεπερασμένου στοιχείου σε σειρά διατομών τοποθετημένων τουλάχιστον στα δύο άκρα και επιπροσθέτως εντός του στοιχείου. Με τον καθορισμό των κατανεμημένων ελεγχόμενων διατομών και την παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής των μηχανικών χαρακτηριστικών (αξονική και καμπτική δυσκαμψία) μεταξύ των διατομών ελέγχου, είναι δυνατή η ολοκλήρωση των παραμορφώσεων και εφαπτομενικών ατενείων ως προς το μήκος και έτσι η εκτίμηση της συνολικής ατένειας του στοιχείου σε γενικευμένη καμπτική και αξονική καταπόνηση. Η τιμή της δυσκαμψίας μεταξύ των διατομών ελέγχου λαμβάνεται ίση με την μέση τιμή της αξονικής και καμπτικής δυσκαμψίας των εκατέρωθεν διατομών ελέγχου.

Η κάθε διατομή ελέγχου προσομοιώνεται με βάση την υπόθεση επιπεδότητας διατομών σε ίνες με καθορισμένη καταστατική συμπεριφορά αξονικής τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης, όπως καθορίζεται από τον χρήστη. Με αυτό τον τρόπο, είναι εφικτή η προσομοίωση της καταστατικής συμπεριφοράς διαφορετικών υλικών όπως για παράδειγμα, το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα του φλοιού, το περισφιγμένο σκυρόδεμα, ο χάλυβας και το ανθρακόνημα.

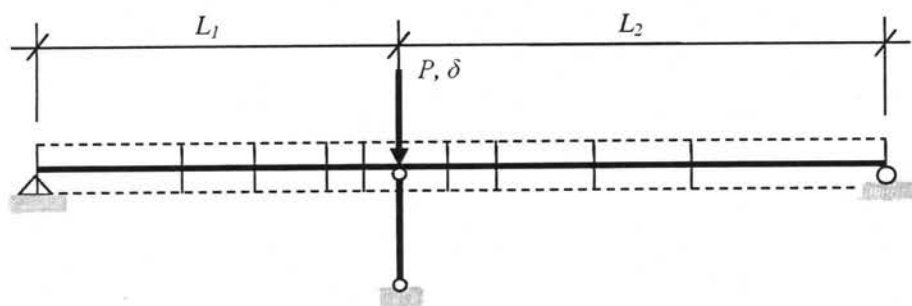
Οι καταστατικοί νόμοι που διατίθενται στο στοιχείο τύπου 15 είναι δύο τύπων :

- α) Για μεν τον χάλυβα, συμμετρικός νόμος σε θλίψη και εφελκυσμό, με διγραμμικά χαρακτηριστικά (ελαστική συμπεριφορά και κράτυνση) με κινηματικά χαρακτηριστικά.
- β) Για το σκυρόδεμα, μη συμμετρικός νόμος με πολυγραμμικά θλιπτικά χαρακτηριστικά σταδιακά μειούμενης δυσκαμψίας, με φθίνοντα κλάδο, και μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Τα χαρακτηριστικά σε θλίψη του περισφιγμένου σκυροδέματος που υιοθετήθηκαν βασίστηκαν στο προσομοίωμα των Mander , Priestley and Park (1983).

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, λόγω του περιορισμού του λογισμικού να επιλύει μόνο φορείς σε επίπεδη καταπόνηση, η κάθε διατομή ορίζεται σε σχήμα ρόμβου ως προς τον άξονα συμμετρίας του υποστυλώματος, όπως δείχνεται στο Σχήμα 6.3.3, σε τυπική διακριτοποίηση ινών.



Για την προσομοίωση των καταστατικών νόμων των επί μέρους υλικών χρησιμοποιήθηκαν τα πραγματικά χαρακτηριστικά τάσεων παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στο Εργαστήριο, καθώς και (μετά το πέρας των πειραμάτων) οι μετρηθείσες ιστορίες επιβαλλόμενης παραμόρφωσης στα δοκίμια, για σύγκριση αναλυτικής και πειραματικής συμπεριφοράς. Το δοκίμιο χωρίζεται σε δύο στοιχεία εκατέρωθεν του σημείου επιβολής φορτίου (Σχ. 6.3.4):



Σχήμα 6.3.4 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων του δοκίμιου υποστυλώματος.

- το ελεγχόμενο τμήμα, το οποίο υποδιαιρείται σε τεμάχια στο 10%, 10%, 20%, 20% και 40% του μήκους του, με πύκνωση στην εκάστοτε κρίσιμη ζώνη. Η κάθε διατομή του ορίζεται με απερίσφικτο και περισφικμένο ($\Phi 6/40$) σκυρόδεμα ξεχωριστά και οκτώ ράβδους διαμέτρου $\Phi 14$.
- το μη ελεγχόμενο τμήμα, με ισοκατανεμημένα τμήματα ελέγχου, ανά 20% του μήκους. Η χαρακτηριστική διατομή του κάθε τμήματος ελέγχου ορίζεται από απερίσφικτο και περισφικμένο ($\Phi 10/10$) σκυρόδεμα και δεκαέξι ράβδους διαμέτρου $\Phi 14$.

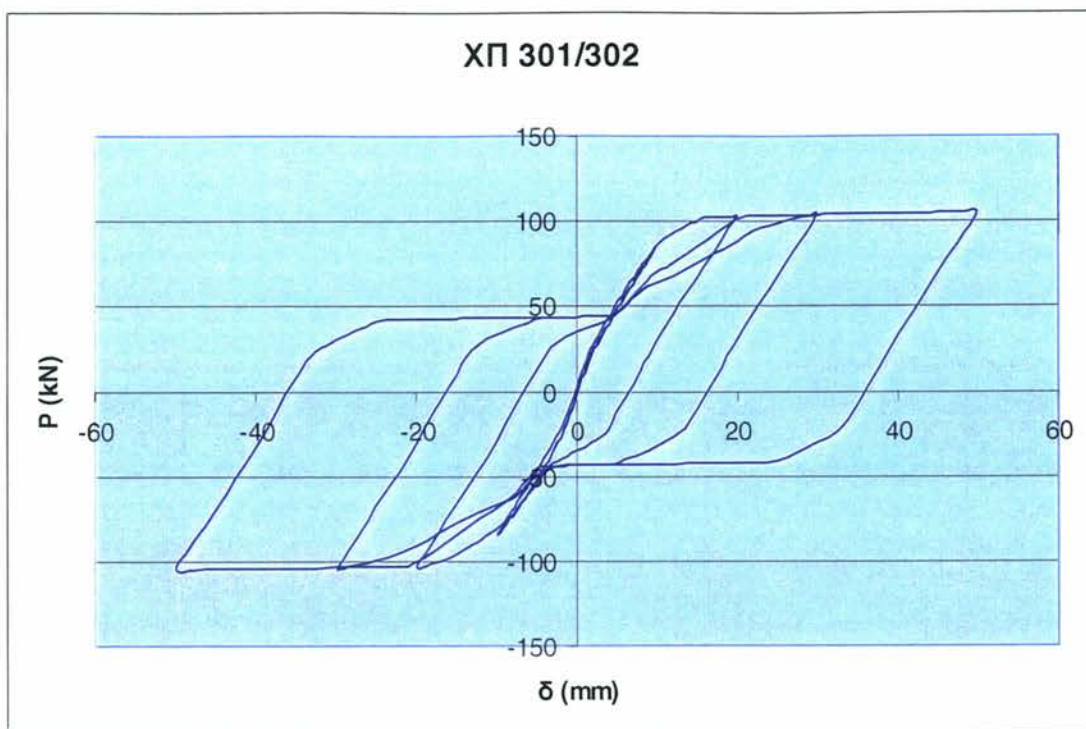
Για την επίτευξη ελεγχόμενων παραμορφώσεων όμοιων με του πειράματος, χρησιμοποιείται ένα πρόσθετο ελαστικό στοιχείο ελκυστήρα (τύπου 01) μεγάλης δυσκαμψίας (της τάξης 1000 X την ελαστική δυσκαμψία του υποστυλώματος), εν σειρά με το δοκίμιο, στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου (Σχ. 6.3.4). Με αυτό τον τρόπο, το αριθμητικό προσομοίωμα υποβάλλεται στον ίδιο αριθμό ανακυκλίσεων όπως και τα πειράματα.

6.3.2 Αριθμητική πρόβλεψη της συμπεριφοράς

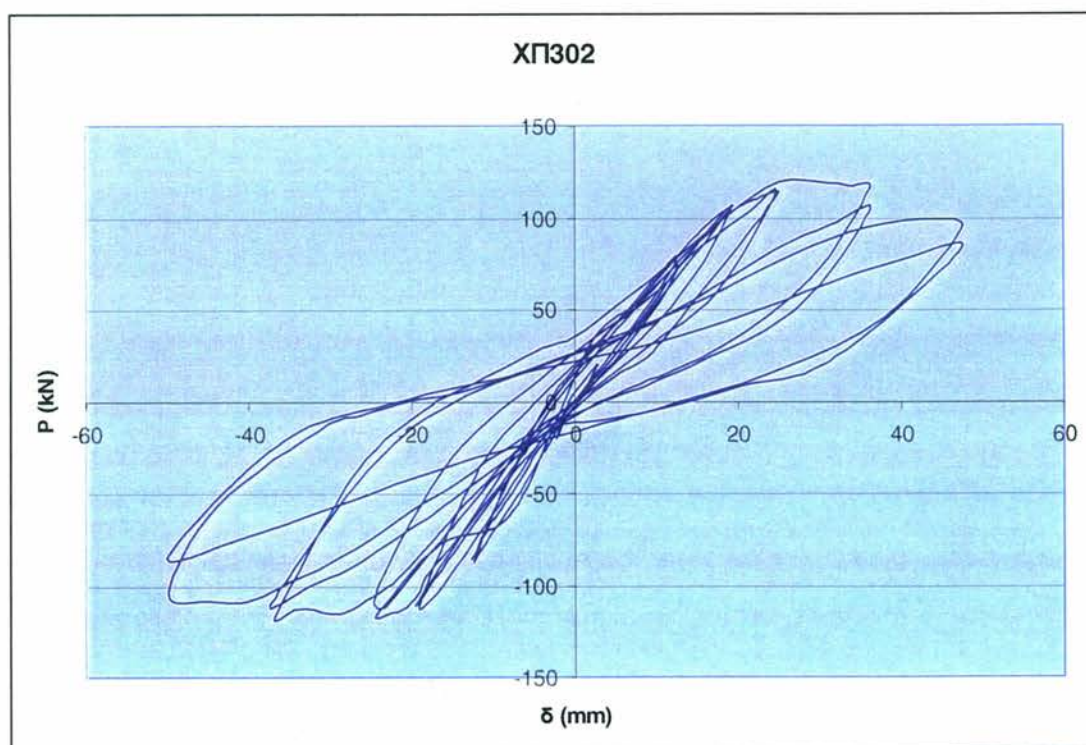
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά διαγράμματα φορτίου παραμόρφωσης στο σημείο εφαρμογής του φορτίου στα Σχήματα 6.3.1 - 6.3.2 για τα ΧΠ301/2, και στα Σχήματα 6.3.3 - 6.3.4 για τα ΧΠ303/4, αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι το προσομοίωμα κατανεμημένης βλάβης είναι σε θέση να αποδώσει με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια τη μέγιστη δύναμη P του εμβόλου που καταγράφηκε πειραματικά, πλην όμως, σε ότι αφορά την ανακυκλιζόμενη υστερετική συμπεριφορά, αν και προσομοιώνει την εναλλαγή της δυσκαμψίας των βρόχων (*pinching*) λόγω της εναλλαγής ρηγματώσης και πλαστιμοποίησης σε ανακύκλιση των οπλισμών, αδυνατεί να αποδώσει τα βασικά στοιχεία της συμπεριφοράς, που παρατηρήθηκαν πειραματικά, και αφορούν τα συγκεκριμένα υφιστάμενα υποστυλώματα από ΟΣ τα οποία είναι και τυπικά αυτού του είδους στοιχείων, και ελέγχθηκαν στην παρούσα:

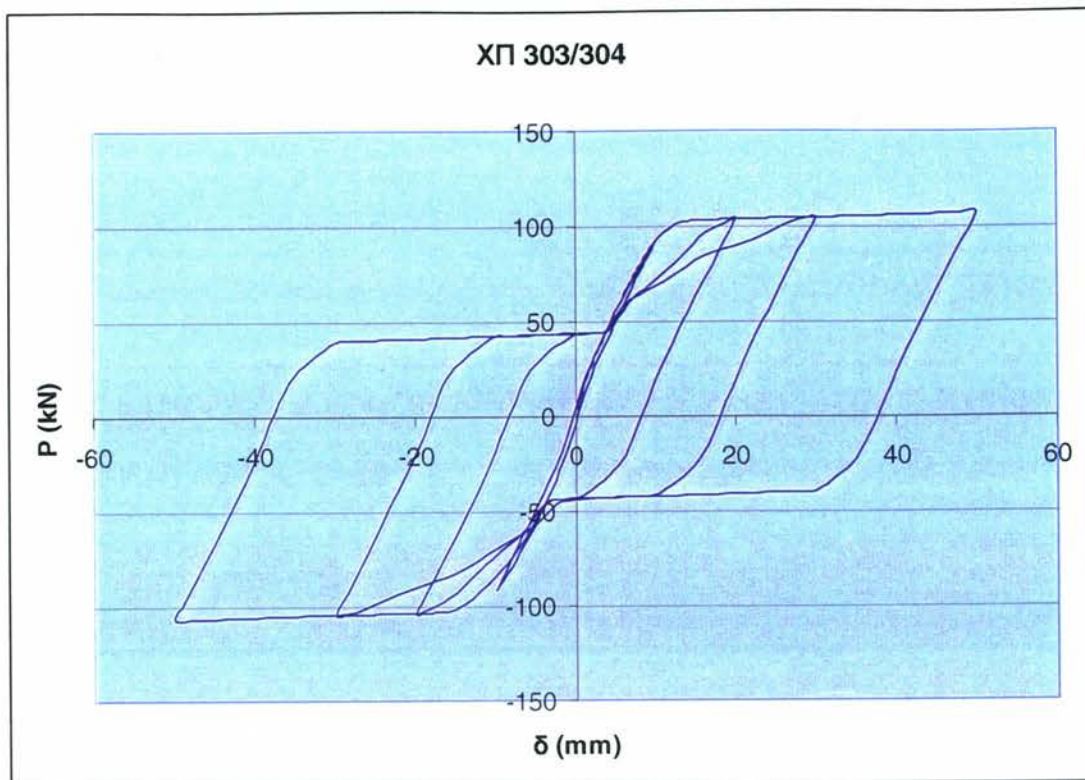
- Την αρχική μείωση της δυσκαμψίας στην περιβάλλουσα απόκρισης, λόγω απομείωσης του μέτρου E_c του υλικού, είτε προτού αλλά και μετά τη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, λόγω ολίσθησης του χάλυβα που δεν προσομοιώνεται.
- Τη σταδιακή απομείωση της αντοχής λόγω λυγισμού των ράβδων σε επαναλαμβανόμενες ανακυκλίσεις υπό σταθερό εύρος παραμορφώσεων: ο λυγισμός δεν προσομοιώνεται.
- Την απομείωση της δυσκαμψίας (έως πλήρη απώλεια της) στις ανακυκλίσεις λόγω της ολίσθησης των ράβδων κατά την επαναφόρτιση μετά από πρότερο κύκλο. Το προσομοίωμα, θεωρώντας πλήρη πρόσφυση οπλισμού με σκυρόδεμα και αποδίδοντας στο χάλυβα σταθερά διγραμμικά χαρακτηριστικά, εμφανίζει σημαντική παραμένουσα αντοχή στην αποφόρτιση μέχρι τη διαρροή του προηγουμένως θλιβόμενου χάλυβα, κάτι που δεν συμβαίνει στο πείραμα.



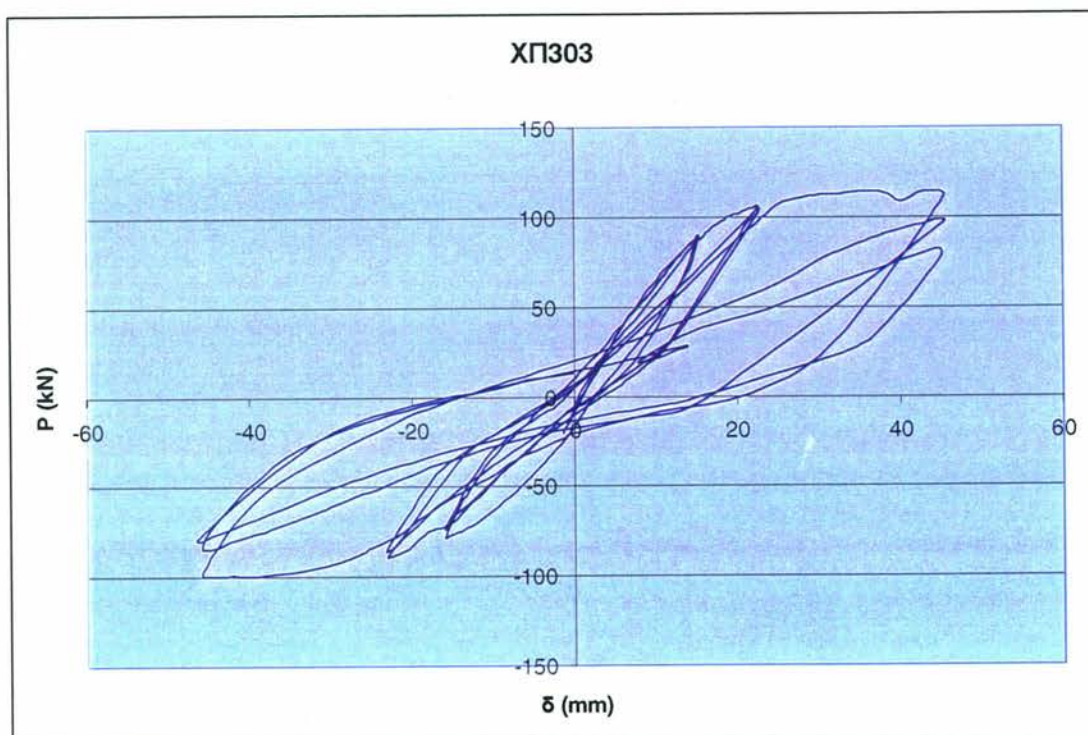
Σχήμα 6.3.1 Προβλεπόμενο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, δοκίμια ΧΠ301/2.



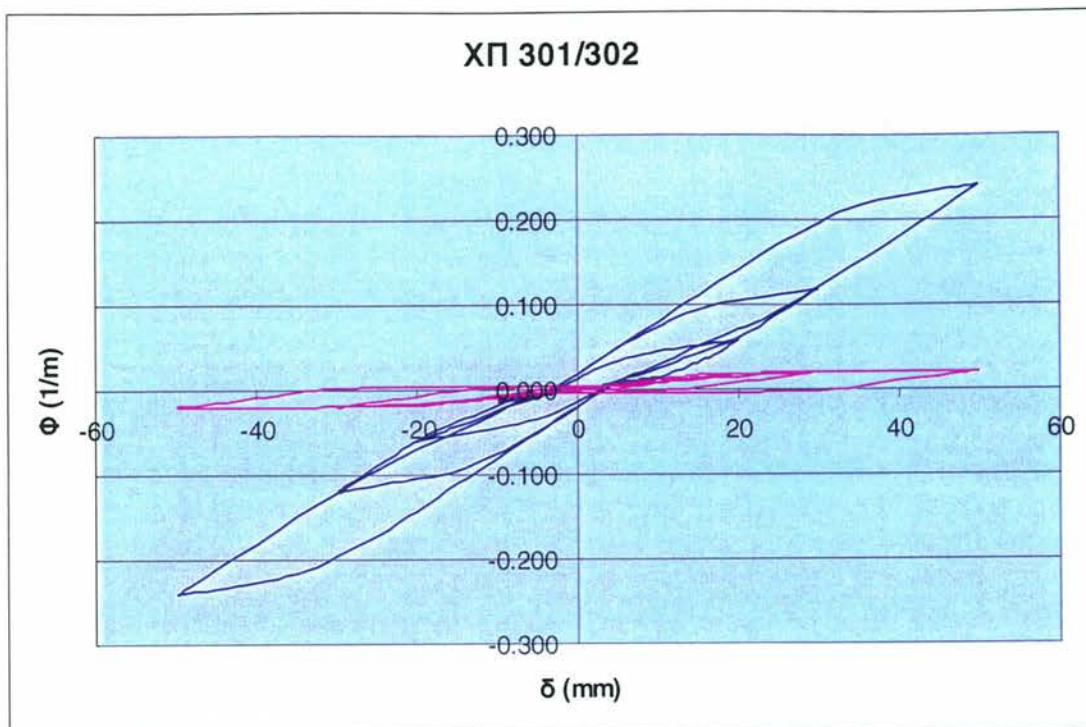
Σχήμα 6.3.2 Καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, ΧΠ302.



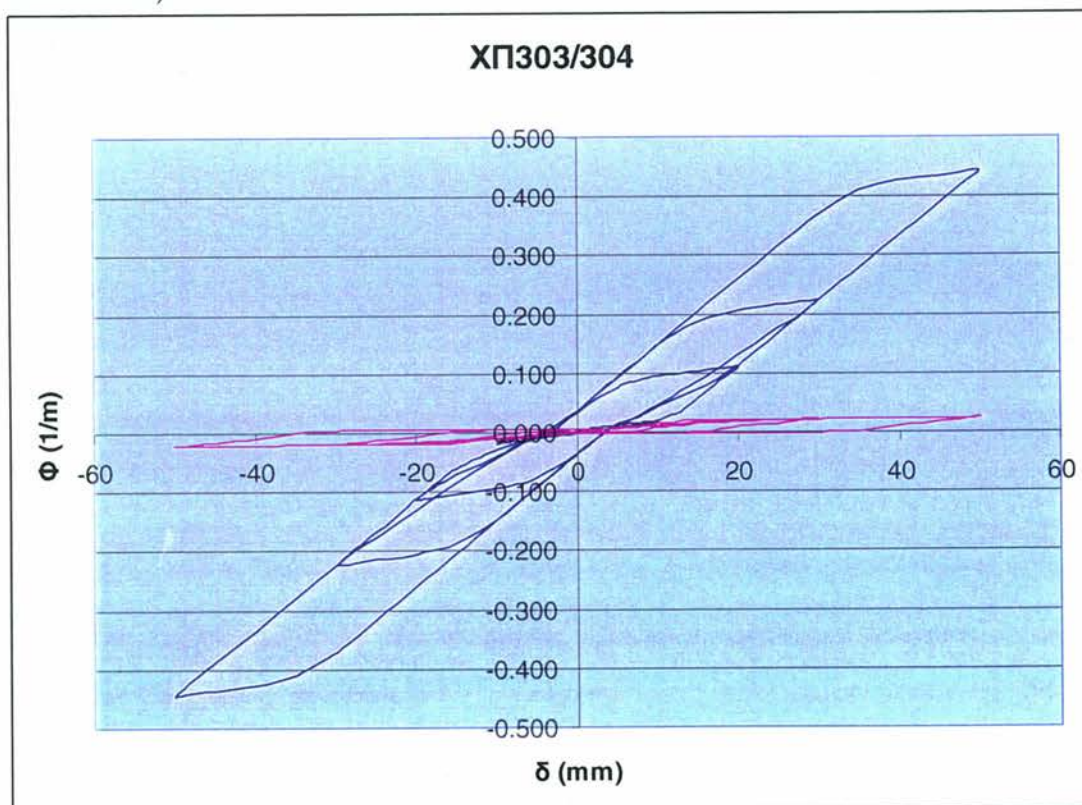
Σχήμα 6.3.3 Προβλεπόμενο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, ΧΠ303/4.



Σχήμα 6.3.4 Καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, ΧΠ303.



Σχήμα 6.3.5 Απαιτήσεις εγκάρσιας παραμόρφωσης δ – καμπυλότητας στις πρώτες δύο ελεγχόμενες διατομές, **ΧΠ301** (για τα επίπεδα διαρροής βλέπε Πίνακα 6.1).



Σχήμα 6.3.6 Απαιτήσεις εγκάρσιας παραμόρφωσης δ – καμπυλότητας στις πρώτες δύο ελεγχόμενες διατομές, **ΧΠ303** (για τα επίπεδα διαρροής βλέπε Πίνακα 6.1).

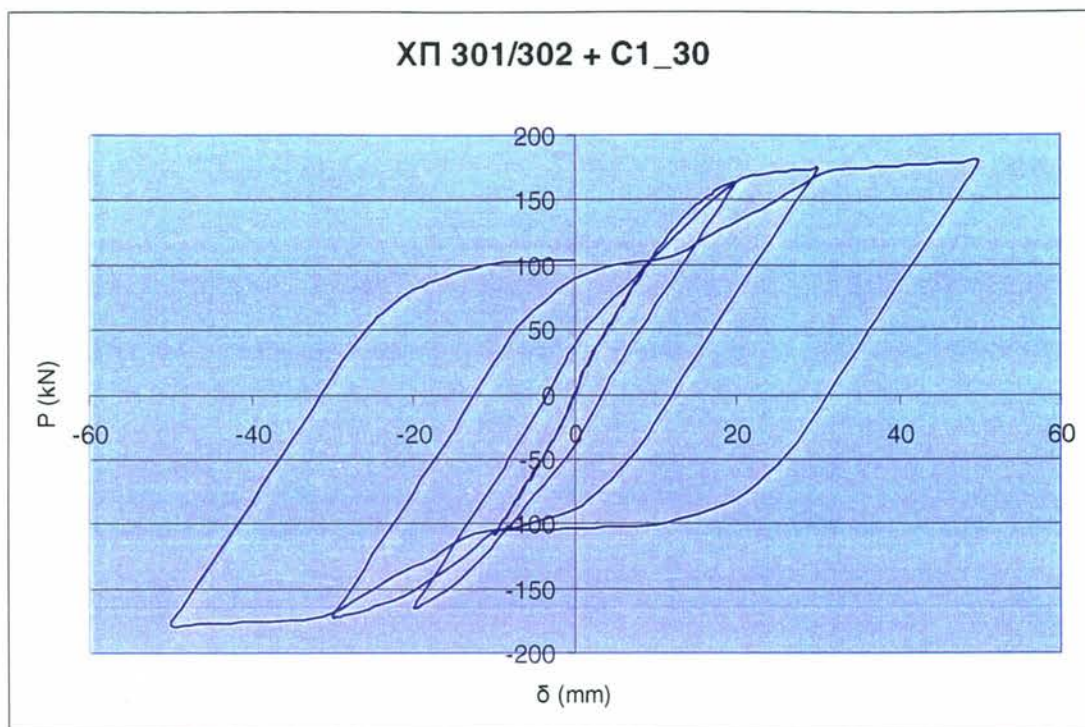
- Την αυξημένη, λόγω των παραπάνω, ενεργειακή απορρόφηση σε υστερετική απόκριση του προσομοιώματος, σε σχέση με το φυσικό πείραμα.

Οι δυνατότητες του προσομοιώματος παρέχουν στοιχεία για την αναλυτική πρόβλεψη των απαιτούμενων καμπυλοτήτων ως προς την επιβαλλόμενη παραμόρφωση δ (σύμφωνα με τη *τμηματικά* γραμμική προσέγγιση αυτών στο εσωτερικό του στοιχείου), για τα ΧΠ301 και ΧΠ303 αντιστοίχως (Σχ. 6.3.5 και 6.3.6). Σημειώνεται ότι οι τιμές που υπολογίζονται αφορούν το μέσον του πρώτου κρίσιμου τμήματος, άρα καταγράφονται πλησίον και όχι επάνω στην πάκτωση, περιορίζοντας την εφαρμογή του στοιχείου.

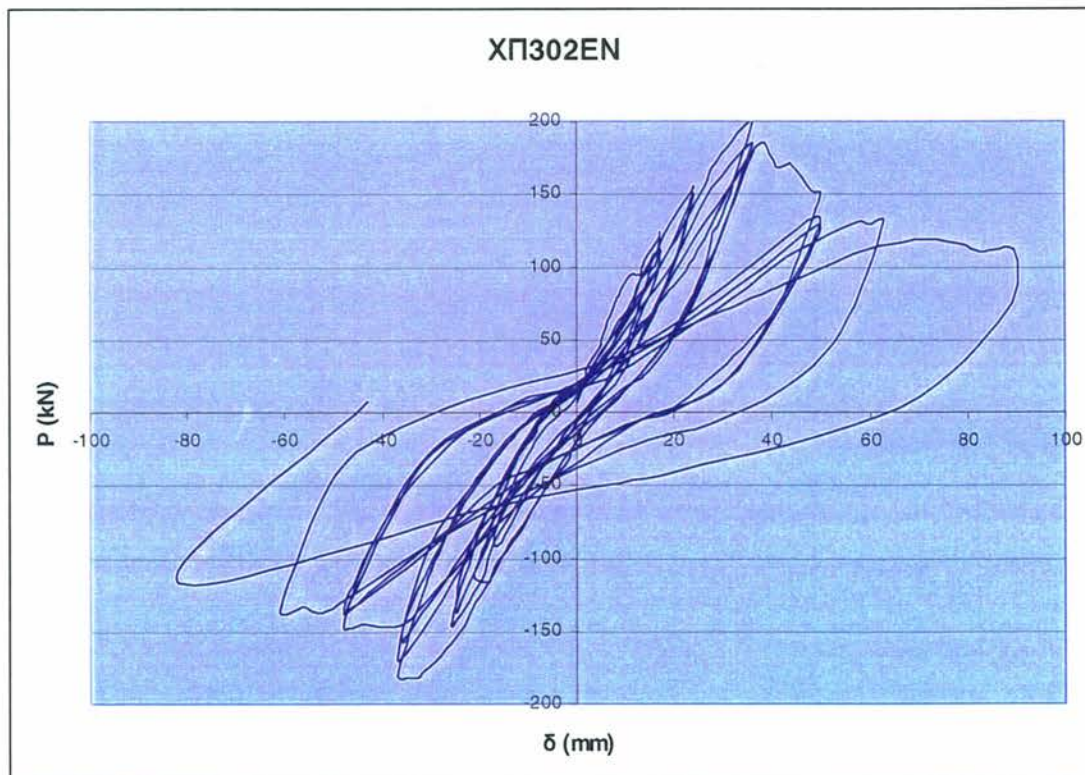
Επί πλέον, έγιναν αριθμητικές προβλέψεις της απόκρισης των ενισχυμένων δοκιμίων με μια στρώση ΙΝΟΠ ινών άνθρακα σε κάθε παρειά, των δύο τυπικών δοκιμίων ΧΠ302ΕΝ και ΧΠ304ΕΝ, σε παρόμοια επιβεβλημένη ιστορία επιβαλλόμενης παραμόρφωσης στο P . Τα αποτελέσματα των προβλέψεων των ενισχυμένων δοκιμίων δίνονται στα Σχήματα 6.3.7 και 6.3.8. Λαμβάνοντας υπόψη και τα στοιχεία απόκρισης των πειραμάτων του Κεφαλαίου 5, είναι εμφανές ότι και σε αυτή την περίπτωση, ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι η αναλυτική πρόβλεψη είναι μεν σε θέση να προβλέψει την τελική αντοχή των δοκιμίων ΧΠ30_ΕΝ (165 kN περίπου), αλλά δεν προβλέπει με αντίστοιχη ακρίβεια ούτε την περιβάλλουσα του μονοτονικού κλάδου της απόκρισης (δυσκαμψία, παραμόρφωση διαρροής) ούτε και την αυτή καθαυτή την ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά: το προσομοίωμα εμφανίζει μια απόκριση που περιλαμβάνει έναν υστερετικό βρόχο σαφώς πιο σταθερό σε σχήμα και διευρυμένο (άρα απορροφά σημαντικά μεγαλύτερη υστερετική ενέργεια), απ' ό,τι η καταγεγραμμένη απόκριση αυτών των υποστυλωμάτων (βλέπε Κεφάλαιο 5). Πέραν δε αυτού, δεν είναι σε θέση να προσομοιώσει ούτε την απομείωση της

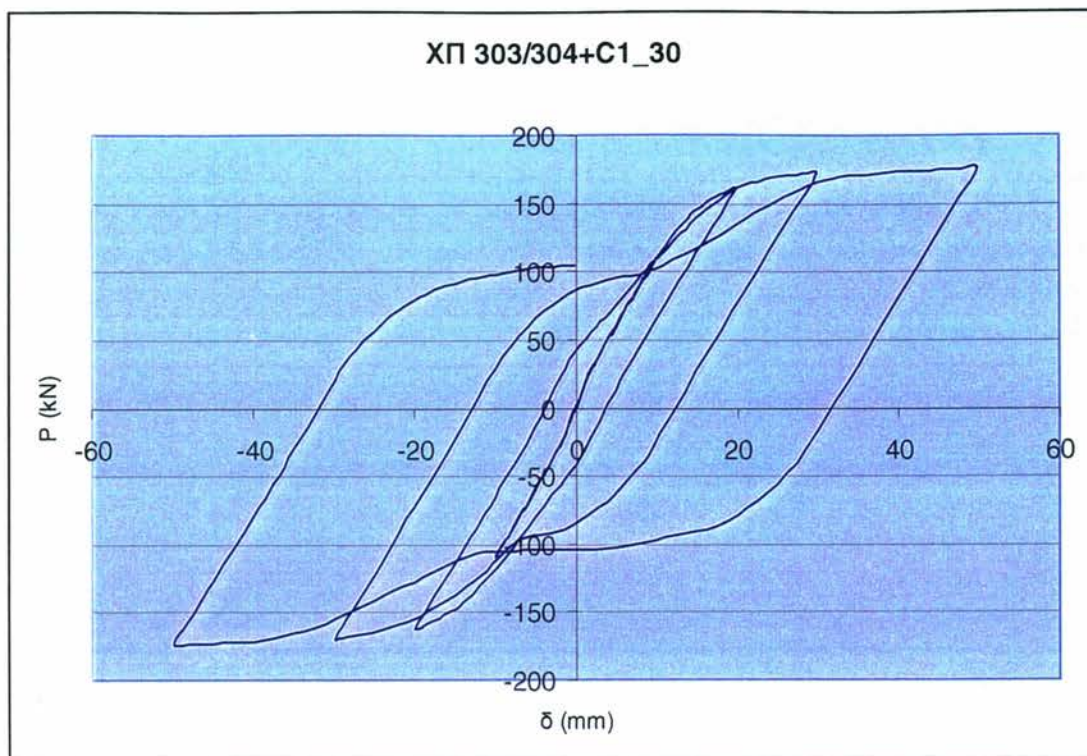
αντοχής λόγω του λυγισμού των ράβδων και της ολίσθησης του μαλακού χάλυβα.



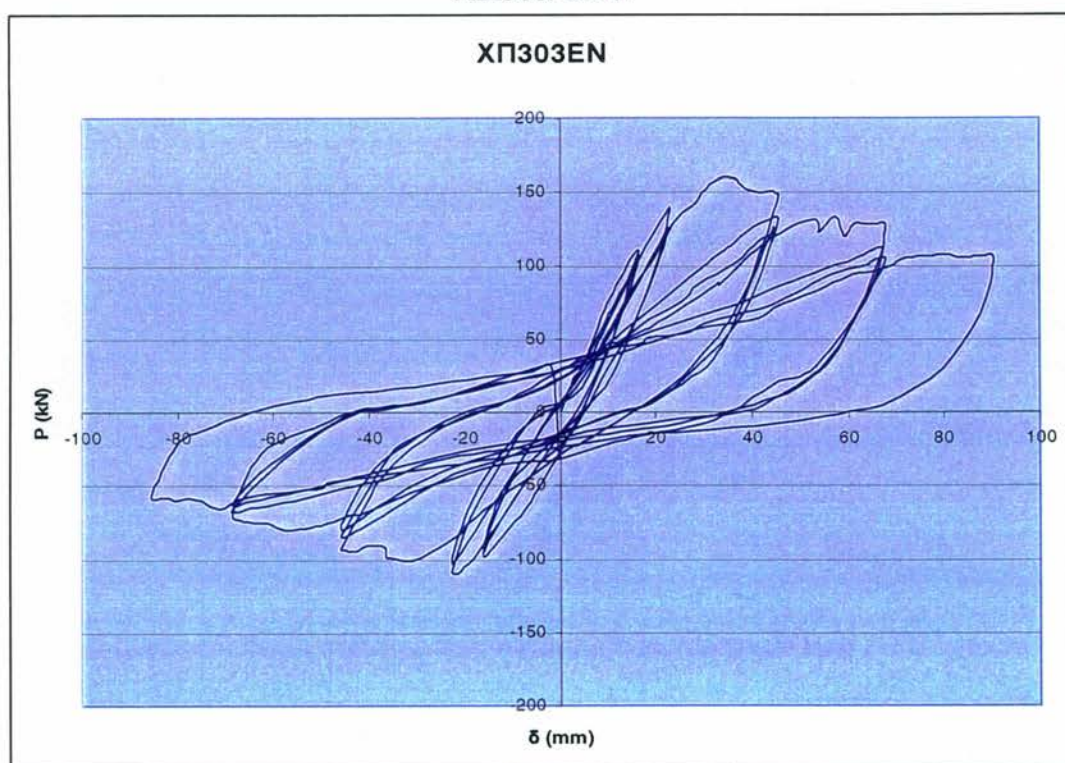
Σχήμα 6.3.7 Προβλεπόμενο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, δοκίμια ΧΠ301/2ΕΝ.



Σχήμα 6.3.8 Καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, ΧΠ302ΕΝ.



Σχήμα 6.3.9 Προβλεπόμενο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, δοκίμια ΧΠ303/4ΕΝ.



Σχήμα 6.3.10 Καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης, δοκίμιο ΧΠ303ΕΝ .

Οι βασικές αιτίες για τα παραπάνω είναι ότι αγνοούνται σημαντικοί παράγοντες που υπεισέρχονται στην συμπεριφορά του συγκεκριμένου είδους

υποστυλωμάτων, όπως οι διατμητικές παραμορφώσεις (σε μικρό βέβαια ποσοστό λόγω του μεγάλου λόγου M/Vd) και κυρίως η ολίσθηση και ο λυγισμός του λείου χάλυβα Φ14. Επί πλέον, η παραδοχή σταθερής μέσης κατανομής των ακαμψιών εσωτερικά γενικά δεν είναι σε θέση να προσομοιώσει με ακρίβεια την βλάβη του φορέα (Zeris and Mahin (2), 1988).

Συμπεραίνεται άρα ότι για την γενική πρόβλεψη της σεισμικής τρωτότητας υφισταμένων κτιρίων από ΟΣ για έλεγχο αλλά και για ανασχεδιασμό, είτε πρόκειται για προσομοίωση της κατάστασής τους όπως έχουν είτε πρόκειται για τις ενισχυμένες διατομές, απαιτούνται πλέον αξιόπιστα αναλυτικά προσομοιώματα για την ακριβή πρόβλεψη της δυναμικής ανελαστικής συμπεριφοράς τους. Το πρόβλημα καθίσταται ουσιαστικότερο στις υφιστάμενες κατασκευές, οι οποίες φέρουν κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπλισης που δεν εμπίπτουν στη σημερινή αντισεισμική πρακτική (όπως οι πυκνοί συνδετήρες και η αποφυγή των φαινομένων διατμητικής αστοχίας).

