

7. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η αναλυτική προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων έγινε με τα παρακάτω λογισμικά ανελαστικής ανάλυσης που διαθέτει το Εργ.ΟΣ ΕΜΠ, περιλαμβάνει δε υπολογιστικές προβλέψεις της ανελαστικής συμπεριφοράς, έως την αστοχία, των τεσσάρων τύπων ενισχυμένων ή μη δοκών που ελέγχθηκαν πειραματικά:

1. Σε επίπεδο διατομής (τόσο με παραδοχές τιμών σχεδιασμού όσο και με παραδοχές μέσης πειραματικής αντοχής των επί μέρους υλικών που την απαρτίζουν, την θεωρούμενη και 'πραγματική' συμπεριφορά) καθώς και
2. Σε επίπεδο στοιχείου - δοκιμίου με παραδοχές μέσης πειραματικής αντοχής των επί μέρους υλικών ('πραγματική συμπεριφορά'), με τη χρήση ραβδόμορφων πεπερασμένων στοιχείων, βάσει δύο διαφορετικών τύπων προσομοίωσης του δοκιμίου: α) συγκεντρωμένης βλάβης - πλαστιμότητας στα άκρα του δοκιμίου και β) κατανεμημένης βλάβης – πλαστιμότητας στα άκρα και στο εσωτερικό του δοκιμίου.
3. Σε επίπεδο στοιχείου - δοκιμίου με παραδοχές μέσης πειραματικής αντοχής των επί μέρους υλικών ('πραγματική συμπεριφορά'), με τη χρήση οκτακομβικών πεπερασμένων στοιχείων κύβου.

Παρακάτω αναπτύσσονται τα αντίστοιχα αναλυτικά αποτελέσματα για σύγκριση με τα πειράματα, που περιγράφηκαν στο Κεφ.6.

7.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά των κρίσιμων διατομών

7.1.1 Παραδοχές υπολογισμού και αναλυτικό προσομοίωμα

Για λόγους ελέγχου της διάταξης και για ανάλυση των αποτελεσμάτων μετά τα πειράματα, υπολογίσθηκαν τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων ($M-\varphi$) των κρίσιμων διατομών των δοκών που ενισχύθηκαν με τα ΙΝΟΠ και της δοκού ΝΕΑΚ. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ΧTRACT (Chadwell, 2001). Το πρόγραμμα, το οποίο αποτελεί εξέλιξη του λογισμικού

UCFYBER που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Berkeley, εφαρμόζεται στην ανελαστική ανάλυση διατομών γενικευμένου σχήματος, αποτελούμενων από πολλαπλά υλικά. Το λογισμικό βασίζεται στο προσομοίωμα της επιπεδότητας της καταπονούμενης διατομής πριν και μετά τη κάμψη και στην παραδοχή της πλήρους συνάφειας - άρα και ισότητας παραμορφώσεων μεταξύ όμορων υλικών (σκυρόδεμα - χάλυβας και σκυρόδεμα - FRP), έχει δε τη δυνατότητα υπολογισμού διαγραμμάτων ροπών καμπυλοτήτων και επαλληλίας αντοχών σε μονοαξονική ή διαξονική κάμψη, με ή χωρίς αξονική δύναμη, για δεδομένη εξωτερική φόρτιση (είτε η αξονική δύναμη είτε ροπή προς μία κύρια διεύθυνση της διατομής).

Για τον υπολογισμό της διατομής γίνεται διακριτοποίηση αυτής σε ίνες καθορισμένης θέσης, οι οποίες δύνανται να έχουν διαφορετικό καταστατικό νόμο τάσης – παραμόρφωσης και ενδεχομένως αρχική παραμόρφωση για προσομοίωση συνθηκών προέντασης. Ο τρόπος υπολογισμού των μεγεθών γίνεται με διαδοχική βήμα προς βήμα εύρεση του ουδέτερου άξονα συναρτήσει της τρέχουσας κατάστασης της διατομής, με προσεγγιστικές διαδοχικές επιλύσεις, μέχρι τη σύγκλιση της εσωτερικής αντίστασης και του εξωτερικά επιβαλλόμενου εντατικού μεγέθους (π.χ. αξονική ίση με μηδέν, στην περίπτωση μας). Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι οι καταστατικοί νόμοι που διαθέτει η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε δεν παρέχουν τη δυνατότητα αποφόρτισης οιαδήποτε υλικού, παρά το γεγονός ότι προσομοιώνεται ο φθίνων κλάδος στο σκυρόδεμα. Αυτός ο περιορισμός δημιουργεί πρόβλημα στον υπολογισμό της αντοχής περί τη μέγιστη, αλλά και πέραν αυτής, αφού όπως έχει αποδειχθεί αναλυτικά (Zeris, 1988), η αλλαγή κίνησης του ουδέτερου άξονα στην περίπτωση που το ακραίο θλιβόμενο σκυρόδεμα αρχίζει να φθίνει σε θλιπτική αντίσταση δημιουργεί αποφόρτιση τμημάτων της διατομής, με συνεπακόλουθη πτώση της συνολικής ροπής αντίστασης. Λογισμικά με τη δυνατότητα αποφόρτισης του υλικού έχουν αναπτυχθεί παλαιότερα από τον ΕΥ (Zeris and Mahin, 1988) σε περιβάλλον UNIX.

Για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των πειραματικά αποτιμηθέντων χαρακτηριστικών των επί μέρους υλικών χάλυβα και σκυροδέματος – όπως μετρήθηκαν και αναφέρθηκαν παραπάνω - ενώ για τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν οι ονομαστικές τιμές που παρέχονται από τον προμηθευτή, όπως δίδονται στο Κεφάλαιο 3. Συνολικά για την προσομοίωση των υλικών, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω καταστατικά προσομοιώματα:

α) Προσομοίωμα κατά Mander, Priestley and Park (1983). Χρησιμοποιείται διαφορετικό για το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα της επικάλυψης και διαφορετικό για το περισφιγμένο σκυρόδεμα, βάσει της εκάστοτε περιοχής όπλισης της δοκού. Λόγω των διαστάσεων των διατομών και της μικρής δυσκαμψίας του υφάσματος, δεν έγινε κάποια περαιτέρω προσαύξηση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω περισφιγξης.

β) Για τον διαμήκη χάλυβα Φ14, διγραμμικά χαρακτηριστικά ελαστοπλαστικού υλικού με παραβολοειδή χαρακτηριστικά κράτυνσης.

γ) Για τα διαμήκη ΙΝΟΠ G60 και C1-30, προδιαγράφηκαν γραμμικά ελαστικά χαρακτηριστικά μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας τους, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή (με μηδενισμό της αντοχής περαιτέρω). Και για τα δύο αυτά υλικά θεωρήθηκαν δύο περιπτώσεις συμποριφοράς, με δυνατότητα ή όχι παραλαβής φορτίου σε θλίψη, για έλεγχο των εκάστοτε διατομών και με τις δύο παραδοχές.

δ) Για της ράβδους ΙΝΟΠ από ίνες άνθρακα Mbar, χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηριστικά υλικού ελαστικού σε θλίψη και εφελκυσμό, μέχρι την ονομαστική παραμόρφωση αστοχίας του, όπως δίδεται από τον προμηθευτή.

Τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων των υλικών που θεωρήθηκαν δείχνονται στο Παράρτημα Ι, μαζί με τις παραδοχές των προσομοιωμάτων (περιλαμβανομένων των λεπτομερειών της διακριτοποίησης, και των συνολικών αναλυτικών προβλέψεων των μηχανικών χαρακτηριστικών της κάθε διατομής).

7.1.2 Αναλυτική πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών

Τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων για τις μέσες (πειραματικές) ιδιότητες του χάλυβα και σκυροδέματος για τις τέσσερις διατομές: ι) **NEAK**, ιι) **G60** με ή χωρίς θλιβόμενα χαρακτηριστικά του υαλονήματος, ιιι) **C1-30** με ή χωρίς θλιβόμενα χαρακτηριστικά του ανθρακονήματος και ιιι) **MBAR** δείχνονται στο Σχήμα 7.1.1. Στο Παράρτημα δίδεται επίσης για το κάθε διάγραμμα και η ισοδύναμη διγραμμική μορφή του, με την παραδοχή ίσων εμβαδών κάτω από το εκάστοτε διάγραμμα. Τα διγραμμικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται στην αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς με τα στοιχεία τύπου 02 (βλ. Κεφάλαιο 7.2), όπου λόγω πυκνωσης, η χρήση διαγραμμάτων $M-\varphi$ είναι αποδεκτή.

Τα διαγράμματα ροπών – καμπυλοτήτων, υπολογισμένα με βάση τις χαρακτηριστικές και μέσες τιμές αντοχής των υλικών, καθώς και τις πειραματικές τιμές (διαρροή του χάλυβα στα 380 MPa περίπου), συγκρίνονται μεταξύ τους στο Σχήμα 7.1.2. Με βάση της σύγκριση αυτή δείχνεται ο βαθμός υπεραντοχής των διατομών με τη χρήση του συγκεκριμένου υλικού.

Τέλος, τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά και οι δείκτες συμπεριφοράς των διατομών συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 7.1, όπου ορίζουμε:

EI_{gr} είναι η αρχική (ολική) δυσκαμψία της διατομής (*gross section stiffness*), σε kNm^2

EI_{sec} είναι η επιβατική (ολική) δυσκαμψία της διατομής (*secant section stiffness*), σε kNm^2

Φ_y είναι η καμπυλότητα σε διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα, σε $1/\text{m}$

M_y είναι η αντίστοιχη ροπή (συνθήκη $N=0$), σε kNm

Φ_{max} είναι η μέγιστη καμπυλότητα σε αστοχία της διατομής, σε $1/\text{m}$

M_u είναι η μέγιστη ροπή αντίστασης της διατομής για $N=0$, σε kNm

μ_{max} είναι η πλαστιμότητα καμπυλοτήτων της διατομής ίση με Φ_{max} / Φ_y

$M_{p0,6\%}$ είναι η ροπή που αντιστοιχεί για μέγιστη παραμόρφωση εφελκυσμένου ΙΝΟΠ ίση προς $6,0\%$, σε kNm

$M_p 0,8\%$ είναι η ροπή που αντιστοιχεί για μέγιστη παραμόρφωση εφελκυσμένου

ΙΝΟΠ ίση προς $8,0\%$, σε kNm

$M_p 1,1\%$ είναι η ροπή που αντιστοιχεί για μέγιστη παραμόρφωση εφελκυσμένου

ΙΝΟΠ ίση προς $11,0\%$, σε kNm

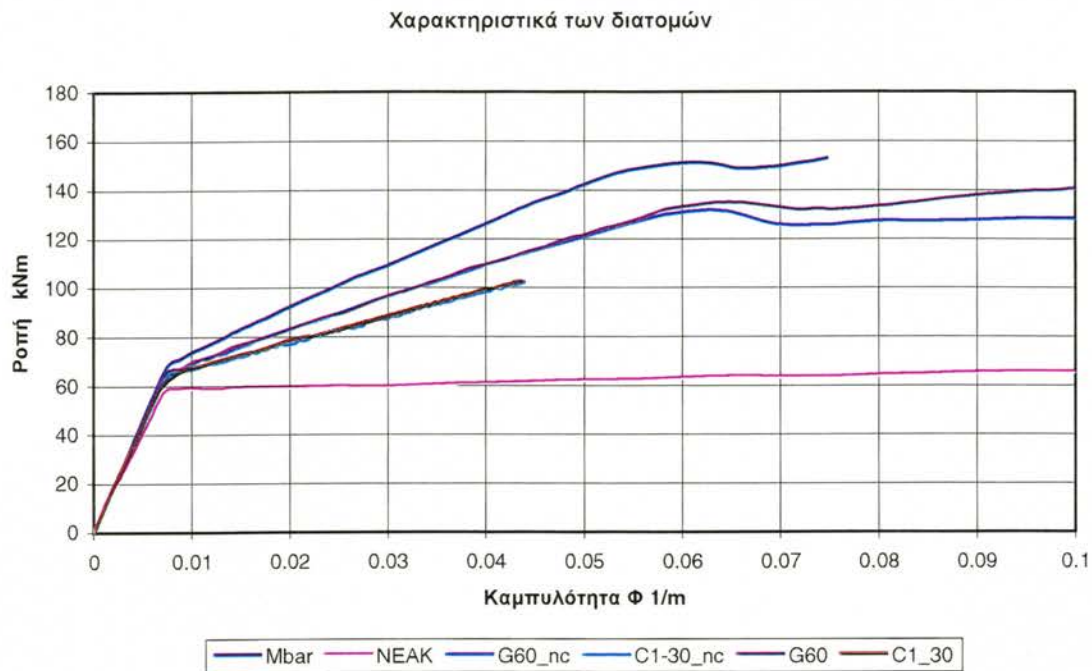
E_y είναι η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, κατά τη διαρροή, ίση με $M_y \Phi_y / 2$, βάσει διγραμμικών χαρακτηριστικών, σε kNm/m

E_{max} είναι η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, κατά την αστοχία, ίση με το συνολικό εμβαδόν που περικλείεται κάτω από το διάγραμμα ροπής – καμπυλότητας, σε kNm/m

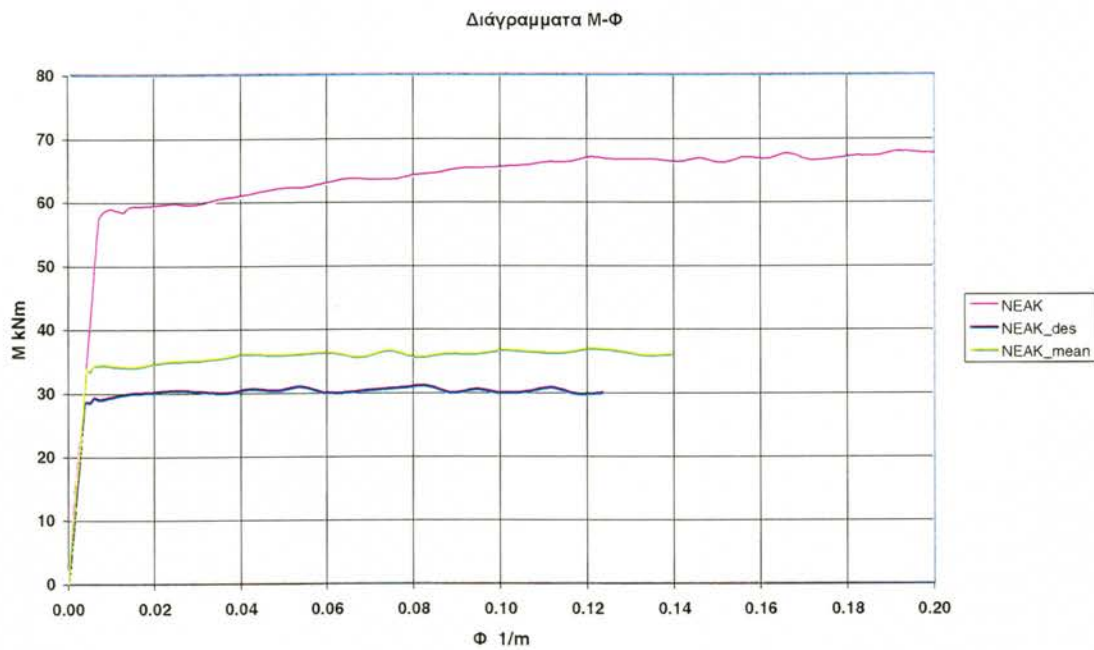
μE είναι η πλαστιμότητα ενεργείας, ίση με E_{max} / E_y

Ω είναι η προβλεπόμενη υπεραντοχή ενίσχυσης, ίση με M_p / M_y

Πίνακας 7.1 Προβλεπόμενοι δείκτες συμπεριφοράς των διατομών (διαρροή και αστοχία)				
Χαρακτηριστικά	NEAK	G60	C1-30	MBAR
$E I_{gr}$	7978,0	8748,0	8331,0	9124,0
$E I_{sec}$	26,3	233,0	1018,0	884,0
$\Phi_y \times 10^{-3}$	7,2	7,3	7,2	7,4
M_y	57,2	64,2	59,7	67,2
$\Phi_{max} \times 10^{-2}$	31,8	11,4	4,4	7,5
M_u	70,3	127,3	102,2	152,60
μ_{max}	44,2	15,6	6,0	10,09
$M_p 0,6\%$	-	82,7	75,1	95,0
$M_p 0,8\%$	-	89,0	80,7	107,8
$M_p 1,1\%$	-	102,1	90,7	126,1
E_y	0,241	0,613	0,261	0,504
E_{max}	20,79	12,41	3,26	8,48
μE	86,6	20,2	12,5	17,0
Ω	1,13	1,23	1,55	1,59



Σχήμα 7.1 Διαγράμματα ροπών-καμπυλότητας των δοκιμών C1-30, G60, MBAR και σύγκρισή τους με το NEAK.



Σχήμα 7.2 Διάγραμμα ροπών-καμπυλότητας σχεδιασμού, μέσης αντοχής και πειραματικών αντοχών της διατομής NEAK.

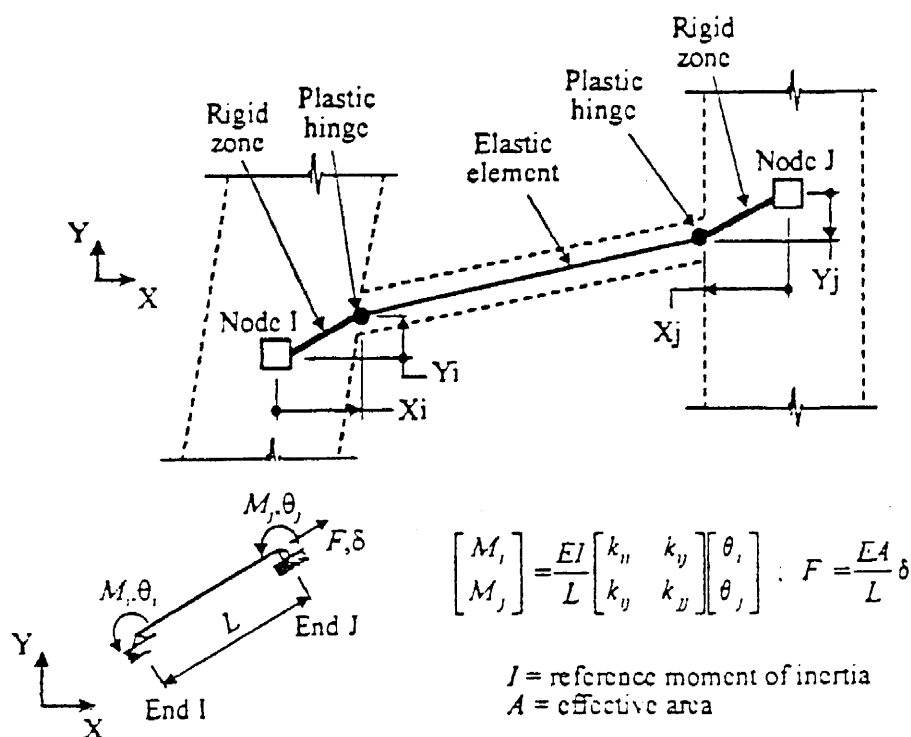
7.2 Αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δοκιμίων με ραβδόμορφα πεπερασμένα στοιχεία

Οι προβλέψεις της συμπεριφοράς των δοκιμίων των δοκών έγιναν με τη χρήση των λογισμικών ι) **DRAIN-2DX** (Allahabadi et al., 1988), με χρήση των στοιχείων 02 (ένα διαδεδομένο στοιχείο σε επίπεδο πρακτικής) και 15 (ένα πλέον σύνθετο στοιχείο ερευνητικού κυρίως επιπέδου) και ιι) **Opensees**, (Mazzoni, McKenna και Fenves, 2004) που έχουν αναπτυχθεί από τον Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας, Berkeley. Και τα δύο λογισμικά διατίθενται για ελεύθερη χρήση (*freeware*) στο Διαδίκτυο, στον ιστοχώρο του National Information Service of Earthquake Engineering (NISEE) – www.nisee.org με ελεύθερη δυνατότητα πρόσβασης (για το δεύτερο από αυτά) εκτός από τον πηγαίο κώδικα, και στα Εγχειρίδια χρήσης του, στον ιστοχώρο <http://opensees.berkeley.edu>.

7.2.1 Προσομοίωση της συμπεριφοράς με το στοιχείο 02 του DRAIN-2DX

Το τυπικό δοκίμιο συνεχούς δοκού με ένα σημειακό φορτίο στο κέντρο του πρώτου ανοίγματος προσομοιώνεται με σειρά ραβδόμορφων στοιχείων σταθερών ιδιοτήτων και πεπερασμένης καμπτικής αντοχής στα άκρα του κάθε στοιχείου, με διγραμμικά ανελαστικά χαρακτηριστικά ροπής – καμπυλότητας. Ο λόγος που επιλέγονται καταρχήν αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία, είναι γιατί η χρήση τους στην πρακτική αποτίμηση (για τον ανασχεδιασμό υφισταμένων κτιρίων με τη μέθοδο του Φάσματος Αντοχής – *Capacity Spectrum Method*), αυτού του τύπου των στοιχείων, είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη - ειδικά του στοιχείου τύπου 02. Στην παρούσα παρατίθεται μία σύντομη μόνο περιγραφή των παραδοχών της προσομοίωσης. Για πλέον λεπτομερή περιγραφή των δυνατοτήτων του στοιχείου 02 και 15 βλέπε DRAIN-2DX (Allahabadi et al., 1988).

Το στοιχείο τύπου 02 είναι ραβδόμορφο στοιχείο αποτελούμενο από τρία εν σειρά μέρη, εκ των οποίων το ένα προσομοιώνει την ελαστική συμπεριφορά του στοιχείου ενώ τα άλλα δύο, στα άκρα του στοιχείου, προσομοιώνουν τη συγκεντρωμένη ανελαστική συμπεριφορά με μηδενικού μήκους στρωφικές ανελαστικές αρθρώσεις. Στα άκρα του στοιχείου είναι δυνατός και ο καθορισμός άκαμπτων κόμβων, κάτι όμως που δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα. Τα χαρακτηριστικά των ανελαστικών κόμβων στην περίπτωση των δοκών καθορίζονται από τις οριακές καμπτικές ροπές, διαφορετικές σε αρνητική και θετική κάμψη και τη διγραμμική καμπτική δυσκαμψία EI και bEI , παράμετροι που καθορίζονται από τον χρήστη (Σχήμα 7.3).

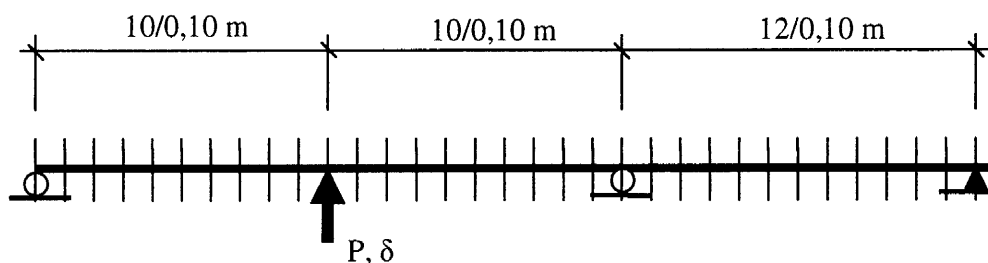


Σχήμα 7.3 Το στοιχείο τύπου 02.

Το στοιχείο δεν προσομοιώνει τις επιρροές της αξονικής δύναμης στη δυσκαμψία (λόγω ρηγμάτωσης και διαρροής), αδυνατεί δε επίσης να προσομοιώσει φαινόμενα επιρροής της διάτμησης στην αστοχία του φορέα. Η δυσκαμψία του στοιχείου αποτελείται έτσι από το ενδιάμεσο ελαστικό τμήμα εν σειρά με τους

ακραίους ανελαστικούς κόμβους, οι οποίοι ενδέχεται να έχουν είτε πλήρως πλαστική είτε κρατυνόμενη απόκριση όταν ενεργοποιηθούν μετά τη διαρροή. Με μία λεπτομερή διακριτοποίηση του φορέα με τύπου 02 στοιχεία είναι εφικτή με αυτό τον τρόπο η προσομοίωση σε γενικευμένη κάμψη της δοκού, με σταδιακή εκατέρωθεν του σημείου εφαρμογής του φορτίου και της εσωτερικής αντίδρασης, του μήκους της πλαστικής άρθρωσης. Επί πλέον, λόγω του μικρού μήκους των στοιχείων (0,10 m) η παραδοχή σταθερών ιδιοτήτων στο εσωτερικό του στοιχείου γίνεται αποδεκτή.

Για την προσομοίωση με το στοιχείο 02 (Σχήμα 7.4) ο φορέας διακριτοποιείται με 32 στοιχεία ανά 0,10 m, σε όλο το μήκος της συνεχούς δοκού. Η φόρτιση του δοκιμίου εφαρμόζεται σαν ελεγχόμενη μετατόπιση δ του κόμβου εφαρμογής του εμβόλου P , 1.0 m από την στήριξη. Τα ανελαστικά διγραμμικά χαρακτηριστικά της διατομής (θεωρούμενα στο μέσον των 10 cm που καλύπτει το κάθε στοιχείο) λαμβάνονται απευθείας από την προβλεφθείσα διγραμμική απόκριση της διατομής της κάθε δοκού (βλέπε τα διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων του Κεφαλαίου 6), με βάση τις μέσες τιμές των επί μέρους υλικών και τις ονομαστικές τιμές των ΙΝΟΠ, θεωρώντας ουσιαστικά σταθερό μήκος ολοκλήρωσης τα 10 cm του κάθε στοιχείου (Σχήμα 7.4). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το στοιχείο 02 συγκρίνονται με προσομοιώματα αυξημένης πολυπλοκότητας στα επόμενα Κεφάλαια.



Σχήμα 7.4 Διακριτοποίηση του δοκιμίου με στοιχεία τύπου 02 του DRAIN 2DX.

7.2.2 Προσομοίωση της συμπεριφοράς με το στοιχείο 15 του DRAIN-2DX

Οι τέσσερις δοκού προσομοιώνονται επί πλέον με τρία μόνο ραβδόμορφα στοιχεία τύπου 15 του DRAIN-2DX (Allahabadi et al., 1988). Το στοιχείο 15 προσομοιώνει ραβδόμορφους φορείς από ΟΣ με κατανεμημένη βλάβη και άρα μεταβλητά εσωτερικά μηχανικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με το βαθμό ρηγμάτωσης και διαρροής του διαμήκους χάλυβα. Για λόγους συντομίας παρατίθεται μιά περίληψη των παραδοχών του στοιχείου. Για πλέον λεπτομερή περιγραφή των δυνατοτήτων του στοιχείου 15 βλέπε το Εγχειρίδιο χρήσης του DRAIN-2DX (Allahabadi et al., 1988).

Το στοιχείο τύπου 15 είναι ραβδόμορφο στοιχείο με δυνατότητα διακριτοποίησης σε εσωτερικές διατομές ελέγχου, όπου η κάθε μία από αυτές διακριτοποιείται περαιτέρω σε ίνες υπό μονοαξονική ένταση με δεδομένα ανελαστικά χαρακτηριστικά τάσεων – παραμορφώσεων (Σχήμα 7.5). Κάνοντας χρήση της βασικής παραδοχής της επιπεδότητας των διατομών και θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή των μηχανικών χαρακτηριστικών (αξονική και καμπτική δυσκαμψία) μεταξύ των διατομών ελέγχου, είναι δυνατή η ολοκλήρωση των εσωτερικών παραμορφώσεων και των εφαιπομενικών ατενείων κατά το μήκος του στοιχείου, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό της συνολικής ατένειας του στοιχείου σε γενικευμένη καμπτική και αξονική καταπόνηση. Όπως και στο στοιχείο 02, στα άκρα του στοιχείου είναι δυνατός και ο καθορισμός άκαμπτων κόμβων, κάτι που δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα. Τα χαρακτηριστικά των διατομών ελέγχου καθορίζονται από τη σχέση τάσεων παραμορφώσεων των υλικών (χάλυβας, σκυρόδεμα περισφιγμένο και απερίσφιγκτο και FRP), όπως περιγράφηκαν ήδη κατά την επίλυση των διατομών της οποίας επέκταση αποτελεί το προσομοίωμα αυτό.

Σε αντίθεση με το στοιχείο τύπου 02, το στοιχείο δύναται να προσομοιώσει τις επιρροές της αξονικής δύναμης στην δυσκαμψία (π.χ. λόγω ρηγμάτωσης). Το συγκεκριμένο στοιχείο όμως αδυνατεί – λόγω επιπεδότητας των διατομών - να

προσομοιώσει φαινόμενα επιρροής της διάτμησης. Επί πλέον, φαινόμενα ολίσθησης του χάλυβα στα άκρα του στοιχείου εν επαφή με τους κόμβους είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη με συγκεντρωμένες αρθρώσεις στα άκρα εν σειρά, αλλά όχι εσωτερικά, μεταξύ διατομών.

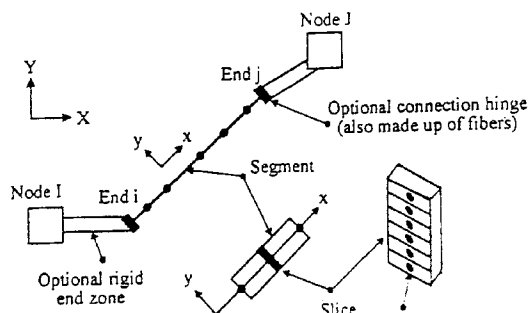


FIGURE E15.1 ELEMENT MODEL

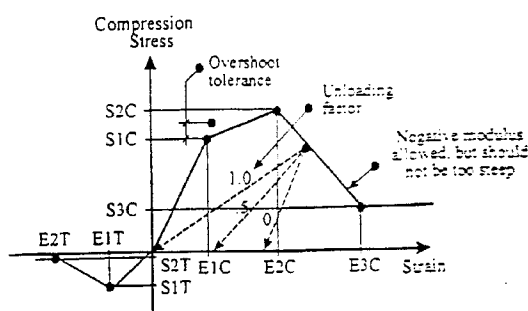


FIGURE E15.2 CONCRETE MATERIAL PROPERTIES

Σχήμα 7.5 Το στοιχείο τύπου 15 (από Allahabadi et al., 1988) :

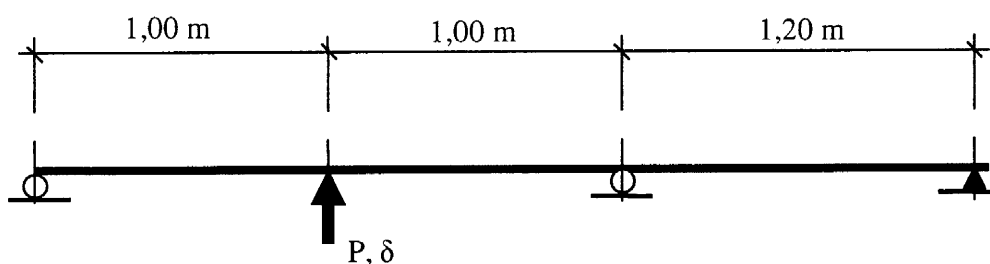
- Διακριτοποίηση του φορέα σε ελεγχόμενες διατομές.
- Διακριτοποίηση διατομών με προσομοίωση ινών.
- Καταστατικός νόμος σκυροδέματος.

Η κάθε διατομή ελέγχου συμπεριφέρεται ουσιαστικά σαν το προσομοίωμα που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 7.1 για την αποτίμηση των χαρακτηριστικών των διατομών. Λόγω της δυνατότητας καθορισμού κατανεμημένης βλάβης (με εσωτερικές ζώνες ρηγμάτωσης και διαρροής του εκάστοτε τμήματος του δοκιμίου), δεν είναι απαραίτητη η διακριτοποίηση του φορέα σε πολλαπλά λεπτομερή υποτμήματα σταθερών ιδιοτήτων – υποστοιχεία, όπως έγινε με το προσομοίωμα στοιχείων τύπου 02: στην περίπτωση του παρόντος αναλυτικού προσομοιώματος, ο φορέας διακριτοποιείται με τρία μόνο στοιχεία τύπου 15, που καθορίζονται αποκλειστικά από τις οριακές συνθήκες στήριξης και φόρτισης

της δοκού (Σχήμα 7.6). Η φόρτιση του δοκιμίου εφαρμόζεται σαν ελεγχόμενη μετατόπιση δ του κόμβου εφαρμογής του εμβόλου P , σε απόσταση ενός μέτρου από τη στήριξη. Σύμφωνα με τη δυνατότητα του πεπερασμένου στοιχείου, το κάθε ένα από τα τρία στοιχεία διακριτοποιείται σε έξη άνισα τοποθετημένες διατομές ελέγχου, που απέχουν από τα άκρα του στοιχείου:

ι) για μεν τα ακραία στοιχεία, σε αποστάσεις 40%, 20%, 20%, 10% και 10% του καθαρού μήκους του στοιχείου (με κατοπτρική διάταξη για το αντιδιαμετρικό στοιχείο,

ιι) για δε το στοιχείο που προσομοιώνει το εσωτερικό τμήμα, σε συμμετρικές αποστάσεις 10%, 20%, 40%, 20% και 10% του καθαρού μήκους, λόγω της αντισυμμετρίας του διαγράμματος ροπών στο τμήμα αυτό και της ύπαρξης ενός σημείου μηδενισμού των ροπών στο κέντρο, με ελαστικά καμπικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 7.6).



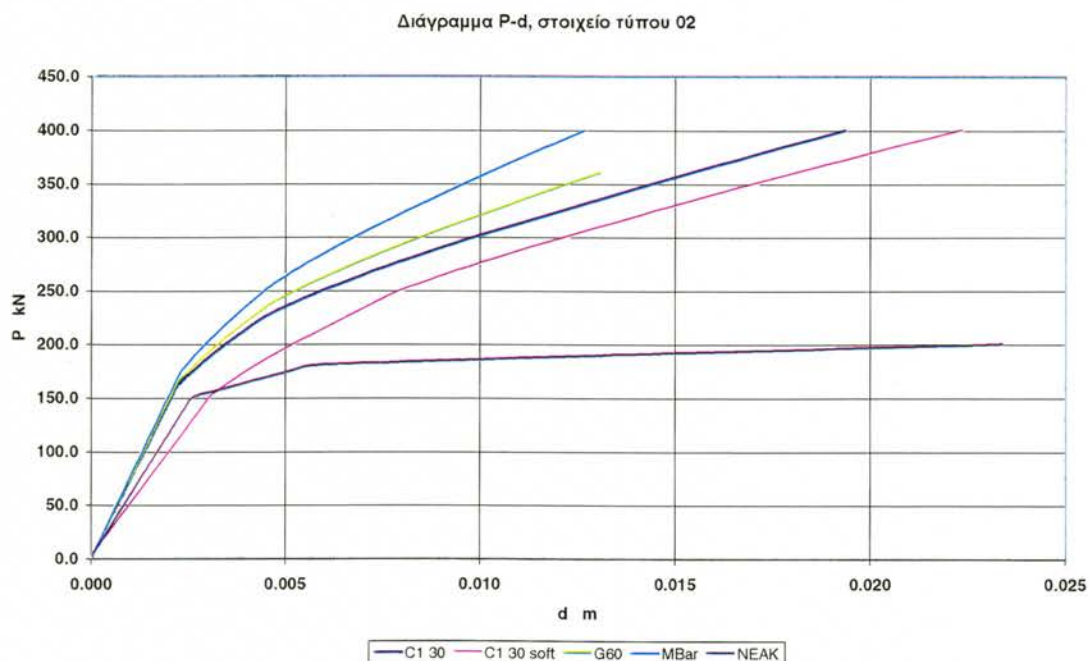
Σχήμα 7.6. Διακριτοποίηση του δοκιμίου με στοιχεία τύπου 15.

Κάθε διατομή καταπονείται σε μονοαξονική κάμψη και μηδενική αξονική, είναι δε διακριτοποιημένη σε τριάντα τέσσερις ίνες περισφιγμένου σκυροδέματος τύπου C02, έξη ίνες απερίσφιγκτου σκυροδέματος (από τρεις στην άνω και κάτω παρειά) τύπου C01, δεκαεπτά ίνες απερίσφιγκτου σκυροδέματος τύπου C01 καθύψος και δύο ίνες χάλυβα, συνολικού εμβαδού $4,50 \text{ cm}^2$ ($3\Phi 14$) άνω και κάτω, σε απόσταση 3 cm από τις παρειές. Όπου απαιτείται η προσθήκη υφάσματος INOΠ, αυτό καθορίζεται σαν ισοδύναμη ίνα ελαστικού υλικού τύπου

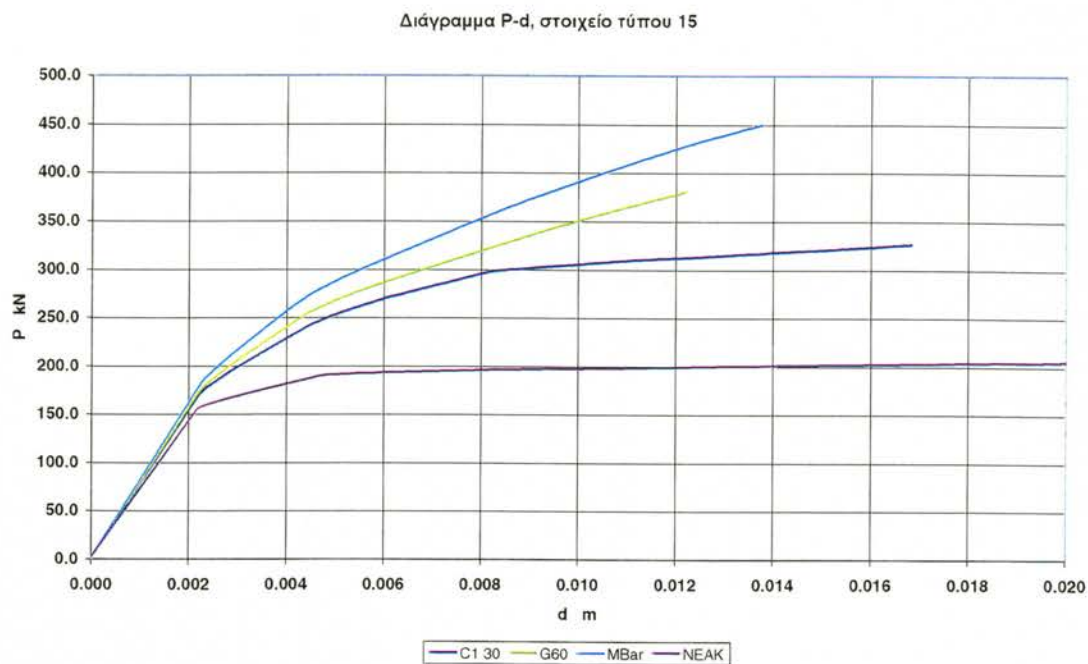
S02, στην αντίστοιχη θέση που αναλογεί (ακραίες παρειές ή καθύψος) με αντίστοιχο ονομαστικό εμβαδό, ανάλογα με το δοκίμιο που αναλύεται.

Τα ανελαστικά χαρακτηριστικά των διατομών ελέγχου καθορίζονται με βάση τις μέσες τιμές των επί μέρους υλικών και τις ονομαστικές τιμές των ΙΝΟΠ, χρησιμοποιώντας τις καταστατικές δυνατότητες προσομοίωσης του πεπερασμένου στοιχείου 15:

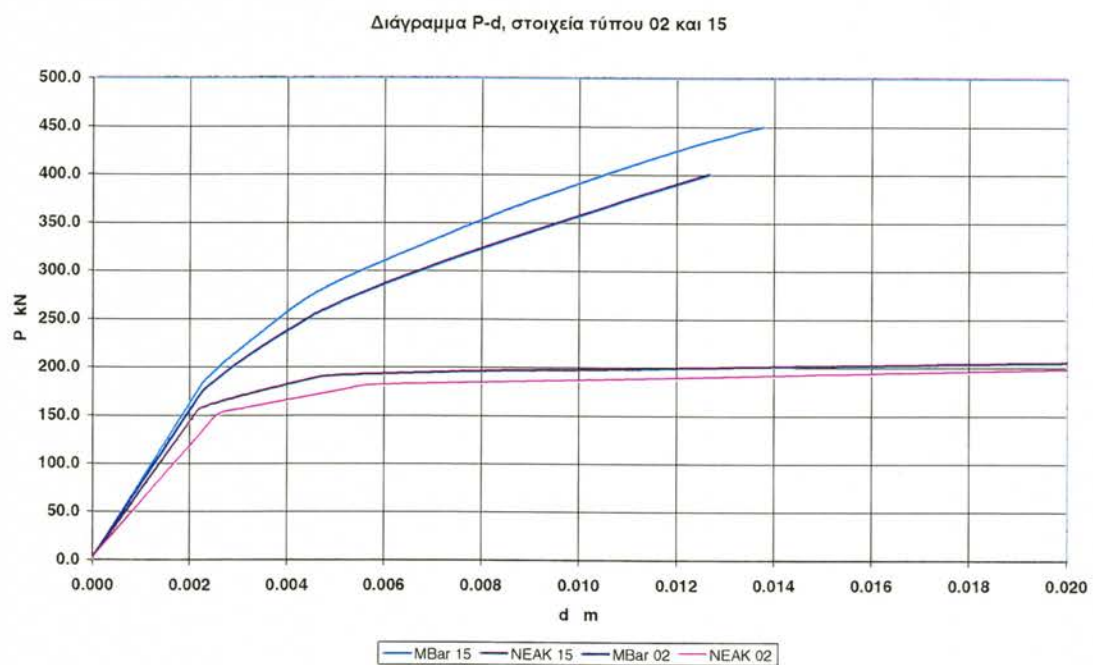
- Σκυρόδεμα: Πενταγραμμικό υλικό με σταδιακά φθίνουσα δυσκαμψία, που προσομοιώνει τη ρηγμάτωση και θλιπτική αστοχία του υλικού συναρτήσει του εγκάρσιου ογκομετρικού ποσοστού συνδετήρων (κατά Mander , Priestley and Park (1983)). Το υλικό έχει μηδενική εφελκυστική αντοχή και παραμένουσα θλιπτική αντίσταση σε ποσοστό 20% της μέγιστης. Διακρίνεται σε δύο τύπους, το απερίσφιγτο σκυρόδεμα επικάλυψης τύπου C01 και το περισφιγμένο σκυρόδεμα τύπου C02.
- Χάλυβας: Ελαστοπλαστικός με γραμμική κράτυνση μετά το σημείο κράτυνσης, ως την αστοχία. Υλικό συμμετρικής απόκρισης σε θλίψη και εφελκυσμό (χάλυβας τύπου S01).



Σχήμα 7.7. Πρόβλεψη μονοτονικής συμπεριφοράς με στοιχεία τύπου 02.



Σχήμα 7.8 Αναλυτική πρόβλεψη της μονοτονικής συμπεριφοράς με τα στοιχεία τύπου 15.



Σχήμα 7.9 Σύγκριση της πρόβλεψης συμπεριφοράς μεταξύ των στοιχείων τύπου 02 και 15, διατομές NEAK και MBar.

- Υφασμα ΙΝΟΠ: Ελαστικά ως την αστοχία, χωρίς αντίσταση σε θλίψη. Η εφελκυστική αστοχία καθορίζεται από τις ονομαστικές χαρακτηριστικές τιμές παραμορφώσεων που δίνονται από τον κατασκευαστή (ελαστικό υλικό τύπου χάλυβα με ιδιότητες ΙΝΟΠ τύπου S02).

Η αναλυτική πρόβλεψη της μονοτονικής συμπεριφοράς των τεσσάρων δοκιμίων με τη διακριτοποίηση που περιγράφηκε, και στοιχεία τύπου 02 και 15 δείχνεται στα Σχήματα 7.7, 7.8 και 7.9. Ειδικότερα, στο Σχήμα 7.9 συγκρίνονται οι προβλέψεις μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων συγκεντρωμένης και κατανεμημένης βλάβης (02 και 15) για τα δοκίμια **NEAK** και **MBAR**.

Από τις αναλυτικές προβλέψεις παρατηρείται ότι σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, η πρόβλεψη των αντοχών του δοκιμίου είναι σε κάθε περίπτωση άριστη, εφόσον χρησιμοποιούνται μέσες τιμές των αντοχών των υλικών. Το αντίθετο συμβαίνει όμως όσον αφορά τις παραμορφώσεις και το σημείο μεγιστοποίησης της αντοχής. Παραβλέποντας το γεγονός ότι τα διαμήκη σύνθετα ΙΝΟΠ στο προσομοίωμα ενεργούν έως την ονομαστική αστοχία τους σε εφελκυσμό, οι αναλύσεις δείχνουν ότι οι προβλέψεις των προσομοιωμάτων 02 και 15 (οι οποίες είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, με το στοιχείο 15 να είναι, αρχικά, πλέον δύσκαμπτο, λόγω της μέσης δυσκαμψίας *EI* που εδόθη σαν δεδομένη στις διατομές του **NEAK**), αδυνατούν να πλησιάσουν τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία είναι γενικά 2. έως 4. φορές πλέον εύκαμπτα από τις αναλυτικά προβλεπόμενες παραμορφώσεις.

Σύμφωνα με περαιτέρω αναλύσεις φαίνεται ότι α) ένα 50% του σφάλματος αποδίδεται στην απεριόριστη δυσκαμψία των στηρίξεων του προσομοιώματος (κάτι που στην πράξη δεν επιτυγχάνεται), β) ένα περαιτέρω ποσοστό αποδίδεται στην ατελή προσομοίωση της πρόσφυσης μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος – η οποία σε αυτά τα προσομοιώματα θεωρείται πλήρης, και γ) στην ελλιπή προσομοίωση της διατμητικής ευκαμψίας των στοιχείων μετά τη ρηγμάτωση, που χαρακτηρίζει τα προσομοιώματα επίπεδης διατομής κάμψης γενικώς, ενώ δ)

ένα εξίσου σημαντικό τμήμα του σφάλματος αποδίδεται στην παραδοχή της πλήρους συμβατότητας σκυροδέματος, χάλυβα και ΙΝΟΠ, κάτι που επίσης δεν είναι σωστό σε όλη το εύρος των επιβεβλημένων παραμορφώσεων.

7.3 Αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δοκιμίων με οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία

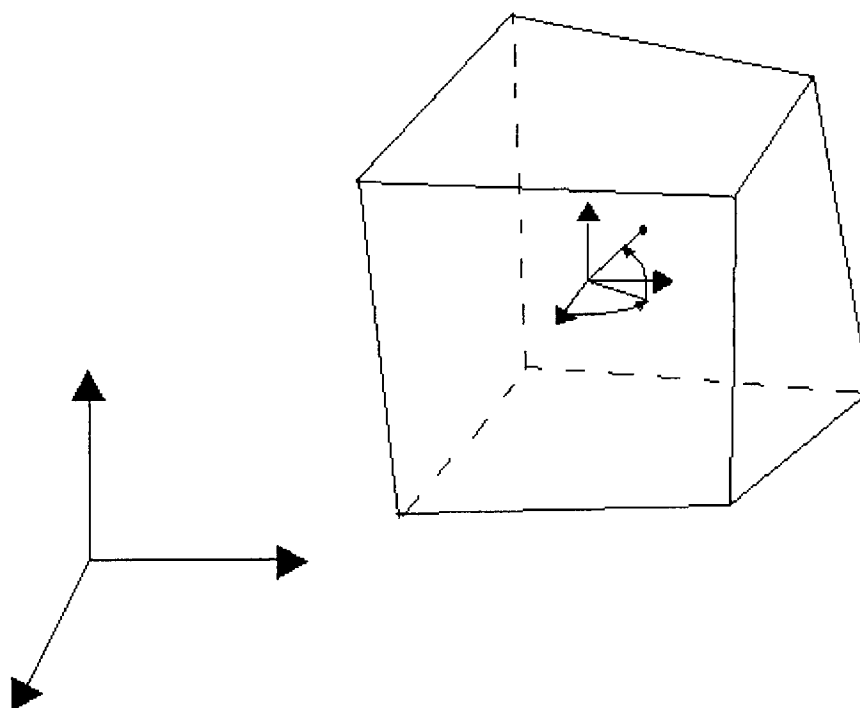
Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων κύβου αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο ακριβέστερης ανάλυσης των κατασκευών από ΟΣ. Με την ανάπτυξη σχετικά φτηνών υπολογιστικών συστημάτων (μεμονωμένων ή κατανεμημένων) με μεγάλη υπολογιστική δυνατότητα, αρχίζει να βρίσκει εφαρμογές στη λύση προβλημάτων που μέχρι πριν λίγα χρόνια ήταν πολύ δύσκολο, έως αδύνατο να επιλυθούν. Η παρούσα διερεύνηση έχει σαν σκοπό την εκτίμηση της αξιοπιστίας της αναλυτικής πρόβλεψης των δοκιμίων έως την αστοχία, με ένα προσομοίωμα λεπτομερών πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Έκδοση 7.0 (ANSYS Inc, 2004). Οι παραδοχές, τα συγκριτικά αποτελέσματα και ένα ευρύτερο τμήμα της αναλυτικής διερεύνησης δίδονται αλλού (Τσόλκας, 2005).

7.3.1 Γεωμετρικό προσομοίωμα των δοκιμίων

Το κάθε ένα από τα τέσσερα δοκίμια διακριτοποιείται συνολικά σε κάνναβο $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, με οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου SOLID65, για το σκυρόδεμα, και ξεχωριστά, με ραβδόμορφα στοιχεία ελκυστήρα τύπου LINK10, για τους οπλισμούς, συμβατικούς και μη (ΙΝΟΠ).

Το στοιχείο SOLID65_ Το στοιχείο χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη μόνωση στερεών με ή χωρίς ράβδους οπλισμού (*Rebars*). Το στερεό είναι σε θέση να ρηγματωθεί σε εφελκυσμο και να συνθλιβεί σε θλίψη. Στις εφαρμογές του σκυροδέματος, η στερεά ικανότητα του στοιχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει το σκυρόδεμα ενώ η δυνατότητα προσομοίωσης οπλισμών είναι διαθέσιμη για τη διαμόρφωση της συμπεριφοράς του οπλισμού σε

κατανεμημένη μορφή μέσα στο στερεό. Άλλες περιπτώσεις για τις οποίες το στοιχείο έχει εφαρμογή είναι: ινοπλισμένα σύνθετα υλικά (όπως, πχ το fiberglass), και γεωλογικά υλικά (όπως ο βράχος). Το στοιχείο ορίζεται από οκτώ κόμβους, με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, που μεταφράζονται στις κομβικές μετατοπίσεις ως προς τις διευθύνσεις X, Y, και Z (Σχ. 7.10).



Σχήμα 7.10 Το στοιχείο SOLID65 του λογισμικού ANSYS.

Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι παρόμοιο με το τρισδιάστατο δομικό στερεό στοιχείο SOLID45, με την προσθήκη της δυνατότητας ρηγμάτωσης και σύνθλιψης καθώς και την προσθήκη του εσωτερικά κατανεμημένου οπλισμού. Για τον καθορισμό του οπλισμού είναι δυνατόν να καθοριστούν μέχρι τρεις διαφορετικές προδιαγραφές κατανεμημένου ογκομετρικού ποσοστού οπλισμού (*Rebar*) σε τρεις ανεξάρτητες διευθύνσεις ανά στοιχείο. Η σημαντικότερη δυνατότητα του στοιχείου αυτού είναι η επεξεργασία των μη γραμμικών ιδιοτήτων των υλικών. Το σκυρόδεμα είναι ικανό να ρηγματωθεί (σε τρεις ορθογώνιες διευθύνσεις), να συνθλιβεί, να παραμορφωθεί πλαστικά και να εμφανήσει φαινόμενα ερπυσμού. Οι κατανεμημένοι οπλισμοί είναι ικανοί να

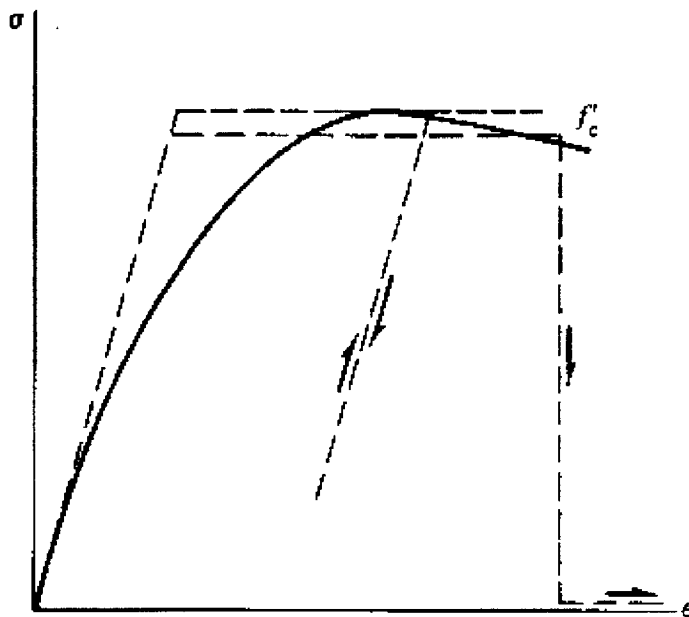
εφελκυσθούν, να συμπιεσθούν, αλλά όχι να ενταθούν εγκαρσίως. Είναι επίσης δυνατόν να παρουσιάσουν πλαστικές παραμορφώσεις και ερπυσμό.

Η γεωμετρία, οι θέσεις των κόμβων, και το σύστημα συντεταγμένων για αυτό το στοιχείο παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.10. Το στοιχείο καθορίζεται από οκτώ κόμβους και τις ισοτροπικές ιδιότητες του υλικού. Χρησιμοποιώντας την εντολή MAT εισάγονται οι καταστατικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα, υπό μορφή τύπων υλικού. Οι προδιαγραφές των *Rebar* περιλαμβάνουν για κάθε διεύθυνση, τον αριθμό του τύπου του υλικού (MAT), το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού (VR), που ορίζεται ως ο όγκος του *Rebar* διαιρεμένος με το συνολικό όγκο του στοιχείου και τις γωνίες προσανατολισμού των οπλισμών ως προς x , z και z (THETA, PHI). Οι προσανατολισμοί των *Rebar* μπορούν να ελεγχθούν γραφικά με την εντολή /ESHAPE.

Το στοιχείο LINK10. Το στοιχείο αυτό είναι ένα στοιχείο ράβδου στο χώρο, με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, που έχει το μοναδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός διγραμμικού μητρώου ακαμψίας, με συνέπεια να συμπεριφέρεται σαν ένα μονοαξονικό στοιχείο, που εντείνεται μόνο σε εφελκυσμό ή μόνο σε θλίψη. Το στοιχείο ορίζεται από δύο κόμβους, το εμβαδόν διατομής του, μια αρχική πίεση (για την επίλυση καλωδιωτών κατασκευών) και τις ισοτροπικές ιδιότητες του υλικού.

7.3.2 Καταστατική προσομοίωση του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα θεωρείται ότι συμπεριφέρεται σαν ισότροπο (αρχικά) ελαστοπλαστικό υλικό με διαφορετική αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, όπως καθορίζεται από το τροποποιημένο πενταπαραμετρικό κριτήριο αστοχίας των Willam και Warnke (1975) (Σχήμα 7.10). Βάσει του προσομοιώματος που



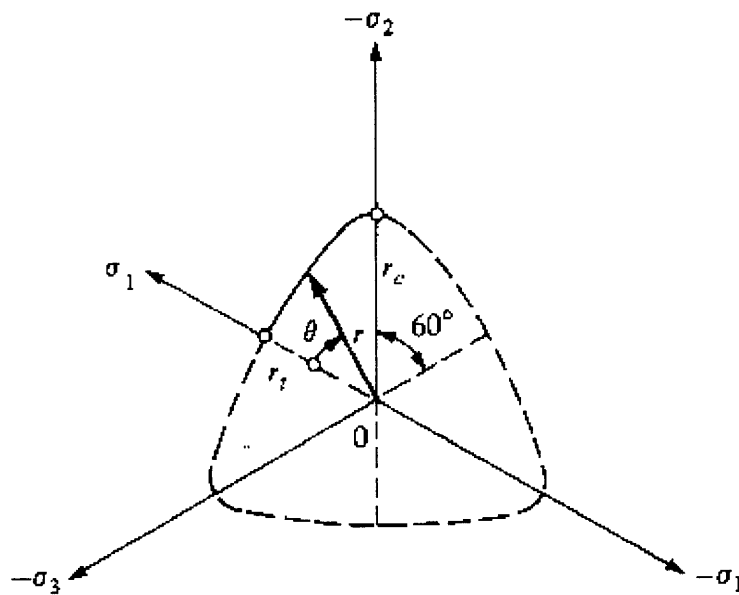
Σχήμα 7.11

Εξιδανικευμένη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα με πλαστική ροή μετά την αστοχία αντοχών.

υιοθετείται θεωρείται ότι το σκυρόδεμα θραύεται εντελώς μόλις προσπελασθεί η επιφάνεια θραύσης που καθορίζεται από το κριτήριο αστοχίας. Για να υπολογισθεί αυτή η περιορισμένη δυνατότητα πλαστικής ροής του σκυροδέματος πριν να αστοχήσει πλήρως, εισάγεται επί πλέον ένα τελείως πλαστικό (*perfectly plastic*) κατασταστικό πρότυπο. (Σχήμα 7.11)

Το κριτήριο αστοχίας ή θραύσης, που περιγράφεται σε όρους τάσεων, μπορεί να ληφθεί πως έχει τη μορφή μίας τέλειας πλαστικής επιφάνειας διαρροής. Ένα σημαντικό τμήμα της αριθμητικής ανάπτυξης προσομοιωμάτων έχει γίνει χρησιμοποιώντας (1) το κριτήριο von Mises, (2) το επεκτεταμένο κριτήριο von Mises (ή κριτήριο Drucker- Prager), και (3) το κριτήριο Coulomb ή το τροποποιημένο κριτήριο Coulomb. Εκτός από το κριτήριο von Mises, που χρησιμοποιείται ευρέως στην πλαστικότητα μετάλλων, όλα τα επόμενα κριτήρια διαρροής που αναπτύχθηκαν για το σκυρόδεμα ενσωμάτωσαν μια σχέση για τον υπολογισμό της τάσης διαρροής συναρτήσει της μέσης ορθής τάσης I_1 και της δεύτερης σταθεράς των διατμητικών τάσεων, J_2 .

Σχήμα 7.12 Το κριτήριο αστοχίας των Willam και Warnke (1975).



Οι Willam και Warnke (1975) πρότειναν αρχικά μια τριπαραμετρική επιφάνεια αστοχίας για το σκυρόδεμα, με καλύτερη δυνατότητα περιγραφής σε συνθήκες εφελκυσμού και χαμηλής θλίψης (Σχ. 7.12). Το τριπαραμετρικό κριτήριο βελτιώθηκε με την προσθήκη δύο πρόσθετων παραμέτρων για την περιγραφή των κυρτών ορίων της επιφάνειας, ώστε η επιφάνεια αστοχίας να μπορεί να εφαρμοστεί σε χαμηλές - καθώς επίσης και σε υψηλές - συνθήκες θλίψης.

Η γραμμική σχέση της μέσης τάσης σ_m , τ_m αντικαθίσταται τώρα από μια γενικότερη έκφραση, όπου τα εφελκυστικά και θλιπτικά όρια δίνονται από τις σχέσεις :

$$\frac{\tau_{mt}}{f'_c} = \frac{r_t}{\sqrt{5}f'_c} = a_0 + a_1 \frac{\sigma_m}{f'_c} + a_2 \left(\frac{\sigma_m}{f'_c} \right)^2 \quad \text{για } \theta = 0^\circ$$

$$\frac{\tau_{mc}}{f'_c} = \frac{r_c}{\sqrt{5}f'_c} = b_0 + b_1 \frac{\sigma_m}{f'_c} + b_2 \left(\frac{\sigma_m}{f'_c} \right)^2 \quad \text{για } \theta = 60^\circ$$

Το κριτήριο αυτό είναι προσαρμοσμένο και στο SOLID65 του λογισμικού ANSYS (2002) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Για να ορισθεί

πλήρως το υλικό στο SOLID65 ορίζονται εννέα παράμετροι, εκ των οποίων οι πέντε είναι ανεξάρτητες :

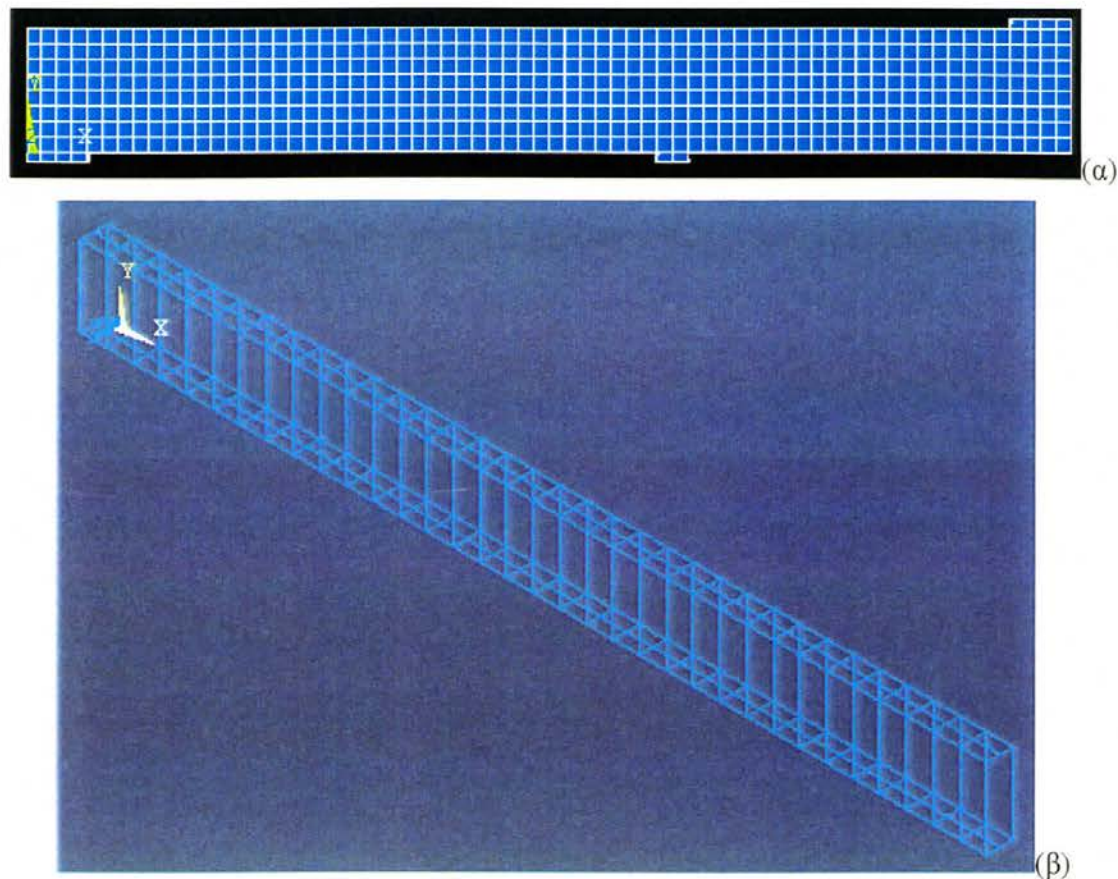
- 1) Ο συντελεστής μεταφοράς τριβής μέσω ανοικτής ρωγμής (*Shear transfer coefficient for an open crack*)
- 2) Ο συντελεστής μεταφοράς τριβής μέσω κλειστής ρωγμής (*Shear transfer coefficient for a closed crack*)
- 3) Η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή (*Uniaxial tensile cracking stress*)
- 4) Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή (*Uniaxial crushing stress*)
- 5) Η θλιπτική αντοχή υπό διαξονική τάση (*Biaxial crushing stress*)
- 6) Η αντοχή σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (*Ambient hydrostatic stress state*)
- 7) Η διαξονική θλιπτική αντοχή σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (*Biaxial crushing stress under the ambient hydrostatic stress state*)
- 8) Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (*Uniaxial crushing stress under the ambient hydrostatic stress state*)
- 9) Η απομείωση ακαμψίας σεεφελκυστική ρηγμάτωση (*Stiffness multiplier for cracked tensile condition*)

Από αυτές οι 3,4,5,7 και 8 είναι ανεξάρτητες. Οι χαρακτηριστικοί συντελεστές μεταφοράς τέμνουσας κυμαίνονται από 0,0 έως 1,0, με το 0,0 να αντιπροσωπεύει μια λεία ρωγμή (πλήρης απώλεια μεταφοράς τέμνουσας) και το 1,0 να αντιπροσωπεύει μια πλήρως τραχιά ρωγμή (καμία απώλεια μεταφοράς). Αυτός ο καθορισμός ισχύει και για τις κλειστές και για τις ανοικτές ρωγμές.

7.3.3 Αριθμητικό προσομοίωμα

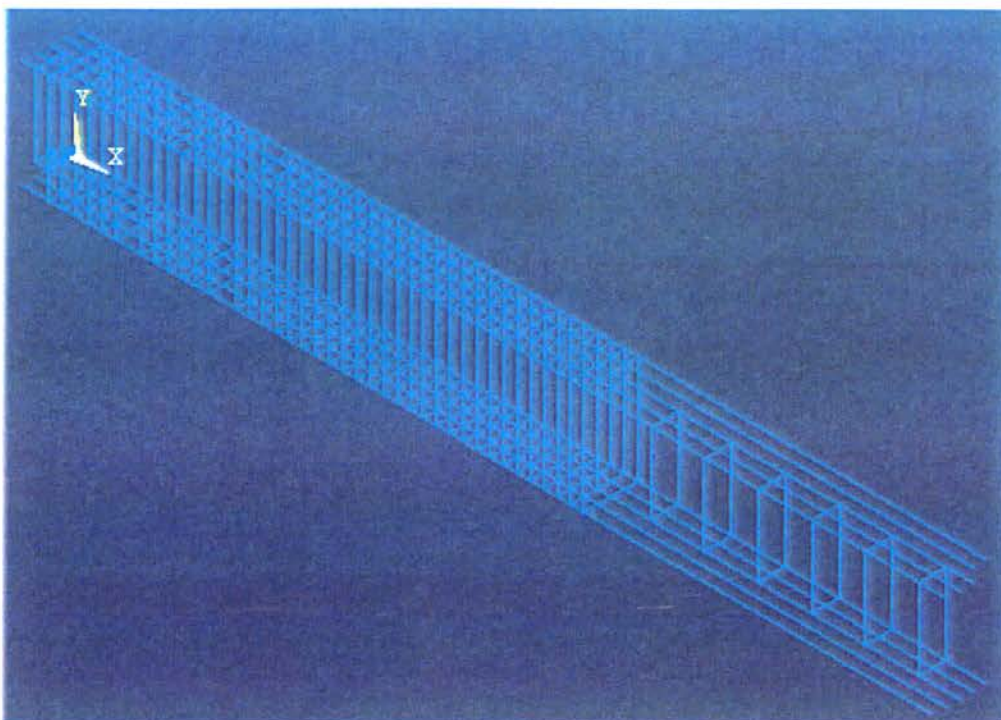
Το προσομοίωμα του δοκιμίου φαίνεται ενδεικτικά για το δοκίμιο **NEAK MONO** στα Σχήματα 7.13(α) και (β) για το σκυρόδεμα και το χάλυβα,

αντίστοιχα. Για τα υπόλοιπα δοκίμια, απλά αλλάζει η κατανομή των στοιχείων προσομοίωσης του εγκάρσιου οπλισμού – συμβατικού ή μη.

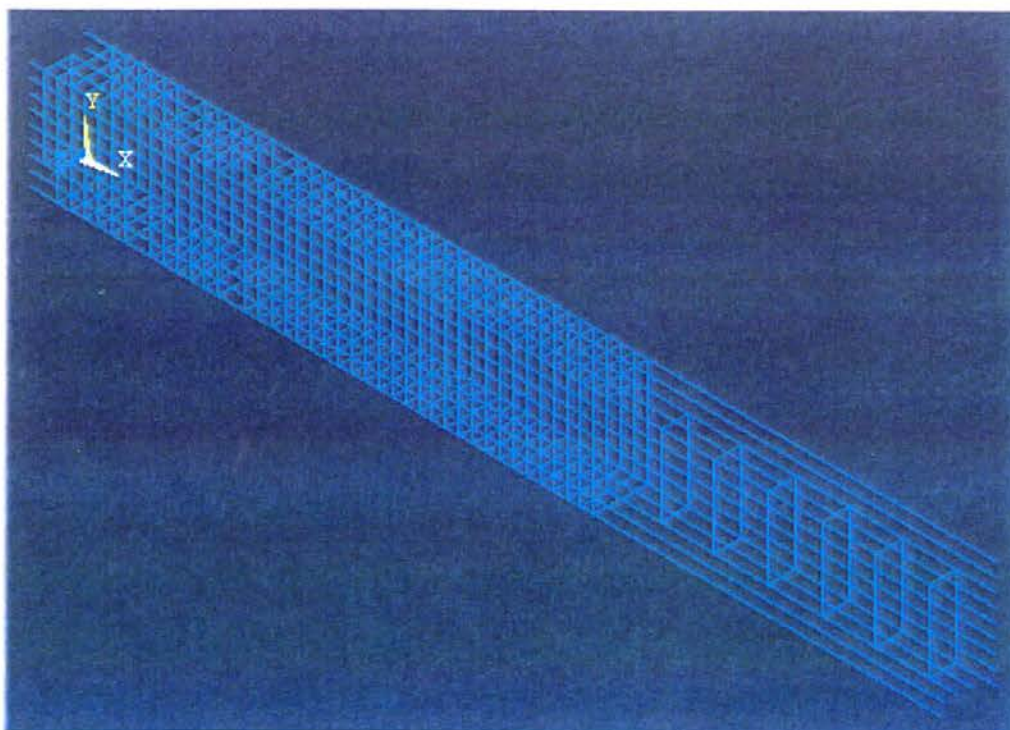


Σχήμα 7.13 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δοκιμίου **NEAK MONO**.

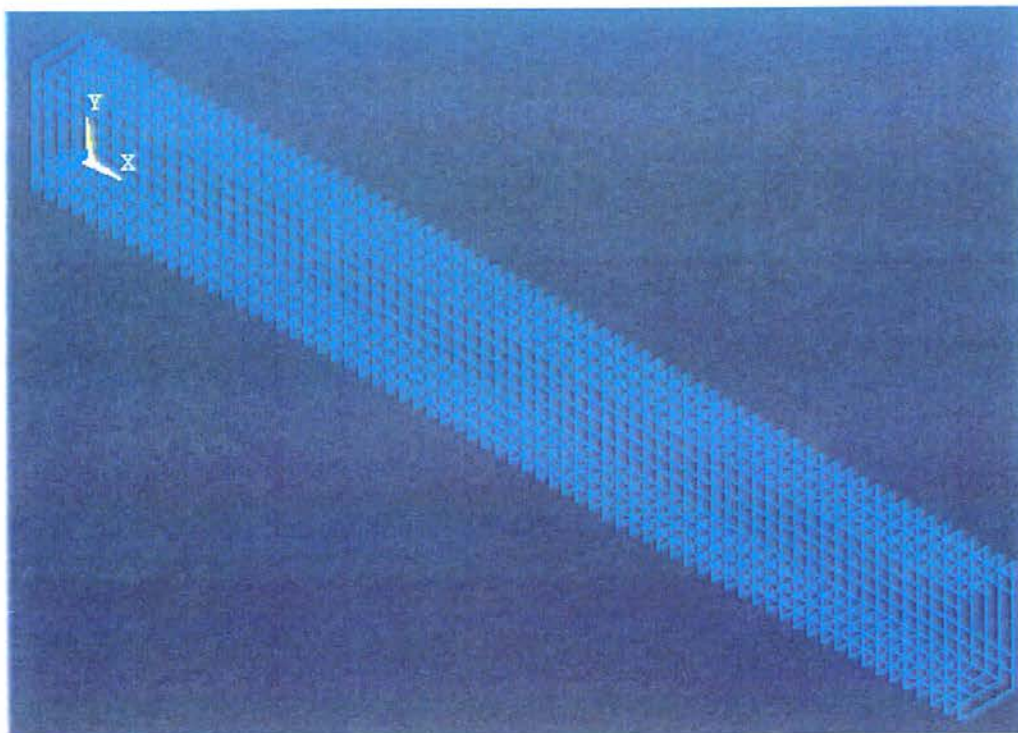
ελκυστήρα που προσομοιώνουν τον εγκάρσιο χάλυβα και τα ΙΝΟΠ (π.χ., Σχήματα 7.14 ως 7.17).



Σχήμα 7.14 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δοκιμίου C1-30 MONO.



Σχήμα 7.15 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δοκιμίου G60 MONO.



Σχήμα 7.16 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δοκιμίου MBAR MONO.

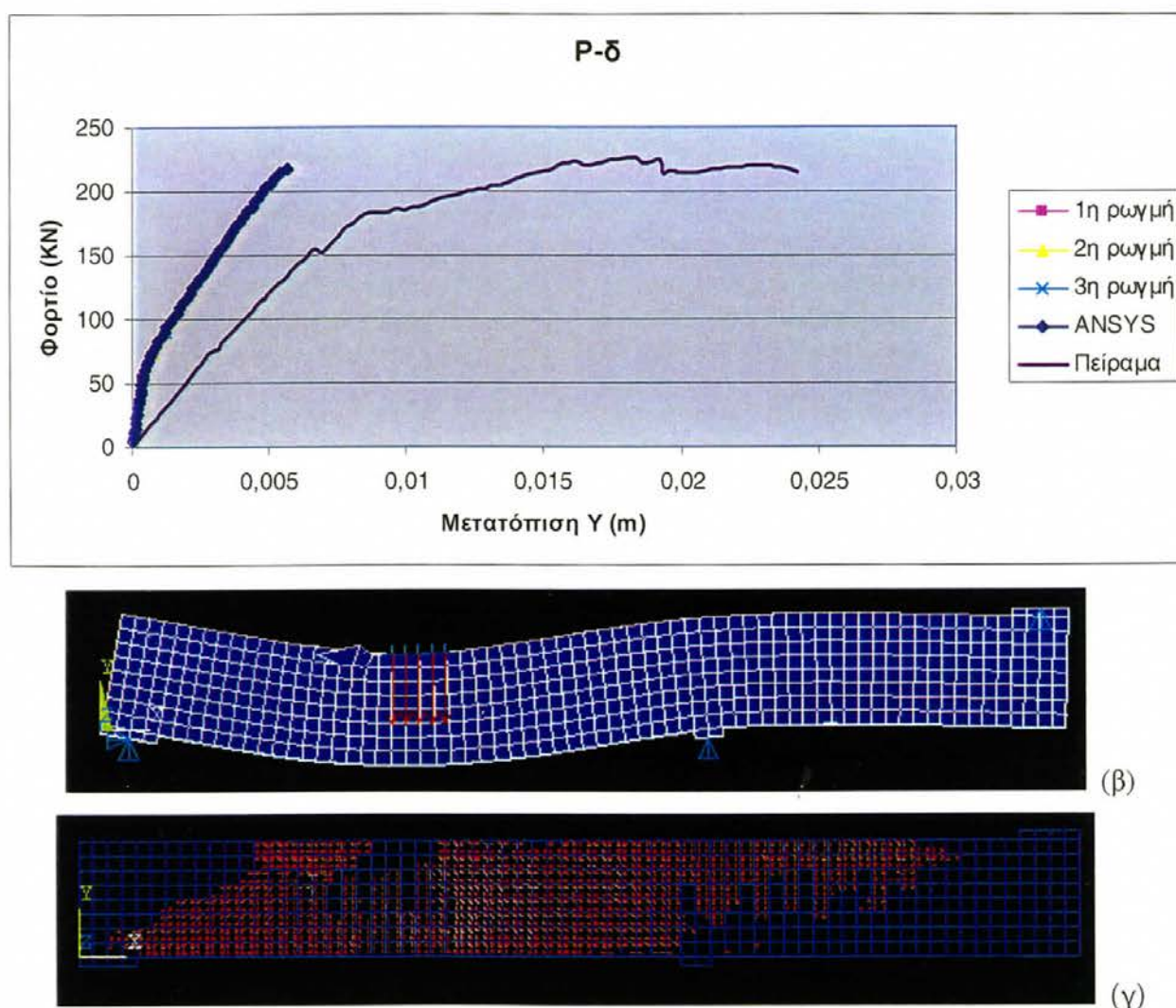
7.3.4 Αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων

Τα τέσσερα δοκίμια επιλύονται σε στατική ανελαστική ανάλυση μέχρι την αστοχία, όπου αστοχία θεωρείται η μη σύγκλιση της επίλυσης. Για αποφυγή τοπικών φαινομένων αστοχίας, που παρατηρήθηκαν αρχικά στις στηρίξεις και το σημείο εφαρμογής του φορτίου, προσομοιώνονται και τα χαλύβδινα ελάσματα έδρασης που χρησιμοποιήθηκαν στην πράξη για να κατανεύμουν τοπικά το φορτίο ή τις αντιδράσεις με οκτακομβικά ελαστικά στοιχεία από χάλυβα.

Η μέθοδος επίλυσης ήταν η εφαιτομενική μέθοδος προσεγγιστικών επιλύσεων κατά Newton – Raphson, με μεταβλητό βήμα. Το αρχικό φορτίο του δοκιμίου καθορίζεται στην αρχή σε ένα βήμα και το λογισμικό επιλύει το σύστημα σε τμήματα του φορτίου μέχρις εξάντλησής του, ανάλογα με την ευστάθεια του μητρώου του φορέα. Οι επιλύσεις περιελάμβαναν και μια ευρύτερη παραμετρική

ανάλυση που περιελάμβανε το μέγεθος διακριτοποίησης (5 και 10cm) του κανάβου, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, την εφελκυστική αντοχή και τους συντελεστές μεταφοράς τριβής σε ανοιχτές και κλειστές ρωγμές του υλικού. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίδονται αλλού (Τσόλκας, 2005).

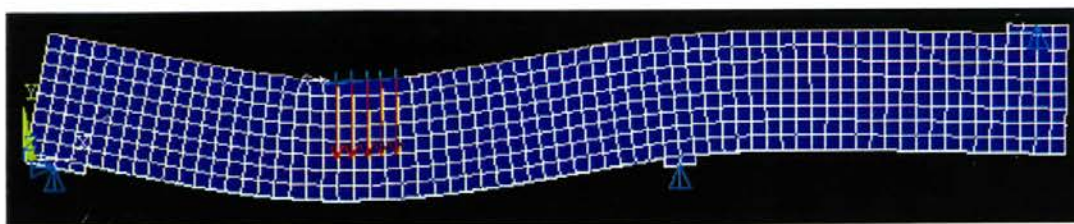
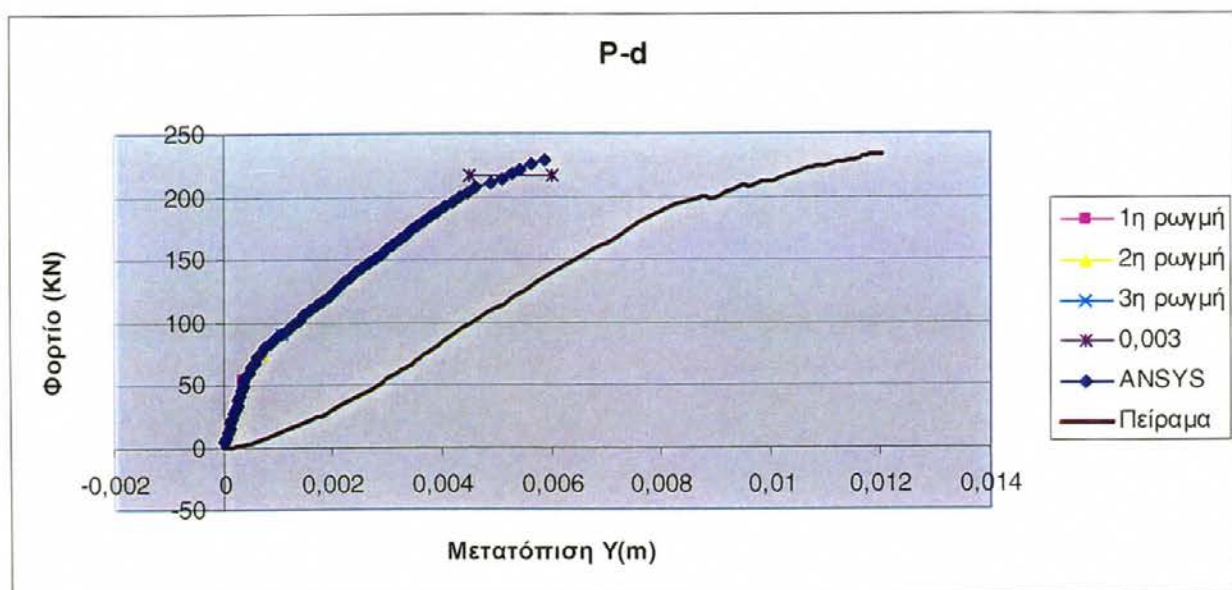
Απόκριση δοκιμίου NEAK MONO_ Το προβλεπόμενο διάγραμμα αντίστασης – παραμόρφωσης του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 7.17(α), μαζί με το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού (Σχ. 7.17(β)) και την κατανομή των ρωγμών στο τελευταίο βήμα σύγκλισης (Σχ. 7.17(γ)).



Σχήμα 7.17 Αριθμητικές προβλέψεις δοκιμίου NEAK MONO και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Το δοκίμιο είναι πολύ περισσότερο δύσκαμπτο από το πείραμα, αστοχεί δε (μη σύγκλιση) σε μέγιστο φορτίο 217 kN, πολύ κοντά στο πειραματικό των 222 kN και αντίστοιχη παραμόρφωση 5,6 mm.

Απόκριση δοκιμίου C1-30 MONO_ Το προβλεπόμενο διάγραμμα αντίστασης – παραμόρφωσης του δοκιμίου (σημειώνεται και σαν δοκίμιο CFRS) δίνεται στο Σχήμα 7.18(α), μαζί με το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού (Σχ. 7.18(β)) και την κατανομή των ρωγμών στο τελευταίο βήμα σύγκλισης (Σχ. 7.18(γ)).



(β)

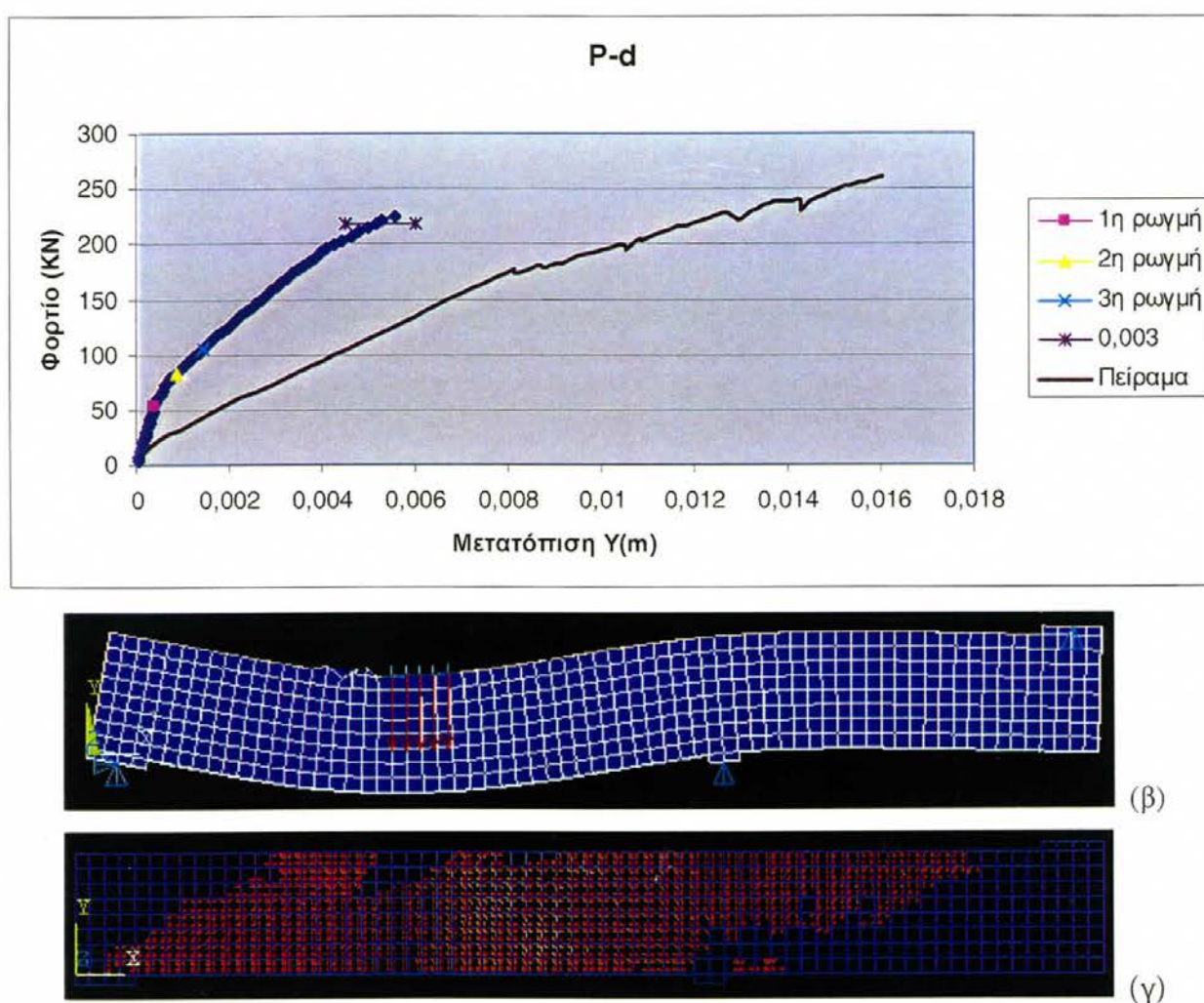


(γ)

Σχήμα 7.18 Αριθμητικές προβλέψεις δοκιμίου C1-30 MONO και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όπως και με το προηγούμενο δοκίμιο, το δοκίμιο είναι πολύ περισσότερο δύσκαμπτο από το πείραμα, αστοχεί δε (μη σύγκλιση) σε μέγιστο φορτίο 229 kN και αντίστοιχη παραμόρφωση 5,9 mm.

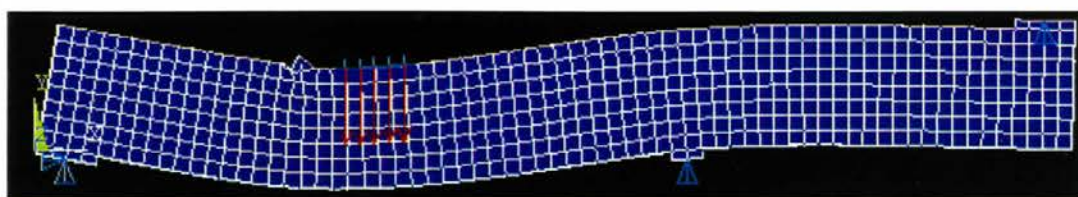
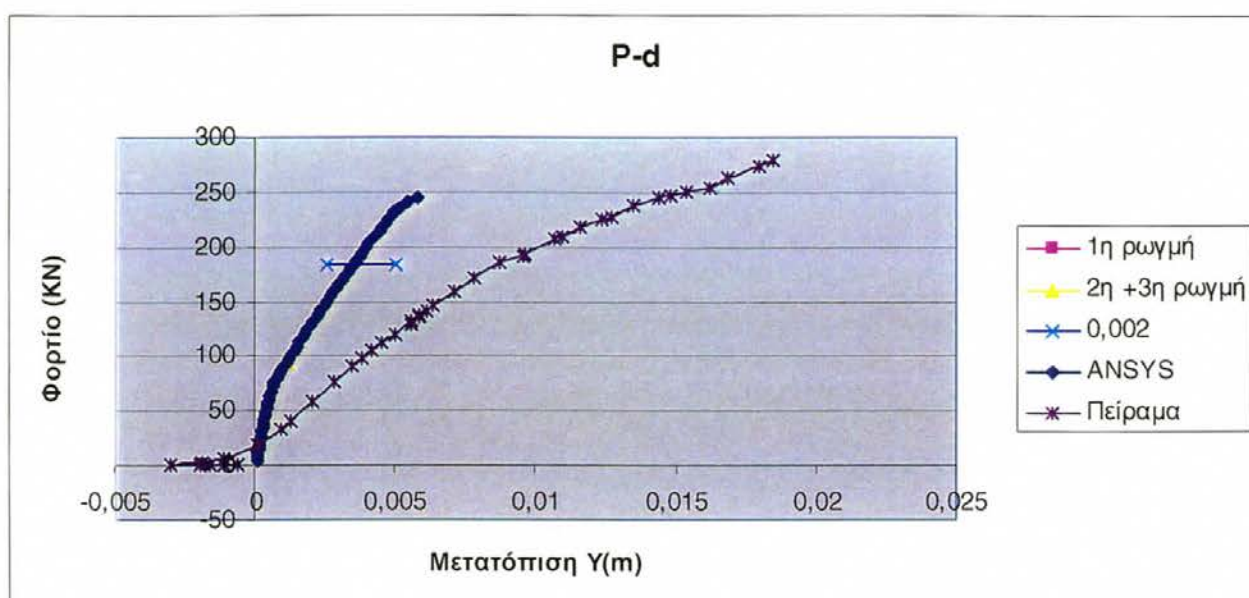
Απόκριση δοκιμίου G60 MONO_ Το διάγραμμα αντίστασης – παραμόρφωσης του δοκιμίου (σημειώνεται και σαν δοκίμιο GFRS) δίνεται στο Σχήμα 7.19(α), μαζί με το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού (Σχ. 7.19(β)) και την κατανομή των ρωγμών στο τελευταίο βήμα σύγκλισης (Σχ. 7.19(γ)).



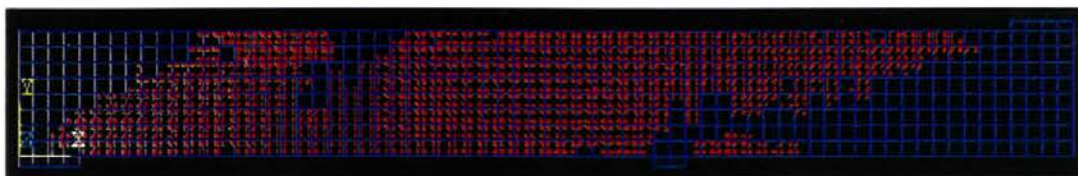
Σχήμα 7.19 Αριθμητικές προβλέψεις δοκιμίου G60 MONO και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όπως και με το προηγούμενο δοκίμιο, το προσομοίωμα είναι πολύ πιο δύσκαμπτο από το πείραμα, αστοχεί δε (μη σύγκλιση) σε μέγιστο φορτίο 225 kN και αντίστοιχη παραμόρφωση 5,5 mm.

Απόκριση δοκιμίου MBAR MONO_ Το διάγραμμα αντίστασης – παραμόρφωσης του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 7.20(α), μαζί με το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού (Σχ. 7.20(β)) και την κατανομή των ρωγμών στο τελευταίο βήμα σύγκλισης (Σχ. 7.20(γ)).



(β)



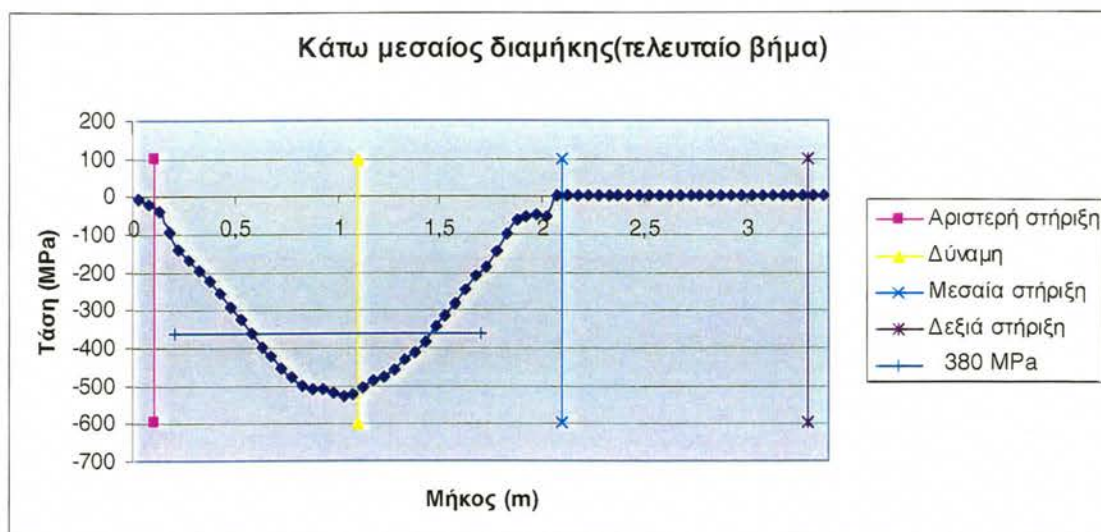
(γ)

Σχήμα 7.20 Αριθμητικές προβλέψεις δοκιμίου MBAR MONO και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όπως και με το προηγούμενο δοκίμιο, το δοκίμιο είναι πολύ περισσότερο δύσκαμπτο από το πείραμα, αστοχεί δε (κριτήριο μη σύγκλισης) σε μέγιστο φορτίο 244 kN και αντίστοιχη παραμόρφωση 5,8 mm.

Σχηματισμός ρωγμών_ Η πρώτη ρωγμή σχηματίζεται για όλα τα δοκίμια στο ίδιο σημείο, στο κάτω εφελκυόμενο μέρος της δοκού στην περιοχή φόρτισης, και στο ίδιο βήμα(14ο) για όλα τα δοκίμια. Διαφορές αρχίζουν να εμφανίζονται από τη δημιουργία της δεύτερης σειράς ρωγμών και μετά. Στα δοκίμια **NEAK** και **C1-30**, η δεύτερη ρωγμή ξεκινάει στο 20ο βήμα, στο **G60** στο 22ο και στο **MBAR** στο 25ο, όπως έχουνδειχθεί στα αντίστοιχα *P-δ*. Σε όλα τα δοκίμια, όμως, εμφανίζεται στην ίδια περιοχή, στο μεσαίο πρὸς κατώτερο τμήμα του δοκιμίου, κάτω από την περιοχή φόρτισης. Η εξαπλώση της πρώτης ρωγμής μέχρι το σημείο αυτό είναι παρόμοια σε όλες τις περιπτώσεις. Η τρίτη ρωγμή εμφανίζεται στην ίδια περιοχή με τις δύο πρώτες για το **NEAK**, το **C1-30** και το **MBAR**, στα βήματα 24,24 και 25 (ίδιο βήμα με τη δεύτερη) αντίστοιχα, ενώ στο **G60** εμφανίζεται στο επάνω τμήμα του δοκιμίου, πάνω από τη μεσαία στήριξη, στο 28ο βήμα.

Ένταση στους διαμήκεις οπλισμούς και ΙΝΟΠ_ Η κατανομή της τάσης για τον άνω διαμήκη οπλισμό είναι ίδια στα τέσσερα προσομοιώματα, εμφανίζοντας τη μέγιστη απαίτηση, που φτάνει τα όρια της κράτυνσης, αριστερά από το *P* προς την ακραία στήριξη, με το δεξιό τμήμα του δοκιμίου, μεταξύ της μεσαίας και ακραίας στήριξης, εντελώς αφόρτιστο και μη συμμετέχων στην παραλαβή φορτίων, σύμφωνα και με τις παραδοχές της ανάλυσης. Από το ποσοστό του διαρρευσαντος χάλυβα (στο Σχήμα 7.21 σημειώνεται το γεωμετρικό εἶδος του δοκιμίου πέραν όπου ο διαμήκης χάλυβας έχει ξεπεράσει το όριο διαρροῆς των 380 MPa) είναι εφικτό να υπολογισθεί το μήκος της πλαστικής άρθρωσης του δοκιμίου εκατέρωθεν του *P*, το οποίο υπολογίσθηκε παρόμοιο, με μικρές μόνο παραλλαγές, μεταξύ των τεσσάρων προσομοιωμάτων (μεταξύ 0,6 και 1,40 m).



Σχήμα 7.21 Κατανομή τάσης του κάτω διαμήκουσ οπλισμού στο δοκίμιο **NEAK**, κατά την αστοχία.

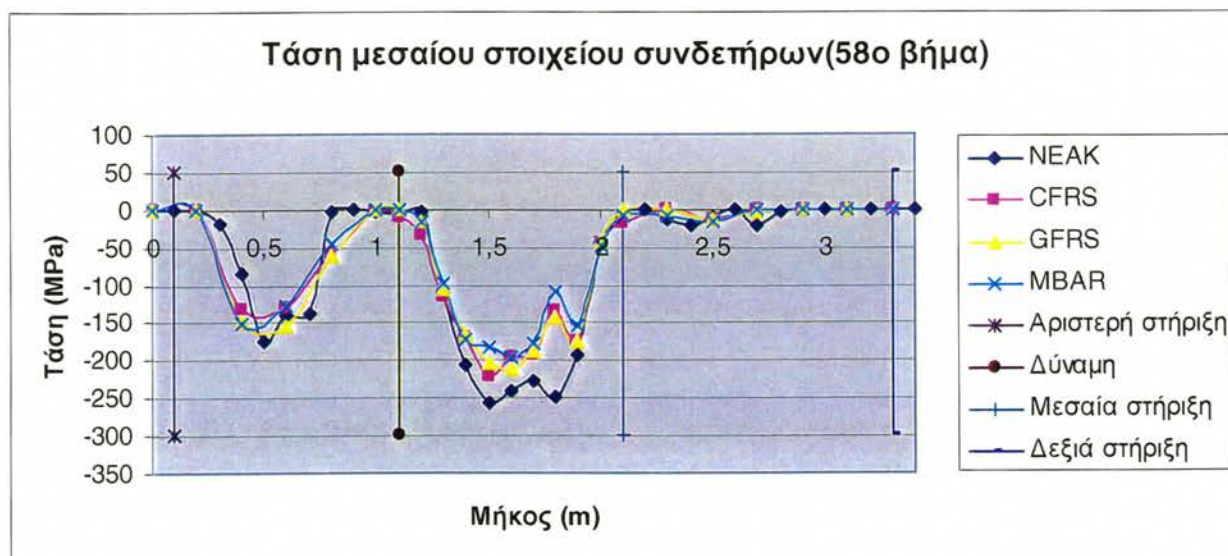
Την ίδια κατανομή τάσης με τον άνω διαμήκη, παρουσιάζουν και οι ενισχύσεις που βρίσκονται στο επάνω εφελκούμενο τμήμα της δοκού, με τη διαφορά ότι εδώ τοπικά σημειακά φαινόμενα αύξησης της έντασης, αριστερά από την περιοχή φόρτισης, είναι περισσότερο εμφανή και υπάρχει και στο άνω ΙΝΟΠ του **C1-30**, στο ανώτερο τμήμα του διαμήκουσ G60 για το δοκίμιο **G60 MONO** ενώ δεν εμφανίζονται στην ακρότατη ράβδο Gallileo του **MBAR MONO**.

Όσον αφορά την κατανομή της τάσης στον κάτω διαμήκη οπλισμό των προσομοιωμάτων και της ενίσχυσης στο κάτω εφελκούμενο τμήμα των δοκών, ισχύουν τα ίδια, για όλες τις περιπτώσεις. Η τάση εμφανίζει την ίδια μορφή, με μέγιστο λίγο αριστερότερα από το *P* ενώ το δεξιό τμήμα, από την μεσαία στήριξη και προς τη δεξιά στήριξη, να παραμένει εντελώς αφόρτιστο (Σχήμα 7.21).

Ένταση στους συνδετήρες και στα εγκάρσια ΙΝΟΠ_ Βάσει του προσομοιώματος, ο κάθε κατακόρυφος συνδετήρας προσομοιώνεται με διαδοχικά στοιχεία ελκυστήρα μήκους 50mm. Η κατανομή της τάσης στους συνδετήρες και το κατακόρυφο G60 που δρα παράλληλα με τους συνδετήρες δεν έχει παρόμοια μορφή για όλα τα προσομοιώματα, εξαρτάται δε σε κάθε

περίπτωση ανάλογα με τη θέση του συνδετήρα, ως προς τη διαμήκη διεύθυνση του δοκιμίου, αν βρίσκεται δηλαδή δεξιά, αριστερά ή στη θέση του φορτίου P .

Θεωρώντας καταρχήν σε απόλυτα μεγέθη τη μέση τάση στο μέσον του ύψους της δοκού κατά μήκος, που δείχνεται στο Σχήμα 7.2.2, φαίνεται ότι αφενός οι τιμές διαφέρουν μεταξύ των δοκιμίων, σε καμία περίπτωση δε, για το εύρος της ανάλυσης, δεν ξεπερνούν την τιμή διαρροής του υλικού (500 MPa για το **NEAK** και 380 MPa για τα δοκίμια **G60**, **MBAR** και **C1-30**). Η κατανομή των τιμών στο μέσον ακολουθεί δύο μέγιστα, σε απόσταση περίπου d αριστερά του P προς την ακραία στήριξη και δεξιά του P , σε ένα διάστημα της δοκού που περιλαμβάνει το σημείο καμψής (μηδενισμού των ροπών). Παρατηρείται επίσης ότι η τάση στο μέσον των συνδετήρων μηδενίζεται κάτω από το P . Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για το INOΠ G60, στις αντίστοιχες θέσεις, που δρα εν παραλλήλω με τον συμβατικό οπλισμό.



Σχήμα 7.22 Κατανομή τάσης μεσαίου στοιχείου συνδετήρων για τα τέσσερα προσομοιώματα, στο ίδιο βήμα επίλυσης (αρ. 58).

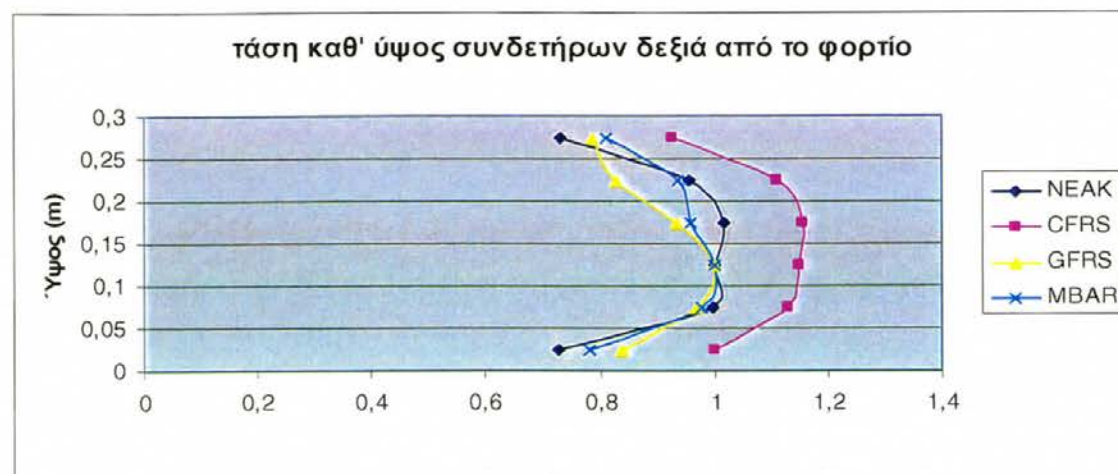
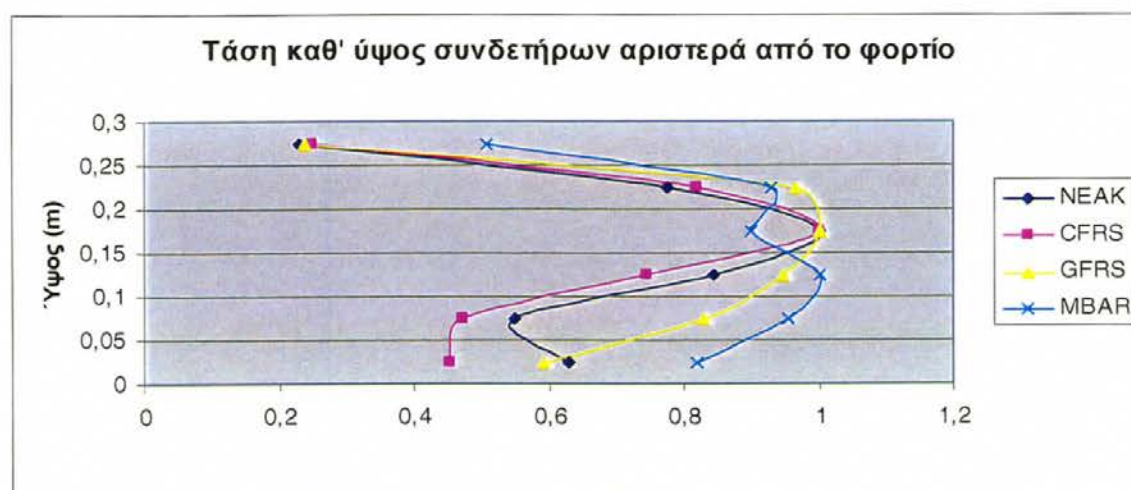
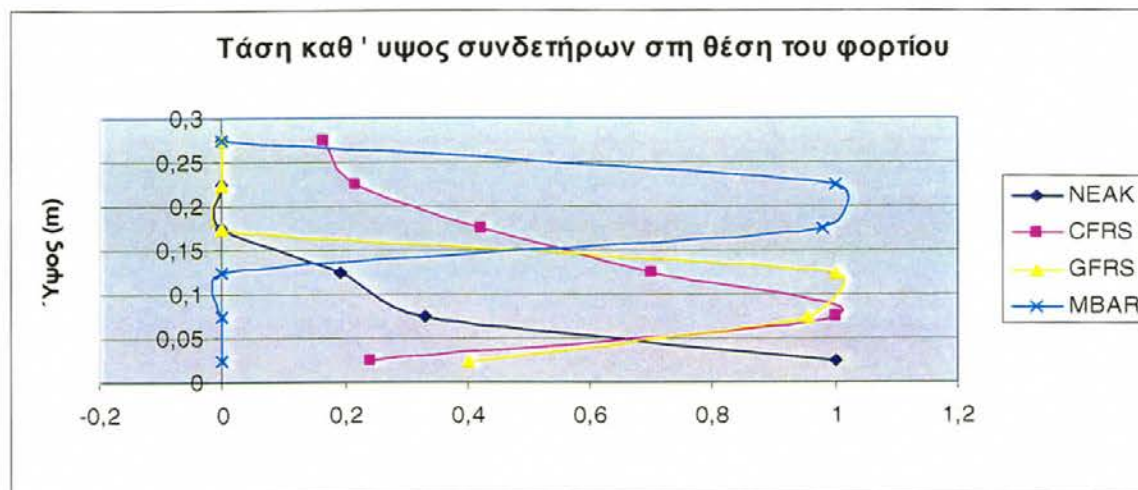
Σε ότι αφορά την κατακόρυφη κατανομή των τάσεων καθύψος σε συγκεκριμένες θέσεις συνδετήρων αριστερά, κάτω από και δεξιά του P (πριν από το σημείο καμψής), σε αποστάσεις $d/2$ μεταξύ τους, αυτές συγκρίνονται για τα τέσσερα δοκίμια στα Σχήματα 7.23 και 7.24, για τους συνδετήρες και τα INOΠ στην ίδια

θέση, αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε γενικές γραμμές τα εξής:

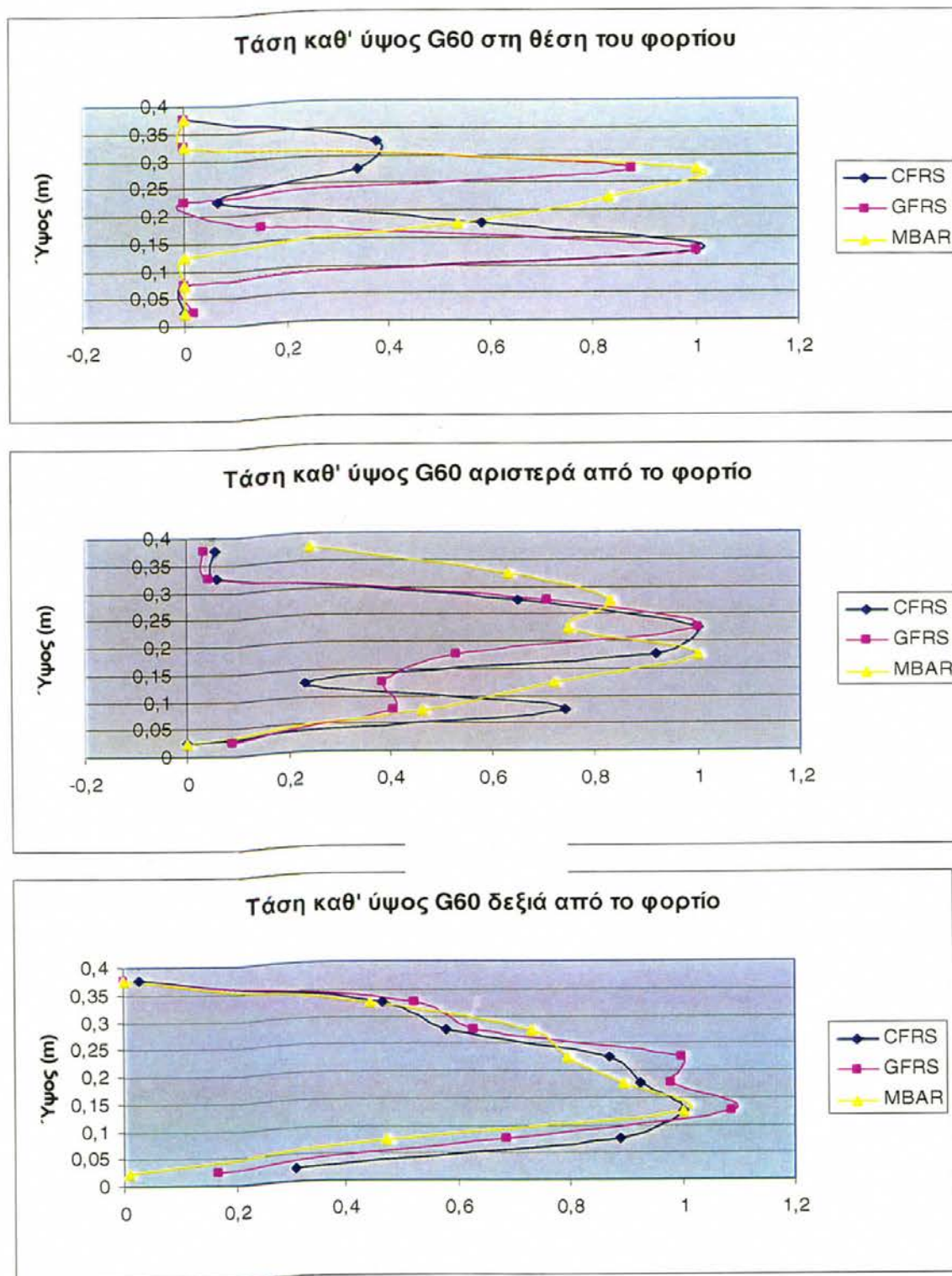
- Οι συνδετήρες που βρίσκονται στη θέση του φορτίου εμφανίζουν ισχυρή ανισοκατανομή καθ΄ ύψος της μέγιστης τάσης, ανάλογα με το δοκίμιο: τα **NEAK** και **C1-30** μεγιστοποιούνται στο θλιβόμενο τμήμα κάτω, το **G60** στο μέσον του ύψους της δοκού και προς τα κάτω ενώ το **MBAR** αντισυμμετρικά προς τα άνω, στον εφελκυσμό. Η διαφορετική κατανομή παραλαβής φορτίου αποδίδεται στη διαφορετική θέση του διαμήκη οπλισμού (στις παρειές αντί για άνω και κάτω) για τα δύο τελευταία, γεγονός που επηρεάζει την κατανομή φορτίων και της παραλαμβανόμενης διάτμησης.
- Οι συνδετήρες που βρίσκονται αριστερά από το φορτίο, προς την ακραία στήριξη, εμφανίζουν μέγιστη τάση στο άνω τμήμα τους, στην θλιβόμενη ζώνη, πλην των δοκιμίων **G60** και **MBAR** που εμφανίζουν ομοιόμορφη κατανομή καθ΄ ύψος με μικρές διακυμάνσεις. Σε αυτό το τμήμα οι διαφορές μεταξύ παραλαμβανόμενης τάσης από το INOP και τον συνδετήρα είναι σημαντικές, ακόμη και μεταξύ **G60** και **MBAR**.
- Αντίθετα, οι συνδετήρες που βρίσκονται δεξιά του P , εμφανίζουν σε όλες τις περιπτώσεις ομοιόμορφη κατανομή τάσεων, μεγιστοποιώντας την παραλαμβανόμενη τάση τους στο μεσαίο τμήμα τους ομοιόμορφα, και προς την κάτω θλιβόμενη ζώνη.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι τόσο ο λόγος του διατμητικού μήκους ανηγμένου M/V όσο και ο τρόπος ενίσχυσης στη διαμήκη διεύθυνση (ουδεμία, σημειακή άνω και κάτω, κατανεμημένη καθ΄ ύψος και σημειακή σε τέσσερα σημεία καθ΄ ύψος, αλλά με διαφορετική δυσκαμψία), επηρεάζουν τόσο τις μέγιστες απαιτήσεις όσο και την κατανομή τους καθ΄ ύψος και κατά μήκος του δοκιμίου. Λαμβάνοντας υπόψη και την ψαθυρότητα του

υλικού ενίσχυσης, κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν υπόψη αυτές οι ανισοκατανομές κατά το σχεδιασμό.



Σχήμα 7.23 Κατανομή της ανηγμένης τάσης (ως προς τη μέγιστη), των συνδετήρων σε ίδιες θέσεις στο φορέα (τελευταίο βήμα).



Σχήμα 7.24 Κατανομή της ανηγμένης τάσης (ως προς τη μέγιστη) των εγκάρσιων ΙΝΟΠ σε ίδιες θέσεις στο φορέα (τελευταίο βήμα).

7.3.4 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα από την αναλυτική διερεύνηση της απόκρισης των τεσσάρων δοκιμίων με λεπτομερή προσομοίωση στοιχείων κύβου, είναι ως εξής:

- Τα τέσσερα βασικά δοκίμια που εξετάσθηκαν αστόχησαν στο επάνω θλιβόμενο τμήμα τους, και λίγο αριστερά από το φορτίο P . Αυτό άλλαξε με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς τριβής μέσω ανοικτής ρωγμής από 0,2 σε 0,0001, οπότε τα δοκίμια αστόχησαν στο εφελκυσμένο τμήμα του δοκιμίου, κάτω από το P αλλά σε πολύ μικρότερη παραμόρφωση. Η παράμετρος αυτή επιφέρει επηρεάζει το ρυθμό εμφάνισης και τη μορφή των ρωγμών στη δοκό - οι ρωγμές δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλη διασπορά στο δοκίμιο κατά τη διεύθυνση κάθετα στο θλιπτήρα, όπου αυτός εμφανίζεται. Όπως παρατηρήθηκε, διαφορετικά δοκίμια με ίδιο συντελεστή μεταφοράς τριβής σε ανοικτές ρωγμές παρουσιάζουν παρόμοια παραμόρφωση, ρωγμές και αστοχία. Ο συντελεστής αυτός, άρα, είναι καθοριστικός για την ορθότητα της πρόβλεψης. Αντίθετα, ο συντελεστής μεταφοράς τριβής στις κλειστές ρωγμές δεν έχει αντίστοιχα σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα (θεωρήθηκαν τιμές 0,60 έως 1,00) λόγω του ότι δεν έκλεισαν ρωγμές στις συγκεκριμένες μονοτονικές αναλύσεις.
- Ο άνω διαμήκης οπλισμός δεν έφτάσε στη διαρροή σε καμία προσομοίωση ενώ κάτω έφτασε σε όλες. Όλα τα προσομοιώματα αστόχησαν έχοντας σχηματίσει μόνο μια πλαστική άρθρωση, στην περιοχή κάτω από το φορτίο. Αυτό δεν παρατηρήθηκε στα πειράματα, τα οποία έφτασαν σε μεγαλύτερα φορτία από τις επιλύσεις. Η κατανομή της έντασης στα ΙΝΟΠ είναι ίδια με το διαμήκη οπλισμό. Στο προσομοίωμα, ισχύει πλήρης συνάφεια ΙΝΟΠ και σκυροδέματος.

- Οι αριθμητικές επιλύσεις δεν ήταν σε θέση να προσομοιώσουν τη δυσκαμψία των πειραμάτων, που ήταν γενικά πλέον εύκαμπτα. Ένας λόγος για αυτό είναι η ύπαρξη ανένδοτων στηρίξεων, κάτι που στα πειράματα δεν ήταν δεδομένο. Η διόρθωση των αναλυτικών αποτελεσμάτων για την ευκαμψία των στηρίξεων βελτίωσε την πρόβλεψη. Ο δεύτερος σημαντικός παράγων είναι η μεγάλη δυσκαμψία των οκτακομβικών στοιχείων σταθερής τάσης στο εσωτερικό τους. Καλύτερες προβλέψεις, πλησιέστερα στα πειραματικά, επετεύχθησαν με πλέον εύκαμπτα στοιχεία κύβου 27 κόμβων, υπό διερεύνηση, τα οποία είναι γραμμικής κατανομής τάσεων.
- Οι συμβατικοί συνδετήρες και τα εγκάρσια ΙΝΟΠ δεν εμφανίζουν την ίδια κατανομή τάσης καθ' ύψος σε όλο το μήκος του δοκιμίου, αλλά η κατανομή αυτή εξαρτάται από τη θέση του συνδετήρα, τον τρόπο ενίσχυσης και το διατμητικό μήκος υπό μελέτη. Η παραλαβή φορτίου από τα στοιχεία αυτά αρχίζει κυρίως μετά τη διαρροή του διαμήκη οπλισμού στο P . Αν και πρώτα εντείνονται τα εγκάρσια στοιχεία αριστερά από το φορτίο, η μέγιστη τιμή τάσης εμφανίζεται δεξιά από το φορτίο, προς το σημείο καμψής. Στο σημείο φόρτισης τα εγκάρσια στοιχεία δεν παραλαμβάνουν φορτίο.
- Από πλευράς αριθμητικής προσομοίωσης, σημειώνεται ότι η διάσταση - ευκρίνεια - διακριτοποίησης του κανάβου, άρα και το μέγεθος των οκτακομβικών πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, δεν έχει μεγάλη επιρροή, τουλάχιστον για τις επιλογές 0,05m και 0,10m που διερευνήθηκαν.