



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΠΜΣ: «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**Μεταπτυχιακή εργασία**

**Προσέγγιση συμπεριφοράς πλαστικών αρθρώσεων με  
πεπερασμένα στοιχεία σε δοκούς από ωπλισμένο σκυρόδεμα**

**Μαρία Καρδαλά**

**Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Σπηλιόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής**

Αθήνα, Απρίλιος 2014



Μεταπτυχιακή εργασία

Προσέγγιση συμπεριφοράς πλαστικών αρθρώσεων με πεπερασμένα  
στοιχεία σε δοκούς από ωπλισμένο σκυρόδεμα

**Μαρία Καρδαλά**

A.M. : 11021212

Αθήνα, Απρίλιος 2014



## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.).

Έχει ως θέμα τη «Προσέγγιση συμπεριφοράς πλαστικών αρθρώσεων με πεπερασμένα στοιχεία σε δοκούς από ωπλισμένο σκυρόδεμα».

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. **Κωνσταντίνο Σπηλιόπουλο**, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όσον αφορά την ανάθεση εκπόνησης του θέματος της παρούσας εργασίας καθώς και για την ουσιαστική και συνεχή επιστημονική καθοδήγηση, τις διδακτικές συμβουλές και την έμπρακτη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλονται στον κ. **Ματθαίο Αντωνίη**, υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., τόσο για την έμπρακτη βοήθεια και τις διευκρινήσεις του κατά την εκμάθηση και τη χρήση του λογισμικού fe77, όσο και για τη συμβολή του στην περαιτέρω εμβάθυνση σε θέματα και προβληματισμούς ποιοτικού - επιστημονικού περιεχομένου που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστίες οφείλονται και στον κ. **Ιωάννη Καπογιάννη**, υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για τη συνεισφορά του σε ζητήματα τεχνικής φύσης που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Μαρία Καρδαλά  
Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract .....	3
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά .....	5
1.2 Η έννοια της πλαστιμότητας.....	5
1.3 Η πλαστική άρθρωση .....	6
1.4 Στόχος της εργασίας .....	7
1.5 Οργάνωση της εργασίας.....	8
Κεφάλαιο 2 Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια.....	9
2.1 Γενικά .....	9
2.2 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό FEMA 356.....	9
2.2.1 Γενικά .....	9
2.2.2 Στοιχεία καμπτικών πλαισίων .....	10
2.2.3 Τοιχώματα .....	13
2.3 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό ATC-4 .....	18
2.3.1 Γενικά.....	18
2.3.2 Δοκοί .....	19
2.3.3 Υποστυλώματα.....	20
2.3.4 Κόμβοι δοκών - υποστυλωμάτων .....	20
2.3.5 Τοιχώματα .....	22
2.4 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τις νεοζηλανδικές οδηγίες αποτίμησης NZSEE .....	23
2.5 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 .....	26
2.6 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	33
2.6.1 Καμπύλη εντατικού μεγέθους-παραμόρφωσης F-δ.....	33
2.6.2 Οιονεί ελαστικός κλάδος και διαρροή.....	34

## Περιεχόμενα

2.6.3 Μετελαστικός κλάδος.....	34
2.6.4 Απομένουσα αντίσταση.....	36
2.6.5 Πλάστιμη και ψαθυρή συμπεριφορά.....	36
2.6.6 Υπολογισμός γωνίας στροφής διαρροής.....	37
2.6.7 Υπολογισμός της παραμόρφωσης διαρροής όταν προέχει η κάμψη.....	38
2.6.8 Υπολογισμός της παραμόρφωσης διαρροής όταν προέχει η διάτμηση.....	39
2.6.9 Υπολογισμός γωνίας στροφής αστοχίας.....	42
2.6.10 Υπολογισμός ροπής διαρροής $M_y$ .....	43
2.7 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον Ιταλικό Κανονισμό CNR-DT 200/2004.....	44
Κεφάλαιο 3 Το λογισμικό FE77.....	45
3.1 Γενικά.....	45
3.2 Καταστατική συμπεριφορά ωπλισμένου σκυροδέματος.....	46
3.2.1 Η ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα.....	46
3.2.2 Συμπεριφορά σκυροδέματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό.....	48
3.2.3 Συμπεριφορά σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη.....	51
3.2.4 Συμπεριφορά ρηγματωμένου σκυροδέματος σε διάτμηση.....	53
3.2.5 Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό διαξονική ένταση.....	54
3.2.6 Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό τριαξονική φόρτιση.....	55
3.2.6.1 Γενικά.....	55
3.2.6.2 Η πειραματική διερεύνηση των Kotsovos & Newman 1977, 1979.....	57
3.3 Μη γραμμική ανάλυση φορέων Ω.Σ. με τη μέθοδο της διανεμημένης ρηγμάτωσης.....	65
3.3.1 Το καταστατικό προσομοίωμα των Kotsovos – Pavlovic.....	65
3.3.2 Μαθηματική περιγραφή της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς.....	66
3.3.3 Προσομοίωση ρηγμάτωσης σκυροδέματος.....	74
3.3.4 Ενοποιημένη αντιμετώπιση της ρηγμάτωσης σε τυχούσα ιστορία φόρτισης.....	79
3.4 Καταστατικό προσομοίωμα χάλυβα.....	81
3.4.1 Προσομοίωμα Menegotto – Pinto 1973.....	81
Κεφάλαιο 4 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.....	85
4.1 Γενικά.....	85



## Περιεχόμενα

4.2	Ανάλυση της δοκού OA1 .....	85	
4.3	Ανάλυση της δοκού OA2 .....	88	
4.4	Ανάλυση της δοκού OA3 .....	90	
4.5	Ανάλυση της δοκού A1 .....	92	
4.6	Ανάλυση της δοκού A2 .....	94	
4.7	Ανάλυση της δοκού A3 .....	96	
4.8	Συμπεράσματα.....	98	
Κεφάλαιο 5 Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση .....			99
5.1	Γενικά .....	99	
5.2	Το μήκος πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς.....	99	
5.3	Αποτίμηση προβόλου I («πρότυπο» δομικό στοιχείο).....	101	
5.3.1	Αποτίμηση προβόλου I με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	101	
5.3.2	Αποτίμηση προβόλου I σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	105	
5.3.3	Αποτίμηση προβόλου I σύμφωνα με τον EC8-3.....	108	
5.3.4	Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου I.....	112	
5.4	Αποτίμηση προβόλου IIα .....	113	
5.4.1	Αποτίμηση προβόλου IIα με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77 .....	113	
5.4.2	Αποτίμηση προβόλου IIα σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ....	115	
5.4.3	Αποτίμηση προβόλου IIα σύμφωνα με τον EC8-3 .....	116	
5.4.4	Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IIα .....	116	
5.5	Αποτίμηση προβόλου IIβ .....	117	
5.5.1	Αποτίμηση προβόλου IIβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77 .....	117	
5.5.2	Αποτίμηση προβόλου IIβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ....	119	
5.5.3	Αποτίμηση προβόλου IIβ σύμφωνα με τον EC8-3 .....	120	
5.5.4	Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IIβ .....	120	
5.6	Αποτίμηση προβόλου IIIα .....	121	
5.6.1	Αποτίμηση προβόλου IIIα με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	121	
5.6.2	Αποτίμηση προβόλου IIIα σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	124	
5.6.3	Αποτίμηση προβόλου IIIα σύμφωνα με τον EC8-3.....	124	
5.6.4	Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IIIα.....	125	
5.7	Αποτίμηση προβόλου IIIβ .....	126	

## Περιεχόμενα

5.7.1 Αποτίμηση προβόλου IIIβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	126
5.7.2 Αποτίμηση προβόλου IIIβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	129
5.7.3 Αποτίμηση προβόλου IIIβ σύμφωνα με τον EC8-3.....	129
5.7.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IIIβ.....	130
5.8 Αποτίμηση προβόλου IVα.....	131
5.8.1 Αποτίμηση προβόλου IVα με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	131
5.8.2 Αποτίμηση προβόλου IVα σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	134
5.8.3 Αποτίμηση προβόλου IVα σύμφωνα με τον EC8-3.....	134
5.8.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IVα.....	135
5.9 Αποτίμηση προβόλου IVβ.....	136
5.9.1 Αποτίμηση προβόλου IVβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	136
5.10 Αποτίμηση προβόλου Va.....	139
5.10.1 Αποτίμηση προβόλου Va με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	139
5.10.2 Αποτίμηση προβόλου Va σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	142
5.10.3 Αποτίμηση προβόλου Va σύμφωνα με τον EC8-3.....	142
5.10.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Va.....	143
5.11 Αποτίμηση προβόλου Vβ.....	144
5.11.1 Αποτίμηση προβόλου Vβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77.....	144
5.11.2 Αποτίμηση προβόλου Vβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	147
5.11.3 Αποτίμηση προβόλου Vβ σύμφωνα με τον EC8-3.....	147
5.11.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Vβ.....	148
5.12 Αποτίμηση προβόλου VIα.....	149
5.12.1 Αποτίμηση προβόλου VIα με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77 ...	149
5.12.2 Αποτίμηση προβόλου VIα σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ....	151
5.12.3 Αποτίμηση προβόλου VIα σύμφωνα με τον EC8-3 .....	151
5.12.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου VIα .....	153
5.13 Αποτίμηση προβόλου VIβ.....	154
5.13.1 Αποτίμηση προβόλου VIβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77 ...	154
5.13.2 Αποτίμηση προβόλου VIβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ....	157
5.13.3 Αποτίμηση προβόλου VIβ σύμφωνα με τον EC8-3 .....	157
5.13.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου VIβ .....	158
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.....	159
6.1 Γενικά .....	159

## Περιεχόμενα

6.2	Επιρροή του θλιβόμενου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης ..	159
6.3	Επιρροή του εφελκόμενου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης .....	162
6.4	Επιρροή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης .....	165
6.5	Επιρροή της τάσης διαρροής του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης .....	168
6.6	Επιρροή του εγκάρσιου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης ....	171
6.7	Σχόλια - παρατηρήσεις .....	174
	Βιβλιογραφία .....	175



## Περίληψη

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η προσέγγιση της συμπεριφοράς των πλαστικών αρθρώσεων με πεπερασμένα στοιχεία σε δοκούς ωπλισμένου σκυροδέματος.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στον τρόπο αντιμετώπισης και υπολογισμού των χαρακτηριστικών των περιοχών των πλαστικών αρθρώσεων από γνωστούς και ευρέως διαδεδομένους κανονισμούς αποτίμησης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα προσομοιώματα, στα οποία και στηρίζεται η λειτουργία του λογισμικού fe77 καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά της αρχής λειτουργίας του. Έπειτα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του με συγκεκριμένα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν αμφιέριστες δοκούς ωπλισμένου σκυροδέματος. Αφού, λοιπόν, διαπιστώνεται η ασφάλεια και η ορθότητα των αποτελεσμάτων του σε αρκετά μεγάλο βαθμό σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα, γίνεται σαφές ότι αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την έγκυρη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων και κατ' επέκταση τη μελέτη των περιοχών των πλαστικών αρθρώσεων, που αποτελεί και αντικείμενο της εργασίας.

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των περιοχών των πλαστικών αρθρώσεων γίνεται σε μία σειρά δομικών στοιχείων προβόλων που υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση με ένα γραμμικό φορτίο στο άκρο του στοιχείου, έπειτα από μη – γραμμική ανάλυση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό fe77. Τα δομικά στοιχεία έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ενώ κάθε ένα διαφέρει ως προς ένα μηχανικό χαρακτηριστικό, του οποίου και η επιρροή διερευνάται στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης. Ως βάση για τις συγκρίσεις και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επιρροή των διάφορων μηχανικών χαρακτηριστικών στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης, επιλέγεται ένα «πρότυπο» δομικό στοιχείο (πρόβολος I), το οποίο και ικανοποιεί τις απαιτήσεις όπλισης του Ελληνικού Κανονισμού Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (Ε.Κ.Ω.Σ. 2000).

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς της περιοχής μέσα στην οποία αναμένεται να γίνει η κατανάλωση του μεγαλύτερου μέρους της σεισμικής ενέργειας, επιτυγχάνεται με κατάλληλη αυξομείωση της τιμής του εν λόγω μεγέθους κάθε φορά σε σχέση με τον «πρότυπο» πρόβολο. Τα χαρακτηριστικά εκείνα που έχουν επιρροή στη συμπεριφορά της περιοχής της πλαστικής άρθρωσης και εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι τα εξής: ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού, ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού, θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, τάση διαρροής χάλυβα διαμήκους οπλισμού και ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων).

Από τις αναλύσεις των δομικών στοιχείων προκύπτουν αποτελέσματα από τα οποία και εξάγονται το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης στο άκρο του προβόλου, οι παραμορφώσεις

## Περίληψη

των εφελκόμενων χαλύβων κατά μήκος του προβόλου και ο δείκτης πλαστιμότητας των μετακινήσεων  $\mu_s$ . Από τη σύγκριση των εξαγομένων, συμπεραίνεται η επιρροή κάθε χαρακτηριστικού που εξετάζεται στη συμπεριφορά της περιοχής κατανάλωσης ενέργειας.

Παράλληλα, γίνεται και αποτίμηση των δομικών στοιχείων σύμφωνα με τις διατάξεις του Ελληνικού Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ) και του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3. Από τα αποτελέσματα των αποτιμήσεων εξάγονται οι δείκτες πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής και επομένως και μετακινήσεων, δεδομένης της γεωμετρίας. Έτσι γίνεται μία σύγκριση σε μεγέθη δεικτών πλαστιμότητας προκειμένου να διερευνηθεί η σχέση αποτελεσμάτων κανονισμών που βασίζονται στις παραδοχές της επιπεδότητας των διατομών και αποτελεσμάτων μη – γραμμικής ανάλυσης που προσομοιώνει την πραγματική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου.

## **Abstract**

The purpose of the present master thesis is to approach the behavior of plastic hinges that develop in reinforced concrete beams, with non-linear 3-d finite elements analysis.

In the first chapter, the subject of the thesis is briefly presented. An introduction to the meaning of ductility and plastic hinge is included, emphasizing the significance of the plastic hinge in the behavior of the structures during the earthquake.

The second chapter of the thesis includes the theory and the criteria, which are adopted by some of the most well - known assessment and retrofit codes for the prediction of the behavior of the plastic hinges' regions. The characteristics of plastic hinges (such as yield chord rotation angle, ultimate chord rotation angle, plastic hinge length, yield curvature, ultimate curvature, etc.) and the way they are approached, are included in the chapter specifically for: FEMA 356, ATC-40, NZSEE-2006, Eurocode 8 - Part 3, Greek Retrofit Code, CNR-DT 200/2004.

In the third chapter, the non-linear 3-d finite element analysis software, fe77, on which results the assessment of the plastic hinges regions is based, is presented. The concrete and steel numerical modelling, which the software is based on, are presented. The numerical strategy for the crack opening and closure, which is adopted is also discussed.

After the comparison of the results of the software with the respective experimental ones, the safety and the accuracy of its results is deduced. The experimental results, which were used for the comparison, included six of the simply supported reinforced concrete beams, which were investigated by Vecchio & Shim in the paper "Experimental and Analytical Reexamination of Classic Concrete Beam Tests" (2004). Therefore, the software is thought to be a reliable "tool", which can be used for the valid prediction of the structural elements' behavior and subsequently for the assessment and investigation of the regions of plastic hinges, which is the purpose of the present thesis.

The investigation of the behavior of the plastic hinges' region is performed in a series of cantilever beams, under monotonic loading on the edge of the beam, by non-linear analysis with 3-d finite elements in the fe77 software. The cantilever beams investigated, have the same geometric characteristics (height, width, effective height, length and shear span). Every beam has a mechanical characteristic, which is different to the ones of the other beams respectively. Through the change of the value the investigated mechanical characteristic, its effect on the behavior of the region of plastic hinge is deduced. The comparison is made between the cantilever beam I, which is reinforced according to the provisions of the Greek

## Abstract

Reinforced Concrete Code 2000 and each beam, which differs with the aforementioned on a mechanical characteristic. So, through this comparison, the deduction of useful conclusions about the effect of the mechanical characteristic on the behavior of plastic hinge is drawn. The characteristics, whose effect on the behavior of the plastic hinge is investigated are: the ratio of compression reinforcement, the ratio of tensional reinforcement, the concrete compressive strength, the yield strength of the longitudinal reinforcement steel and the ratio of the transverse reinforcement. The effect of each of the aforementioned characteristics is investigated through the reduction and the increase of its value respectively in the cantilever beam I.

From the 3-d, non – linear finite element analysis of the structural elements, the force – displacement relation of the edge of the cantilever beam, the strains of the longitudinal tensional reinforcement along the beam and the displacement ductility factor  $\mu_\delta$  are evaluated.. From the comparison of the deduced results between the beams, a conclusion can be easily reached, concerning the effect of each characteristic investigated, on the behavior of the region of the structural element, across which the consumption of seismic energy takes place.

In addition to the analytical assessment, an appraisal according to the provisions of the Greek Retrofit Code and Eurocode 8 – Part 3 is also performed. The chord rotation angle ductility factor is calculated, since in the assessment results of the aforementioned Codes, the yield chord rotation angle and the ultimate chord rotation angle are evaluated. Due to the beam geometry, the chord rotation angle ductility factor at the end section is equal to the displacement ductility factor at the edge of the cantilever. So, a comparison can be made so as to investigate the relation between the results of the Codes and the results of the non-linear analysis. It's worth mentioning that useful conclusions are drawn after the comparison between results based on the assumption of the sections remaining plane during yield and ultimate state and results depending on the non – linear analysis, which simulates the “real” behavior of the structural element· these are all included in the sixth chapter. In this chapter, one may also see the conclusions about the effect of the mechanical characteristics on the behavior of structural element both from the point of view the assessment based on the Codes and the ones based on the non – linear analysis.



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Σημαντικός σταθμός στην εξέλιξη του αντισεισμικού σχεδιασμού και βάση των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών υπήρξε η πλαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων και κατ'επέκταση των κατασκευών.

Κατά την δεκαετία του '60, περίοδο μέχρι την οποία οι κανονισμοί υιοθετούσαν την ελαστική αντιμετώπιση κατά το σχεδιασμό των κατασκευών, μετά την εμφάνιση και χρήση των ψηφιακών υπολογιστών, έγιναν πολύ ακριβείς υπολογισμοί φασμάτων απόκρισης με βάση αξιόπιστα επιταχυνσιογραφήματα ισχυρών σεισμών. Από τη μελέτη των στοιχείων αυτών προέκυψε ότι οι αναπτυσσόμενες σεισμικές δυνάμεις μπορεί να είναι 3-4 φορές μεγαλύτερες από τις δυνάμεις σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει εκτεταμένη είσοδο της κατασκευής στην πλαστική περιοχή συμπεριφοράς, μεγάλες πλαστικές (ανελαστικές) παραμορφώσεις και συνακόλουθες βλάβες σε φέροντα και μη φέροντα στοιχεία, όπως άλλωστε παρατηρείται έπειτα από ισχυρούς σεισμούς [14].

Ως κεντρικό σημείο αναφοράς του αντισεισμικού σχεδιασμού είναι η επιδίωξη πλαστικής συμπεριφοράς και η αποφυγή ψαθυρής αστοχίας, πράγμα που συνεπάγεται την ανάλυση της μη γραμμικής απόκρισης του κτιρίου υπό στατική και δυναμική καταπόνηση. Αντίθετα, στους παλαιότερους κανονισμούς οι έννοιες της πλαστιμότητας και του ικανοτικού σχεδιασμού ήταν «άγνωστες». Γι' αυτό και η προσομοίωση του σεισμού γινόταν μέσω μιας οριζόντιας φόρτισης σε ένα εξαιρετικά απλοποιημένο ελαστικό προσομοίωμα και η διαστασιολόγηση βάσει επιτρεπομένων ελαστικών τάσεων. Δεν εξεταζόταν καθόλου η φύση του σεισμού και η πραγματική συμπεριφορά του φορέα σε προχωρημένο στάδιο καταπόνησης και αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα υφιστάμενα κτίρια (ιδιαίτερα αυτά που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας) να κρίνονται τουλάχιστον ανεπαρκή να παραλάβουν τα σεισμικά φορτία [14].

### 1.2 Η έννοια της πλαστιμότητας

Με τον όρο πλαστιμότητα εννοείται γενικά η ικανότητα ενός στοιχείου ή συστήματος να παραμορφώνεται πέραν της ελαστικής περιοχής χωρίς ουσιαστική μείωση της αντοχής. Η πλαστιμότητα είναι η ιδιότητα που χαρακτηρίζει τη μετελαστική συμπεριφορά του δομικού

στοιχείου ή συστήματος. Οι δύο άλλες ιδιότητες, δυσκαμψία και αντοχή χαρακτηρίζουν την ελαστική απόκριση και τα όρια ελαστικής και της μετελαστικής απόκρισης αντίστοιχα [15].

Ποσοτικά η πλαστιμότητα αποδίδεται ως ο λόγος της συνολικής ικανότητας για παραμόρφωση ενός στοιχείου, ελαστικής και ανελαστικής, προς την αντίστοιχη μέγιστη ελαστική παραμόρφωση. Ως μέγιστη ελαστική παραμόρφωση λαμβάνεται συνήθως η παραμόρφωση στο τέλος της ελαστικής περιοχής, που συμπίπτει με την έναρξη διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα [15].

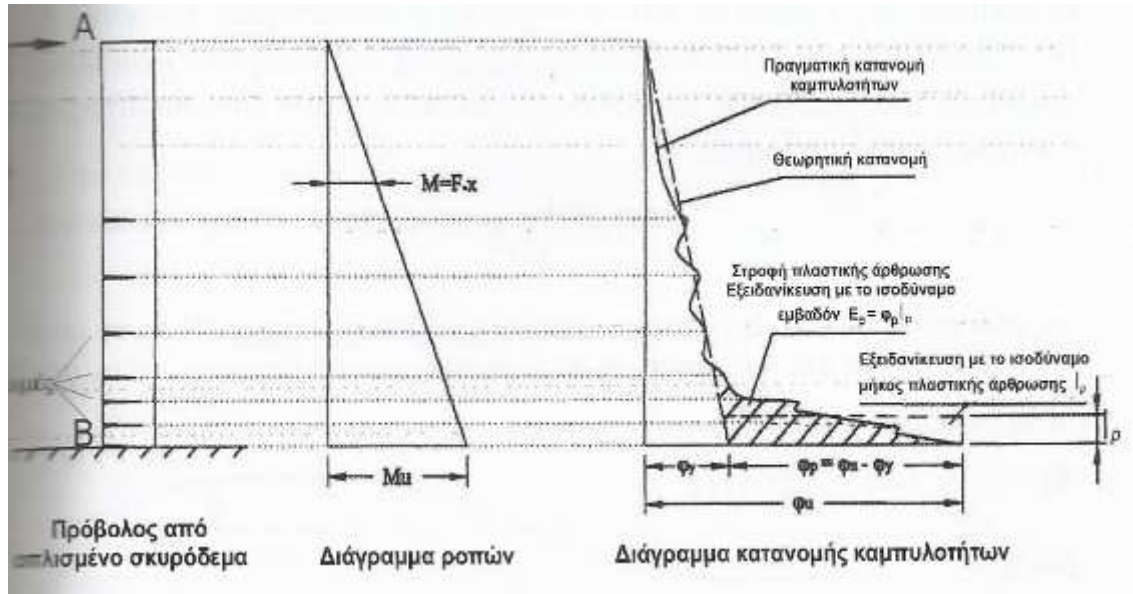
### 1.3 Η πλαστική άρθρωση

Όταν ένα στοιχείο υφίσταται διαρροή σε κάποια διατομή, σε εκείνο το σημείο η καμπυλότητα παίρνει μεγάλες τιμές (ανελαστική καμπυλότητα). Στην πραγματικότητα η ανελαστικοποίηση του στοιχείου δεν είναι σημειακή, δεν περιορίζεται δηλαδή σε μία διατομή, αλλά περιλαμβάνει κάποιο τμήμα του στοιχείου που ονομάζεται ανελαστική περιοχή και μέσα στην οποία οι εφελκόμενοι χάλυβες ευρίσκονται σε κατάσταση διαρροής. Η ανελαστική περιοχή εφόσον είναι κατάλληλα σχεδιασμένη έχει τη δυνατότητα να υφίσταται στροφή (πλαστική στροφή) χωρίς ουσιαστική άυξηση της δρώσας ροπής. Μπορεί δηλαδή να θεωρηθεί ότι η ανελαστική περιοχή συμπεριφέρεται στο υφιστάμενο επίπεδο ροπής ως άρθρωση και για το λόγο αυτό ονομάζεται πλαστική άρθρωση [15].

Η τιμή της ανελαστικής καμπυλότητας σε όλα τα σημεία (διατομές) της ανελαστικής περιοχής δεν είναι ίδια. Για να απλουστευθεί όμως ο υπολογισμός της πλαστικής στροφής που τελικώς αναπτύσσεται λόγω ανελαστικής καμπυλότητας, αντικαθίσταται η πραγματική κατανομή καμπυλοτήτων εντός της ανελαστικής περιοχής με κατανομή γραμμική. Η γραμμική κατανομή θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή ίση με τη μέγιστη καμπυλότητα της ανελαστικής περιοχής [15].

Σε αυτή την περίπτωση το μήκος της ανελαστικής περιοχής αντιπροσωπεύεται από το ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{pl}$ , εντός του οποίου η πλαστική καμπυλότητα θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή ίση με  $\phi_p$  ίση με τη μέγιστη καμπυλότητα που παρατηρείται εντός της πραγματικής ανελαστικής περιοχής [15].

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι για να είναι η ολική στροφή της περιοχής αυτής ίση με την πραγματική στροφή το ισοδύναμο μήκος  $L_{pl}$  έχει προφανώς μήκος μικρότερο από το πραγματικό μήκος της ανελαστικής περιοχής. Η τιμή του ισοδύναμου μήκους πλαστικής άρθρωσης  $L_{pl}$  εκλαμβάνεται έτσι ώστε η τελική τιμή μετατόπισης του στοιχείου όπως προκύπτει από την αναλυτική αντιμετώπιση να προσεγγίζει την πραγματική [15].



Σχήμα 1. 1: Στοιχείο εν προβόλω με συγκεντρωμένο φορτίο στο ελεύθερο άκρο. Κατανομή καμπυλοτήτων και ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης [15].

Το ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{pl}$  δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ικανοποιητικά με αναλυτικό τρόπο δηλαδή με βάση τις αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές και τη συνθήκη διαρροής μιας διατομής  $M > M_y$ , διότι έτσι λαμβάνονται υπόψη μόνο η καμπυλότητα λόγω της καμπτικής έντασης. Στην πραγματικότητα, εκτός από την ανελαστική καμπτική παραμόρφωση, η έκταση της ανελαστικής περιοχής επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες που έχουν ως αποτέλεσμα την επαύξηση του μήκους της. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι η λοξή διατμητική ρηγμάτωση και η επέκταση της ανελαστικοποίησης των εφελκόμενων χαλύβων και πέραν των διατομών που κατά την ανάλυση έχουν διαρρεύσει ( $M > M_y$ ) ακόμη και μέσα στη στήριξη του στοιχείου, πέραν, δηλαδή, του σημείου της θεωρητικής πάκτωσης [15].

#### 1.4 Στόχος της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την προσέγγιση της συμπεριφοράς των πλαστικών αρθρώσεων σε δοκούς ωπλισμένου σκυροδέματος και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τα χαρακτηριστικά εκείνα που επηρεάζουν τη δημιουργία και τη μετέπειτα συμπεριφορά της. Βάση της προσέγγισης και της ποσοτικοποίησης της πλαστικής άρθρωσης είναι η ανελαστικοποίηση των εφελκόμενων χαλύβων με βάση τα αποτελέσματα λογισμικού μη - γραμμικής ανάλυσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

## 1.5 Οργάνωση της εργασίας

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της προσέγγισης των περιοχών των πλαστικών αρθρώσεων, καθώς και των σχέσεων και τρόπων υπολογισμού των χαρακτηριστικών της (μήκος, στροφές χορδής, καμπυλότητες) που προτείνουν διάφοροι σύγχρονοι κανονισμοί κατά την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο λογισμικό μη - γραμμικής ανάλυσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων fe77, με το οποίο και πραγματοποιούνται οι αναλύσεις των δομικών στοιχείων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της πλαστικής άρθρωσης σε προβόλους ωπλισμένου σκυροδέματος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος. Παράλληλα γίνεται η προσπάθεια σύγκρισης των εν λόγω αποτελεσμάτων με αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των κανονιστικών πλαισίων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3.

Προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη ασφάλειας και ορθότητας των αποτελεσμάτων της μη - γραμμικής ανάλυσης, στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο προηγείται η επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκών που εξέτασαν οι Vecchio – Shim [10], με τα αποτελέσματα του προγράμματος όσον αφορά τις καμπύλες P - δ και το τελικό φορτίο αστοχίας.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο καταγράφονται συμπεράσματα, σχόλια και παρατηρήσεις που προκύπτουν από τη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων.

## Κεφάλαιο 2

# Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

### 2.1 Γενικά

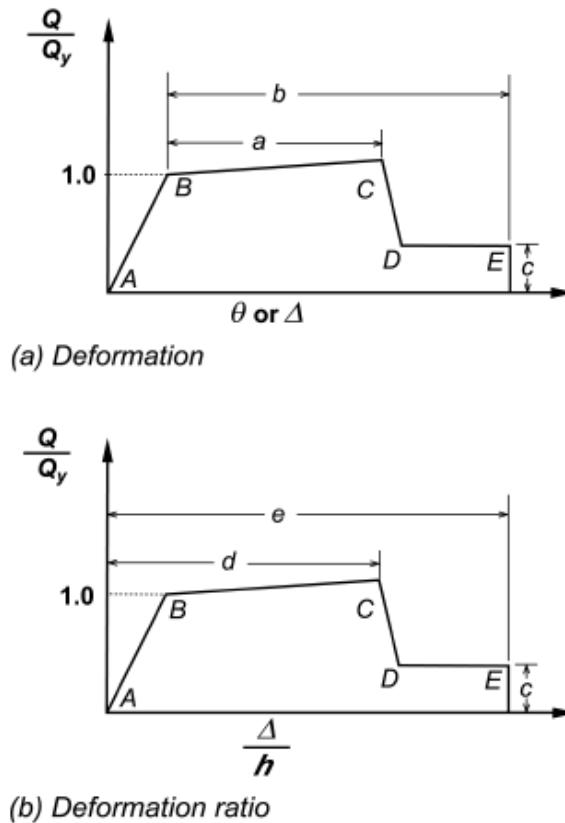
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στις σχέσεις και τους τρόπους υπολογισμού των χαρακτηριστικών της πλαστικής άρθρωσης (μήκος, στροφές χορδής, καμπυλότητες) των πιο γνωστών και ευρέως διαδεδομένων κανονισμών αποτίμησης, προκειμένου να γίνει αντιληπτή και κατανοητή η προσέγγιση της έννοιας της πλαστικής άρθρωσης από τον εκάστοτε κανονισμό.

### 2.2 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό FEMA 356 [7]

Κατά τις ανελαστικές αναλύσεις, για τη συμπεριφορά ενός στοιχείου χρησιμοποιούνται μη γραμμικές σχέσεις φορτίου - παραμόρφωσης, οι οποίες πρέπει να βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα ή να σχετίζονται με στοιχεία που υποδεικνύονται από τον εν λόγω κανονισμό. Συγκεκριμένα, για Μη γραμμική Στατική Ανάλυση (Nonlinear Static Procedure (NSP)), ο Κανονισμός υπαγορεύει τη χρήση της γενικευμένης σχέσης φορτίου - παραμόρφωσης που περιγράφεται από τις καμπύλες του Σχήματος 2.1, ή άλλες καμπύλες που ορίζουν τη συμπεριφορά κάτω από μονοτονικά αυξανόμενη παραμόρφωση, οι οποίες πρέπει να βασίζονται σε αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα ή αναλύσεις.

#### 2.2.1 Γενικά

Η γενικευμένη σχέση φορτίου - παραμόρφωσης περιλαμβάνει αρχικά γραμμική απόκριση από την κατάσταση A (αφόρτιστο στοιχείο) μέχρι και την κατάσταση διαρροής B και γραμμική απόκριση, αλλά με μειωμένη δυσκαμψία μέχρι και την κατάσταση C. Έπειτα ακολουθεί μία απότομη μείωση της αντίστασης σε φορτίο μέχρι και την κατάσταση D, η οποία ακολουθείται από απόκριση με μειωμένη αντίσταση μέχρι και την κατάσταση E και τελική απώλεια αντίστασης από εκεί και έπειτα. Η κλίση από το B στο C, πρέπει να λαμβάνεται ίση από 0 έως 10% της αρχικής κλίσης από το σημείο A έως και το B.



Σχήμα 2.1: Καμπύλες που εκφράζουν τη γενικευμένη σχέση φορτίου-παραμόρφωσης για στοιχεία Ω.Σ. ή τμήματά τους [7].

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις, εκφράζονται με δύο τρόπους. Για την περίπτωση a του Σχήματος 2.1 (Deformation), οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους στροφών, καμπυλοτήτων ή μηκύνσεων και οι παράμετροι a και b αναφέρονται σε ποσότητες που υφίστανται μετά τη διαρροή (πλαστικές παραμορφώσεις). Η παράμετρος c αφορά την απομένουσα αντίσταση μετά την απότομη μείωση CD. Για την περίπτωση b του Σχήματος 2.1 (Deformation ratio), οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους γωνίας διάτμησης και εφαπτομενικής μετακίνησης και οι παράμετροι d και e αναφέρονται σε ολικές παραμορφώσεις που μετρώνται από την αρχή.

### 2.2.2 Στοιχεία καμπτικών πλαισίων

Η συμπεριφορά τόσο των δοκών όσο και των υποστυλωμάτων των καμπτικών πλαισίων εκφράζεται από τις καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης του Σχήματος 2.1. Οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους στροφής χορδής (chord rotation) ή στροφής πλαστικής άρθρωσης (plastic hinge rotation), όταν πρόκειται για καμπτική συμπεριφορά. Όταν χρησιμοποιείται η δεύτερη μορφή έκφρασης, τότε η ικανότητα πλαστικής στροφής λαμβάνεται από πίνακες που ορίζει ο κανονισμός και παρουσιάζονται παρακάτω.

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Επίσης, όροι γωνίας διάτμησης χρησιμοποιούνται όταν πρόκειται για διατμητική συμπεριφορά του κόμβου δοκού - υποστυλώματος και η αντίστοιχη ικανότητα στροφής λαμβάνεται από πίνακες.

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 2.1 που αφορά δοκούς, οι τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής εξαρτώνται από το είδος της συμπεριφοράς (καμπτική η διατμητική), από το ποσοστό των οπλισμών (θλιβόμενου και εφελκυόμενου), και τη σχέση μεταξύ τους, από την ύπαρξη εγκάρσιου οπλισμού καθώς και από το λόγο της διατμητικής τάσης προς τη θλιπτική αντοχή υψωμένη στην  $\frac{1}{2}$ .

*Πίνακας 2.1: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής για δοκούς Ω.Σ. [7].*

<b>Table 6-7 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams</b>										
<b>Conditions</b>			<b>Modeling Parameters<sup>3</sup></b>			<b>Acceptance Criteria<sup>3</sup></b>				
			<b>Plastic Rotation Angle, radians</b>		<b>Residual Strength Ratio</b>	<b>Plastic Rotation Angle, radians</b>				
						<b>Performance Level</b>				
			<b>IO</b>	<b>Component Type</b>						
				<b>Primary</b>		<b>Secondary</b>				
<b>LS</b>	<b>CP</b>	<b>LS</b>		<b>CP</b>						
<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>LS</b>		<b>CP</b>		<b>LS</b>		<b>CP</b>	
<b>i. Beams controlled by flexure<sup>1</sup></b>										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. <sup>2</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
$\leq 0.0$	C	$\leq 3$	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
$\leq 0.0$	C	$\geq 6$	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
$\geq 0.5$	C	$\leq 3$	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
$\geq 0.5$	C	$\geq 6$	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
$\leq 0.0$	NC	$\leq 3$	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
$\leq 0.0$	NC	$\geq 6$	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
$\geq 0.5$	NC	$\leq 3$	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
$\geq 0.5$	NC	$\geq 6$	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01
<b>ii. Beams controlled by shear<sup>1</sup></b>										
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
<b>iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span<sup>1</sup></b>										
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
<b>iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint<sup>1</sup></b>										
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Πίνακας 2. 2: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής για υποστυλώματα Ω.Σ. [7].

<b>Table 6-8 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns</b>										
<b>Conditions</b>			<b>Modeling Parameters<sup>4</sup></b>			<b>Acceptance Criteria<sup>4</sup></b>				
			<b>Plastic Rotation Angle, radians</b>		<b>Residual Strength Ratio</b>	<b>Plastic Rotation Angle, radians</b>				
						<b>Performance Level</b>				
						<b>Component Type</b>				
<b>Primary</b>		<b>Secondary</b>			<b>IO</b>	<b>LS</b>		<b>CP</b>		
<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>LS</b>	<b>CP</b>		<b>LS</b>	<b>CP</b>			
<b>i. Columns controlled by flexure<sup>1</sup></b>										
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans. Reinf. <sup>2</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.1	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.015	0.02	0.02	0.03
≤ 0.1	C	≥ 6	0.016	0.024	0.2	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.003	0.012	0.015	0.018	0.025
≥ 0.4	C	≥ 6	0.012	0.02	0.2	0.003	0.01	0.012	0.013	0.02
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.005	0.012	0.2	0.005	0.004	0.005	0.008	0.012
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003	0.006	0.01
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002	0.005	0.008
<b>ii. Columns controlled by shear<sup>1,3</sup></b>										
All cases <sup>5</sup>			—	—	—	—	—	—	.0030	.0040
<b>iii. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height<sup>1,3</sup></b>										
Hoop spacing ≤ d/2			0.01	0.02	0.4	0.005	0.005	0.01	0.01	0.02
Hoop spacing > d/2			0.0	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
<b>iv. Columns with axial loads exceeding 0.70P<sub>0</sub><sup>1,3</sup></b>										
Conforming hoops over the entire length			0.015	0.025	0.02	0.0	0.005	0.01	0.01	0.02
All other cases			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Όσον αφορά τα υποστυλώματα τα κριτήρια παραμένουν όμοια με αυτά των δοκών, με μόνη διαφορά την αντικατάσταση των ποσοστών εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού με το ανηγμένο αξονικό φορτίο, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.2.



## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Πίνακας 2.3: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας στροφής για κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων [7].

<b>Table 6-9 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beam-Column Joints</b>												
<b>Conditions</b>			<b>Modeling Parameters<sup>4</sup></b>			<b>Acceptance Criteria<sup>4</sup></b>						
			<b>Plastic Shear Angle, radians</b>		<b>Residual Strength Ratio</b>	<b>Plastic Rotation Angle, radians</b>						
						<b>Performance Level</b>						
						<b>Component Type</b>						
			<b>Primary</b>		<b>Secondary</b>							
<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>IO</b>	<b>LS</b>	<b>CP</b>	<b>LS</b>	<b>CP</b>					
<b>i. Interior joints<sup>2,3</sup></b>												
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans. Reinf.	$\frac{V}{V_n}$										
≤ 0.1	C	≤ 1.2	0.015	0.03	0.2	0.0	0.0	0.0	0.02	0.03		
≤ 0.1	C	≥ 1.5	0.015	0.03	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02		
≥ 0.4	C	≤ 1.2	0.015	0.025	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.025		
≥ 0.4	C	≥ 1.5	0.015	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02		
≤ 0.1	NC	≤ 1.2	0.005	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02		
≤ 0.1	NC	≥ 1.5	0.005	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015		
≥ 0.4	NC	≤ 1.2	0.005	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015		
≥ 0.4	NC	≥ 1.5	0.005	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015		
<b>ii. Other joints<sup>2,3</sup></b>												
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans. Reinf. <sup>1</sup>	$\frac{V}{V_n}$										
≤ 0.1	C	≤ 1.2	0.01	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02		
≤ 0.1	C	≥ 1.5	0.01	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015		
≥ 0.4	C	≤ 1.2	0.01	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02		
≥ 0.4	C	≥ 1.5	0.01	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015		
≤ 0.1	NC	≤ 1.2	0.005	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0075	0.01		
≤ 0.1	NC	≥ 1.5	0.005	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0075	0.01		
≥ 0.4	NC	≤ 1.2	0.0	0.0	–	0.0	0.0	0.0	0.005	0.0075		
≥ 0.4	NC	≥ 1.5	0.0	0.0	–	0.0	0.0	0.0	0.005	0.0075		

Στην περίπτωση των κόμβων, οι τιμή της γωνίας διάτμησης εξαρτάται από τη θέση του κόμβου (εσωτερικός ή άλλου είδους), το ανηγμένο αξονικό φορτίο του άνω υποστυλώματος του κόμβου και το λόγο της δρώσας προς την τέμνουσα αντοχής του κόμβου, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.3.

### 2.2.3 Τοιχώματα

Στην περίπτωση που πρόκειται για δομικό σύστημα με τοιχώματα, πρέπει τοιχώματα, δοκοί σύζευξης και υποστυλώματα που στηρίζουν ασυνεχή τοιχώματα να ακολουθούν διαφορετικές διατάξεις από τις αντίστοιχες που αφορούν καμπτικά πλαίσια και έχουν

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

αναφερθεί παραπάνω. Το προσομοίωμα της συμπεριφοράς που υιοθετείται και σ'αυτή την περίπτωση είναι αυτό του Σχήματος 2.1.

Συγκεκριμένα, για τοιχώματα και υποστυλώματα που στηρίζουν ασυνεχή τοιχώματα, και που διέπονται από καμπτική συμπεριφορά, η στρόφη που αντιστοιχεί στη διαρροή (κατάσταση Β - Σχήμα 2.1 α), λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\theta_y = \left( \frac{M_y}{E_c I} \right) l_p \quad \{2.1\}$$

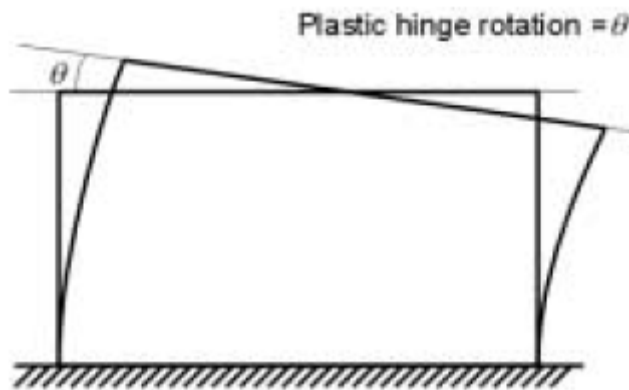
όπου

$M_y$ : η ροπή διαρροής

$E_c$ : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

$I$ : η ροπή αδράνειας της διατομής

$l_p$ : το θεωρούμενο μήκος πλαστικής άρθρωσης



Σχήμα 2.2: Στροφή πλαστικής άρθρωσης σε τοίχωμα, όταν η κάμψη κυριαρχεί κατά την ανελαστική απόκριση [7].

Όσον αφορά το μήκος της πλαστικής άρθρωσης, για τοιχώματα λαμβάνεται ίσο με το μισό του καμπτικού βάθους του στοιχείου, αλλά μικρότερο από το ύψος του ορόφου για την πρώτη περίπτωση και μικρότερο από το 50% του μήκους του στοιχείου για τη δεύτερη αντίστοιχα. Για τα υποστυλώματα που στηρίζουν ασυνεχή τοιχώματα λαμβάνεται ίσο με το μισό του καμπτικού βάθους του στοιχείου (μετράται στη διεύθυνση της αντίστοιχης δρώσας τέμνουσας).

Για τοιχώματα που διέπονται από διατμητική συμπεριφορά, η σχέση φορτίου-παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι αυτή του Σχήματος 2.1 β, όπου πλέον οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους μετακίνησης (Σχήμα 2.3).

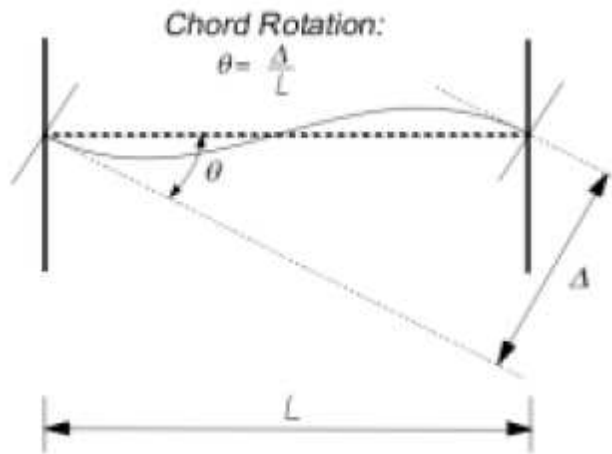
## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια



Σχήμα 2.3: Μετακίνηση σε τοίχωμα όταν η διάτμηση κυριαρχεί κατά την ανελαστική απόκριση [7].

Για τις δοκούς σύζευξης, η σχέση φορτίου - παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι αυτή του Σχήματος 2.1 b, όπου πλέον οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους στροφής χορδής (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Στροφή χορδής σε δοκό σύζευξης [7].

Στις περιπτώσεις, στις οποίες χρησιμοποιείται η σχέση φορτίου-παραμόρφωσης του Σχήματος 2.1 b, οι τιμές d, e και c λαμβάνονται από τον Πίνακα 2.4.

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Πίνακας 2. 4: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας μετακίνησης ή στροφής χορδής για τοιχώματα και δοκούς σύζευξης με διατμητική συμπεριφορά [7].

<b>Table 6-19 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Members Controlled by Shear</b>									
Conditions	Total Drift Ratio (%) or Chord Rotation (radians) <sup>1</sup>		Residual Strength Ratio	Acceptable Total Drift (%) or Chord Rotation (radians) <sup>1</sup>					
				Performance Level					
	IO	Component Type							
		Primary		Secondary					
	d	e	c	IO	LS	CP	LS	CP	
<b>i. Shear walls and wall segments</b>									
All shear walls and wall segments <sup>2</sup>	0.75	2.0	0.40	0.40	0.60	0.75	0.75	1.5	
<b>ii. Shear wall coupling beams<sup>4</sup></b>									
Longitudinal reinforcement and transverse reinforcement <sup>3</sup>	$\frac{\text{Shear}}{t_w L_w \sqrt{f'_c}}$								
Conventional longitudinal reinforcement with conforming transverse reinforcement	≤ 3	0.002	0.030	0.60	0.006	0.015	0.020	0.020	0.030
	≥ 6	0.016	0.024	0.30	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
Conventional longitudinal reinforcement with nonconforming transverse reinforcement	≤ 3	0.012	0.025	0.40	0.006	0.008	0.010	0.010	0.020
	≥ 6	0.008	0.014	0.20	0.004	0.006	0.007	0.007	0.012

Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Πίνακας 2.5: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής για τοιχώματα, υποστυλώματα και δοκούς σύζευξης με καμπτική συμπεριφορά [7].

**Table 6-18 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Members Controlled by Flexure**

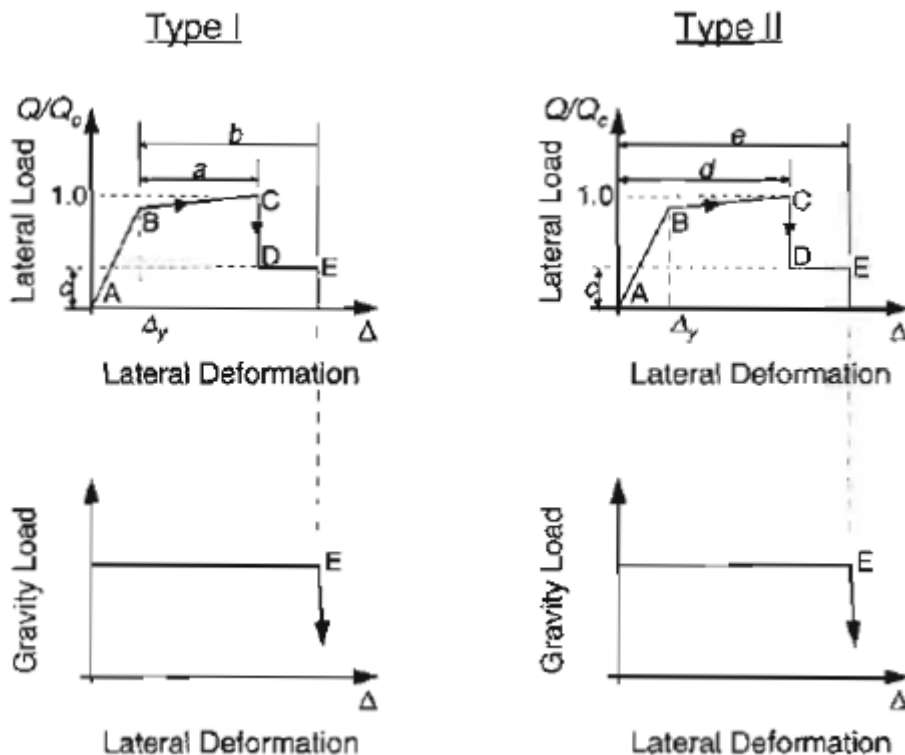
Conditions	Plastic Hinge Rotation (radians)		Residual Strength Ratio	Acceptable Plastic Hinge Rotation (radians)						
				Performance Level						
				IO	Component Type					
					Primary		Secondary <sup>4</sup>			
a	b	c	LS	CP	LS	CP				
<b>i. Shear walls and wall segments</b>										
$\frac{(A_s - A'_s)f_y + P}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$	Shear $\frac{V}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$	Confined Boundary <sup>1</sup>								
≤ 0.1	≤ 3	Yes	0.015	0.020	0.75	0.005	0.010	0.015	0.015	0.020
≤ 0.1	≥ 6	Yes	0.010	0.015	0.40	0.004	0.008	0.010	0.010	0.015
≥ 0.25	≤ 3	Yes	0.009	0.012	0.60	0.003	0.006	0.009	0.009	0.012
≥ 0.25	≥ 6	Yes	0.005	0.010	0.30	0.0015	0.003	0.005	0.005	0.010
≤ 0.1	≤ 3	No	0.008	0.015	0.60	0.002	0.004	0.008	0.008	0.015
≤ 0.1	≥ 6	No	0.006	0.010	0.30	0.002	0.004	0.006	0.006	0.010
≥ 0.25	≤ 3	No	0.003	0.005	0.25	0.001	0.002	0.003	0.003	0.005
≥ 0.25	≥ 6	No	0.002	0.004	0.20	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004
<b>ii. Columns supporting discontinuous shear walls</b>										
Transverse reinforcement <sup>2</sup>										
Conforming			0.010	0.015	0.20	0.003	0.007	0.010	n.a.	n.a.
Nonconforming			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	n.a.	n.a.
<b>iii. Shear wall coupling beams</b>										
Longitudinal reinforcement and transverse reinforcement <sup>3</sup>	Shear $\frac{V}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$									
Conventional longitudinal reinforcement with conforming transverse reinforcement	≤ 3	0.025	0.050	0.75	0.010	0.02	0.025	0.025	0.050	
	≥ 6	0.02	0.040	0.50	0.005	0.010	0.020	0.020	0.040	
Conventional longitudinal reinforcement with nonconforming transverse reinforcement	≤ 3	0.020	0.035	0.50	0.006	0.012	0.020	0.020	0.035	
	≥ 6	0.010	0.025	0.25	0.005	0.008	0.010	0.010	0.025	
Diagonal reinforcement	n.a.	0.030	0.050	0.80	0.006	0.018	0.030	0.030	0.050	

## 2.3 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό ATC-40 [2]

### 2.3.1 Γενικά

Οι διατάξεις του κανονισμού ATC-40 σε γενικές γραμμές είναι όμοιες με αυτές του κανονισμού FEMA, αλλά παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές.

Οι καμπύλες που περιγράφουν τη σχέση φορτίου - παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα. Διακρίνονται δύο τύποι καμπυλών, όπως και στις διατάξεις του κανονισμού FEMA. Στον πρώτο τύπο καμπυλών (Type I), οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους στροφών, καμπυλοτήτων ή μηκύνσεων και οι παράμετροι  $a$  και  $b$  αναφέρονται σε ποσότητες που υφίστανται μετά τη διαρροή (πλαστικές παραμορφώσεις) και λαμβάνονται από πίνακες που θα παρουσιαστούν παρακάτω. Στο δεύτερο τύπο καμπυλών (Type II), οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους γωνίας διάτμησης και εφαπτομενικής μετακίνησης και οι παράμετροι  $d$  και  $e$  αναφέρονται σε ολικές παραμορφώσεις που μετρώνται από την αρχή, και όπως και η παράμετρος  $c$  λαμβάνονται από πίνακες.



Σχήμα 2.5: Καμπύλες που εκφράζουν τη γενικευμένη σχέση φορτίου-παραμόρφωσης για στοιχεία Ω.Σ. ή τμήματά τους κατά ATC-40 [2].

### 2.3.2 Δοκοί

Η συμπεριφορά των δοκών εκφράζεται από τον πρώτο τύπο καμπυλών φορτίου-παραμόρφωσης του Σχήματος 2.5 και οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους στροφής χορδής (chord rotation) ή στροφής πλαστικής άρθρωσης (plastic hinge rotation). Οι τιμές της παραμόρφωσης των σημείων Β, C και Ε προέρχονται από πειραματικά αποτελέσματα ή αναλύσεις και πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την αλληλοεπίδραση μεταξύ κάμψης και διάτμησης. Εναλλακτικά, αν η παραμόρφωση εκφράζεται σε όρους στροφής πλαστικής άρθρωσης, η ικανότητα στροφής λαμβάνεται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.6). Φαίνεται ότι τα κριτήρια είναι όμοια με αυτά που ορίζονται και από τη FEMA. Η τιμή πλαστικής στροφής  $a$  αντιστοιχεί στο σημείο κατά το οποίο συμβαίνει αξιοσημείωτη μείωση της ροπής στο διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων, ενώ η τιμή  $b$  στο σημείο που η αντίσταση έναντι φορτίων βαρύτητας θεωρείται πλέον αμελητέα. Σημειώνεται ότι οι τιμές  $a$  και  $b$  έχουν προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα.

Πίνακας 2.6: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής για δοκούς Ω.Σ. [2].

Table 9-6. Modeling Parameters for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams

			Modeling Parameters <sup>d</sup>		
			Plastic Rotation Angle, rad		Residual Strength Ratio
Component Type			a	b	c
<b>1. Beams controlled by flexure<sup>1</sup></b>					
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Transverse Reinforcement <sup>2</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}}$ <sup>3</sup>			
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2
<b>2. Beams controlled by shear<sup>1</sup></b>					
stirrup spacing ≤ d/2			0.0	0.02	0.2
stirrup spacing > d/2			0.0	0.01	0.2
<b>3. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span<sup>1</sup></b>					
stirrup spacing ≤ d/2			0.0	0.02	0.0
stirrup spacing > d/2			0.0	0.01	0.0
<b>4. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint<sup>1</sup></b>					
			0.015	0.03	0.2

Εναλλακτικά, η στροφή της πλαστικής άρθρωσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) l_p \quad \{2.2\}$$

όπου

$\varphi_y$  και  $\varphi_u$  οι τιμές των καμπυλοτήτων κατά τη διαρροή και την αστοχία, που μπορούν να εξαχθούν από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού και

$I_p$  το μήκος της πλαστικής άρθρωσης, του οποίου συντηρητικές τιμές υπολογίζονται από τη σχέση  $I_p=0.5h$ ,  $h$  το καμπτικό βάθος στη διεύθυνση της φόρτισης.

### 2.3.3 Υποστυλώματα

Η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων εκφράζεται από τον πρώτο τύπο καμπυλών φορτίου-παραμόρφωσης του Σχήματος 2.5 και οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους στροφής χορδής (chord rotation) ή στροφής πλαστικής άρθρωσης (plastic hinge rotation). Οι τιμές της παραμόρφωσης των σημείων B, C και E προέρχονται από πειραματικά αποτελέσματα ή αναλύσεις και πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την αλληλοεπίδραση μεταξύ κάμψης, αξονικής δύναμης και διάτμησης. Εναλλακτικά, αν η παραμόρφωση εκφράζεται σε όρους στροφής πλαστικής άρθρωσης, η ικανότητα στροφής λαμβάνεται από τον Πίνακα 2.7. Οι τιμές των πλαστικών στροφών  $a$  και  $b$  ορίζονται όπως και στην περίπτωση των δοκών.

Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η σχέση

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) L_p \quad \{2.3\}$$

με τις παραμέτρους  $\varphi_u$ ,  $\varphi_y$  και  $L_p$  όπως έχουν οριστεί παραπάνω.

### 2.3.4 Κόμβοι δοκών - υποστυλωμάτων

Η συμπεριφορά των κόμβων εκφράζεται από το δεύτερο τύπο καμπυλών φορτίου-παραμόρφωσης του Σχήματος 2.5 και οι παραμορφώσεις εκφράζονται σε όρους γωνίας διάτμησης και η ικανότητα διατμητικής στροφής του κόμβου λαμβάνεται από τον Πίνακα 2.8. Η τιμή διατμητικής γωνίας  $d$  αντιστοιχεί στο σημείο κατά το οποίο συμβαίνει αξιοσημείωτη μείωση του φορτίου, ενώ η  $e$  στο σημείο που η αντίσταση έναντι φορτίων βαρύτητας θεωρείται πλέον αμελητέα.



## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Πίνακας 2.7: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής για υποστολώματα Ω.Σ. [2].

**Table 9-7. Modeling Parameters for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns**

Component Type			Modeling Parameters <sup>d</sup>		
			Plastic Rotation Angle, rad		Residual Strength Ratio
			a	b	c
<b>1. Columns controlled by flexure<sup>1</sup></b>					
$\frac{P}{A_g f_c}$ <sup>e</sup>	Transverse Reinforcement <sup>f</sup>	$\frac{v}{b_w d \sqrt{f_c}}$ <sup>e</sup>			
≤ 0.1	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2
≤ 0.1	C	≥ 6	0.015	0.025	0.2
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2
≥ 0.4	C	≥ 6	0.01	0.015	0.2
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.005	0.005	-
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.005	0.005	-
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.0	0.0	-
<b>2. Columns controlled by shear<sup>1,3</sup></b>					
Hoop spacing ≤ d/2, or $\frac{P}{A_g f_c}$ <sup>e</sup> ≤ 0.1			0.0	0.015	0.2
other cases			0.0	0.0	0.0
<b>3. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height<sup>1,3</sup></b>					
Hoop spacing ≤ d/2			0.01	0.02	0.4
Hoop spacing > d/2			0.0	0.01	0.2
<b>4. Columns with axial loads exceeding 0.70P<sub>o</sub><sup>1,3</sup></b>					
Conforming reinforcement over the entire length			0.015	0.025	0.02
All other cases			0.0	0.0	0.0

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Πίνακας 2. 8: Συνιστώμενες τιμές ικανότητας διατμητικής στροφής κόμβου Ω.Σ. [2].

Table 9-8. Modeling Parameters for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beam-Column Joints

Component Type			Modeling Parameters <sup>a</sup>		
			Shear Angle, rad		Residual Strength Ratio
			d	e	c
<b>1. Interior Joints</b>					
$\frac{P}{A_g f_c}$ <sup>2</sup>	Transverse Reinforcement <sup>1</sup>	$\frac{V}{V_n}$ <sup>3</sup>			
≤ 0.1	C	≤ 1.2	0.015	0.05	0.2
≤ 0.1	C	≥ 1.5	0.015	0.03	0.2
≥ 0.4	C	≤ 1.2	0.015	0.025	0.2
≥ 0.4	C	≥ 1.5	0.015	0.02	0.2
≤ 0.1	NC	≤ 1.2	0.005	0.02	0.2
≤ 0.1	NC	≥ 1.5	0.005	0.015	0.2
≥ 0.4	NC	≤ 1.2	0.005	0.015	0.2
≥ 0.4	NC	≥ 1.5	0.005	0.015	0.2
<b>2. Other joints</b>					
$\frac{P}{A_g f_c}$ <sup>2</sup>	Transverse Reinforcement <sup>1</sup>	$\frac{V}{V_n}$ <sup>3</sup>			
≤ 0.1	C	≤ 1.2	0.01	0.02	0.2
≤ 0.1	C	≥ 1.5	0.01	0.015	0.2
≥ 0.4	C	≤ 1.2	0.01	0.02	0.2
≥ 0.4	C	≥ 1.5	0.01	0.015	0.2
≤ 0.1	NC	≤ 1.2	0.005	0.01	0.2
≤ 0.1	NC	≥ 1.5	0.005	0.01	0.2
≥ 0.4	NC	≤ 1.2	0.0	0.0	-
≥ 0.4	NC	≥ 1.5	0.0	0.0	-

### 2.3.5 Τοιχώματα

Οι διατάξεις του εν λόγω κανονισμού είναι ίδιες με του κανονισμού FEMA 356, με τη μόνη διαφορά ότι περιλαμβάνονται περισσότερες λεπτομέρειες για τις δοκούς σύζευξης.

## 2.4 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τις νεοζηλανδικές οδηγίες αποτίμησης NZSEE [1]

Σύμφωνα με τις Νεοζηλανδικές Οδηγίες Αποτίμησης η διαθέσιμη ικανότητα πλαστικής στροφής δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) L_p \quad \{2.4\}$$

Για δοκούς, η καμπυλότητα διαρροής  $\varphi_y$  δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - k_d} \quad \{2.5\}$$

όπου

$\varepsilon_y$  : η παραμόρφωση στην πρώτη διαρροή του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού

$d$  : το στατικό ύψος

$k_d$  : το βάθος του ουδέτερου άξονα όταν συμβαίνει η πρώτη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού

Για τα υποστυλώματα, η καμπυλότητα διαρροής ορίζεται χρησιμοποιώντας διγραμμική προσέγγιση καθώς στο διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων δεν ορίζεται πλήρως η καμπυλότητα διαρροής.

Ο εν λόγω κανονισμός υιοθετεί τις σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Priestley και Kowalsky (2000) για τον υπολογισμό των καμπυλοτήτων διαρροής και παρουσιάζονται παρακάτω:

Για δοκούς:

$$\varphi_y = \frac{1.7\varepsilon_y}{h} \quad \{2.6\}$$

όπου  $h$  το ύψος της διατομής.

Για κυκλικά υποστυλώματα:

$$\varphi_y = \frac{2.35\varepsilon_y}{d} \quad \{2.7\}$$

όπου  $d$  η διάμετρος του υποστυλώματος.

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Για ορθογωνικά υποστυλώματα:

$$\varphi_y = \frac{2.12\varepsilon_y}{h} \quad \{2.8\}$$

όπου  $h$  το βάθος του υποστυλώματος.

Όσον αφορά την καμυλότητα αστοχίας  $\varphi_u$  τόσο στην περίπτωση των δοκών όσο και των υποστυλωμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} \quad \{2.9\}$$

όπου

$c$  : το βάθος του ουδέτερου άξονα στην τελική καμυλότητα και

$\varepsilon_{cu}$  : η τελική παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που εξαρτάται από την περίσφιγξη του σκυροδέματος. Για απερίσφιγκτο σκυρόδεμα η  $\varepsilon_{cu}$  μπορεί να λαμβάνεται ίση με  $\varepsilon_{cu}=0.004$  (Priestley and Park 1987) ενώ για περισφιγμένο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη τιμή, μια συντηρητική προσέγγιση της οποίας δίνεται από την παρακάτω σχέση (Scott et al 1982):

$$\varepsilon_{cu} = 0.004(1 + 1.1\rho_s f_{yt}) \quad \{2.10\}$$

όπου

$\rho_s$  : το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού προς τον όγκο του πυρήνα σκυροδέματος και

$f_{yt}$  : η αντοχή διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού

Εναλλακτικά, η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί από τη λιγότερη συντηρητική σχέση (Mander et al 1988):

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad \{2.11\}$$

όπου

$\rho_s$  : το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού προς τον όγκο του πυρήνα σκυροδέματος που προσεγγίζεται από τη σχέση  $\rho_s=1.5A_v/b_c s$

$A_v$  : το συνολικό εμβαδό του εγκάρσιου οπλισμού μίας στρώσης

$s$  : η απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων οπλισμών

$b_c$  : το πλάτος του πυρήνα του σκυροδέματος, μετρούμενο από το κέντρο βάρους των εγκάρσιων οπλισμών

$f_{yh}$  : η αντοχή διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

$\varepsilon_{su}$  : η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα,  $\varepsilon_{su}=0.15$  για αντοχή διαρροής  $f_v=275\text{MPa}$  και ,  $\varepsilon_{su}=0.10$  για αντοχή διαρροής  $f_v=430\text{MPa}$

$f_{cc}$  : η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, που μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση  $f_{cc}=1.5f_c$  (Scott et al 1982; Priestley et al 1996).

Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου μήκους πλαστικής άρθρωσης  $L_p$ , χρησιμοποιούνται οι ημι-εμπειρικές σχέσεις (Park 1992; Priestley and Park 1987):

$$L_{pl} = 0,5h \quad \{2. 12\}$$

$$L_{pl} = 0,08L_s + 0,022d_b f_y \quad \{2. 13\}$$

όπου

$h$  : το βάθος της διατομής

$L_s$  : το μήκος από την πλαστική άρθρωση έως το σημείο μηηδενισμού των ροπών

$d_b$  : η διάμετρος του διαμήκους εφελκυόμενου οπλισμού

$f_y$  : η αντοχή διαρροής του χάλυβα του εφελκυόμενου οπλισμού

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την κατανομή της πλαστικότητας λόγω του μήκους μετάθεσης του διαγράμματος των καμπτικών ροπών. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την επιρροή της ολίσθησης των ράβδων από τη ζώνη αγκύρωσής τους και ιδιαίτερα της ολίσθησης σ' εκείνο το τμήμα της ράβδου μέσα στην αγκύρωση στο οποίο επεκτείνεται η διαρροή. Το τμήμα αυτό ονομάζεται τμήμα “δειξόδυσης της διαρροής” μέσα στον κόμβο όπου αγκυρώνεται ο διαμήκης οπλισμός (yield penetration).

## 2.5 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 [5]

Η ικανότητα παραμόρφωσης των δοκών, των υποστυλωμάτων και των τοιχωμάτων Ο.Σ., ορίζεται σε όρους στροφής χορδής  $\theta$ , δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της εφαπτομένης του άξονα στο τέλος της διαρροής και της χορδής που συνδέει το τέλος της διαρροής με το τέλος του διατμητικού ανοίγματος, δηλαδή το σημείο μηδενισμού των ροπών ( $L_v = M/V = \text{ροπή}/\text{τέμνουσα}$  στην ακραία διατομή). Η στρόφη χορδής είναι επίσης ίση με τη μετακίνηση στο τέλος του διατμητικού ανοίγματος αναφορικά με την εφαπτομένη του άξονα στο τέλος της διαρροής, δια το διατμητικό άνοιγμα.

Η τιμή της ολικής ικανότητας στροφής (ελαστική και ανελαστική)  $\theta_u$  στοιχείων Ω.Σ. κάτω από ανακυκλιζόμενη φόρτιση, που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «Οιωνεί κατάρρευση» μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{um} = \left(\frac{1}{\gamma_{el}}\right) \cdot 0,016 \cdot (0,3^v) \left[ \frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h}\right)^{0,35} 25^{\left(\frac{ap_{sx} f_{yw}}{f_c}\right)} (1,25^{100\rho_d}) \quad \{2.14\}$$

όπου

$\gamma_{el}$  : συντελεστής ασφάλειας που λαμβάνεται ίσος με 1,5 για κύρια στοιχεία και 1,0 για δευτερεύοντα στοιχεία (η διάκριση γίνεται σύμφωνα με την §2.2.1(6) του εν λόγω κανονισμού)

$h$  : το βάθος της διατομής

$L_v=M/V$  : ο λόγος ροπής/τέμνουσα στην ακραία διατομή του στοιχείου

$v=N/bhf_c$  : ( $b$  το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης,  $N$  το αξονικό φορτίο που λαμβάνεται με θετικό πρόσημο στην περίπτωση που είναι θετικό)

$\omega, \omega'$  : το μηχανικό ποσοστό διαμήκους εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού αντίστοιχα

$f_c, f_{yw}$  : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (MPa) και η αντοχή διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων (MPa) αντίστοιχα. Πρόκειται για μέσες τιμές, οι οποίες παρέχονται από επιτόπου δοκιμές και από επιπρόσθετες πηγές πληροφοριών, και διαιρούνται με τους συντελεστές εμπιστοσύνης ανάλογα με την παρεχόμενη στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων.

$\rho_{sx}=A_{sx}/b_w s_h$  : το γεωμετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού στην κατεύθυνση της φόρτισης

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

$\rho_d$  : το γεωμετρικό ποσοστό του τυχόντος δισδιαγώνιου οπλισμού

$\alpha$  : ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης, που λαμβάνεται ίσος με

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o}\right) \quad \{2.15\}$$

$b_o$  και  $h_o$  οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα μετρούμενες από το κέντρο βάρους του εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρα) και  $b_i$  η απόσταση μεταξύ των καλά συγκρατούμενων διαμήκων ράβδων οπλισμού

Σημειώνεται ότι για τοιχώματα Ω.Σ. η σχέση υπολογισμού της στροφής χορδής κατά την αστοχία διαιρείται με 1,6. Το ίδιο ισχύει και όταν χρησιμοποιείται χάλυβας ψυχρής έλασης.

Για την τιμή της πλαστικής στροφής χορδής στοιχείων Ω.Σ. που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ο Ευρωκώδικας 8 προτείνει την ακόλουθη έκφραση:

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_{um} - \theta_y = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,0145 \cdot (0,25^v) \left[ \frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} \right]^{0,3} \cdot f_c^{0,2} \cdot \left( \frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left( \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,275^{100\rho_d}) \quad \{2.16\}$$

όπου

ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_{el}$  λαμβάνεται ίσος με 1,8 για κύρια στοιχεία και 1,0 για δευτερεύοντα στοιχεία.

Σημειώνεται ότι για τοιχώματα Ω.Σ. καθώς και για όταν γίνεται χρήση χάλυβα ψυχρής έλασης, η σχέση υπολογισμού της πλαστικής στροφής χορδής, πολλαπλασιάζεται με το μειωτικό συντελεστή 0,6.

Όταν πρόκειται για στοιχεία που δεν έχουν σχεδιαστεί και διαστασιολογηθεί προκειμένου να έχουν αντισεισμική επάρκεια, οι τιμές της πλαστικής στροφής χορδής αλλά και της στροφής χορδής κατά την αστοχία λαμβάνονται μειωμένες και για το λόγο αυτό πολλαπλασιάζονται με 0,825.

Οι παραπάνω εκφράσεις της ικανότητας στροφής κατά την αστοχία και η ικανότητα πλαστικής στροφής εφαρμόζονται σε στοιχεία που δεν υπάρχει υπερκάλυψη ράβδων στην περιοχή που αναμένεται να συμβεί διαρροή. Αν υπάρχει ένωση οπλισμών με παράθεση των ευθύγραμμων άκρων των διαμήκων ράβδων από τη στάθμη της βάσης τους, όπως συμβαίνει σε υποστυλώματα και τοιχώματα τότε η τιμή του ποσοστού θλιβόμενου οπλισμού  $\omega'$  λαμβάνεται η διπλάσια από αυτή που ισχύει εκτός μήκους υπερκάλυψης. Αν το μήκος υπερκάλυψης  $l_o$  είναι μικρότερο από το  $l_{ou,min}$  τότε η σχέση από την οποία προκύπτει η πλαστική στροφή πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το λόγο  $l_o / l_{ou,min}$ , και η κατά τον

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

υπολογισμό της στροφής κατά τη διαρροή πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιρροή της υπερκάλυψης. Η τιμή του  $I_{ou,min}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{ou,min} = d_{bL} f_{yL} / \left[ \left( 1,05 + 14,5 a_1 \rho_{sx} f_{yw} / f_c \sqrt{f_c} \right) \right] \quad \{2.17\}$$

όπου

$d_{bL}$ : η διάμετρος των υπερκαλυμμένων ράβδων

$f_{yL}$ : η μέση αντοχή διαρροής του χάλυβα των διαμήκων ράβδων οπλισμού (MPa), η οποία λαμβάνεται από επιτόπου δοκιμές και από επιπρόσθετες πηγές πληροφοριών, και πολλαπλασιάζεται με τον κατάλληλο συντελεστή εμπιστοσύνης ανάλογα με την παρεχόμενη στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων.

$f_c$ ,  $f_{yw}$  και  $\rho_{sx}$ : όπως ορίζονται παραπάνω

$$a_1 = (1 - s_h / (2b_o)) (1 - s_h / (2h_o)) n_{restr} / n_{tot}$$

$n_{restr}$ : ο αριθμός των καλά συγκρατούμενων υπερκαλυμμένων ράβδων

$n_{tot}$ : ο συνολικός αριθμός των υπερκαλυμμένων ράβδων της διατομής

Μειωτικοί συντελεστές χρησιμοποιούνται επίσης και στην περίπτωση στοιχείων που περιέχουν λείους χάλυβες χωρίς υπερκάλυψη ράβδων στην περιοχή που αναμένεται να συμβεί διαρροή. Τότε, η στροφή χορδής κατά την αστοχία και η πλαστική στροφή, οι τιμές των οποίων λαμβάνονται από τις σχέσεις που έχει προαναφερθεί πολλαπλασιασμένες επί 0,575 και 0,375 αντίστοιχα (με το συντελεστή 0,825, για στοιχεία χωρίς την απαιτούμενη σεισμική επάρκεια, να περιέχεται σ' αυτές τις τιμές).

Αν η υπερκάλυψη ξεκινά στην ακραία διατομή του στοιχείου και τα άκρα των ράβδων έχουν τα κατάλληλα άγκιστρα με μήκος υπερκάλυψης  $l_o$  τουλάχιστον ίσο με  $15d_{bL}$ , τότε κατά τον υπολογισμό της στροφής κατά την αστοχία και της πλαστικής στροφής το διατμητικό μήκος λαμβάνεται μειωμένο κατά το μήκος υπερκάλυψης, καθώς η τελική κατάσταση ελέγχεται από την περιοχή αμέσως μετά την περιοχή της υπερκάλυψης. Η συνολική ικανότητα στροφής και η πλαστική στροφή λαμβάνονται από τις εκφράσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, πολλαπλασιασμένες επί τους όρους:

$$0,0025(180 + \min(50, l_o/d_{bL}))(1 - l_o/L_v) \quad \{2.18\}$$

και

$$0,0035(60 + \min(50, l_o/d_{bL}))(1 - l_o/L_v) \quad \{2.19\}$$

Μία εναλλακτική έκφραση για την εκτίμηση της συνολικής ικανότητας στροφής που προτείνει ο Ευρωκώδικας 8 είναι η εξής:



## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left( \theta_y + (\varphi_u + \varphi_y) L_{pl} \left( 1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_v} \right) \right) \quad \{2.20\}$$

όπου

$\theta_y$  : η στροφή χορδής κατά τη διαρροή

$\varphi_u$  : η καμπυλότητα αστοχίας της ακραίας διατομής

$\varphi_y$  : η καμπυλότητα κατά τη διαρροή της ακραίας διατομής

Η τιμή του μήκους πλαστικής άρθρωσης, εξαρτάται από το πόσο λαμβάνεται υπόψη η βελτίωση που προσφέρει η περίσφιγξη στην ικανότητα παραμόρφωσης και την αντοχή στον υπολογισμό της καμπυλότητας αστοχίας της ακραίας διατομής. Διακρίνονται, έτσι δύο περιπτώσεις:

1. α) Αν η μέγιστη παραμόρφωση του διαμήκους οπλισμού  $\epsilon_{su}$  λαμβάνεται ίση με:
  - την ελάχιστη τιμή που δίνεται στο EN 1992-1-1, Πίνακας C.1 για την χαρακτηριστική παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο,  $\epsilon_{uk}$ , για κατηγορίες χάλυβα A και B,
  - 6% για κατηγορία χάλυβα C, και
- β) το προσομοίωμα της περίσφιγξης στο EN 1992-1-1:2004, 3.1.9, με ενεργή εγκάρσια τάση  $\sigma_2$  λαμβάνεται ίσο με  $\alpha \rho_{sx} f_{yw}$ , όπου  $\alpha$  ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \left( 1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left( 1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left( 1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o} \right) \quad \{2.21\}$$

$b_o$  και  $h_o$  οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα μετρούμενες στο κέντρο βάρους του εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρα) και  $b_i$  η απόσταση μεταξύ των συγκρατούμενων διαμήκων ράβδων οπλισμού

$\rho_{sx} = A_{sx} / b_w s_h = \alpha$  ο λόγος του εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης

$f_{yw}$  η μέση αντοχή διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού, όπως λαμβάνεται από επιτόπου δοκιμές

τότε η σχέση που υπολογίζει το μήκος της πλαστικής άρθρωσης είναι η ακόλουθη:

$$L_{pl} = 0,1L_v + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bl} f_y \text{ (MPa)}}{\sqrt{f_c \text{ (MPa)}}} \quad \{2.22\}$$

όπου  $L_v$  το διατμητικό μήκος του στοιχείου, δηλαδή η απόσταση μεταξύ του σημείου της μέγιστης ροπής και του σημείου μηδενισμού των ροπών,  $h$  το βάθος της διατομής,  $d_{bl}$  η μέση

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού ( $m$ ),  $f_y$  η αντοχή διαρροής του χάλυβα (MPa) και  $f_c$  η αντοχή του σκυροδέματος (MPa). Σ' αυτή την περίπτωση ο συντελεστής  $\gamma_{el}$  στην έκφραση της στροφής αστοχίας  $\theta_{um}$  λαμβάνεται ίσος με 2 για πρωτεύοντα και 1,0 δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία.

2. α) Αν η μέγιστη παραμόρφωση του διαμήκους οπλισμού  $\varepsilon_{su}$  λαμβάνεται ίση με:

- την ελάχιστη τιμή που δίνεται στο EN 1992-1-1, Πίνακας C.1 για την χαρακτηριστική παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο,  $\varepsilon_{uk}$ , για κατηγορίες χάλυβα A και B,

- 6% για κατηγορία χάλυβα C, και

β) το προσομοίωμα της περίσφιγξης είναι ακριβέστερο από το αντίστοιχο του EN 1992-1-1:2004, 3.1.9, και συγκεκριμένα:

η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος εκτιμάται από τη σχέση:

$$f_{cc} = f_c \left[ 1 + 3.7 \left( \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_c} \right)^{0.86} \right] \quad \{2.23\}$$

η παραμόρφωση στην οποία παρατηρείται η αντοχή  $f_{cc}$  λαμβάνεται αυξημένη σε σχέση με την παραμόρφωση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος ως εξής:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad \{2.24\}$$

και η τελική παραμόρφωση αστοχίας της εξωτερικής ίνας της θλιβόμενης ζώνης λαμβάνεται ίση με:

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 0,5 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}} \quad \{2.25\}$$

όπου  $\alpha$ ,  $\rho_{sx}$  και  $f_{yw}$  όπως προσδιορίστηκαν παραπάνω τότε η σχέση που υπολογίζει το μήκος της πλαστικής άρθρωσης είναι η ακόλουθη:

$$L_{pl} = \frac{L_v}{30} + 0,2h + 0,11 \frac{d_{bl} f_y \text{ (MPa)}}{\sqrt{f_c \text{ (MPa)}}} \quad \{2.26\}$$

Σ' αυτή την περίπτωση ο συντελεστής  $\gamma_{el}$  στην έκφραση της στροφής αστοχίας  $\theta_{um}$  λαμβάνεται ίσος με 1,7 για πρωτεύοντα και 1,0 δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία.

Η τιμή της ικανότητας στροφής που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «Σημαντικές Βλάβες» είναι ίση με το 75% της ολικής ικανότητας στροφής  $\theta_{um}$ .

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

Η τιμή της ικανότητας στροφής κατά τη διαρροή  $\theta_y$  στοιχείων Ω.Σ., που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «Περιορισμός βλαβών» μπορεί να υπολογιστεί για τα διάφορα είδη δομικών στοιχείων ως εξής:

Για δοκούς και υποστυλώματα:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,00135 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d'} \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad \{2.27\}$$

Για τοιχώματα ορθογωνικής και T διατομής:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,002 \left( 1 - 0,135 \frac{L_v}{h} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d'} \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad \{2.28\}$$

Εναλλακτική (ισοδύναμη) έκφραση για δοκούς και υποστυλώματα:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,0013 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + \varphi_y \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad \{2.29\}$$

Εναλλακτική (ισοδύναμη) έκφραση για τοιχώματα ορθογωνικής ή T διατομής:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,002 \left( 1 - 0,125 \frac{L_v}{h} \right) + 0,13\phi_y \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad \{2.30\}$$

$\varphi_y$  : η καμπυλότητα διαρροής στην ακραία διατομή

$a_v z$  : όρος που εκφράζει την επιρροή του “μήκους μετάθεσης” του διαγράμματος ροπών κάμψης

$z$  : ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων που λαμβάνεται ίσος με  $d - d'$  για δοκούς υποστυλώματα και τοιχώματα T διατομής και ίσος με  $0.8h$  για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής

$a_v$  : συντελεστής που ισούται με 1 αν η ροπή διαρροής στην ακραία διατομή  $M_y$  υπερβαίνει το γινόμενο του διατμητικού μήκους  $L_v$  επί τη διατμητική αντοχή  $V_{R,c}$  (αντοχή σε διάτμηση χωρίς οπλισμό διάτμησης), διαφορετικά αν  $M_y < L_v \cdot V_{R,c}$  ο συντελεστής αν λαμβάνεται ίσος με 0.

$f_y$  και  $f_c$  : η αντοχή διαρροής του χάλυβα και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όπως έχουν οριστεί παραπάνω (σε MPa)

$\varepsilon_y$  : λαμβάνεται ίση με  $f_y/E_s$

$d$  και  $d'$  : το στατικό ύψος όσον αφορά τον εφελκόμενο και το θλιβόμενο οπλισμό αντίστοιχα

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

$d_{bL}$  : η μέση διάμετρος του εφελκυόμενου οπλισμού

Στις παραπάνω εκφράσεις της στροφής κατά τη διαρροή, ο πρώτος όρος εκφράζει την συνεισφορά της κάμψης. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά των διατμητικών και ο τρίτος την ολίσθηση της αγκύρωσης των ράβδων.

Οι παραπάνω εκφράσεις της ικανότητας στροφής κατά τη διαρροή εφαρμόζονται σε στοιχεία που δεν υπάρχει υπερκάλυψη ράβδων στην περιοχή που αναμένεται να συμβεί διαρροή. Αν υπάρχει ένωση οπλισμών με παράθεση των ευθύγραμμων άκρων των διαμήκων ράβδων από τη στάθμη της βάσης τους, όπως συμβαίνει σε υποστύλωματα και τοιχώματα τότε η ροπή και η καμπυλότητα διαρροής πρέπει να υπολογίζονται με την τιμή του ποσοστού θλιβόμενου οπλισμού  $\omega$  διπλάσια από αυτή που ισχύει εκτός μήκους υπερκάλυψης. Αν το μήκος υπερκάλυψης  $l_o$  είναι μικρότερο από το  $l_{oy,min}$  τότε οι τιμές ροπής και καμπυλότητας διαρροής πρέπει να υπολογιστούν με την αντοχή διαρροής πολλαπλασιασμένη με το λόγο  $l_o/l_{oy,min}$ . Επίσης, η παραμόρφωση διαρροής  $\epsilon_y$  πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το λόγο  $l_o/l_{oy,min}$ . Ο δεύτερος όρος των εκφράσεων πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το λόγο της ροπής διαρροής της τροποποιημένης ώστε να ληφθεί υπόψη η παράθεση των ων ευθύγραμμων άκρων των διαμήκων ράβδων με την ροπή διαρροής που ισχύει εκτός μήκους υπερκάλυψης. Ακόμα, προκειμένου να διαπιστωθεί αν ο όρος  $\alpha_{vz}$  συνεισφέρει στον πρώτο όρο των εκφράσεων της στροφής διαρροής, γίνεται σύγκριση του γινομένου  $L_v/V_{R,c}$  με την τιμή της ροπής διαρροής της τροποποιημένης ώστε να ληφθεί υπόψη η παράθεση των ων ευθύγραμμων άκρων των διαμήκων ράβδων.

Οι παραπάνω εκφράσεις εφαρμόζονται για στοιχεία με λείους χάλυβες, αν η υπερκάλυψη ξεκινά στην ακραία διατομή του στοιχείου και τα άκρα των ράβδων έχουν τα κατάλληλα άγκιστρα με μήκος υπερκάλυψης  $l_o$  τουλάχιστον ίσο με  $15d_{bL}$ . Η τιμή του  $l_{oy,min}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$l_{oy,min} = 0,3d_{bL} f_{yL} / \sqrt{f_c} \quad \{2.31\}$$

όπου τα  $d_{bL}$ ,  $f_{yL}$  και  $f_c$  έχουν οριστεί παραπάνω

Αν ο έλεγχος γίνεται σε όρους παραμορφώσεων πρέπει να ληφθεί υπόψη η δυσκαμψία που λαμβάνεται από τη σχέση:

$$M_y L_v / 3\theta \quad \{2.32\}$$

με το διατμητικό μήκος  $L_v$  να λαμβάνεται ίσο με το μισό του μήκους του στοιχείου.

## 2.6 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. [9]

### 2.6.1 Καμπύλη εντατικού μεγέθους-παραμόρφωσης $F - \delta$

Η μηχανική συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής δομικού στοιχείου, ή μιας συνδέσεως στοιχείων (κόμβου), περιγράφεται μέσω ενός διαγράμματος εντατικού μεγέθους  $F$  συναρτήσει της παραμόρφωσης ή σχετικής μετακίνησης  $\delta$ . Το είδος, η διεύθυνση κ.λπ. του μεγέθους  $F$  επιλέγονται έτσι ώστε να χαρακτηρίζουν το κύριο μέρος της έντασης την οποία προκαλεί η σεισμική δράση στο στοιχείο, στην κρίσιμη περιοχή ή στην σύνδεση. Η παραμόρφωση  $\delta$  επιλέγεται έτσι ώστε, σε συνδυασμό με το εντατικό μέγεθος  $F$ , να εκφράζει την ενέργεια παραμόρφωσης του στοιχείου, της κρίσιμης περιοχής ή της σύνδεσης.

Όπου καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, κατάλληλα μεγέθη  $F$  και  $\delta$  είναι η ροπή κάμψης  $M$  και η καμπυλότητα  $1/r$ . Αν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, κατάλληλα μεγέθη είναι η τέμνουσα δύναμη  $V$  και η γωνιακή (διατμητική) παραμόρφωση  $\gamma$ .

Επειδή στα στοιχεία Ω.Σ. οι καμπτικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν με τις διατμητικές και με τις στροφές των ακραίων διατομών λόγω εξόλκευσης των οπλισμών στην αγκύρωση πέραν του άκρου του στοιχείου, η καταλληλότερη επιλογή  $F$  και  $\delta$  είναι η ροπή  $M$  και η γωνία στροφής  $\theta$  στα άκρα του στοιχείου, όπου η  $\theta$  περιλαμβάνει το σύνολο των διατμητικών και καμπτικών παραμορφώσεων, καθώς και τη στροφή των άκρων λόγω εξόλκευσης οπλισμών.

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., θεωρείται ότι η μηχανική συμπεριφορά περιγράφεται από την περιβάλλουσα των εξασθενημένων αποκρίσεων  $F$ , μετά από πλήρως ανακυκλιζόμενη επιβαλλόμενη παραμόρφωση  $\pm\delta$ , μέχρι και την απώλεια της ικανότητας του δομικού στοιχείου, της κρίσιμης περιοχής ή της σύνδεσης να φέρει τα φορτία βαρύτητας.

Η απώλεια της φέρουσας ικανότητας ή αντίστασης έναντι κατακορύφων φορτίων σηματοδοτεί το τελικό στάδιο της αστοχίας του στοιχείου. Κατά κανόνα, αυτή συμβαίνει σε τιμές της παραμόρφωσης  $\delta$  πολύ πέραν από αυτές που προκαλούν απώλεια ή ουσιαστική μείωση της αντίστασης του στοιχείου έναντι της σεισμικής έντασης. Συνήθως λαμβάνονται υπόψη τρεις πλήρεις ανακυκλίσεις σε κάθε επιβαλλόμενη παραμόρφωση  $\delta$ .

### 2.6.2 Οιονεί ελαστικός κλάδος και διαρροή

Η προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης  $F - \delta$  μέσω ενός πολυγραμμικού διαγράμματος είναι γενικώς επαρκής για τις ανάγκες του σχεδιασμού. Ο πρώτος ευθύγραμμος κλάδος εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μέχρι τη συμβατική (ή ενεργό) «διαρροή» του στοιχείου (ή της κρίσιμης περιοχής του στοιχείου, ή της σύνδεσης δύο ή περισσότερων στοιχείων), μετά την οποία η καμπύλη  $F - \delta$  μπορεί να λαμβάνεται περίπου οριζόντια.

Η αντίσταση διαρροής  $F_y$  μπορεί να ληφθεί ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας.

Έτσι, μπορεί να διακριθούν οι εξής περιπτώσεις:

- Σε ένα μέλος που αστοχεί από κάμψη σε ροπή στο άκρο ίση με  $M_u$ , θα λαμβάνεται
  - $F_y = V_{M_u}$ , εφόσον οι  $F$  εκφράζονται σε όρους ροπών,
  - Είτε  $F_y = V_{M_u}$  (η τέμνουσα, την στιγμή της καμπτικής αστοχίας), εφόσον οι  $F$  εκφράζονται σε όρους τεμνουσών.
- Σε ένα μέλος που αστοχεί από τέμνουσα, όταν δηλαδή  $V_u < V_{M_u}$ , θα λαμβάνεται
  - $F_y = M_{V_u}$  (η ροπή, την στιγμή της διατμητικής αστοχίας), εφόσον οι  $F$  εκφράζονται σε όρους ροπών,
  - Είτε  $F_y = V_u$ , εφόσον οι  $F$  εκφράζονται σε όρους τεμνουσών.

Είναι:

$$V_{M_u} = M_u / (\alpha_s h) \quad \{2.33\}$$

όπου

$\alpha_s = M / (V \cdot h)$  ο “λόγος διατμήσεως” της υπόψη περιοχής κατά την υπό εξέταση εντατική κατάσταση.

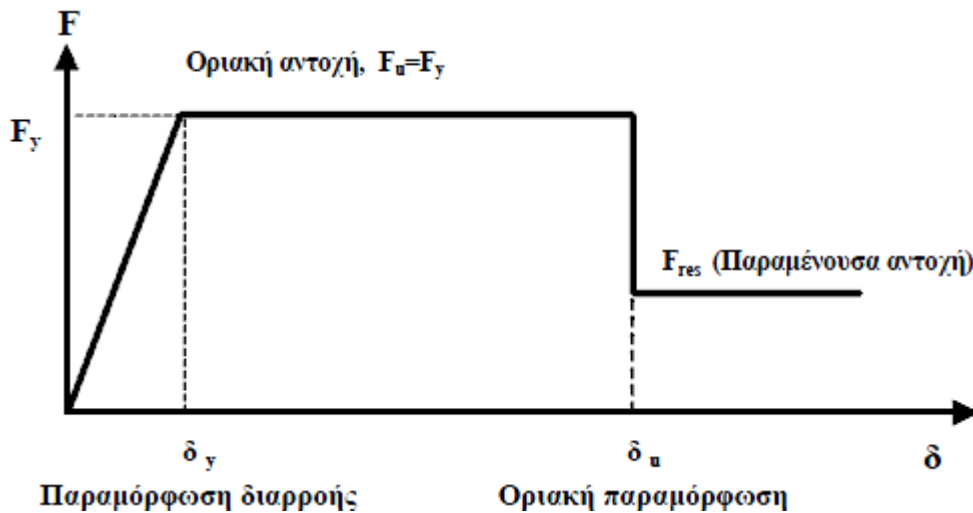
Σημειώνεται ότι, η έννοια “διαρροής” δομικού στοιχείου, είναι ευρύτερη εκείνης που προκαλείται αποκλειστικώς από τη διαρροή οπλισμού.

### 2.6.3 Μετελαστικός κλάδος

Στις περιπτώσεις όπου αναμένεται ορισμένη αξιόπιστη πλαστιμότητα των κρίσιμων περιοχών, είναι αποδεκτό να λαμβάνεται ο μετελαστικός κλάδος της καμπύλης  $F - \delta$  ως οριζόντιος μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας του στοιχείου  $\delta_u$ .

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη τυχόν αναμενόμενη έντονη εξασθένηση της απόκρισης με την ανακύκλιση της παραμόρφωσης, ή φαινόμενα 2ας τάξεως, ο μετελαστικός κλάδος οφείλει να λαμβάνεται με αρνητική κλίση.

Αν χρησιμοποιείται ανελαστική μέθοδος ανάλυσης της σεισμικής απόκρισης (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-§5.7 και §5.8), η χρήση αρνητικής κλίσης της καμπύλης  $F - \delta$  μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητικά προβλήματα και λανθασμένα αποτελέσματα. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις, συνιστάται μια κατάλληλη μείωση της  $F_y$ , ώστε ένας συντηρητικότερος οριζόντιος μετελαστικός κλάδος, να λαμβάνει προσεγγιστικώς υπόψη και την εξασθένηση της απόκρισης υπό μεγαλύτερες παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.6: Καμπύλη εντατικού μεγέθους – παραμόρφωσης  $F - \delta$  [9].

Ως αστοχία ορίζεται η σημαντική και συχνά απότομη μείωση της αντίστασης  $F$  υπό μονοτονικά αυξανόμενη παραμόρφωση, ή υπό ανακυκλιζόμενη παραμόρφωση. Υπό την έννοια αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ως «αστοχία» μία μείωση της αντίστασης ίση περίπου με 20% της μέγιστης τιμής της. Ως παραμόρφωση αστοχίας,  $\delta_u$ , επομένως, ορίζεται εκείνη η τιμή που αντιστοιχεί σε απόκριση  $F$  μειωμένη κατά 20% έναντι της μέγιστης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η «αστοχία» λόγω σημαντικής πτώσης της αντίστασης  $F$  δεν συνοδεύεται απαραίτητα από μείωση της αντίστασης έναντι φορτίων βαρύτητας. Εξάιρεση αποτελούν υποστυλώματα με πολύ υψηλό ανηγμένο αξονικό φορτίο.

Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας,  $\delta_u$ , ορίζει και την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης, μέσω του πλαστικού τμήματος της παραμόρφωσης αστοχίας, δηλαδή του  $\delta_{u,pl} = \delta_u - \delta_y$  ενός στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής ή μιας συνδέσεως στοιχείων. Η παραμόρφωση  $\delta$  μπορεί να εκφράζεται ως ανηγμένο μέγεθος, με τη βοήθεια του δείκτη

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

πλαστικότητας παραμορφώσεων,  $\mu_\delta = \delta / \delta_y$ . Η  $\mu_{\delta u} = \delta_u / \delta_y$  ορίζεται ως διαθέσιμη (μέγιστη) τιμή του δείκτη πλαστικότητας παραμορφώσεων.

Εάν ως  $\delta$  χρησιμοποιείται η γωνία στροφής χορδής,  $\theta$ , ο δείκτης πλαστικότητας  $\mu_\delta = \mu_\theta$  αφορά γωνίες στροφής χορδής, δηλ. σχετική μετάθεση άκρων στοιχείου. Αν ως  $\delta$  χρησιμοποιείται η καμπυλότητα  $1/r$ , τότε  $\mu_\delta$  είναι ο δείκτης πλαστικότητας καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$ .

#### 2.6.4 Απομένουσα αντίσταση

Μετά την παραμόρφωση αστοχίας,  $\delta_u$ , μειώνεται σημαντικά η απόκριση του στοιχείου σε ένταση λόγω σεισμικής δράσης υπό αυξανόμενη παραμόρφωση  $\delta$ , αλλά συνήθως δε μηδενίζεται. Η απόκριση αυτή μπορεί να θεωρηθεί περίπου σταθερή μέχρι την παραμόρφωση που προκαλεί απώλεια της αντίστασης έναντι φορτίων βαρύτητας, ονομάζεται δε απομένουσα αντίσταση  $F_{res}$ .

Μόνον για λόγους προσομοίωσης της απόκρισης του συνολικού δομήματος μετά την παραμόρφωση αστοχίας των επιμέρους στοιχείων, μπορεί να λαμβάνεται απομένουσα αντοχή ίση με το 25% της οριακής αντοχής των στοιχείων.

#### 2.6.5 Πλάστιμη και ψαθυρή συμπεριφορά

Αν η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστικότητας  $\mu_\delta$  ενός δομικού στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής στοιχείου, ή μιας συνδέσεως στοιχείων ξεπερνά ένα ορισμένο όριο, η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως πλάστιμη, οπότε η ανίσωση ασφαλείας του θα εκφράζεται σε όρους παραμορφώσεων  $\delta$ . Διαφορετικά, η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή, οπότε η ανίσωση ασφαλείας θα εκφράζεται σε όρους δυνάμεων  $F$ .

Το όριο μεταξύ πλάστιμης και ψαθυρής συμπεριφοράς λαμβάνεται συμβατικά ίσο με 2.0, όταν αναφέρεται σε διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστικότητας σχετικών μετακινήσεων,  $\mu_\delta$  ή  $\mu_\theta$ . Όταν αναφέρεται σε διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστικότητας καμπυλοτήτων,  $\mu_{1/r}$ , το συμβατικό όριο λαμβάνεται ίσο με 3.0.

Στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος που διαρρέουν σε διάτμηση πριν από τη διαρροή σε κάμψη (δηλαδή στα οποία η  $V_{Mu} = M_u / (\alpha_s h)$  είναι μεγαλύτερη από τη  $V_u$ ) θεωρείται ότι έχουν ψαθυρή συμπεριφορά.

Στοιχεία που διαρρέουν σε κάμψη πριν από τη διαρροή σε διάτμηση (δηλαδή όταν  $V_{Mu} = M_u / (\alpha_s h)$  είναι μικρότερη της  $V_u$ ) μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν πλάστιμη συμπεριφορά, με εξαίρεση στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης (π.χ.  $\alpha_s = M/Vh < 2$ ), των



οποίων η συμπεριφορά μπορεί να ληφθεί ως ψαθυρή, χωρίς υπολογισμό και έλεγχο της διαθέσιμης τιμής του δείκτη πλαστιμότητας

Στοιχεία με συμπεριφορά η οποία κατά τα ανωτέρω χαρακτηρίζεται κατ'αρχήν ως πλαστική, χρειάζεται να ελέγχονται σε όρους δυνάμεων έναντι του ενδεχομένου μετελαστικής αστοχίας από διάτμηση λόγω εξασθένησης της διατμητικής αντοχής κατά την ανακύκλιση των παραμορφώσεων κατά την §7.2.4.2 του ΚΑΝ.ΕΠΕ..

### 2.6.6 Υπολογισμός γωνίας στροφής διαρροής

Το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό της στροφής διαρροής  $\theta_y$  είναι ο υπολογισμός της καμπυλότητας διαρροής  $(1/r)_y$ . Η τελευταία, σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, μπορεί να υπολογισθεί με βάση την υπόθεση επιπεδότητας διατομών και με γραμμικό νόμο  $\sigma$ - $\epsilon$  του χάλυβα και του σκυροδέματος σε θλίψη, για μηδενική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Στο Παράρτημα 7<sup>A</sup> του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνεται τρόπος αναλυτικού υπολογισμού της καμπυλότητας διαρροής διατομής  $\Omega$ .Σ. με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη, ο οποίος υιοθετείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και παρουσιάζεται ακολούθως.

Σε περίπτωση που η διαρροή της διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού, τότε:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)d} \quad \{2.34\}$$

Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε μη-γραμμικότητα του θλιβόμενου σκυροδέματος (για παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας πέραν του  $\epsilon_c \approx 1,8f_c/E_c$ )

$$(1/r)_y = \frac{\epsilon_c}{\xi_y d} = \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d} \quad \{2.35\}$$

Τελικά ως καμπυλότητα διαρροής λαμβάνεται η μικρότερη των τιμών  $(1/r)_y$  από τις εξισώσεις {2.33} και {2.34}

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή,  $\xi_y$  ανηγμένο στο στατικό ύψος  $d$ , είναι:

$$\xi_y = \left( a^2 A^2 + 2aB \right)^{\frac{1}{2}} - aA \quad \{2.36\}$$

όπου  $a = E_s/E_c$  και τα  $A, B$  προσδιορίζονται από τις κατωτέρω εξισώσεις, εάν η διαρροή ελέγχεται από τον εφελκυσμένο οπλισμό ή από το θλιβόμενο σκυρόδεμα αντίστοιχα:

- i. Διαρροή λόγω χάλυβα:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y} \quad \{2.37\}$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y} \quad \{2.38\}$$

ii. Διαρροή λόγω σκυροδέματος

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{\varepsilon_c E_s b d} \approx \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1,8 a b d f_c} \quad \{2.39\}$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta') \quad \{2.40\}$$

Στις Εξ. {2.36} έως και {2.39}, τα  $\rho$ ,  $\rho'$  και  $\rho_v$  είναι τα ποσοστά του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού (ανηγμένα στο  $b \cdot d$ ),  $\delta' = d'/d$ , όπου  $d'$  η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος,  $b$  το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης (λαμβάνεται το πλάτος της δοκού για λειτουργία ορθογωνικής και το συνεργαζόμενο πλάτος για λειτουργία πλακοδοκού) και  $N$  το αξονικό φορτίο (θετικό σε θλιψη και μηδενικό σε εφελκυσμό).

### 2.6.7 Υπολογισμός της παραμόρφωσης διαρροής όταν προέχει η κάμψη

Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης διαρροής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συμβολή τόσο της κάμψης, όσο και της διάτμησης στις παραμορφώσεις (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-§7.2.2).

Οι σχέσεις που προτείνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ για την εκτίμηση της  $\theta_y$  βασίζονται στα εξής :

Η συμβολή της κάμψης στην παραμόρφωση διαρροής μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την τιμή της καμπυλότητας διαρροής,  $(1/r)_y$ , της οποίας ο τρόπος προσδιορισμού περιγράφηκε παραπάνω. Εάν οι παραμορφώσεις  $\delta$  αναφέρονται στο σύνολο του μήκους  $L_s = a_s \cdot d$  στο άκρο δομικού στοιχείου (π.χ. όταν ως  $\delta$  χρησιμοποιείται η γωνία στροφής χορδής  $\theta$ ), τότε στη φάση της καμπτικής διαρροής το τμήμα της  $\theta_y$  που οφείλεται στην κάμψη, μπορεί να ληφθεί ίσο με  $(1/r)_y (L_s + a_v \cdot z) / 3$ , όπου  $a_v \cdot z$  όρος εκφράζει την επιρροή του “μήκους μετάθεσης” των ροπών κάμψης  $s'$  αυτές ( $z$  είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων και ο συντελεστής  $a_v$  ισούται με 1 εάν η τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου,  $V_{R1}$ , υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή,  $V_{Mu} = M_y / L_s$ , και με 0 αν είναι μεγαλύτερη).

Στην τιμή αυτής της  $\theta_y$  (λόγω κάμψης) χρειάζεται να προστεθεί η συμβολή των διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και η συμβολή της στροφής της ακραίας διατομής λόγω εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της διατομής στήριξης, είναι ανάλογη του μήκους που απαιτείται για την αγκύρωση των ράβδων.

Για να ληφθεί υπόψη η εξόλκευση του οπλισμού στη στήριξη και οι διατμητικές παραμορφώσεις, η γωνία στροφής χορδής  $\theta_y$  στην καμπτική διαρροή στοιχείων μπορεί να εκτιμηθεί από τις ακόλουθες εκφράσεις:

Για δοκούς ή υποστυλώματα:

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0,0014 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{d_b f_y (1/r)_y}{8\sqrt{f_c}} \quad \{2.41\}$$

Για τοιχώματα:

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0,0013 + \frac{d_b f_y (1/r)_y}{8\sqrt{f_c}} \quad \{2.42\}$$

όπου:

$h$  : το ύψος της διατομής

$(1/r)_y$  : η καμπυλότητα του δομικού στοιχείου

$L_s$  : ο λόγος  $M/V$  στην ακραία διατομή του στοιχείου, δηλαδή η απόσταση της ακραίας διατομής από το σημείο μηδενισμού των ροπών.

Στις Εξ. (2.40) και 2.41) ο 1<sup>ος</sup> όρος εκφράζει τη συμβολή των καμπτικών παραμορφώσεων. Ο 2<sup>ος</sup> όρος στην Εξ. (2.40) εκφράζει τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος  $L_s$ , ενώ ο 3<sup>ος</sup> εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου ( $f_y$  και  $f_c$  σε MPa).

Όσον αφορά το μήκος διάτμησης, υπάρχει μία διατομή, στην οποία μηδενίζεται η ροπή. Επομένως, κάθε δομικό στοιχείο, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο προβόλους, πακτωμένοι στα άκρα του στοιχείου και χαρακτηρίζεται από ένα μήκος ισοδύναμο με το μήκος διάτμησης  $L_s$ :

$$L_s = M/V \quad \{2.43\}$$

όπου  $M$  και  $V$  είναι η ροπή και η τέμνουσα στο άκρο του στοιχείου

### 2.6.8 Υπολογισμός της παραμόρφωσης διαρροής όταν προέχει η διάτμηση

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., στην περίπτωση που η τέμνουσα αντοχής του στοιχείου  $V_R$ , υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή,  $V_{Mu} = M_y/L_s$ , τότε καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση, οπότε:

- η παραμόρφωση διαρροής υπολογίζεται ως το γινόμενο της  $(1/r)_y$  ή της  $\theta_y$  επί  $V_R L_s / M_y$ , ανάλογα με το νόημα της  $\delta$  (ως  $1/r$  ή ως  $\theta$ ) (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-§7.2.2)

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

- η ροπή διαρροής θα υπολογίζεται σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην §8.3.1 (ii) του Κανονισμού ( $F_y = M_{Vu}$ , όπου  $M_{Vu}$  η ροπή τη στιγμή της διατμητικής αστοχίας).

Ακόμη και στην περίπτωση που αρχικά εκτιμάται ότι προέχει η καμπτική αστοχία της κρίσιμης περιοχής ενός στοιχείου, θα πρέπει αυτή να ελέγχεται σε όρους δυνάμεων έναντι του ενδεχομένου μετελαστικής αστοχίας από διάτμηση λόγω εξασθένησης της διατμητικής αντοχής  $V_R$  με την ανακύκλιση των παραμορφώσεων, όπως ήδη ειπώθηκε παραπάνω (ΚΑΝΕΠΕ.-§7.2.4.2).

Για να ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο αυτό, απαιτείται η εκτίμηση αυτής της εξασθένησης της  $V_R$  συναρτήσει του απαιτούμενου για τον ανασχεδιασμό δείκτη πλαστιμότητας επιβαλλόμενων μετακινήσεων,  $\mu_s = \mu_\theta = \theta_u / \theta_y$  όπου η  $\theta_y$  προσδιορίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω, ενώ η εκτίμηση της  $\theta_u$  θα περιγραφεί στα επόμενα.

Η εξασθένηση αυτής της διατμητικής αντίστασης με την ανακύκλιση οφείλεται στο συνδυασμό πολλών μηχανισμών, όπως:

- i. Η λειοτριβίση των επιφανειών των ρωγμών και η εξασθένηση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών
- ii. Η διεύρυνση των ρωγμών με τη συσσώρευση ανελαστικών παραμορφώσεων (μήκυνσης) στους συνδετήρες και με τη μείωση των τάσεων συνάφειας κατά μήκος τους, λόγω της ανακύκλισης, και η επακόλουθη εξασθένηση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών.
- iii. Η εξασθένηση της δράσης βλήτρου με την ανακύκλιση της έντασης
- iv. Η ανάπτυξη διαμπερών καμπτικών ρωγμών με την ανακύκλιση, και η μείωση της αντίστοιχης αντοχής σε τέμνουσα της θλιβόμενης ζώνης
- v. Η μείωση θλιπτικής αντοχής των λοξών θλιπτήρων.

Όταν δε διατίθεται ένα ακριβέστερο προσομοίωμα, η εξασθένηση της αντοχής σε τέμνουσα επιτρέπεται να εκτιμάται με εμπειρικές μεθόδους όπως αυτές του Παραρτήματος 7Δ του ΚΑΝ.ΕΠΕ., το οποίο ορίζει τα εξής :

Η διατμητική αντοχή  $V_R$ , ενός δομικού στοιχείου (υποστυλώματος, δοκού, τοιχώματος) το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις μειώνεται με το μέγεθος του πλαστικού τμήματος της μετακίνησης του άκρου του μήκους διάτμησης ως προς την εφαπτομένη στον άξονα του στοιχείου στη διατομή της μεγίστης ροπής, ανηγμένου στη μετακίνηση διαρροής στο ίδιο σημείο,  $\mu_\Delta^{pl} = \mu_\Delta - 1$ . Η διατμητική αντοχή δομικού στοιχείου, όπως αυτή καθορίζεται από τη διαρροή των συνδετήρων, μειώνεται με την τιμή του  $\mu_\Delta^{pl}$  ως (μονάδες MN και m):

## Κεφάλαιο 2

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

$$V_R = \frac{h-x}{2L_s} \min(N; 0,55 A_c f_c) + \left(1 - 0,05 \min(5, \mu_{\Delta}^{pl})\right) \left[0,16 \max(0,5; 100 \rho_{tot}) (1 - 0,16 \min(5, a_s)) \sqrt{f_c A_c} + V_w\right]$$

{2. 44}

όπου:

$h$  : Ύψος διατομής (ίσο με τη διάμετρο  $D$  στις κυκλικές διατομές)

$x$  : Ύψος της θλιβόμενης ζώνης ( $x=d \cdot \xi_y$ )

$N$  : Αξονικό φορτίο σε MN (θετικό για θλίψη, μηδενικό για εφελκυσμό)

$a_s$  :  $L_s/h$ : Λόγος διάτμησης.

$A_c$  : Επιφάνεια σκυροδέματος, ίση με  $b_w \cdot d$  σε διατομές με ορθογωνικό κορμό πάχους  $b_w$  και στατικό ύψος  $d$

$f_c$  : Αντοχή σκυροδέματος σε MPa.

$\rho_{tot}$  : Συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού (εφελκυόμενου, θλιβόμενου και ενδιάμεσου).

$V_w$  : Συμβολή εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή.

Η  $V_w$  για διατομές με ορθογωνικό κορμό πάχους  $b_w$  ισούται με :

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} \quad \{2. 45\}$$

όπου :

$\rho_w$  : Το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού από σκέλη συνδετήρα στη ρωγμή

$z$  : Ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων (ίσος με  $d-d'$  σε υποστυλώματα, δοκούς και τοιχώματα διατομής T ή H, ή με  $0,8h$  σε τοιχώματα ορθογωνικής διατομής) και

$f_{yw}$  : Η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού.

Η τιμή της  $V_R$  για την τέμνουσα αντοχής υπολογίζεται από την ίδια σχέση και για τον ΕΚ8, διαιρώντας την με 1.15.

Η διατμητική αντοχή,  $V_R$ , τοιχώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει την οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε αστοχία του κορμού σε λοξή θλίψη,  $V_{R,max}$ , η οποία, υπό ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις, ελαστικές ή μετελαστικές, δίνεται από τη σχέση:

$$V_{R,max} = 0,85 \cdot \left(1 - 0,06 \cdot \min(5, \mu_{\Delta}^{pl})\right) \cdot \left(1 + 1,8 \cdot \min\left(0,15, \frac{N}{A_c f_c}\right) \cdot (1 + 0,25 \cdot \max(1,75, \rho_{tot})) \cdot (1 - 0,2 \cdot \min(2, a_s)) \cdot \sqrt{f_c} b_w z\right) \quad \{2. 46\}$$

$$V_{R,max} = \frac{4}{7} \left(1 - 0,02 \min(5, \mu_{\theta}^{pl})\right) \left(1 + 1,35 \frac{N}{A_c f_c}\right) \left(1 + 0,45(100 \rho_{tot})\right) \sqrt{\min(40; f_c)} \cdot b_w z \cdot \sin 2\delta \quad \{2. 47\}$$

Η πλαστική άρθρωση σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια

όπου  $\delta$  η γωνία της διαγωνίου του στοιχείου ως προς τον άξονά του ( $\tan\delta=h/2L_s=0.5/\alpha_s$ ).

Η τιμή της  $V_{R,max}$  προ της καμπτικής διαρροής υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση με  $\mu_{\Delta pl} = 0$ .

Η διατμητική αντοχή  $V_R$  υποστρώματος με λόγο διάτμησης  $\alpha_s \leq 2,0$  δεν μπορεί να ξεπεράσει την οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος κατά τη διαγώνιο του στοιχείου,  $V_{R,max}$  η οποία υπό ανακυκλιζόμενες μετελαστικές παραμορφώσεις, μειώνεται με το μέγεθος του πλαστικού τμήματος του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων,  $\mu_{\Delta}^{pl} = \mu_{\Delta} - 1$ .

### 2.6.9 Υπολογισμός γωνίας στροφής αστοχίας

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (§7.2.4.1), η διαθέσιμη γωνία στροφής χορδής  $\theta_u$  στο άκρο δομικού στοιχείου πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη, υπέρ της ασφαλείας, όλες τις υπεισερχόμενες πηγές αβεβαιότητας.

Είναι δυνατή η εμπειρική εκτίμηση της διαθέσιμης τιμής της γωνίας στροφής χορδής στοιχείων Ο.Σ. συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων και των οπλισμών τους, με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων ή πινάκων.

Για τη γωνία στροφής χορδής κατά την αστοχία δοκών ή υποστρώματων που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί με τις μετά το 1985 αντιλήψεις για αντισεισμικές κατασκευές η σχέση που υιοθετεί ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι η εξής:

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3)^v \left[ \frac{\max(0,01, \omega')}{\max(0,01, \omega)} f_c \right]^{0,225} (a_s)^{0,35} 25^{\left( a \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d}) \quad \{2.48\}$$

όπου:

$\alpha_s$ : Ο λόγος διάτμησης.

$\omega'$ ,  $\omega$ : Μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού (ο διαμήκης οπλισμός μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος θεωρείται ως εφελκόμενος).

$v=N/bhf_c$ : ( $b$  = πλάτος θλιβόμενης ζώνης)

$\rho_s=A_{sx}/b_w s_h$ : Γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης.

$\rho_d$ : Γεωμετρικό ποσοστό τυχόντος δισδιαγώνιου οπλισμού.

$a$ : Συντελεστής που λαμβάνεται ίσος με μηδέν όταν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος.

Για τοιχώματα με τις ίδιες προϋποθέσεις το 2<sup>ο</sup> μέλος της εξίσωσης {2.48} χρειάζεται να πολλαπλασιασθεί επί 0.58 (ο συντελεστής γίνεται 0,009).

Σε στοιχεία χωρίς αντισεισμικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπως ισχύει στη συγκεκριμένη περίπτωση με χρήση λείων χαλύβων, το 2<sup>ο</sup> μέλος της Εξ. {2.48} χρειάζεται να πολλαπλασιασθεί επί 0.95.

### 2.6.10 Υπολογισμός ροπής διαρροής $M_y$

Η αντίσταση διαρροής  $F_y$  μπορεί να λαμβάνεται ίση με την οριακή αντοχή (για το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως αυτή υπολογίζεται κατά τις διατάξεις του Ε.Κ.Ω.Σ. 2000), με χρήση όμως των μέσων τιμών της αντοχής των υλικών, αντί των τιμών σχεδιασμού (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-§7.2.1). Επιπλέον, στο Παράρτημα 7<sup>Α</sup> του ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρέχεται σχέση για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής ενός στοιχείου συναρτήσει της καμπυλότητας διαρροής  $(1/r)_y$ , η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

Στην περίπτωση των πλακοδοκών, η ροπή αστοχίας (ή διαρροής) για εφελκυσμό στην πλάκα πρέπει να υπολογίζεται προσμετρώντας και τους παράλληλους στη δοκό οπλισμούς της πλάκας οι οποίοι βρίσκονται μέσα στο συνεργαζόμενο σε εφελκυσμό πλάτος της πλάκας, και είναι επαρκώς αγκυρωμένοι πέραν της διατομής στήριξης της δοκού. Το συνεργαζόμενο σε εφελκυσμό πλάτος της πλάκας σε κάθε πλευρά του κορμού μπορεί να ληφθεί ίσο με το ένα τέταρτο του ανοίγματος της δοκού ή με το μισό της απόστασης μέχρι την πρώτη παράλληλη δοκό, όποιο είναι μικρότερο.

Σημειώνεται ότι η ροπή αντοχής ή διαρροής πλακοδοκών είναι ευαίσθητη στην τιμή του συνεργαζόμενου πλάτους σε εφελκυσμό, ενώ η υποτίμηση της καμπτικής αντοχής πλακοδοκών με υιοθέτηση χαμηλής τιμής συνεργαζόμενου πλάτους σε εφελκυσμό είναι εις βάρος της ασφάλειας, εάν οδηγεί στο εσφαλμένο συμπέρασμα ότι η πλακοδοκός διαρρέει σε κάμψη προτού αστοχήσει σε τέμνουσα ή ότι σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στις δοκούς αντί στα υποστυλώματα.

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Παράρτημα 7<sup>Α</sup>) η ροπή διαρροής μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{M_y}{bd^3} = (1/r)_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left( 0.5(1 + \delta^*) - \frac{\xi_y}{3} \right) + \left[ (1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta^*)\rho + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta^*) \right] (1 - \delta^*) \frac{E_s}{2} \right\} \quad \{2.49\}$$

## 2.7 Τα χαρακτηριστικά της πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τον Ιταλικό Κανονισμό CNR-DT 200/2004 [3]

Ο Ιταλικός Κανονισμός υιοθετεί τις παρακάτω σχέσεις υπολογισμού της στροφής χορδής κατά τη διαρροή και την αστοχία.

Η στρόφη χορδής κατά τη διαρροή:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v}{3} + 0.0013 \left( 1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + 0.13 \varphi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \{2.50\}$$

όπου

$h$  : το βάθος της διατομής

$d_b$  : η μέση διάμετρος των διαμήκων ράβδων

$f_c$  και  $f_y$  : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και η αντοχή διαρροής του χάλυβα (MPa), των οποίων οι τιμές λαμβάνονται από επιτόπου δοκιμές των υφιστάμενων υλικών διαιρούνται με τον κατάλληλο συντελεστή εμπιστοσύνης ανάλογο της αξιοπιστίας των δεδομένων που παρέχονται

$\varphi_u$  : η τελική καμπυλότητα της ακραίας διατομής, που εκτιμάται από την παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος  $\varepsilon_{ccu}$

$\varphi_y$  : η καμπυλότητα της ακραίας διατομής, όταν ο χάλυβας υφίσταται διαρροή

$L_{pl}$  : το μέγεθος της πλαστικής άρθρωσης, και εκτιμάται ως εξής

$$L_{pl} = 0,1L_v + 0,17h + 0,24 \frac{d_b f_y \text{ (MPa)}}{\sqrt{f_c \text{ (MPa)}}} \quad \{2.51\}$$

$L_v$  : το διατμητικό μήκος του στοιχείου (η απόσταση μεταξύ του σημείου μέγιστης ροπής και του σημείου μηδενισμού ροπών)

Η στρόφη χορδής κατά την αστοχία:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left( \theta_y + (\varphi_u + \varphi_y) L_{pl} \left( 1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_v} \right) \right) \quad \{2.52\}$$

όπου

$\gamma_{el}$  : λαμβάνεται ίσος με 1.5 ή 1.0.

Οι σχέσεις υπολογισμού του μήκους πλαστικής άρθρωσης αλλά και της στροφής αστοχίας ταυτίζονται με τις αντίστοιχες του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3.



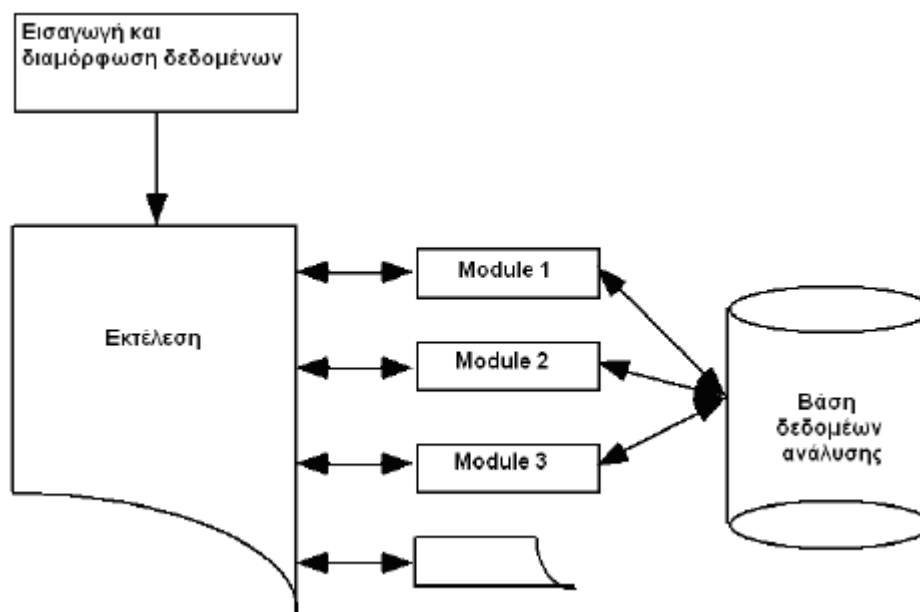
## Κεφάλαιο 3

### Το λογισμικό FE77

#### 3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία αναφορά στο λογισμικό, το οποίο και χρησιμοποιείται για τις αναλύσεις στην παρούσα εργασία και με βάση τα αποτελέσματα του οποίου γίνεται η αποτίμηση των δομικών στοιχείων σε επόμενο κεφάλαιο.

Πρόκειται για ένα γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με την ονομασία FE77 (παλαιότερη ονομασία Finel). Ο κώδικάς του, ο οποίος ήταν διαθέσιμος στο εργαστήριο της Στατικής & Αντισεισμικών Ερευνών του Ε.Μ.Π., έχει γραφτεί από την ερευνητική ομάδα του Δρ. D. Hitchings στο Imperial College του Πανεπιστημίου του Λονδίνου. Πρόκειται για λογισμικό γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το οποίο είναι ιδιαίτερα ευέλικτο χάρις στη συστηματική υποδιαίρεσή του σε προγραμματιστικές υπομονάδες (modules).

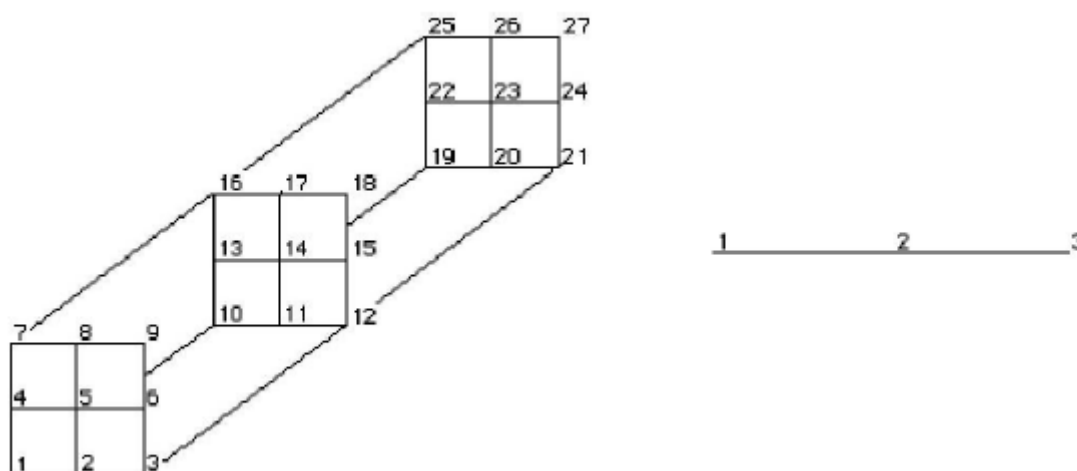


Σχήμα 3. 1: Δομή προγράμματος Finel [16].

Η δόμησή του αυτή το καθιστά ιδανικό για την ανάπτυξη πρόσθετου κώδικα που ουσιαστικά να αποτελεί μια καινούρια υπομονάδα και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση περισσότερο εξειδικευμένων προβλημάτων ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία όπως είναι π.χ. η μη γραμμική ανάλυση φορέων ωπλισμένου σκυροδέματος.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρύτατα για την ανάλυση κατασκευών. Ακολουθείται η λογική της διακριτοποίησης ενός συνεχούς μέσου σε ένα πεπερασμένο αριθμό στοιχείων που συνδέονται με κόμβους στους οποίους απαιτείται να ισχύει ισορροπία δυνάμεων. Η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύσσεται εδώ και αρκετές δεκαετίες και στοιχεία για τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να βρεθούν σε πολυάριθμες βιβλιογραφικές αναφορές.

Η διακριτοποίηση των φορέων ωπλισμένου σκυροδέματος έγινε με τρισδιάστατα πρισματικά ισοπαραμετρικά στοιχεία Lagrange 27 κόμβων για το σκυρόδεμα και ισοπαραμετρικά στοιχεία δικτυώματος 3 κόμβων για τον χάλυβα (Σχήμα 3. 2) [16].



Σχήμα 3. 2: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν[16].

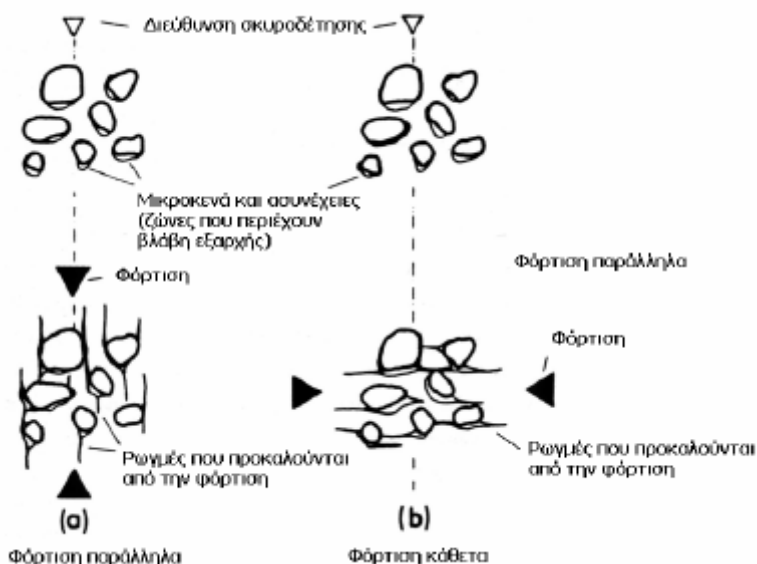
## 3.2 Καταστατική συμπεριφορά ωπλισμένου σκυροδέματος

### 3.2.1 Η ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα

Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα αίτια έναρξης της θραύσης και κατ' επέκταση της αστοχίας στο σκυρόδεμα είναι οι ατέλειες και οι μικρορωγμές που υπάρχουν μέσα στο υλικό ακόμα και πριν από την εφαρμογή του φορτίου. Οι ασυνέχειες αυτές είναι συνήθως τυχαία κατανομημένες, με τυχαίο προσανατολισμό, σχήμα και όγκο μέσα στο υλικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αρχική τους διαμόρφωση εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η σκυροδέτηση (Σχήμα 3. 3).

Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που εφαρμόζονται στα όρια ενός σύμμεικτου υλικού όπως είναι το σκυρόδεμα, δημιουργούν ένα παραμορφωσιακό πεδίο που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή των συστατικών του, δηλαδή τα αδρανή και το συνδετικό τους ιστό. Εξαιτίας της ανομοιομορφίας του υλικού δημιουργούνται συγκεντρώσεις τάσεων και

παραμορφώσεων στις άκρες των ασυνεχειών οι οποίες τελικώς προκαλούν την θραύση και την ρηγμάτωση (Σχήμα 3. 3, Σχήμα 3. 4). Η διαμόρφωση μιας σχετικά μεγάλου μήκους διακριτής ρηγμάτωσης γίνεται πάντα κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας θλιπτικής τάσης.



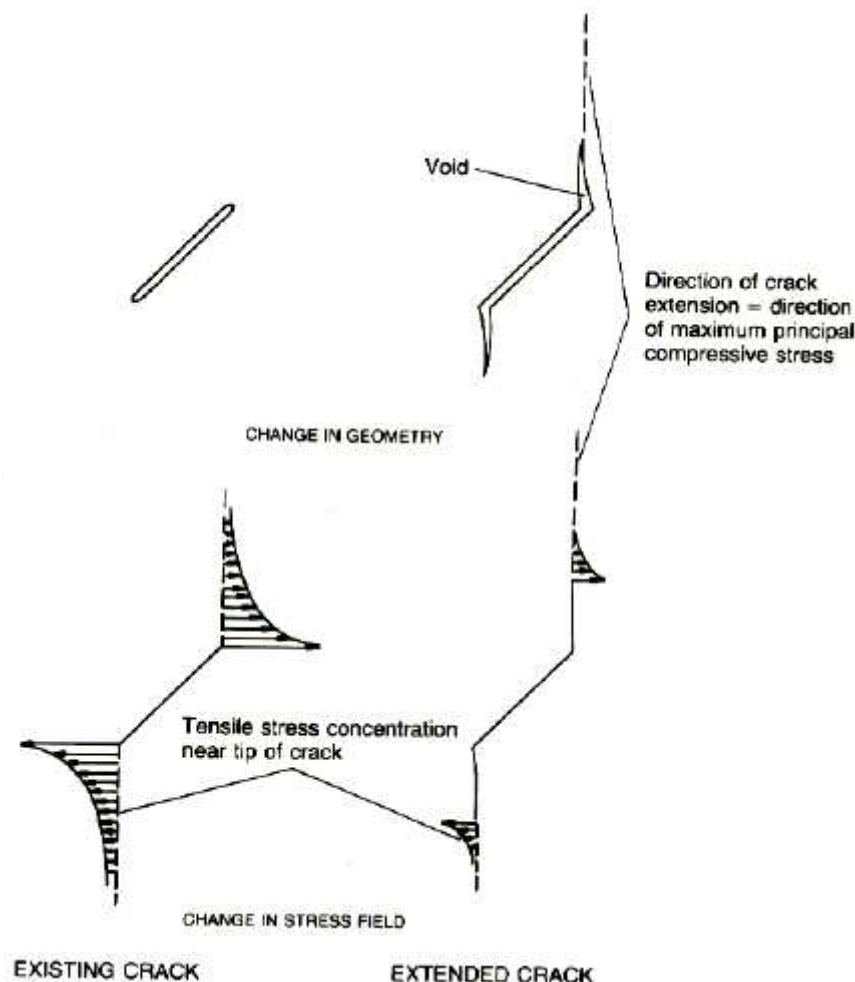
Σχήμα 3. 3: Διαμόρφωση ατελειών (μικρορηγματώσεων) στην περιοχή των αδρανών και επέκταση αυτών με την εισαγωγή διαφόρων φορτίσεων [16].

Θεωρώντας την εντατική κατάσταση ενός σημείου στον καρτεσιανό χώρο των κυρίων τάσεων και παρατηρώντας τις παραμορφώσεις κατά τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης μέγιστης κύριας θλιπτικής τάσης  $\sigma_1$  και κάθετα σε αυτήν, γίνεται κατανοητό ότι η θραύση υπό αποκλίνουσες (deviatoric) τάσεις επεκτείνεται κάθετα στη  $\sigma_1$  (Σχήμα 3. 14). Αντιθέτως οι καθαρά υδροστατικές τάσεις συνδέονται μόνο με τυχαίους προσανατολισμούς ρηγμάτωσης. Με βάση τα παραπάνω έχουμε δύο κατηγορίες θραύσεων:

- A. Με συγκεκριμένο και μοναδικό προσανατολισμό (κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας θλιπτικής τάσης). Προκαλείται από μη υδροστατικές (αποκλίνουσες) καταπονήσεις.
- B. Με τυχαίο και αυθαίρετο προσανατολισμό: Προκαλείται από υδροστατικές καταπονήσεις ενώ ελαχιστοποιείται υπό καθαρά αποκλίνουσες.

Η ομαλή σταθερή ρηγμάτωση που παρατηρείται στο σκυρόδεμα και οφείλεται κυρίως στην ανακούφιση των εφελκυστικών τάσεων στα άκρα των ρωγμών θα αναφέρεται στο εξής μικρορηγμάτωση. Όταν ο βαθμός της ρηγμάτωσης φτάσει σε πολύ υψηλότερο βαθμό και η ογκομετρική παραμόρφωση αρχίσει να αυξάνει με ταχύτερους ρυθμούς λόγω τοπικής έντονης ρηγμάτωσης τότε θεωρείται ότι έχουμε τη μακρορηγμάτωση. Η μακρορηγμάτωση επεκτείνεται υπό σταθερό φορτίο και η ένταση ανακατανέμεται στον υπόλοιπο φορέα. Η

τοπική θραύση του υλικού προκαλεί τη δημιουργία ασυνεχειών στην αρχική γεωμετρία της κατασκευής. Κατά συνέπεια η μακρορηγμάτωση επηρεάζει το σκυρόδεμα σε επίπεδο φορέα, ενώ η μικρορηγμάτωση σε επίπεδο υλικού.

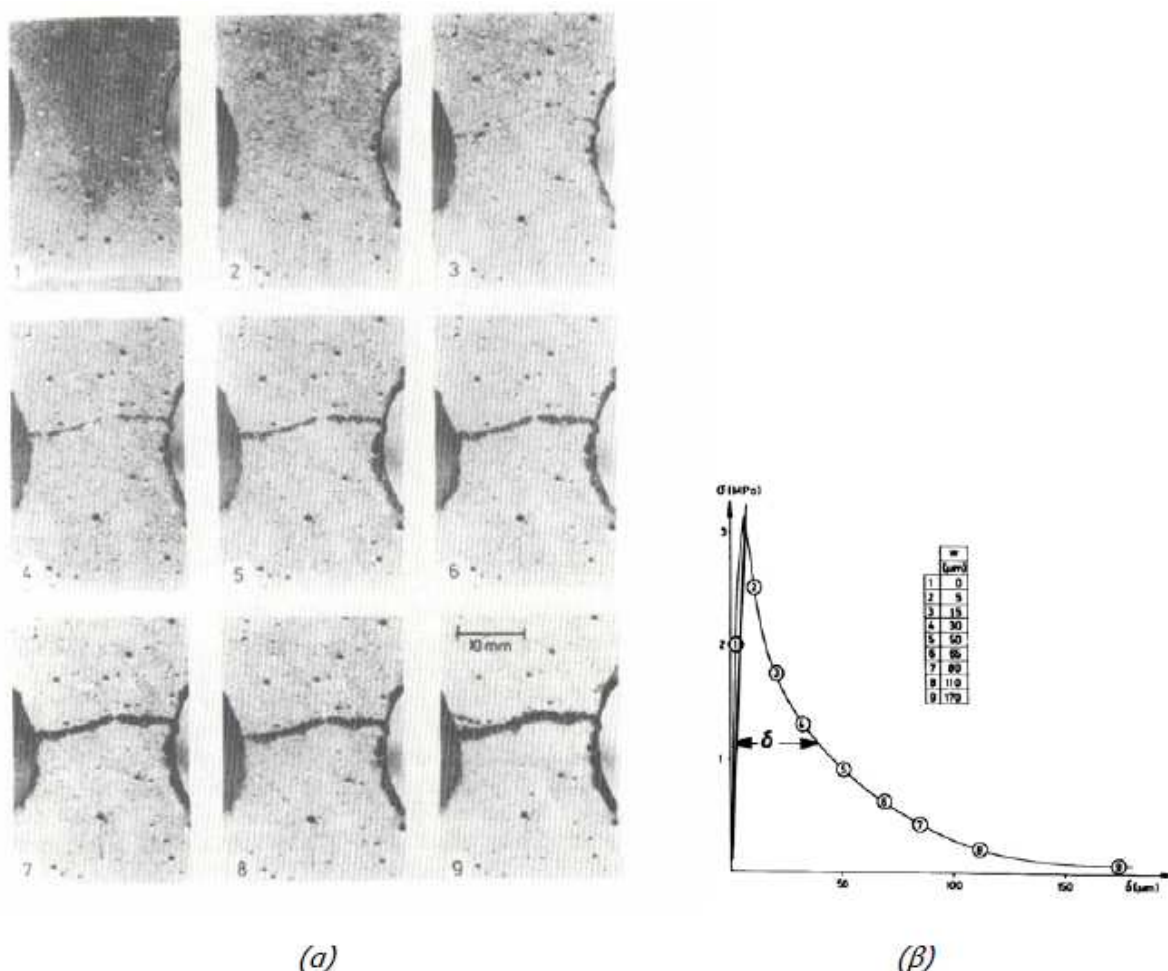


Σχήμα 3. 4: Αλλαγές στην γεωμετρία της ρωγμής και στο αντίστοιχο πεδίο τάσεων λίγο πριν την επέκτασή της (από Kotsovos & Pavlovic 1995) [16].

### 3.2.2 Συμπεριφορά σκυροδέματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Σύμφωνα με τους περισσότερους ερευνητές, οι εφελκυστικές τάσεις εξακολουθούν να μεταφέρονται μέσα από μια ρωγμή ακόμα και όταν αυτή έχει σχηματιστεί (CEB 1996). Ενδεικτικά παρουσιάζεται η δοκιμή των Cotterell & Mai 1996 στο (Σχήμα 3. 5), η οποία διεξήχθη με χρήση πολύ δύσκαμπτης πειραματικής διάταξης. Η διάνοιξη της ρωγμής ξεκινά από την φωτογραφία 3 όπου το πάχος της μετράται ίσο με 15  $\mu\text{m}$  και επεκτείνεται έως την φωτογραφία 9 με πάχος 170  $\mu\text{m}$ . Μέχρι τη μέγιστη τάση  $f_t$  δεν υπάρχουν σημάδια σχηματισμού διακριτής ασυνέχειας ρηγμάτωσης ή όπως αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία μιας Ζώνης Επέκτασης της Ρηγμάτωσης (ZEP) (Fracture Process Zone, (FPZ)). Παρ' όλο που φαίνεται να υπάρχει κάποια μικρή μη γραμμικότητα στον ανιόντα κλάδο μέχρι τη μέγιστη

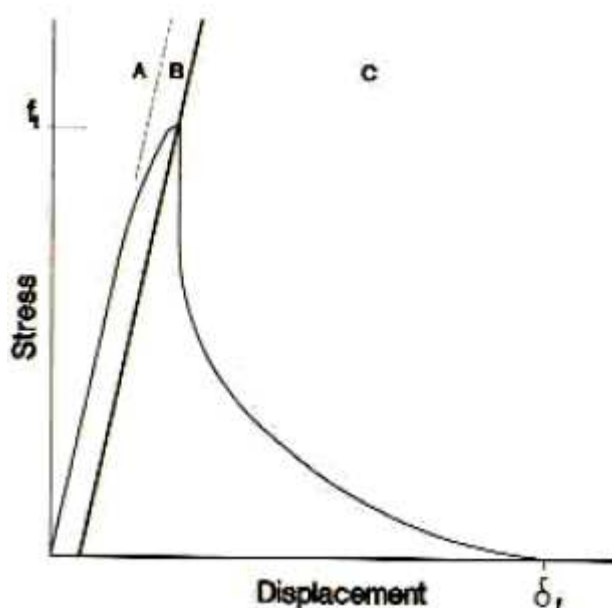
τάση  $f_t$  (προφανώς λόγω μικρορηγματώσεων σε όλο το ύψος του δοκιμίου), γενικώς είναι αποδεκτό ότι η συμπεριφορά πλησιάζει στην ελαστικά γραμμική.



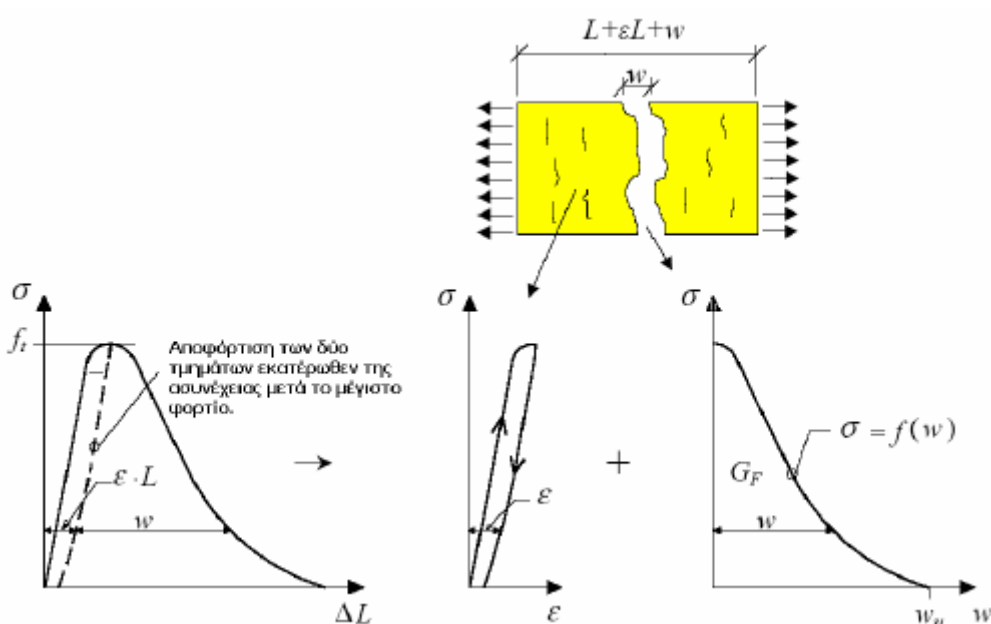
Σχήμα 3. 5: (α) Η δημιουργία της ZEP κατά τη διάρκεια μιας εφελκυστικής δοκιμής. (β) Η καμπύλη τάσης – μετατόπισης (από Cotterel and Mai 1996) [16].

Ουσιαστικά η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. 5 μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις υποπεριοχές (Σχήμα 3. 6). Μέχρι το 60% της μέγιστης αντοχής  $f_t$  δηλαδή μέχρι το σημείο A, το δοκίμιο παραμένει ελαστικό. Από εκεί και πέρα μέχρι το σημείο B έχουμε κάποια μικρή μη γραμμικότητα λόγω της διανεμημένης ρηγματώσεως σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Μετά το σημείο B η περιοχή της ZEP προχωράει στο τμήμα C της καμπύλης ενώ το υπόλοιπο δοκίμιο αποφορτίζεται ελαστικά. Μια ορατή διακριτή ρωγμή σε όλο το πλάτος του δοκιμίου εμφανίζεται σταδιακά κατά μήκος της ZEP στην φάση αυτή υποδεικνύοντας τη συγκέντρωση της παραμόρφωσης στην ζώνη αυτή. Η καμπύλη τάσης – εύρους ρωγμής προκύπτει αφαιρώντας σε κάθε σημείο το ελαστικό τμήμα της μετατόπισης (Σχήμα 3. 7).

Οι Shah et al. 1995 παρουσιάζουν μια παρόμοια δοκιμή στην οποία επίσης παρατηρείται η ύπαρξη του φθιτού κλάδου.



Σχήμα 3. 6: Τυπική σχέση τάσης – μετατόπισης για οιονεί ψαθυρά υλικά (από Cotterel and Mai 1996) [16].



Σχήμα 3. 7: Καμπύλη μέσης τάσης – μετατόπισης μιας μονοαξονικής εφελκυστικής δοκιμής και οι δύο συνιστώσες αυτής (i) τάση – παραμόρφωση στο τμήμα που αποφορτίζεται και (ii) τάση – εύρος συγκεντρωμένης παραμόρφωσης στην ρωγμή [16].

Οι Kotsovos & Pavlovic 1995 αναφέρουν ότι στις εφελκυστικές δοκιμές που διεξήγαγαν δεν παρατήρησαν φθιτό κλάδο χαλάρωσης. Θεωρούν ότι οι φθιτοί κλάδοι χαλάρωσης που παρατηρούνται από διάφορους άλλους ερευνητές είναι αποτέλεσμα των πολύ δύσκαμπτων διατάξεων με τις οποίες επιβάλλονται οι φορτίσεις και δεν αποτελούν χαρακτηριστικό του

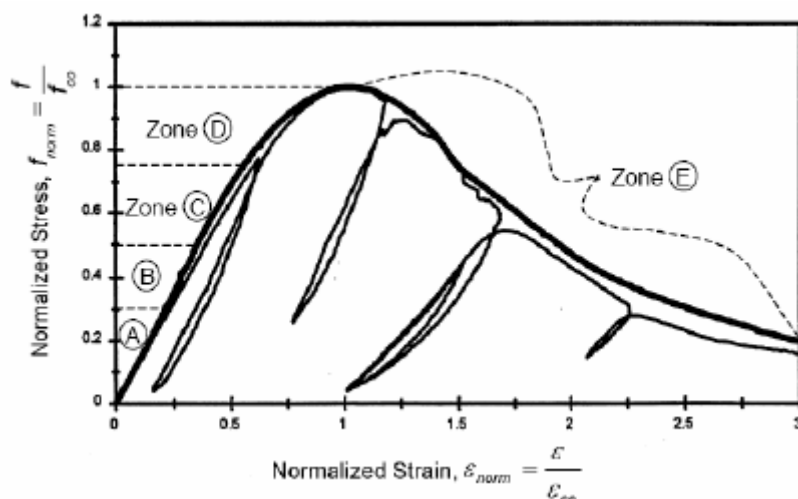
υλικού του σκυροδέματος. Προσθέτουν ότι οι διατάξεις αυτές έχουν πολύ μεγαλύτερη στιβαρότητα συγκριτικά με τις περιοχές που συνορεύουν με μια περιοχή σκυροδέματος που εφελκύεται μέσα σε μια κατασκευή και συνεπώς τέτοιου είδους δοκιμές δεν φαίνεται να έχουν ουσιαστικό νόημα.

Οι Bazant & Cedolin 1991 αναφέρουν ότι η παραμορφωσιακή χαλάρωση δεν είναι αποδεκτή σε επίπεδο μικροκλίμακας. Αποτελεί μόνο ένα τέχνασμα με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να προσομοιώσουμε οιονεί-ψαθυρά υλικά σε μεγαλύτερες κλίμακες εφόσον θα ήταν αδύνατο για κάποιον να προσομοιώσει όλες τις μικρορωγμές ξεχωριστά. Παρόμοια φαινόμενα, τα οποία δημιουργούν τέτοιου είδους αστάθειες, είναι γνωστά και αποδεκτά σε άλλους κλάδους της επιστήμης της Φυσικής. Για παράδειγμα, το φαινόμενο της μετάβασης από υγρό σε αέριο όπως περιγράφεται από την εξίσωση του van der Waals' σύμφωνα με την οποία η πίεση αυξάνεται με την αύξηση του όγκου. Η συμπεριφορά αυτή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ογκομετρική παραμορφωσιακή χαλάρωση. Στην αστροφυσική, μια από τις εξισώσεις του συνεχούς μέσου μιας γαλαξιακής μάζας η οποία προβλέπει την ύπαρξη ογκομετρικής παραμορφωσιακής χαλάρωσης, αποτελεί τη βάση για την εξήγηση της βαρυτικής κατάρρευσης ενός «λευκού νάνου» (white dwarf), ενός άστρου δηλαδή που έχει καταναλώσει όλη του την ενέργεια και το οποίο απονεκρώνεται σταδιακά.

Η εφελκυστική συμβολή του χάλυβα στη δυσκαμψία του σκυροδέματος (tension stiffening), δηλαδή το φαινόμενο περιορισμού του ρυθμού κατά τον οποίο η τάση κάθετα σε μια διανεμημένη ρωγμή μειώνεται, προσομοιώνεται και αυτή με φθιτούς κλάδους χαλάρωσης. Στις περιπτώσεις αυτές η μέγιστη παραμόρφωση στο τέλος του φθιτού κλάδου να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στη χαλάρωση του σκυροδέματος και κατά συνέπεια οι φθιτοί κλάδοι της κλασσικής συγκέντρωσης της παραμόρφωσης έχουν πολύ μικρή επιρροή στη συμπεριφορά του φορέα.

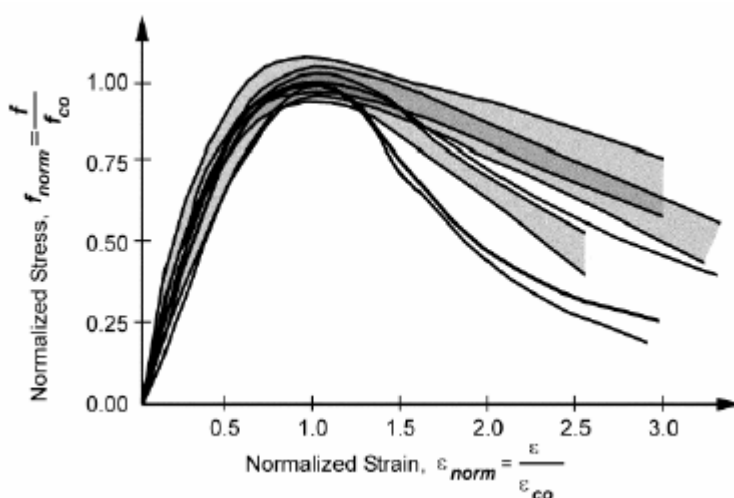
### **3.2.3 Συμπεριφορά σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη**

Η τυπική συμπεριφορά σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη έχει μελετηθεί εκτενέστατα στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης από τις εργασίες των Bahn & Hsu 1998 και της Lowes 1999 (Σχήμα 3. 8, Σχήμα 3. 9). Ο φθιτός κλάδος χαλάρωσης που παρουσιάζουν οι περισσότερες καμπύλες που έχουν δημοσιευθεί μέχρι στιγμής στη βιβλιογραφία, δικαιολογείται ως αποτέλεσμα της ρηγμάτωσης που σχηματίζεται παράλληλα στην θλίψη η οποία γίνεται όλο και πιο έντονη με αποτέλεσμα την απομείωση της αντοχής όσο αυξάνει η παραμόρφωση.



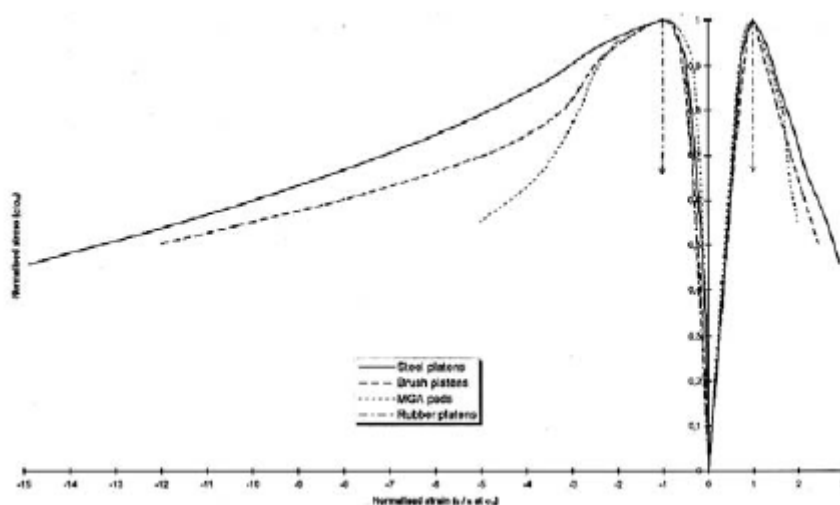
Σχήμα 3. 8: Απόκριση σκυροδέματος σε μονοτονικό και ανακυκλιζόμενο θλιπτικό φορτίο (από Bahn & Hsu 1998) [16].

Στην εργασία των van Mier et al. 1997 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός ερευνητικού προγράμματος που διεξήχθη για την πειραματική διερεύνηση της παραμορφωσιακής χαλάρωσης του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη. Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δέκα διαφορετικά εργαστήρια. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν σε ένα εξ' αυτών (Zisopoulos et al. 2000), έδειξαν ότι όσο απομειώνεται η τριβή που επιβάλλεται από τις πλάκες φόρτισης σε μια μονοαξονική θλιπτική δοκιμή τόσο πιο απότομοι είναι και οι φθιτοί κλάδοι χαλάρωσης στις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (Σχήμα 3. 10). Στην περίπτωση που η τριβή είναι σχεδόν μηδενική, τότε παρατηρούμε ότι η αστοχία είναι απολύτως ψαθυρή χωρίς την παραμικρή ένδειξη πλαστιμότητας. Παρά ταύτα η εργασία των van Mier et al. 1997 δεν καταλήγει σε κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα.



Σχήμα 3. 9: Απόκριση σκυροδέματος σε μονοτονικό θλιπτικό φορτίο από διάφορες δοκιμές (από Lowes 1999[16]).





Σχήμα 3. 10: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων όπως προέκυψαν από μονοαξονικές θλιπτικές δοκιμές με διάφορες πλάκες επιβολής φόρτισης (από Zisopoulos et al. 2000) [16].

### 3.2.4 Συμπεριφορά ρηγματωμένου σκυροδέματος σε διάτμηση

Πριν τη δημιουργία της ρηγμάτωσης, το άοπλο σκυρόδεμα που υπόκειται σε διάτμηση έχει την ίδια συμπεριφορά με αυτή που προβλέπουν οι αντίστοιχες δοκιμές ορθής έντασης (λοξή θλίψη με εγκάρσιο εφελκυσμό). Σε ήδη όμως διανοιγμένες ρωγμές, η διατμητική καταπόνηση κατά μήκος τους έχει διαφορετική συμπεριφορά συγκριτικά με αυτή που προκύπτει για αρηγμάτωτο σκυρόδεμα το οποίο μπορεί να θεωρηθεί συνεχές μέσο.

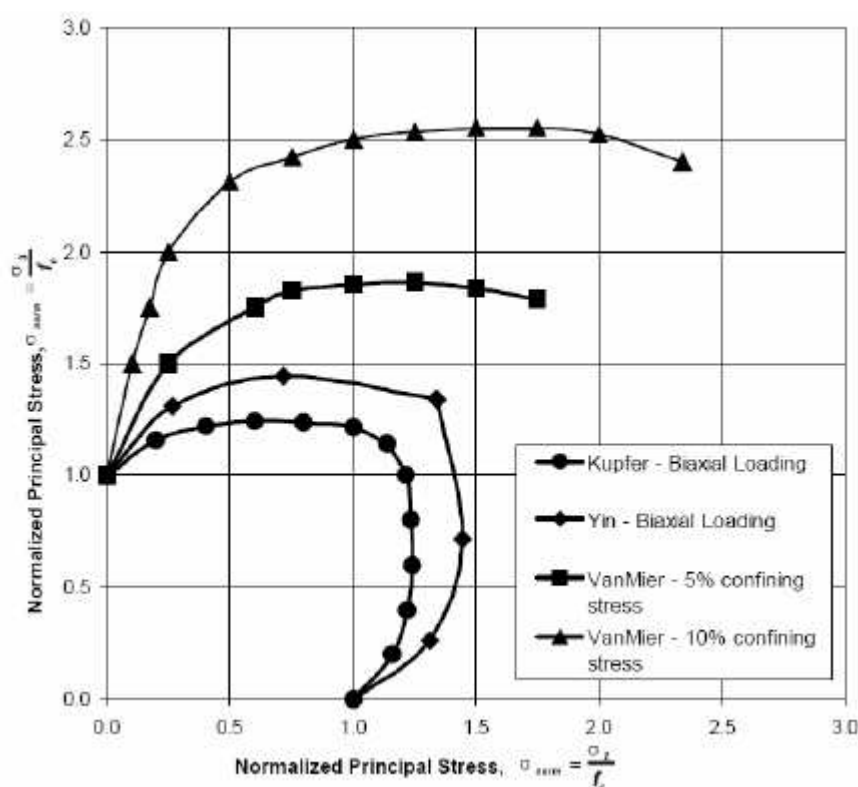
Για σχετικά μικρά εύρη ρηγμάτωσης, η μεταφορά των διατμητικών δυνάμεων γίνεται μέσω του μηχανισμού αλληλεμπλοκής των αδρανών. Στην περίπτωση που διέρχεται οπλισμός από τη διεπιφάνεια της ρωγμής συμμετέχει και ο μηχανισμός της δράσης βλήτρου. Σε γενικές γραμμές, από τις διάφορες πειραματικές δοκιμές που έχουν διεξαχθεί, προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα (Lowe 1999):

1. Η αντοχή της μεταφοράς τέμνουσας πάνω σε μια επιφάνεια σκυροδέματος όπως επίσης και η αντίστοιχη στιβαρότητα αυξάνονται όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του υλικού και μειώνονται όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της αρχικής ρωγμής.
2. Το μέγεθος και το σχήμα των αδρανών έχουν μικρή επιρροή στη διατμητική αντοχή και στιβαρότητα.
3. Η διατμητική αντίσταση αυξάνει συναρτήσει της σχετικής ολίσθησης των διεπιφανειών της ρωγμής μέχρι μια μέγιστη τιμή ίση με 20 έως 30 % της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής  $f_c$ .

### 3.2.5 Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό διαξονική ένταση

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς σε όρους αντοχής, διάφορες δοκιμές υπό διδιάστατη ένταση έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία (π.χ. Kupfer et al. 1969 και Yin et al. 1989). Ο van Mier 1986 εμπλούτισε τα παραπάνω στοιχεία με δοκιμές κατά τις οποίες υπήρχε πίεση περισφιγξης κατά την 3η διάσταση. Οι περιβάλλουσες αντοχής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. 11. Είναι σαφές ότι οι δοκιμές του van Mier 1986 απέδειξαν ότι με την αύξηση της περισφιγξης κατά την τρίτη διάσταση έχουμε σημαντική βελτίωση των αντοχών στις άλλες δύο.

Δεδομένου ότι η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό διδιάστατη ένταση αποτελεί ειδική υποπερίπτωση της γενικευμένης συμπεριφοράς σε τρεις διαστάσεις, η παραμορφωσιακή συμπεριφορά του υλικού αντιμετωπίζεται γενικώς με τις έννοιες των οκταεδρικών τάσεων και παραμορφώσεων. Για το λόγο αυτό αναλυτική περιγραφή της θα ακολουθήσει στην επόμενη παράγραφο που αφορά στην τριαξονική συμπεριφορά.

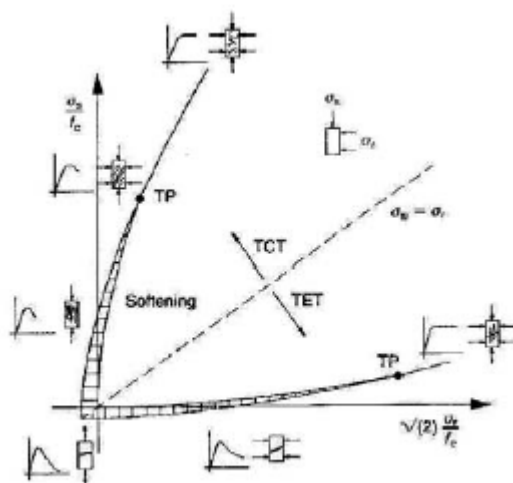


Σχήμα 3. 11: Επιφάνεια αστοχίας για διδιάστατη ένταση (Δεδομένα από Kupfer et al. 1969, Yin et al. 1989 και Van Mier 1986) [16].

### 3.2.6 Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό τριαξονική φόρτιση

#### 3.2.6.1 Γενικά

Στην έκθεση του CEB 1996 γίνεται μια εκτενής περιγραφή της τριαξονικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος. Στον τρισδιάστατο χώρο των τάσεων, ο γεωμετρικός τόπος όλων των πιθανών συνδυασμών τάσεων βρίσκεται μέσα σε μια περιοχή που περιβάλλεται από μια επιφάνεια οριακής αντοχής (Σχήμα 3. 12). Ο προσδιορισμός της επιφάνειας αυτής είναι ιδιαίτερα σημαντικός, επειδή μέσω αυτής μπορεί να προβλεφθεί η αστοχία και ο μηχανισμός της. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. 12 στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού έχουμε τη μορφή καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων που φαίνεται και στο Σχήμα 3. 6. Στην περίπτωση της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη η καμπύλη παίρνει μια μορφή παρόμοια με αυτή στο Σχήμα 3. 9. Παρατηρείται επίσης ένα σημείο (με την ένδειξη TP (Transition Point δηλ. Σημείο Μετάβασης) στο οποίο η συμπεριφορά ξεκινά να γίνεται σχετικά πλάσטיμη από οιονεί-ψαθυρή. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει τα εντατικά σημεία στα οποία υπάρχει παραμορφωσιακή χαλάρωση.



Σχήμα 3. 12: Επιφάνεια αστοχίας (από CEB 1996) [16].

Σημαντική πρόοδος στον πειραματικό προσδιορισμό της καταστατικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος υπό τρισδιάστατη εντατική καταπόνηση επιτεύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 σε ένα ερευνητικό πρόγραμμα στο οποίο συμμετείχαν επτά εργαστήρια (Gerstle et al. 1980). Οι τριαξονικές δοκιμές περιλάμβαναν υδροστατικές προφορτίσεις της τάξεως του 75-200% της μονοαξονικής αντοχής και στη συνέχεια φορτίσεις που δημιουργούσαν αποκλίνουσες τάσεις (deviatoric stresses) έως την αστοχία των δοκιμών. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν τη διερεύνηση συνοψίζονται στα κάτωθι:

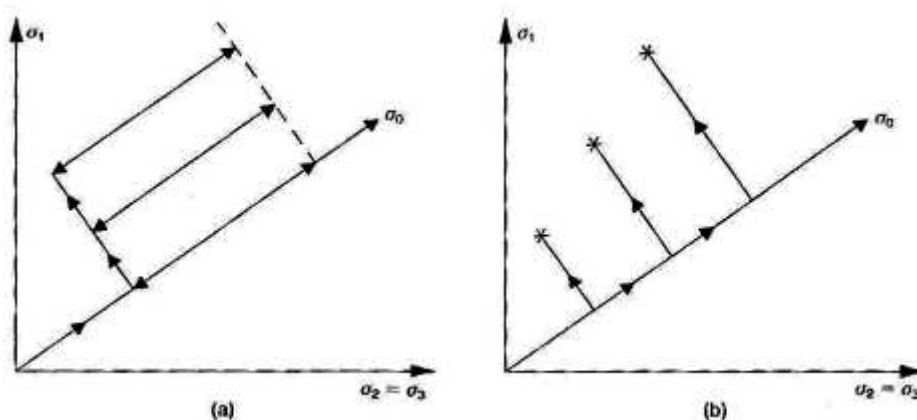
1. Υπάρχει σημαντική διασπορά στις μετρήσεις των παραμορφώσεων σε δοκιμές με τριαξονική εντατική κατάσταση ακόμα και εάν ακολουθείται η ίδια πειραματική διάταξη.

2. Η χρήση των πρώτων δύο αναλλοίωτων της τάσης και της παραμόρφωσης (οκταεδρικές τιμές) είναι ο καλύτερος τρόπος να περιγραφεί η καταστατική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Η θεώρηση ισότροπου υλικού που απαιτείται για την προσέγγιση αυτή είναι αποδεκτή μέχρι την έναρξη της αστοχίας.

3. Η απευθείας συσχέτιση μεταξύ ογκομετρικής και αποκλίνουσας τάσης και παραμόρφωσης χαρακτηρίζονται από δύο ανεξάρτητα μέτρα  $K$  και  $G$  (bulk and shear moduli).

4. Υπάρχει μια συσχέτιση της οκταεδρικής διατμητικής τάσης και της ογκομετρικής παραμόρφωσης η οποία μπορεί να καθορίζεται από ένα τρίτο μέτρο  $H$ .

Ένα από τα εργαστήρια τα οποία συμμετείχαν στο πρόγραμμα αυτό, είναι και αυτό του Imperial College στο Λονδίνο (Kotsovos & Newman 1977, 1979). Στην έκθεση του CEB 1996 αναφέρεται ότι οι μετρήσεις του συγκεκριμένου εργαστηρίου δίνουν παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που προέκυψαν από τις δοκιμές των άλλων εργαστηρίων (π.χ. University of Colorado, Scavuzzo 1983) και κατά συνέπεια είναι αντικειμενικές και αντιπροσωπευτικές.



Σχήμα 3. 13: Ιστορίες έντατικής καταπόνησης των δοκιμών σκυροδέματος που διεξήχθησαν στο Imperial College από τους Kotsovos & Newman 1977, 1979 [16].

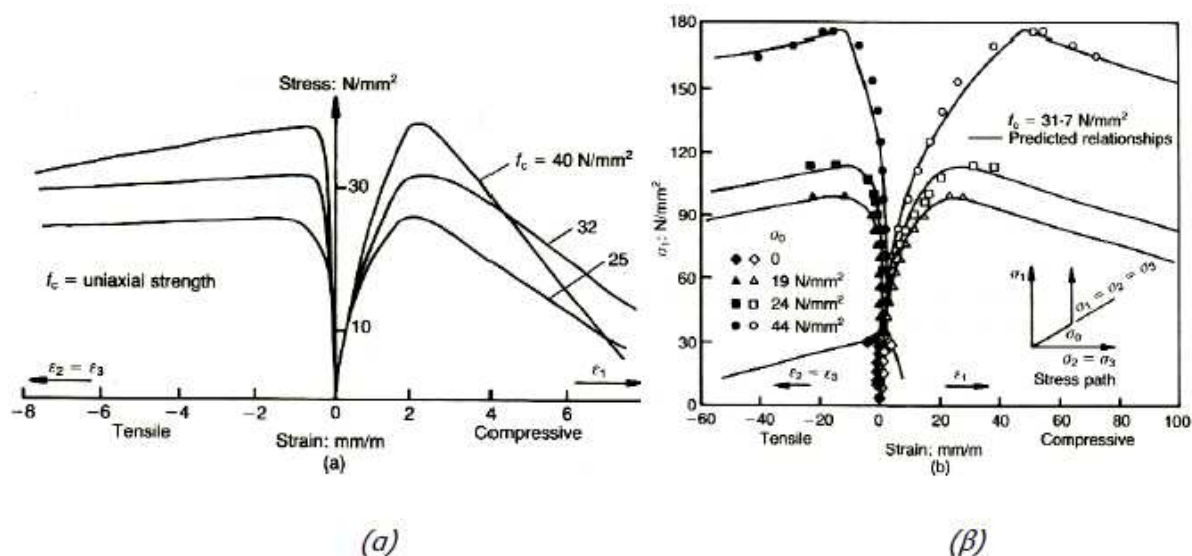
Στις δοκιμές αυτές, χρησιμοποιήθηκαν δύο ιστορίες φόρτισης (Σχήμα 3. 13). Στο Σχήμα 3. 13(a) γίνεται υδροστατική φόρτιση και αποφόρτιση σε διαφορετικά επίπεδα αποκλίνουσας τάσης. Από τις δοκιμές αυτές προέκυψαν οι σχέσεις της υδροστατικής τάσης  $\sigma_0$  με τις υδροστατική και αποκλίνουσα παραμόρφωση  $\epsilon_0$  και  $\gamma_0$ . Στο Σχήμα 3. 13 (β) φαίνεται η δεύτερη ιστορία φόρτισης που επιβλήθηκε έτσι ώστε να έχουμε συνεχείς φορτίσεις και αποφορτίσεις της αποκλίνουσας τάσης σε διάφορα επίπεδα υδροστατικής τάσης. Από τις

αντίστοιχες καμπύλες προέκυψαν οι σχέσεις μεταξύ της αποκλίνουσας τάσης και παραμόρφωσης  $\tau_0$  και  $\gamma_0$  καθώς και της πρώτης με την υδροστατική παραμόρφωση  $\epsilon_0$ .

Δυστυχώς οι δοκιμές αυτές δεν μπόρεσαν να δώσουν κάποια στοιχεία της συμπεριφοράς που παρατηρείται στις μονοαξονικές δοκιμές. Ένα από αυτά τα στοιχεία αφορά στους φθιτούς κλάδους χαλάρωσης, οι οποίοι δεν μπόρεσαν να προσδιοριστούν αφού οι δοκιμές ήταν ελεγχόμενες από την τάση και όχι από την παραμόρφωση.

### 3.2.6.2 Η πειραματική διερεύνηση των Kotsovos & Newman 1977, 1979

Το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε αυτές ακριβώς τις πειραματικές δοκιμές. Πρόκειται για πειράματα σε κυλινδρικά δοκίμια διαφόρων ποιοτήτων σκυροδέματος (μονοαξονική αντοχή από 15 MPa έως 65 MPa) και έχουν τη μορφή καμπυλών που εκφράζουν τις σχέσεις μεταξύ κύριων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) και κύριων ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε διάφορους τύπους αξονοσυμμετρικής έντασης όπως μονοαξονική θλίψη ( $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ), τριαξονική θλίψη ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ ), τριαξονική προέκταση ( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ ), τριαξονικό εφελκυσμό ( $\sigma_1 = \sigma_2 > 0 > \sigma_3$ ) κλπ (υιοθετήθηκε η σύμβαση τα θλιπτικά μεγέθη να λαμβάνονται ως θετικά). Ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 3. 14(a) για διάφορους τύπους σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη και στο Σχήμα 3. 14(β) για την περίπτωση ενός τύπου σκυροδέματος, με θλιπτική αντοχή κυλίνδρου  $f_c = 31.7$  MPa, το οποίο έχει υποβληθεί σε διάφορους τύπους τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 3. 14: α) Πειραματικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για διάφορες ποιότητες σκυροδέματος β) Πειραματικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα αντοχής  $f_c=31.7$  MPa, για διάφορους τύπους τριαξονικής καταπόνησης [16].

Η μη γραμμικότητα του υλικού θεωρήθηκε ότι οφείλεται μόνο σε αλλαγές του φορέα οι οποίες εκδηλώνονται υπό τη μορφή θραύσης και επέκτασης της ρηγματώσης. Συγκεκριμένα έχουμε:

(α) Ρηγματώση που προκαλεί μείωση των υψηλών εφελκυστικών τάσεων στις άκρες των ρωγμών. Η μείωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται με την εφαρμογή μιας ισοδύναμης θλιπτικής τάσης που τείνει να μειώσει τον όγκο του σκυροδέματος.

(β) Η ρηγματώση προκαλεί κενά που τείνουν να αυξήσουν τον όγκο του υλικού.

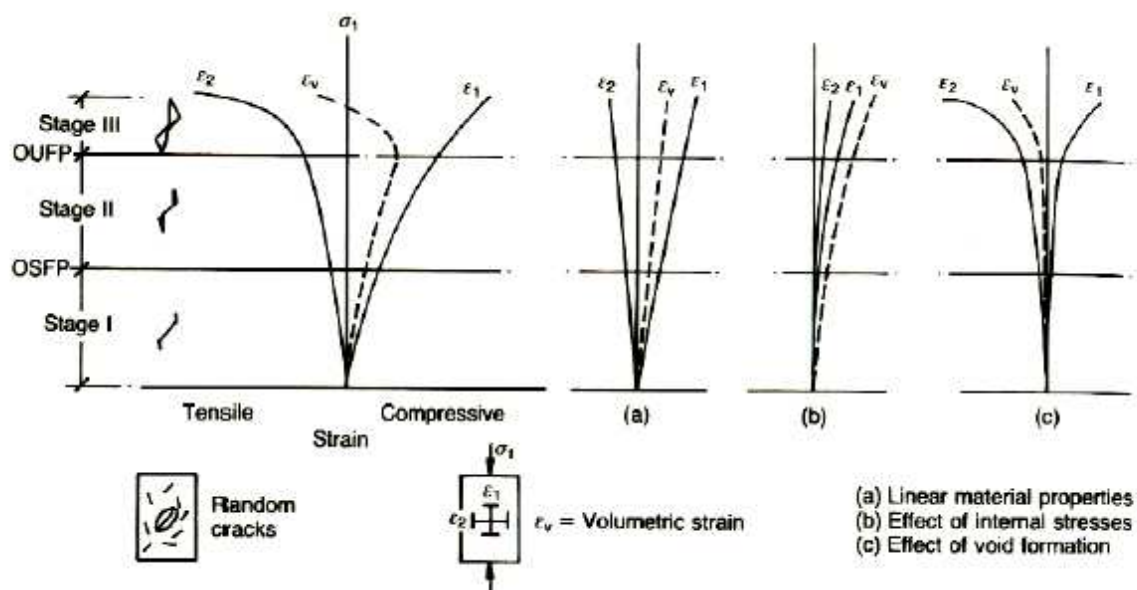
Η εξέλιξη της ρηγματώσης όσον αφορά στα (α) και (β) μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια:

Στάδιο I: Η επιρροή του (α) είναι πολύ πιο σημαντική από του (β)

Στάδιο II: Τα (α) και (β) είναι και τα δύο σημαντικά αλλά το (α) εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερο από το (β). Κατά συνέπεια ο όγκος συνεχίζει να μειώνεται.

Στάδιο III: Εδώ το (β) είναι πια μεγαλύτερο από το (α) με συνέπεια την αύξηση του όγκου.

Τα παραπάνω φαίνονται παραστατικά στο Σχήμα 3. 15. Οι συμβολισμοί OSFP και OUFP αντιστοιχούν σε Onset of Stable Fracture Propagation (Σημείο ευσταθούς εξέλιξης της ρηγματώσης) και Onset of Unstable Fracture Propagation (Σημείο ασταθούς εξέλιξης της ρηγματώσης) όπως αναφέρονται από τους Kotsovos & Pavlovic 1995.



Σχήμα 3. 15: Στάδια μηχανισμών θραύσης και επιδράσεις στην σχέση τάσεων – παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα (από Kotsovos & Pavlovic 1995)[16].

Από τα παραπάνω μπορούμε να χωρίσουμε την παραμορφωσιακή συμπεριφορά του σκυροδέματος σε τρεις συνιστώσες:

ι. μία γραμμική συνιστώσα που δεν εξαρτάται από αλλαγές λόγω θραύσης.

ii. μια μη γραμμική συνιστώσα που να εκφράζει τα αποτελέσματα της εσωτερικής έντασης λόγω της επιρροής (α).

iii. μια μη γραμμική έκφραση της δημιουργίας κενών λόγω ρηγμάτωσης (επιρροή (β)).

Παρ' όλο που η μικρορηγμάτωση προκαλεί κάποια αύξηση του όγκου, αυτή δεν λαμβάνεται υπ' όψιν μέχρι το σημείο του ελάχιστου όγκου. Θεωρείται ότι η μοναδική μη γραμμικότητα μέχρι εκείνο το σημείο, είναι αυτή που προκαλείται από την εσωτερική θλιπτική τάση που μειώνει τον όγκο του σκυροδέματος.

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων βασίστηκε στη μετατροπή τους από σχέσεις μεταξύ κυρίων τάσεων και αντίστοιχων ανηγμένων παραμορφώσεων σε σχέσεις μεταξύ οκταεδρικών τάσεων και οκταεδρικών ανηγμένων παραμορφώσεων. Η μετατροπή αυτή έγινε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$\sigma_o = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \{3.1\}$$

$$\varepsilon_o = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad \{3.2\}$$

$$\tau_o = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \{3.3\}$$

$$\gamma_o = \frac{1}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad \{3.4\}$$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : οι κύριες τάσεις

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ : οι ανηγμένες παραμορφώσεις κατά τη διεύθυνση των  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

$\sigma_o, \tau_o$ : οι οκταεδρικές τάσεις, ορθή και διατμητική αντίστοιχα

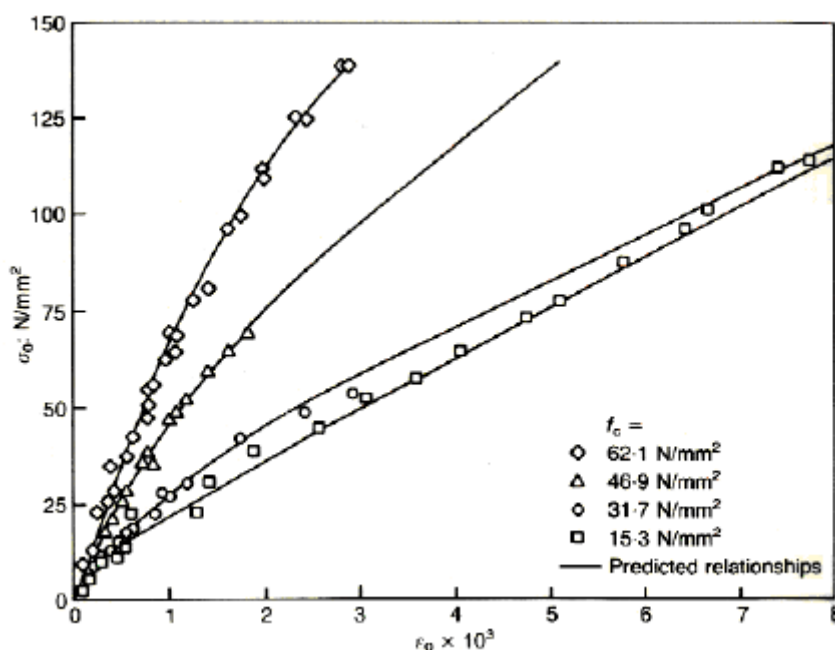
$\varepsilon_o, \gamma_o$ : οι οκταεδρικές ανηγμένες παραμορφώσεις, ογκομετρική και διατμητική που αντιστοιχούν στις  $\sigma_o, \tau_o$ .

Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν καμπύλες οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, όταν υπόκειται (α) σε ορθή οκταεδρική τάση  $\sigma_o$  και (β) σε διατμητική οκταεδρική τάση  $\tau_o$  συνδυασμένη με διάφορες τιμές της ορθής οκταεδρικής τάσης. Οι καμπύλες αυτές περιγράφουν τη συμπεριφορά του υλικού μέχρι το επίπεδο του ελάχιστου όγκου.

#### ***α. Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό $\sigma_o$***

Από τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του σκυροδέματος υπό ορθή οκταεδρική (υδροστατική) τάση  $\sigma_o$ , διαπιστώθηκε

ότι αυτός ο συγκεκριμένος τρόπος καταπόνησης προκαλεί μόνο ορθή οκταεδρική (ογκομετρική) παραμόρφωση  $\epsilon_{oh}$ , αφού η διαμητική οκταεδρική παραμόρφωση  $\gamma_o$  βρέθηκε ότι είναι αμελητέα. Στο Σχήμα 3. 16 παρουσιάζονται ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα με τη μορφή καμπυλών που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ υδροστατική τάσης και της αντίστοιχης παραμόρφωσης για διάφορους τύπους σκυροδέματος. Το σχήμα δείχνει ότι η μορφή των καμπυλών αυτών, που περιγράφουν πλήρως τη συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό υδροστατική πίεση, εξαρτάται από την ποιότητα του σκυροδέματος.



Σχήμα 3. 16: Σχέση υδροστατικής τάσης  $\sigma_o$  με υδροστατική παραμόρφωση  $\epsilon_o$  για διάφορους τύπους σκυροδέματος [16].

### β. Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό $\tau_o$

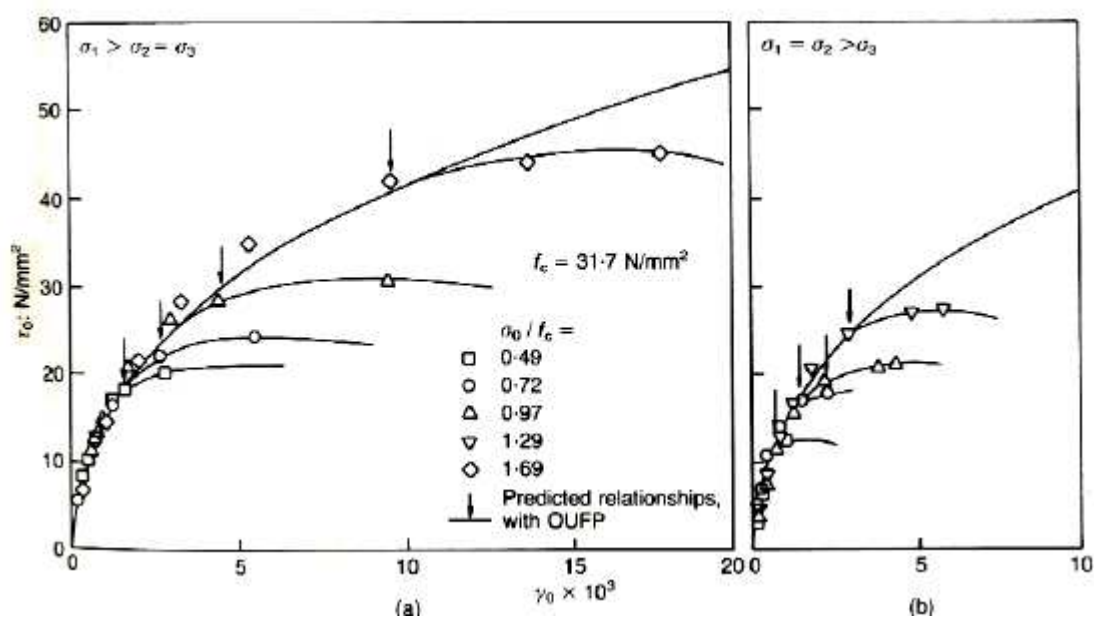
Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως όταν ένα δοκίμιο σκυροδέματος υποβάλλεται σε αποκλίνουσα επιπόνηση  $\tau_o$  τότε η παραμόρφωση που προκαλείται έχει δύο συνιστώσες: μια ογκομετρική  $\epsilon_{od}$  και μια αποκλίνουσα  $\gamma_o$ . Στο Σχήμα 3. 17 παρουσιάζονται ενδεικτικά πειραματικές καμπύλες που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ  $\tau_o$  και  $\gamma_o$  για την περίπτωση ενός τύπου σκυροδέματος για διάφορες τιμές της ορθής οκταεδρικής τάσης  $\sigma_o$ . Για την περίπτωση διαφόρων ποιοτήτων σκυροδέματος η σχέση  $\tau_o - \gamma_o$  φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3. 18.

Επίσης για τον ίδιο τύπο σκυροδέματος η σχέση μεταξύ  $\tau_o$  και  $\epsilon_{od}$  για διάφορες τιμές του  $\sigma_o$  φαίνονται στο Σχήμα 3. 19.

Όσον αφορά στη σχέση των  $\tau_o - \gamma_o$  από τα σχήματα είναι σαφές ότι οι καμπύλες που προκύπτουν για διάφορες τιμές της τάσης  $\sigma_o$  συμπίπτουν στο μεγαλύτερο τμήμα τους. Δεδομένου ότι οι καμπύλες αυτές πρακτικά συμπίπτουν, η σχέση  $\tau_o - \gamma_o$  είναι μοναδική με



την έννοια ότι δεν εξαρτάται από τη στάθμη της ορθής οκταεδρικής τάσης αλλά ούτε και από την ιστορία της φόρτισης.

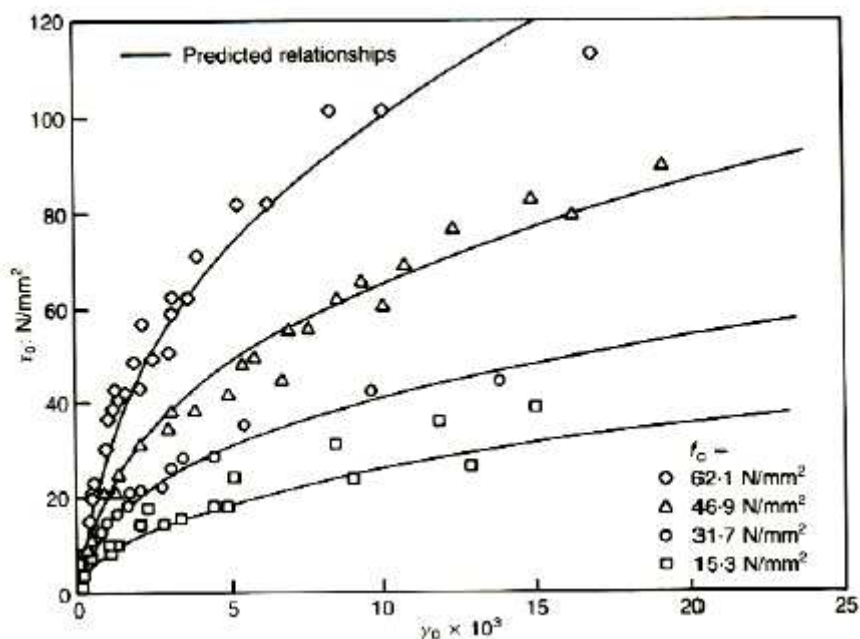


Σχήμα 3. 17: Σχέση διατμητικής οκταεδρικής τάσης  $\tau_0$  με οκταεδρική διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_0$  για τιμές της υδροστατικής τάσης  $\sigma_0$ , υπό εντατική καταπόνηση  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  και  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$  [16].

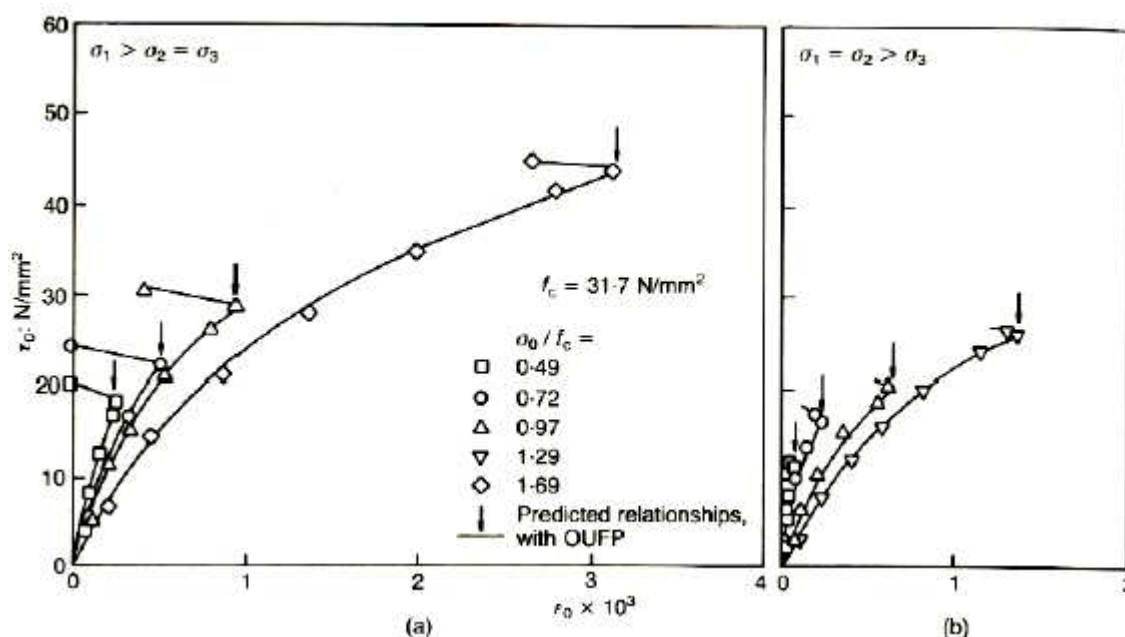
Για διάφορες ποιότητες σκυροδέματος προκύπτουν τα πειραματικά αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3. 18. Τα αποτελέσματα αυτά περιγράφουν μια οικογένεια καμπυλών η κάθε μία από τις οποίες εκφράζει τη σχέση μεταξύ  $\tau_0$  και  $\gamma_0$  για μια συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος.

Όμως όπως προαναφέρθηκε, υπό την επίδραση της διατμητικής οκταεδρικής τάσης  $\tau_0$  εκτός της αντίστοιχης παραμόρφωσης  $\gamma_0$  αναπτύσσεται και η ογκομετρική (υδροστατική) παραμόρφωση  $\epsilon_{od}$ . Στο Σχήμα 3. 19 γίνεται γραφική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων  $\tau_0 - \epsilon_{od}$  για τις περιπτώσεις αξονοσυμμετρικής φόρτισης με  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  και  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$  αντίστοιχα. Είναι φανερό από τα σχήματα ότι οι καμπύλες εξαρτώνται από την τιμή της ορθής οκταεδρικής τάσης  $\sigma_0$ . Κάνοντας σύγκριση των σχημάτων (α) και (β) διαπιστώνεται ότι παρά τη διαφορετική ιστορία φόρτισης οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές ορθής οκταεδρικής τάσης  $\sigma_0$  συμπίπτουν. Παρατηρείται δηλαδή ότι οι καμπύλες που περιγράφουν τη σχέση  $\tau_0 - \epsilon_{od}$  εξαρτώνται μεν από την τιμή της  $\sigma_0$  αλλά όχι και από την ιστορία της φόρτισης.

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77



Σχήμα 3. 18: Σχέση διατμητικής οκταεδρικής τάσης  $\tau_0$  με οκταεδρική διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_0$  για διάφορους τύπους σκυροδέματος [16].



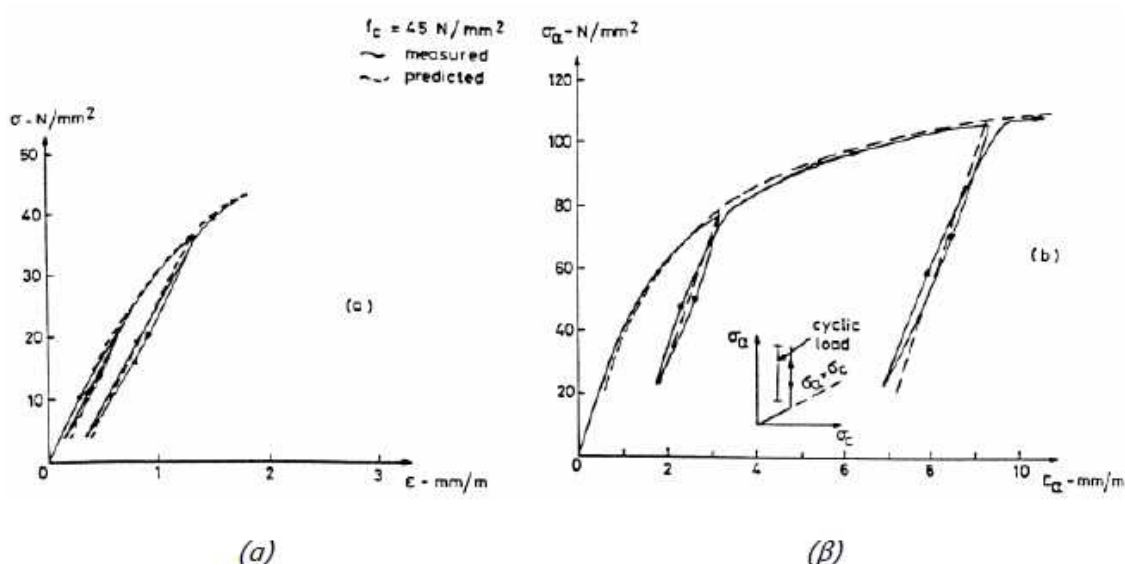
Σχήμα 3. 19: Σχέση διατμητικής οκταεδρικής τάσης  $\tau_0$  με οκταεδρική διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_0$  για διάφορους τύπους σκυροδέματος [16].

Σημειώνεται πως η ογκομετρική παραμόρφωση που παρατηρείται υπό διατμητική επιπόνηση θεωρείται ότι οφείλεται στην ορθή οκταεδρική συνιστώσα  $\sigma_{int}$  μιας εσωτερικής έντασης που προκαλεί στο σκυρόδεμα η ρηγμάτωση. Τα πειραματικά δεδομένα που περιγράφουν τη σχέση  $\tau_0 - \epsilon_{od}$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν οι τιμές της

$\sigma_{int}$  που προκαλεί την ογκομετρική παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό διατμητική καταπόνηση.

### γ. Συμπεριφορά κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση

Από τις πειραματικές δοκιμές που παρουσιάζονται από τους Kotsovos & Pavlovic 1995 προκύπτει ότι οι υστερητικοί βρόχοι για περιορισμένου εύρους (χωρίς αναστροφή προσήμου) ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι τόσο μικροί που μπορεί εύκολα να θεωρηθεί πως κατά την αποφόρτιση από μια στάθμη φόρτισης αλλά και για την επαναφόρτιση μέχρι αυτήν έχουμε γραμμική συμπεριφορά με μέτρα ελαστικότητας ίσα με τα αρχικά (Σχήμα 3. 20). Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι κατά την αποφόρτιση η επέκταση των εσωτερικών μικροθραύσεων σταματά και το σκυρόδεμα αποφορτίζεται γραμμικά με παραμένουσες παραμορφώσεις. Μόνον όταν επανέλθει στη μέγιστη εντατική κατάσταση που είχε φτάσει νωρίτερα μπορεί η μικρορηγματώση να συνεχιστεί.



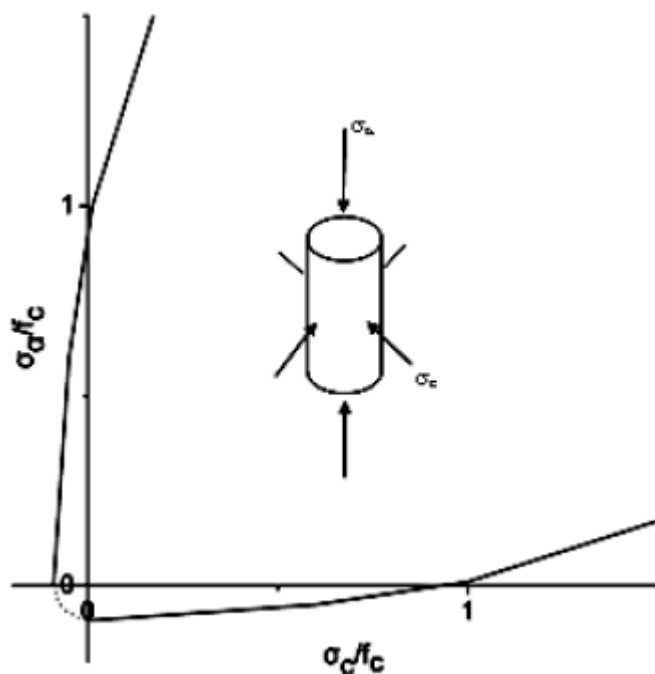
Σχήμα 3. 20: Παρατηρηθείσα σχέση τάσεων – παραμορφώσεων κατά την φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση σκυροδέματος ποιότητας  $f_c = 45 \text{ MPa}$  (α) σε μονοαξονική και (β) σε τριαξονική θλίψη [16].

Σε τρισδιάστατες εντατικές καταπονήσεις παρατηρείται ότι κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση ξεχωριστά της υδροστατικής  $\sigma_o$  ή της αποκλίνουσας τάσης  $\tau_o$  παρατηρούνται ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά δηλαδή ελαστική αποφόρτιση και επαναφόρτιση μέχρι το προηγούμενο επίπεδο τάσεων ( $|\sigma|_{max}$  και  $|\tau|_{max}$ ). Σε περισσότερο όμως πολύπλοκες εντατικές καταστάσεις όπου η αποφόρτιση δεν γίνεται αποκλειστικά σε ένα εκ των δύο μεγεθών (υδροστατικής ή αποκλίνουσας), όπως αναφέρεται στο CEB 1996, οι δοκιμές που διεξήχθησαν από τον πανεπιστήμιο του Colorado δείχνουν ότι ένα κριτήριο αποφόρτισης που

συγκρίνει με τις τιμές των αποθηκευμένων μεγεθών  $|\sigma|_{\max}$  ή  $|\tau|_{\max}$  υπάρχει περίπτωση να μην είναι ρεαλιστικό. Για το λόγο αυτό σε προσομοιώσεις προτείνεται να γίνεται σύγκριση των κύριων τάσεων με την αντίστοιχη μέγιστη που έχει αναπτυχθεί μέχρι εκείνο το σημείο.

**δ. Αντοχή σκυροδέματος σε τρισδιάστατη εντατική καταπόνηση**

Σύμφωνα με την εργασία του Kotsinos 1979, όπως και στη διερεύνηση των καταστατικών σχέσεων που διέπουν το υλικό, το κριτήριο αστοχίας μπορεί και αυτό να διαμορφωθεί σε όρους υδροστατικής και αποκλίνουσας συνιστώσας πάνω στο οκταεδρικό επίπεδο. Κατά συνέπεια είναι βολικό να γίνει χρήση του χώρου των κυρίων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ). Παρατηρώντας το σύστημα των αξόνων από ένα επίπεδο κάθετα στον «υδροστατικό» άξονα (το οποίο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη υδροστατική τάση), διαμορφώθηκε μια καμπύλη που αντιστοιχεί σε αστοχία του υλικού. Θεωρώντας όλες τις καμπύλες για οποιαδήποτε τιμή υδροστατικής τάσης δημιουργείται μια επιφάνεια αστοχίας (Σχήμα 3. 21) η οποία όσο μεγαλώνει η τάση αυτή τόσο μεγαλύτερη αντοχή αποκλίνουσας τάσης δίνει. Από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψε ότι η ιστορία της φόρτισης έχει πολύ μικρή επιρροή στην επιφάνεια αστοχίας και κατά συνέπεια είναι αποδεκτό να αγνοηθεί για τον υπολογισμό της αντοχής.



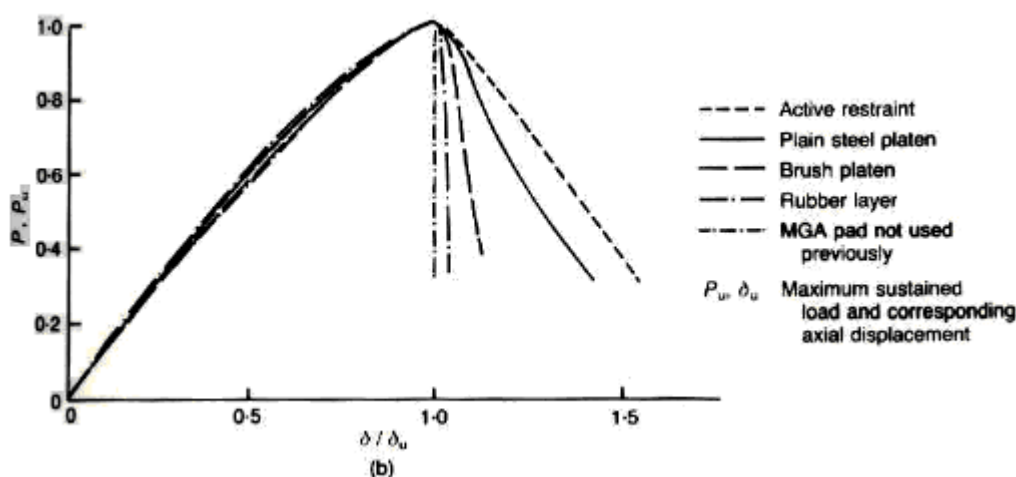
Σχήμα 3. 21: Επιφάνεια αστοχίας σκυροδέματος [16].

### **3.3 Μη γραμμική ανάλυση φορέων Ω.Σ. με τη μέθοδο της διανεμημένης ρηγμάτωσης**

#### **3.3.1 Το καταστατικό προσομοίωμα των Kotsovos – Pavlovic**

Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορα προσομοιώματα της συμπεριφοράς του σκυροδέματος υπό φόρτιση κυρίως βασισμένα σε θεωρίες συνεχούς μέσου όπως π.χ. τη θεωρία της πλαστικότητας, της ελαστοπλαστικότητας, βισκοπλαστικότητας κλπ. Εν τούτοις η εφαρμογή αυτών των θεωριών οδήγησε σε πολύπλοκες αναλυτικές εκφράσεις οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό συναρτήσεων και παραμέτρων όπως αυτά προκύπτουν από προσαρμογή σε πειραματικά αποτελέσματα. Είναι σαφές ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που δίνονται από τα συγκεκριμένα προσομοιώματα εξαρτάται περισσότερο από την ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων που χρησιμοποιούν, παρά από το ποια θεωρία χρησιμοποιείται. Σε πολλά πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών με σκυρόδεμα παρατηρούνται φθίνοντες κλάδοι στα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων. Αυτή η εικόνα ερμηνεύεται από πολλούς ερευνητές ως ιδιότητα του υλικού του σκυροδέματος, κάτι όμως που φαίνεται να μην ισχύει στην πραγματικότητα τουλάχιστον όσον αφορά στην θλιπτική συμπεριφορά. Έχει διαπιστωθεί ότι ο φθιτός κλάδος σε θλίψη δεν περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού, όπως γενικά πιστεύεται, αλλά την αλληλεπίδραση του δοκιμίου και της διάταξης φόρτισης. Λόγω του ασυμβίβαστου των μηχανικών ιδιοτήτων χαρακτηριστικών σκυροδέματος και χάλυβα αναπτύσσονται αγνώστου μεγέθους δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια δοκιμίου και πλακών φόρτισης. Η επίδραση των δυνάμεων αυτών στη μορφή των καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων έχει διερευνηθεί πειραματικά χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους για τη μείωση των δυνάμεων τριβής. Ενδεικτικά αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής δίδονται στο Σχήμα 3. 22. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι όσο αποτελεσματικότερη είναι η μέθοδος μείωσης των τριβών, τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση του φθιτού κλάδου, γεγονός που αποδεικνύει ότι για μηδενικές δυνάμεις τριβών η συμπεριφορά του δοκιμίου είναι ψαθυρή, δηλαδή χαρακτηρίζεται από απότομη και πλήρη απώλεια της φέρουσας ικανότητας.

Όσον αφορά στη συμπεριφορά σε εφελκυσμό, η ύπαρξη του φθιτού κλάδου της συγκέντρωσης της παραμόρφωσης φαίνεται να είναι γενικά αποδεκτή στη βιβλιογραφία. Παρά ταύτα η θεώρησή του στα προσομοιώματα σκυροδέματος εμπεριέχει πολυπλοκότητες οι οποίες λίγα έχουν να προσφέρουν στην καθολική πρόβλεψη της συμπεριφοράς φορέων Ω.Σ. (ACI 1997). Είναι σίγουρο ότι σε άοπλους φορείς η συμβολή του θα είναι σημαντική, σε



Σχήμα 3. 22: Επίδραση μεθόδων μείωσης δυνάμεων τριβής στις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης (από Kotsovos & Pavlovic 1995) [16].

περιπτώσεις όμως που ο χάλυβας έχει πρωτεύοντα ρόλο στην απόκριση, η θεώρηση της παραμορφωσιακής χαλάρωσης φαίνεται να έχει μικρή συμβολή. Όσον αφορά στη χαλάρωση της εφελκυστικής συμβολής του χάλυβα στη στιβαρότητα (tension stiffening), αυτή μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν με εναλλακτικούς τρόπους (π.χ. με θεώρηση ολίσθησης με συνάφεια των οπλισμών, εφόσον οι δύο παράγοντες συνδέονται (Maekawa & An 2000)). Κατά συνέπεια είναι λογικό ένα πλήρως ψαθυρό προσομοίωμα να μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Με βάση τα παραπάνω είναι σαφές ότι ο ανιών κλάδος των πειραματικών αποτελεσμάτων μέχρι και τη μέγιστη τιμή για φόρτιση γενικευμένης τάσης είναι αρκετός για την περιγραφή της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς του σκυροδέματος μέχρι την αστοχία. Η οριακή κατάσταση, δεδομένης της ψαθυρότητας του σκυροδέματος (Kotsovos 1984) μπορεί να δοθεί με τη μορφή κριτηρίου αστοχίας. Οι δύο αναλυτικές εκφράσεις που θα προκύψουν για την περιγραφή α) του καταστατικού νόμου και β) της μέγιστης έντασης πριν την αστοχία ουσιαστικά περιγράφουν τους μηχανισμούς της μικρορηγμάτωσης και της μακρορηγμάτωσης και παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους όπως προκύπτουν από εργασία των Kotsovos & Pavlovic 1995.

### 3.3.2 Μαθηματική περιγραφή της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς

#### 3.3.2.1 Συνθήκες φόρτισης

Οι Kotsovos & Pavlovic 1995 αναφέρουν τρεις τρόπους μαθηματικής περιγραφής της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς του σκυροδέματος πριν την ρηγμάτωση:

- 1) Των τριών σταθερών
- 2) Των εσωτερικών τάσεων

3) Τη συνδυαστική των (1) και (2)

Η 3η προσέγγιση ενδείκνυται περισσότερο δεδομένου ότι είναι η πιο απλή και η πιο εύκολα εφαρμόσιμη. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται στοιχεία των (1) και (2) όπως χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή της (3).

Η σχέση γενικευμένων τάσεων – παραμορφώσεων με βάση τον νόμο του Hooke είναι στην γενική μορφή της:

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{\nu_e}{E_e} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{(1+\nu_e)}{E_e} \sigma_{ij} \Rightarrow \quad \{3.5\}$$

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{(3K_e - 2G_e)}{18K_e G_e} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{1}{2G_e} \sigma_{ij} \Rightarrow \quad \{3.6\}$$

με  $K_e$ ,  $G_e$  τα ελαστικά μέτρα συμπίεστικότητας και διάτμησης. Μετατρέποντας τις τάσεις σε οκταεδρικές έχουμε:

$$\sigma_{kk} = 3\sigma_o, 2\varepsilon_{ij} = \gamma_{ij}, \varepsilon_o = \frac{\varepsilon_{kk}}{3}, \sigma_o = \frac{\sigma_{kk}}{3}, e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_o \delta_{ij}, s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_o \delta_{ij} \quad \{3.7\}$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_o \delta_{ij} + e_{ij} = \frac{\sigma_o}{3K_e} \delta_{ij} + \frac{s_{ij}}{2G_e} \Rightarrow \quad \{3.8\}$$

Στο σκυρόδεμα λόγω της μη γραμμικότητας (πριν τη μακρορηγμάτωση) είναι σαφές ότι μπορεί να θεωρηθεί μια σχέση του τύπου:

$$\sigma_o = \sigma_{ij}^{ext} + \sigma_{ij}^{int} \quad \{3.9\}$$

δηλαδή οι τάσεις χωρίζονται σε μία εξωτερική συνιστώσα (αυτή τείνει να εφαρμοστεί λόγω του εξωτερικού φορτίου) και σε μια εσωτερική λόγω της μικρορηγμάτωσης. Η συνιστώσα της παραμόρφωσης που οφείλεται στην εξωτερική τάση είναι αναστρέψιμη κατά την αποφόρτιση ενώ αυτή λόγω της εσωτερικής όχι.

Μετά την αναλυτική επεξεργασία των δεδομένων (Σχήμα 3. 23, Σχήμα 3. 24) με τη μέθοδο της παλινδρόμησης προέκυψαν οι παρακάτω σχέσεις που περιγράφουν αναλυτικά τις καμπύλες  $\sigma_o - \varepsilon_o$  και  $\tau_o - \gamma_o$ .

$$\varepsilon_{oh} = \frac{\sigma_o + 3K_e \cdot \sigma_o^b}{3K_e} \gamma \alpha \frac{\sigma_o}{f_c} \leq 2 \quad \{3.10\}$$

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77

$$\varepsilon_{oh} = \frac{\sigma_o + 3 \cdot a \cdot b \cdot (2f_c)^{b-1} \cdot \sigma_o + 3 \cdot \alpha \cdot (1-b) \cdot K_e \cdot (2 \cdot f_c)^b \cdot \sigma_o}{3K_e} \gamma \alpha \frac{\sigma_o}{f_c} > 2 \quad \{3.11\}$$

$$\gamma_o = \frac{\tau_o + 2 \cdot c \cdot G_e \cdot 4\tau_o^d}{2G_e} \gamma \alpha \frac{\sigma_o}{f_c} \leq 2 \quad \{3.12\}$$

όπου  $K_e$  και  $G_e$  το αρχικό μέτρο συμπίεστότητας και το αρχικό μέτρο διάτμησης του σκυροδέματος αντίστοιχα, για διάφορους τύπους του σκυροδέματος. Τα μέτρα εκφράζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$K_e = 11000 + 3.2 \cdot f_c \quad \{3.13\}$$

$$G_e = 9224 + 136 \cdot f_c + 3296 \cdot 10^{-15} \cdot f_c^{8.273} \quad \{3.14\}$$

με  $f_c$  την αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  παράμετροι που εξαρτώνται από την ποιότητα του υλικού και μπορούν επίσης να εκφραστούν συναρτήσει του  $f_c$ . Συγκεκριμένα έχουμε:

$$b = 2 + 1.81 \cdot 10^{-8} \cdot f_c^{4.461} \quad \{3.15\}$$

$$d = 2.12 + 0.183 \cdot f_c \quad \gamma \alpha \quad f_c \leq 31.7 \text{MPa} \quad \{3.16\}$$

$$d = 2.7 \quad \gamma \alpha \quad f_c > 31.7 \text{MPa} \quad \{3.17\}$$

Το  $a$  ενσωματώνεται στην παράμετρο  $A$  ως εξής:

$$A = 3\alpha K_e f_c^{b-1} \quad \{3.18\}$$

Οι σχέσεις {3. 10} και {3. 11} των  $\varepsilon_{0(h)}$  πρέπει να είναι συμβατές με τον πρώτο όρο της εναλλακτικής διατύπωσης του νόμου του Hooke. Πρέπει δηλαδή η υδροστατική συνιστώσα της εσωτερικής τάσης  $\sigma_{o(int)}^h \equiv \sigma_{ih}$  που προκύπτει από την υδροστατική τάση  $\sigma_o^{ext} \equiv \sigma_o$  να είναι:

$$\frac{\sigma_{ih}}{f_c} = A \left( \frac{\sigma_o}{f_c} \right)^b \quad \gamma \alpha \quad \frac{\sigma_o}{f_c} \leq 2 \quad \{3.19\}$$

$$\frac{\sigma_{ih}}{f_c} = 2^{b-1} A b \left( \frac{\sigma_o}{f_c} \right) + 2^b A (1-b) \quad \gamma \alpha \quad \frac{\sigma_o}{f_c} > 2 \quad \{3.20\}$$



Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77

Με ανάλυση παλινδρόμησης των πειραματικών δεδομένων της σχέσης {3. 19} προκύπτουν οι εκφράσεις του A (και άρα και του a):

$$A = 0.516 \text{ για } f_c \leq 31.7 \text{ MPa} \quad \{3. 21\}$$

$$A = \frac{0.516}{1 + 0.0027(f_c - 31.7)^{2.397}} \text{ για } f_c > 31.7 \text{ MPa} \quad \{3. 22\}$$

Το c ενσωματώνεται στην παράμετρο C ως εξής:

$$C = 2cG_e f_c^{d-1} \quad \{3. 23\}$$

Η σχέση {3. 12} του  $\gamma_o$  πρέπει να είναι συμβατή με τον πρώτο όρο της εναλλακτικής σχέσης του νόμου του Hooke. Πρέπει δηλαδή η αποκλίνουσα συνιστώσα της εσωτερικής τάσης  $\tau_{o(d)}^{\text{int}} = \tau_{id}$  να είναι:

$$\frac{\tau_{id}}{f_c} = C \left( \frac{\tau_o}{f_c} \right)^d \quad \{3. 24\}$$

Η οποία με ανάλυση παλινδρόμησης από τα πειραματικά αποτελέσματα

$$C = 3.573 \text{ για } f_c \leq 31.7 \text{ MPa} \quad \{3. 25\}$$

$$C = \frac{3.573}{1 + 0.0134(f_c - 31.7)^{1.414}} \text{ για } f_c > 31.7 \text{ MPa} \quad \{3. 26\}$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για  $15 \text{ MPa} < f_c < 65 \text{ MPa}$ . Για τιμές του  $f_c$  μεγαλύτερες από 65 MPa ή μικρότερες από 15 MPa τα K, G θα είναι εκείνα που ισχύουν για  $f_c$  ίσο με 65 MPa και 15 MPa αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η προσομοίωση μπορεί να γίνει ως εξής:

α) με τη χρήση των κατάλληλων K, G ώστε να λαμβάνουν τις μη γραμμικότητες των  $\sigma_o$   $\varepsilon_{o(h)}$  και  $\tau_o - \gamma_{o(d)}$

β) σε συνδυασμό με τον υπολογισμό της εσωτερικής έντασης  $\sigma_{id}$  ώστε να λαμβάνεται υπ'όψιν η σχέση μεταξύ  $\tau_o - \varepsilon_{o(d)}$ . Συνεπώς οι οκταεδρικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από μια εξωτερικώς εφαρμοζόμενη εντατική κατάσταση ( $\sigma_o$ ,  $\tau_o$ ) μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{o(\eta)} + \varepsilon_{o(\delta)} = \frac{\sigma_o + \sigma_{id}}{3K_s} \quad \{3. 27\}$$

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77

$$\gamma_o = \gamma_{o(d)} = \frac{\tau_o}{2G_s} \quad \{3.28\}$$

Εύκολα προκύπτουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος με τη μορφή του μέτρου συμπίεστότητας  $K$  και διάτμησης  $G$ . Οι τέμνουσες εκφράσεις των μέτρων αυτών είναι:

$$K_s = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o}, G_s = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \quad \{3.29\}$$

και οι εφαπτομενικές εκφράσεις από τις σχέσεις:

$$K_T = \frac{d\sigma_o}{d\varepsilon_o}, G_T = \frac{d\tau_o}{d\gamma_o} \quad \{3.30\}$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις τις παραμορφώσεις  $\varepsilon$  και  $\gamma$  με τις εκφράσεις τους από τις σχέσεις {3.27}{3.28} προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για τις τέμνοντες ( $s$  - secant) και τις εφαπτομενικές ( $t$  - tangent) μηχανικές ιδιότητες:

$$\frac{K_s}{K_e} = \frac{1}{1 + A \left( \frac{\sigma_o}{f_c} \right)^{b-1}} \quad \text{για } \frac{\sigma_o}{f_c} \leq 2 \quad \{3.31\}$$

$$\frac{K_s}{K_e} = \frac{1}{1 + 2^{b-1} \cdot A \cdot b - 2(b-1) \cdot A \cdot \left( \frac{\sigma_o}{f_c} \right)^{-1}} \quad \text{για } \frac{\sigma_o}{f_c} > 2 \quad \{3.32\}$$

$$\frac{G_s}{G_e} = \frac{1}{1 + C \cdot \left( \frac{\tau_o}{f_c} \right)^{d-1}} \quad \{3.33\}$$

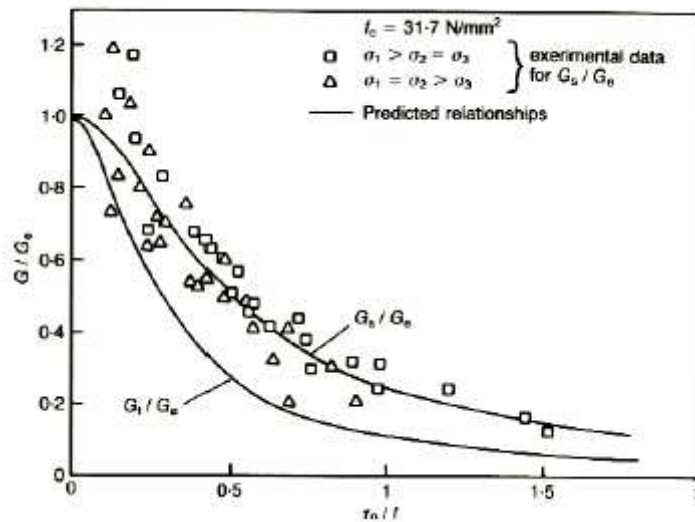
$$\frac{K_T}{K_e} = \frac{1}{1 + b \cdot A \left( \frac{\sigma_o}{f_c} \right)^{b-1}} \quad \text{για } \frac{\sigma_o}{f_c} \leq 2 \quad \{3.34\}$$

$$\frac{K_T}{K_e} = \frac{1}{1 + 2^{b-1} \cdot A \cdot b} \quad \text{για } \frac{\sigma_o}{f_c} > 2 \quad \{3.35\}$$

$$\frac{G_s}{G_e} = \frac{1}{1 + d \cdot C \cdot \left(\frac{\tau_o}{f_c}\right)^{d-1}} \quad \{3.36\}$$

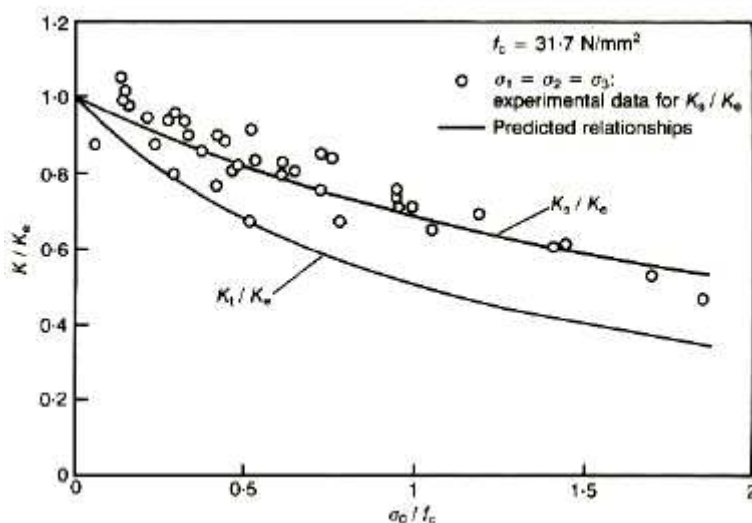
Γραφικές παραστάσεις των παραπάνω σχέσεων δίνονται στο Σχήμα 3. 23 και Σχήμα 3. 24. Στο σημείο αυτό απαιτείται να υπολογιστεί η εσωτερική τάση  $\sigma_{id}$  της σχέσης {3. 27} που εκφράζει τη σχέση  $\tau_o - \varepsilon_{od}$  (Σχήμα 3. 17). Η ορθή οκταεδρική (υδροστατική) συνιστώσα  $\sigma_{int}$  της εσωτερικής έντασης που αναπτύσσεται στο δοκίμιο λόγω της μικρορηγμάτωσης που χαρακτηρίζει το σκυρόδεμα. Κάνοντας χρήση των αντίστοιχων καμπυλών (Σχήμα 3. 15, Σχήμα 3. 16, Σχήμα 3. 17) που περιγράφουν τη σχέση  $\sigma_o - \varepsilon_o$ , από τις σχέσεις  $\tau_o - \varepsilon_{od}$  είναι δυνατόν να υπολογιστούν ονομαστικές τιμές της  $\sigma_{int}$  με τη διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 3. 25.

Συγκεκριμένα, για κάποια συγκεκριμένη τιμή  $\varepsilon_{o(d)}$  που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση. ( $\sigma_o, \tau_o$ ), η υδροστατική τάση (που μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά κάποια τιμή της  $\sigma_{id}$ ) μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση  $\sigma_o - \varepsilon_{o(h)}$  (Σχήμα 3. 17). Με αυτό τον τρόπο η σχέση  $\tau_o - \varepsilon_{o(d)}$  μπορεί να μετασχηματιστεί σε σχέση  $\sigma_{id} - \tau_o$ . Η διαδικασία αυτή περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 3. 25.



Σχήμα 3. 23: Τυπικές σχέσεις του τέμνοντος και του εφαπτομενικού μέτρου συμπίεστικότητας με την υδροστατική συνιστώσα  $\sigma_o$  για συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος  $f_c = 31.7 \text{ Mp}$  [16].

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77



Σχήμα 3. 24: Τυπικές σχέσεις του τέμνοντος και του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης με την αποκλίνουσα συνιστώσα  $\tau_o$  για συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος  $f_c = 31.7 \text{ MPa}$  [16].

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\sigma_{id}}{f_c} = D \cdot \left( \frac{\tau_o}{f_c} \right)^n \text{ με } D = \frac{k}{1 + l \cdot \left( \frac{\sigma_o}{f_c} \right)^m} \quad (3.37)$$

και  $k$ ,  $l$ ,  $m$  και  $n$  είναι οι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό και εκφράζονται ως ακολούθως:

$$k = \frac{4.0}{1 + 1.087 \cdot (f_c - 15.0)^{0.23}} \quad (3.38)$$

$$l = 0.222 + 0.01086 \cdot f_c - 0.000122 \cdot f_c^2 \quad (3.39)$$

$$m = -2.415 \text{ για } f_c \leq 31.7 \text{ MPa} \quad (3.40)$$

$$m = -3.531 + 0.0352 \cdot f_c \text{ για } f_c > 31.7 \text{ MPa} \quad (3.41)$$

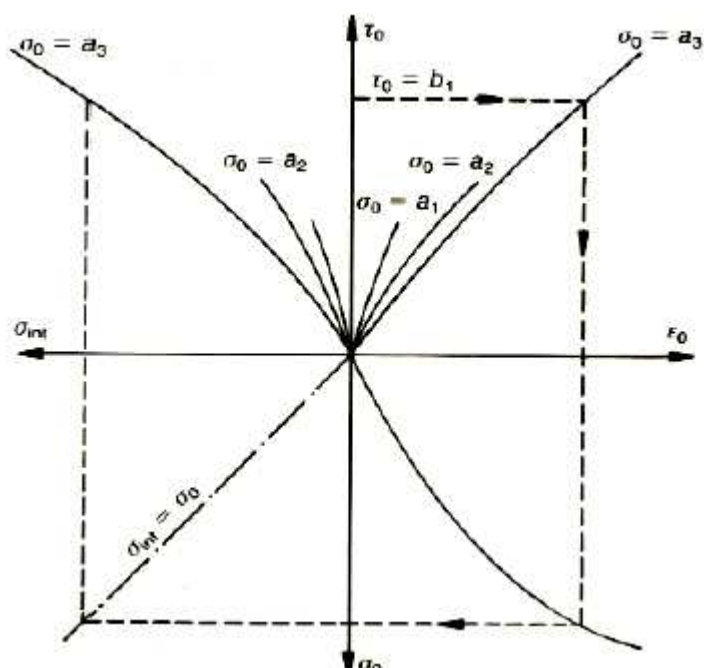
$$n = 1.0 \text{ για } f_c \leq 31.7 \text{ MPa} \quad (3.42)$$

$$n = 0.3124 + 0.0217 \cdot f_c \text{ για } f_c > 31.7 \text{ MPa} \quad (3.43)$$

Για  $f_c > 65 \text{ MPa}$  και  $f_c < 15 \text{ MPa}$  οι παραπάνω παράμετροι έχουν σταθερές τιμές και ίσες με αυτές που αντιστοιχούν σε  $f_c = 65 \text{ MPa}$  και  $f_c = 15 \text{ MPa}$ .

Δεδομένου ότι η  $\sigma_{id}$  είναι υδροστατική τάση οι {3.27} και {3.28} είναι ισοδύναμες με την

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij} + \sigma_{id} \delta_{ij}}{2G_s} - \frac{3\nu_s}{E_s} (\sigma_o + \sigma_{id}) \delta_{ij} \quad (3.44)$$



Σχήμα 3. 25: Υπολογισμός της εσωτερικής τάσης  $\sigma_{id}$  για οποιονδήποτε συνδυασμό υδροστατικής και αποκλίνουσας τάσης  $(\sigma_o, \tau_o)$  [16].

Από τις εκφράσεις των μέτρων συμπίεστικότητας και διάτμησης μπορούν εύκολα να προκύψουν οι σχέσεις που δίνουν το μέτρο ελαστικότητας Young  $E$  και το λόγο Poisson  $\nu$ .

$$E = \frac{9KG}{3K + G}, \nu = \frac{3K - 2G}{3K + 2G} \quad \{3.45\}$$

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις του σκυροδέματος κατά τη διεύθυνση της κύριας τάσης προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_{int}}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_2 + \sigma_3 + 2\sigma_{int}}{E} \quad \{3.46\}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 + \sigma_{int}}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\sigma_{int}}{E} \quad \{3.47\}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3 + \sigma_{int}}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_2 + \sigma_1 + 2\sigma_{int}}{E} \quad \{3.48\}$$

Σε γενικές γραμμές, η σχέση {3.44} αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των καθολικών παραμορφώσεων από τις καθολικές τάσεις. Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Οι οκταεδρικές τάσεις  $(\sigma_o, \tau_o)$  υπολογίζονται είτε από τις κύριες τάσεις  $\sigma_1, \sigma_2$  και  $\sigma_3$  είτε από τις καθολικές  $\sigma_{ij}$ .
- Υπολογίζονται τα  $K_s, G_s, E_s$  και  $\nu$ .

- Υπολογίζεται η υδροστατική διόρθωση  $\sigma_{id}$ .
- Υπολογίζονται οι καθολικές παραμορφώσεις  $\epsilon_{ij}$ .

### 3.3.2.2 Συνθήκες αποφόρτισης – επαναφόρτισης

Χρησιμοποιήθηκαν οι θεωρήσεις αποφόρτισης – επαναφόρτισης που προτείνονται στο άρθρο των Kotsonos & Spiliopoulos 1998. Σύμφωνα με αυτό αποφόρτιση από κάποιο εντατικό σημείο και επαναφόρτιση με επιστροφή σε αυτό μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από τις «αρχικές» ελαστικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Δεδομένου ότι η μη γραμμική παραμορφωσιακή αποκλίνουσα συνιστώσα είναι πολύ μεγαλύτερη από την υδροστατική, το κριτήριο φόρτισης / επαναφόρτισης στηρίζεται στη σύγκριση της τρέχουσας αποκλίνουσας τάσης  $\tau_0$  με τη μέγιστη επιτευχθείσα μέχρι το τρέχον σημείο  $|\tau_0|_{max}$ . Εάν είναι μεγαλύτερη τότε βρισκόμαστε σε συνθήκες φόρτισης ενώ σε αντίθετη περίπτωση σε συνθήκες αποφόρτισης.

### 3.3.3 Προσομοίωση ρηγμάτωσης σκυροδέματος

#### 3.3.3.1 Κριτήριο ρηγμάτωσης

Όπως και στις καταστατικές σχέσεις, η μαθηματική προσομοίωση της επιφάνειας αστοχίας του σκυροδέματος μπορεί εύκολα να διαχωριστεί σε υδροστατική και αποκλίνουσα συνιστώσα πάνω στο αποκλίνον επίπεδο. Συνεπώς απαιτείται και εδώ να ορίσουμε τον τασικό χώρο στο ορθογώνιο σύστημα των κύριων τάσεων  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ .

Το κριτήριο αστοχίας ουσιαστικά περιγράφει μια επιφάνεια στο χώρο των τάσεων η οποία περικλείει την περιοχή για την οποία το καταστατικό προσομοίωμα του αρηγμάτωτου σκυροδέματος ισχύει. Για κάθε σημείο εκτός αυτής της περιοχής προκαλούνται ρωγμές οι οποίες δημιουργούν ασυνέχειες στο σκυρόδεμα. Οι ασυνέχειες σχηματίζονται στο επίπεδο της μέγιστης και ενδιάμεσης κύριας θλιπτικής τάσης και προεκτείνεται κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας θλιπτικής τάσης.

Σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με άξονες κατά τη διεύθυνση των κύριων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) κάθε επίπεδο κάθετο στη διαγώνιο του χώρου  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$  ονομάζεται αποκλίνον ή οκταεδρικό επίπεδο και ορίζεται από την απόσταση του  $z = \sqrt{3} \cdot \sigma_0$  από την αρχή των αξόνων. Οι προβολές των αξόνων  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  στο οκταεδρικό επίπεδο τέμνονται στο σημείο που προβάλλεται η αρχή των αξόνων στο επίπεδο και σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία  $120^\circ$ . Οι παρακάτω προβολές αυτές και οι προεκτάσεις τους κατά τη διαγώνιο της αντικειμενικής γωνίας χωρίζουν το επίπεδο σε έξι περιοχές όπου ισχύει.

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77

Περιοχή 1:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

Περιοχή 2:  $\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2$

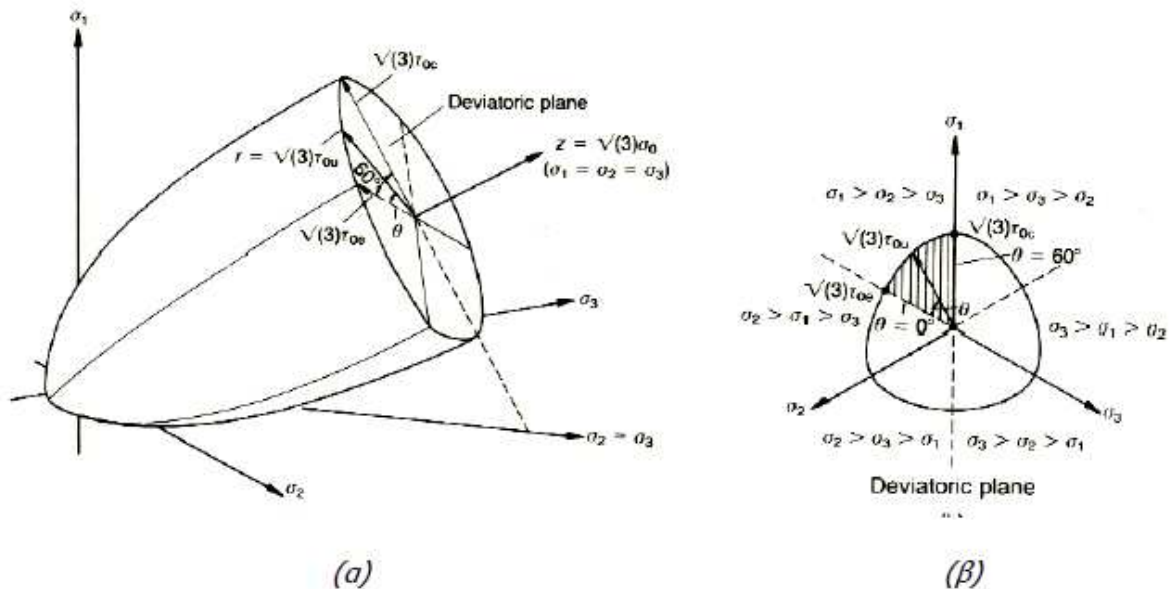
Περιοχή 3:  $\sigma_2 \geq \sigma_1 \geq \sigma_3$

Περιοχή 4:  $\sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_1$

Περιοχή 5:  $\sigma_3 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2$

Περιοχή 6:  $\sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_1$

Από κάθε σημείο του χώρου των τάσεων διέρχεται ένα οκταεδρικό επίπεδο στο οποίο η θέση του σημείου ορίζεται από την ευθεία μήκους  $r = \sqrt{3} \cdot \tau_o$ , που ενώνει το σημείο με το σημείο τομής της προβολής των αξόνων και την γωνία  $\theta$  που σχηματίζει η ευθεία αυτή με την προβολή ενός από τους άξονες [16].



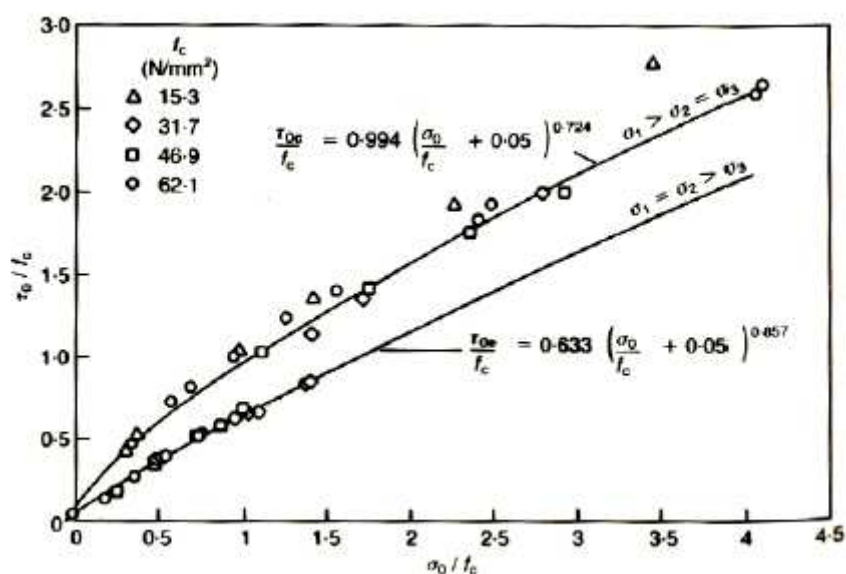
Σχήμα 3. 26: Απεικόνιση της επιφάνειας οριακής αντοχής (α) γενικότερη όψη τασικού χώρου (β) τυπική διατομή της περιβάλλουσας αντοχής σε τομή με το αποκλίνον επίπεδο (σταθερής  $\sigma_o$ ) [16].

Με την παραδοχή ότι το σκυρόδεμα είναι ένα ισότροπο υλικό προκύπτει ότι η επιφάνεια του κριτηρίου αστοχίας αποτελείται από έξι τμήματα συμμετρικά ως προς τους άξονες  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  (Σχήμα 3. 26). Έτσι για την αναλυτική περιγραφή της επιφάνειας αστοχίας αρκεί να περιγραφεί το τμήμα της που αντιστοιχεί σε μία από τις έξι περιοχές στις οποίες χωρίστηκε ο τασικός χώρος. Η καμπύλη που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας αστοχίας με το διατμητικό ή οκταεδρικό επίπεδο και αντιστοιχεί σε εντατική κατάσταση όπου  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  ορίζεται από τις συνιστώσες  $\tau_{oe}$  και  $\tau_{oc}$ , όπου  $\tau_{oe}$  και  $\tau_{oc}$  είναι οι διατμητικές οκταεδρικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την αστοχία του υλικού υπό την επίδραση αξονοσυμμετρικής

εντατικής κατάστασης για τις περιπτώσεις  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$  και  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές των τάσεων εξαρτώνται από το επίπεδο της υδροστατικής πίεσης. Η τιμή της διαμητικής οκταεδρικής τάσης του που ορίζει την καμπύλη αστοχίας για την περίπτωση που  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{ou} = \frac{2 \cdot \tau_{oc} (\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cdot \cos \theta + \tau_{oc} (2 \cdot \tau_{oe} - \tau_{oc}) \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{4 \cdot (\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cdot \cos^2 \theta + 5 \cdot \tau_{oc}^2}}{4 \cdot (\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cdot \cos^2 \theta + (2 \cdot \tau_{oe} - \tau_{oc})} \quad \{3.49\}$$

για  $60^\circ < \theta < 0^\circ$



Σχήμα 3. 27: Συνδυασμοί οκταεδρικών τάσεων για σκυρόδεμα υπό τριαξονική θλίψη και τριαξονικό εφελκυσμό στην οριακή αντοχή [16].

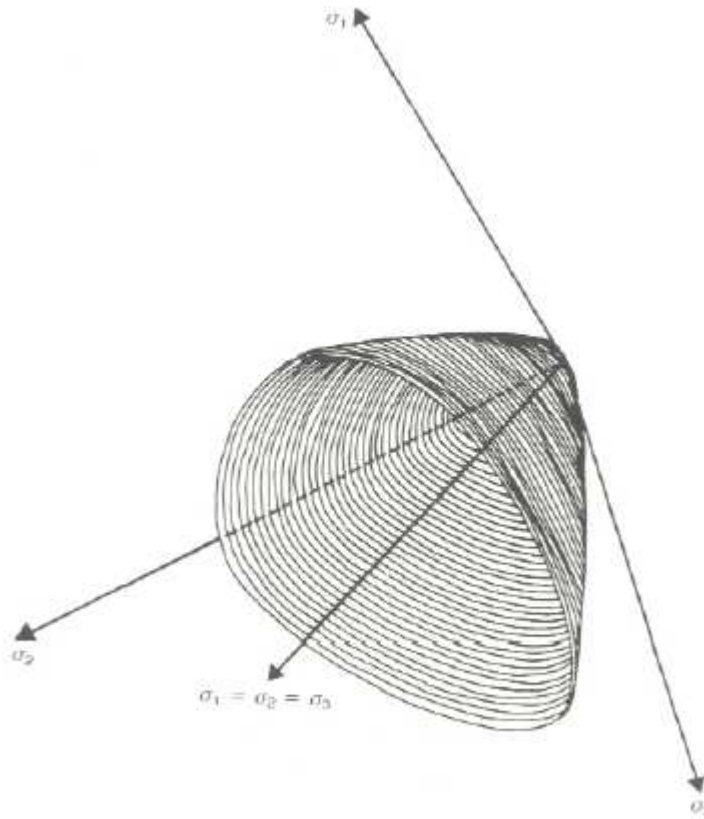
Οι αναλυτικές εκφράσεις των  $\tau_{oe}$  και  $\tau_{oc}$  προκύπτουν από την ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων Σχήμα 3. 27 και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{\tau_{oc}}{f_c} = 0.944 \left( \frac{\sigma_o}{f_c} + 0.05 \right)^{0.724} \quad \{3.50\}$$

$$\frac{\tau_{oe}}{f_c} = 0.633 \left( \frac{\sigma_o}{f_c} + 0.05 \right)^{0.857} \quad \{3.51\}$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις είναι δυνατόν να προκύψει μια επιφάνεια που να περιγράφει το κριτήριο αστοχίας για οποιοδήποτε τρόπο φόρτισης και η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. 28.





Σχήμα 3. 28: Επιφάνεια αστοχίας [16].

### 3.3.3.2 Προσομοίωση μακρορηγμάτωσης

Η προσαναυξητική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων ενός αρηγμάτωτου σημείου ολοκλήρωσης Gauss, χρησιμοποιώντας τη σταθερά του Lamé, έχει ως εξής:

$$\Delta\sigma = D \cdot \Delta\varepsilon \quad \{3.52\}$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G + \mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 2G + \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 2G + \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad \{3.53\}$$

Σταθερά του Lamé: 
$$\mu = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \text{ ή εναλλακτικά } \mu = K - \frac{2G}{3} \quad \{3.54\}$$

Όπως είδαμε, είναι πιθανό κατά τον υπολογισμό των εσωτερικών δυνάμεων, κάποιο σημείο ολοκλήρωσης Gauss να βρεθεί έξω από την επιφάνεια αστοχίας με αποτέλεσμα το

μηδενισμό της στιβαρότητας (σχηματισμός ρωγμής) κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης κύριας εφελκυστικής δύναμης. Εάν θεωρήσουμε ότι δημιουργείται μια ρωγή κάθετα στη διεύθυνση  $z'$  σε ένα νέο τρισσορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα αξόνων  $x', y', z'$  τότε η καταστατική σχέση θα παίρνει την εξής μορφή στο σύστημα αυτό:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{x'} \\ \Delta\sigma_{y'} \\ \Delta\sigma_{z'} \\ \Delta\tau_{xy'} \\ \Delta\tau_{xz'} \\ \Delta\tau_{yz'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G + \mu & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 2G + \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_{x'} \\ \Delta\varepsilon_{y'} \\ \Delta\varepsilon_{z'} \\ \Delta\gamma_{xy'} \\ \Delta\gamma_{xz'} \\ \Delta\gamma_{yz'} \end{Bmatrix} \quad \{3.55\}$$

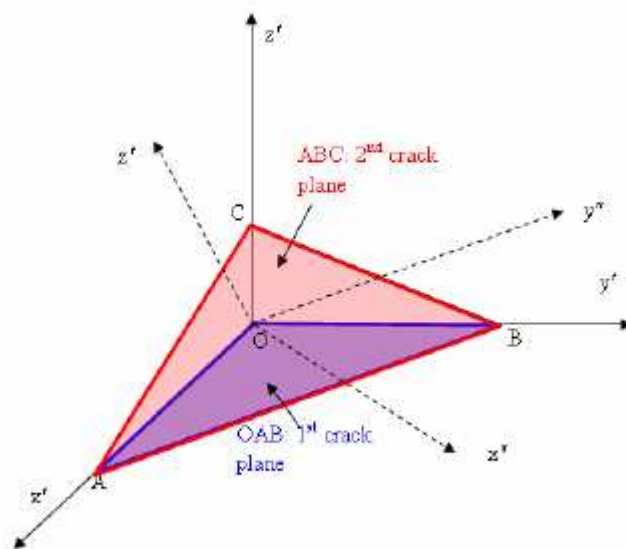
Δεδομένου ότι από τη στιγμή που δημιουργείται η ρηγμάτωση παύουμε να έχουμε ιστροπική συμπεριφορά, απαιτείται μετασχηματισμός προκειμένου να φέρουμε το μητρώο  $\mathbf{D}'$  στους καθολικούς άξονες. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο μετασχηματισμό. Ο συντελεστής  $\beta$  ονομάζεται συντελεστής διατήρησης διατμητικής. Κατά το σχηματισμό και 2ης ρωγμής, η εναπομένουσα διεύθυνση κατά την οποία διατηρείται η στιβαρότητα είναι κατά τον άξονα τομής των επιπέδων των δύο ρωγμών. Εάν υποθέσουμε ότι ο άξονας αυτός συμπίπτει με τον άξονα  $y''$  ενός συστήματος αξόνων  $x'', y'', z''$  τότε η καταστατική σχέση θα πάρει την εξής μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{x''} \\ \Delta\sigma_{y''} \\ \Delta\sigma_{z''} \\ \Delta\tau_{xy''} \\ \Delta\tau_{xz''} \\ \Delta\tau_{yz''} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2G + \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_{x''} \\ \Delta\varepsilon_{y''} \\ \Delta\varepsilon_{z''} \\ \Delta\gamma_{xy''} \\ \Delta\gamma_{xz''} \\ \Delta\gamma_{yz''} \end{Bmatrix} \quad \{3.56\}$$

Και εδώ απαιτείται ο μετασχηματισμός του καταστατικού μητρώου από το σύστημα  $x'', y'', z''$  στο  $x, y, z$  με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

Στην περίπτωση που δημιουργηθεί και 3η ρωγή τότε δεν υπάρχει στιβαρότητα σε καμία διεύθυνση και συνεπώς το μητρώο παίρνει τη μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x'' \\ \Delta\sigma_y'' \\ \Delta\sigma_z'' \\ \Delta\tau_{xy}'' \\ \Delta\tau_{xz}'' \\ \Delta\tau_{yz}'' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x'' \\ \Delta\varepsilon_y'' \\ \Delta\varepsilon_z'' \\ \Delta\gamma_{xy}'' \\ \Delta\gamma_{xz}'' \\ \Delta\gamma_{yz}'' \end{Bmatrix} \quad \{3.57\}$$



Σχήμα 3. 29: Γραφική απεικόνιση επιπέδων ρηγμάτωσης στο χώρο [16].

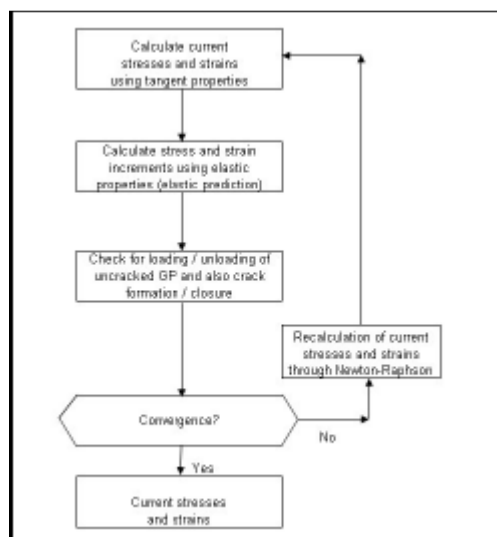
Είναι σαφές ότι για την περίπτωση ύπαρξης τριών ρωγμών το μητρώο D είναι ισοτροπικό και δεν χρειάζεται μετασχηματισμό για τη χρήση του στο καθολικό σύστημα αξόνων. Τα συστήματα των αξόνων καθώς και τα επίπεδα των ρωγμών όπως περιγράφηκαν παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 3. 29.

### 3.3.4 Ενοποιημένη αντιμετώπιση της ρηγμάτωσης σε τυχούσα ιστορία φόρτισης

Στην εργασία των Kotsovos & Spiliopoulos 1998 στην οποία εισήχθη για πρώτη φορά η δυνατότητα κλεισίματος της ρωγμής, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος διαχείρισης των ρωγμών με την ονομασία Single Crack Approach (SCA, Προσέγγιση Μοναδικής Ρωγμής, ΠΜΡ). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή το φορτίο εφαρμόζεται σε σχετικά μεγάλα βήματα και για λόγους ευστάθειας της σύγκλισης, μόνο μία ρωγμή μπορεί να ανοίξει ή να κλείσει μέσα σε μια επανάληψη της μεθόδου Newton – Raphson. Ο έλεγχος για φόρτιση ή αποφόρτιση ενός σημείου ολοκλήρωσης Gauss γίνεται μόνο στην αρχή του βήματος και η κατάσταση του (εάν αφορτίζεται ή φορτίζεται δηλαδή) θεωρείται σταθερή σε όλες τις υπόλοιπες επαναλήψεις. Επίσης, το άνοιγμα και κλείσιμο των ρωγμών γίνεται διαδοχικά σε

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77

δύο ξεχωριστές διαδικασίες μέσα στην επανάληψη. Δηλαδή πρώτα εκτελείται μια επαναληπτική υπόδιαδικασία κλεισίματος όλων των ρωγμών και αφού ολοκληρωθεί αυτή τότε εκτελείται μια δεύτερη υπόδιαδικασία ανοίγματος ρωγμών (Σχήμα 3. 30(α)).



Σχήμα 3. 30: Τροποποιημένος αλγόριθμος Ενοποιημένη Αντιμετώπιση της Ρηγμάτωσης σε Τυχούσα Ιστορία Φόρτισης (Unified Total Crack Approach (UTCA) [16].

Σύμφωνα με μια νέα προσέγγιση της επαναληπτικής διαδικασίας για το άνοιγμα και κλείσιμο των ρωγμών αυτή, στην οποία δόθηκε η ονομασία Unified Total Crack Approach (UTCA, Ενοποιημένη Αντιμετώπιση της Ρηγμάτωσης σε Τυχούσα Ιστορία Φόρτισης), η ιστορία ρηγμάτωσης ενός σημείου ολοκλήρωσης αντιμετωπίζεται με έναν ενιαίο τρόπο χωρίς το διαχωρισμό ανοίγματος και κλεισίματος μέσα σε μια επανάληψη της μεθόδου Newton – Raphson (Σχήμα 3. 30(β)). Επίσης ο έλεγχος για φόρτιση ή αποφόρτιση σε ένα σημείο Gauss γίνεται μέσα στην επανάληψη και όχι στην αρχή της. Έτσι καλύπτεται και το ενδεχόμενο κάποιο σημείο Gauss να βρεθεί και στις δύο καταστάσεις μέσα σε ένα επαυξητικό βήμα. Η όλη διαδικασία συνεπώς, μπορεί να περιγράψει με φυσικότερο τρόπο τη μη γραμμική διαδικασία και, όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, αναιρεί και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν με την αρχική προσέγγιση της PMP των Kotsovos & Spiliopoulos 1998.

### 3.4 Καταστατικό προσομοίωμα χάλυβα

#### 3.4.1 Προσομοίωμα Menegotto – Pinto 1973

Το μοντέλο των Menegotto & Pinto 1973 δίνει πιο ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς, συμπεριλαμβάνοντας το φαινόμενο Bauschinger. Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων του συγκεκριμένου προσομοιώματος δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{(1+\varepsilon^{*R})^{\frac{1}{R}}} \text{ με } \varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_o - \varepsilon_r} \text{ και } \sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_o - \sigma_r} \quad \{3.58\}$$

Η εξίσωση αυτή αναπαριστά μια καμπυλωτή μετάβαση από την ευθεία ασύμπτωτο κλίσης ο  $E_o$  σε μια άλλη ασύμπτωτο  $E_1 \cdot \sigma_o$  και ο  $\varepsilon$  είναι η τάση και η παραμόρφωση στο σημείο που συναντώνται οι δύο ασύμπτωτες.  $\sigma_r$  και  $\varepsilon_r$  είναι η τάση και η παραμόρφωση στο σημείο που συνέβη η τελευταία αναστροφή της παραμόρφωσης για το ίδιο πρόσημο τάσης. Το  $b$  είναι ο λόγος κράτυνσης  $E_1/E_o$  και  $R$  είναι μια παράμετρος που επηρεάζει το σχήμα της μετάβασης που περιγράφει το φαινόμενο Bauschinger. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. 31(α) τα  $(\varepsilon_o, \sigma_o)$  και  $(\sigma_r, \varepsilon_r)$  αποθηκεύονται μετά από κάθε αντιστροφή της παραμόρφωσης.

Το  $R$  εξαρτάται από τη διαφορά της παραμόρφωσης ανάμεσα στο σημείο συνάντησης των ασυμπτώτων και στο τελευταίο σημείο αντιστροφής του φορτίου με μέγιστη ή ελάχιστη παραμόρφωση που εξαρτάται από το εάν η αντίστοιχη τάση είναι θετική ή αρνητική. Η σχέση που δίνει το  $R$  είναι:

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad \{3.59\}$$

όπου το  $\xi$  είναι μεταβλητή η οποία ανανεώνεται σε κάθε αντιστροφή της παραμόρφωσης (Σχήμα 3. 31(β)).  $R_0$  είναι η τιμή του  $R$  κατά την πρώτη φόρτιση και  $a_1, a_2$  σταθερές που μετρώνται πειραματικά μαζί με το  $R_0$ . Το  $\xi$  παραμένει σταθερό όταν υπάρξει μερική αποφόρτιση.

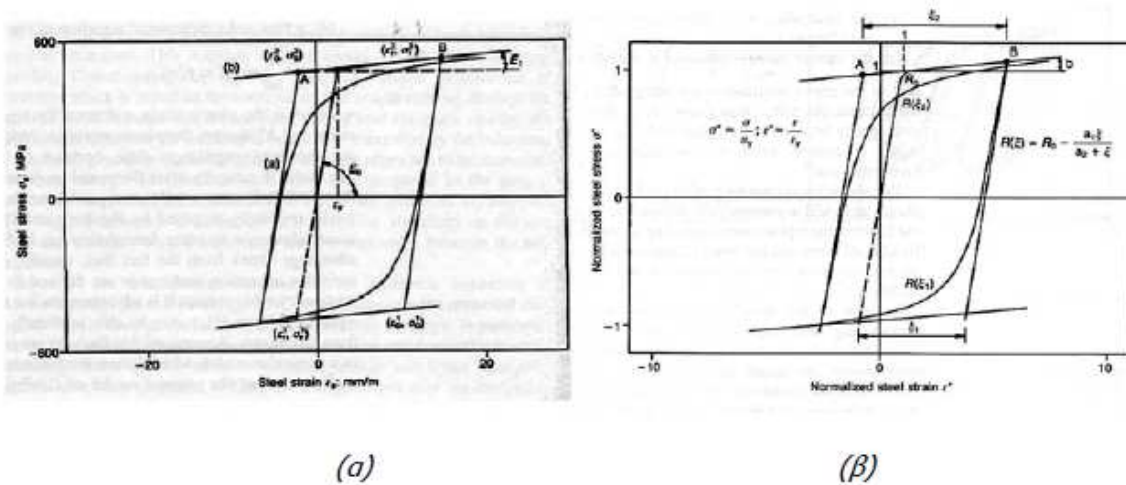
Κατά τις περιπτώσεις μερικής αποφόρτισης μια απόλυτα ρεαλιστική προσομοίωση θα απαιτούσε την αποθήκευση όλων των προηγούμενων κλάδων της ιστορίας τάσεων – παραμορφώσεων. Μόνον έτσι θα ήταν δυνατό το προσομοίωμα να παρακολουθήσει τον προηγούμενο κλάδο φόρτισης μόλις η νέα καμπύλη επαναφόρτισης έφτανε εκεί. Αυτό θα απαιτούσε την αποθήκευση όλων τα απαραίτητων πληροφοριών στη μνήμη κάτι που δεν είναι καθόλου πρακτικό από υπολογιστικής πλευράς. Συνεπώς στη συγκεκριμένη προσομοίωση αποθηκεύονται:

- (α) Η μονοτονική περιβάλλουσα

(β) Ο ανώτερος ανερχόμενος κλάδος που ξεκινάει από το σημείο αντιστροφής με τη μικρότερη παραμόρφωση  $\varepsilon$ .

(γ) Ο χαμηλότερος κατερχόμενος κλάδος που ξεκινάει από το σημείο αντιστροφής με τη μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon$ .

(δ) την τρέχουσα καμπύλη που ξεκινάει από το πιο πρόσφατο σημείο αντιστροφής. Λόγω των περιορισμένων πληροφοριών που αποθηκεύονται, η επαναφόρτιση μετά από μερική αποφόρτιση ακολουθεί την καμπύλη (β) και όχι την (α) (Σχήμα 3. 32). Κρίνεται ότι η απόκλιση αυτή θεωρείται αποδεκτή.



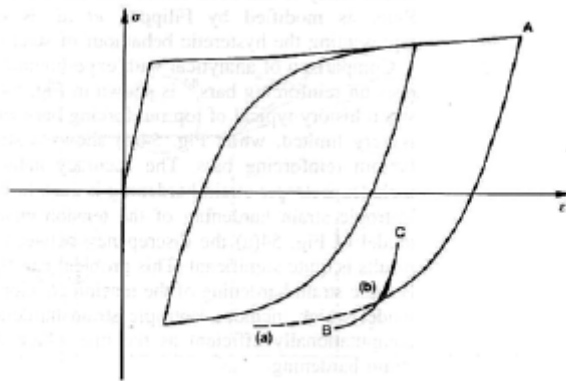
Σχήμα 3. 31: (α) Παράμετροι προσομοιώματος χάλυβα των Menegotto – Pinto. (β) Ορισμός της παραμέτρου καμπυλότητας  $R(\xi)$  των Menegotto – Pinto [16].

Το προσομοίωμα επεκτάθηκε από τους Filippou et al. 1983 με την προσθήκη κάποιας μετάθεσης των ασυμπτώτων για να ληφθεί υπ'όψιν η ισοτροπική παραμορφωσιακή κράτυνση. Θεωρήθηκε ότι η μετάθεση της ασυμπτώτου εξαρτάται από την τρέχουσα μέγιστη πλαστική παραμόρφωση με τη μορφή:

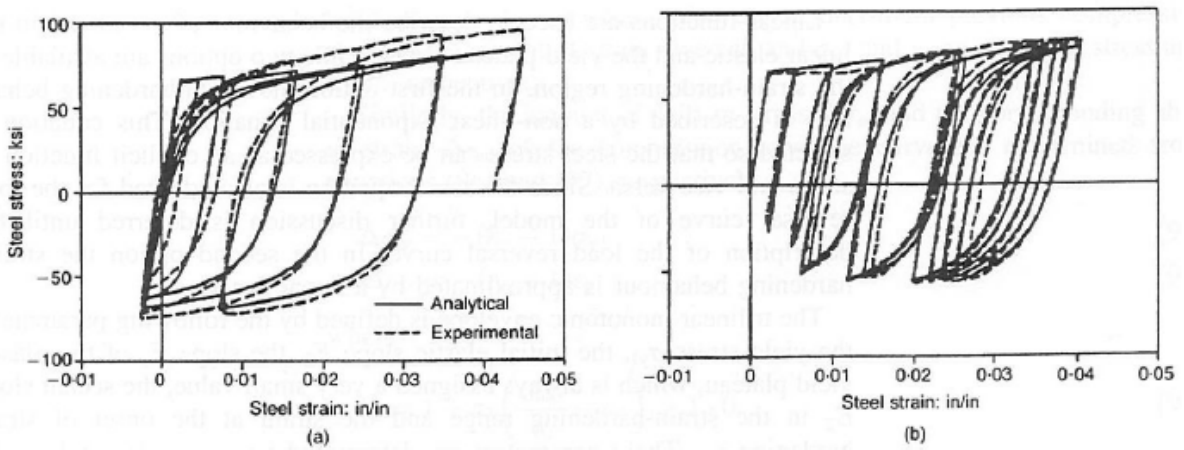
$$\frac{\sigma_{st}}{\sigma_y} = a_3 \left( \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_y} - a_4 \right) \quad (3.60)$$

με  $\varepsilon_{\max}$  την απόλυτη μέγιστη παραμόρφωση τη στιγμή της αντιστροφής,  $\varepsilon_y$ ,  $\sigma_y$  την παραμόρφωση και την τάση κατά τη διαρροή και  $a_3$  και  $a_4$  σταθερές που μετρώνται πειραματικά. Σύγκριση αναλυτικών αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. 33. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται από το προσομοίωμα που περιλαμβάνει ισοτροπική παραμορφωσιακή κράτυνση είναι ιδιαίτερος ικανοποιητική ενώ αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος που απαιτείται προγραμματιστικά και υπολογιστικά είναι σχεδόν το ίδιο όταν αυτή λαμβάνεται υπ'όψιν.

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77



Σχήμα 3. 32: Καμπύλη επαναφόρτισης κατόπιν μερικής αποφόρτισης (a) Θεωρητικώς σωστή συμπεριφορά (b) συμπεριφορά προσομοιώματος περιορισμένης μνήμης [16].



Σχήμα 3. 33: Σύγκριση προσομοιωμάτων με πειραματικές δοκιμές [από CEB 1996] [16].

Κεφάλαιο 3  
Το λογισμικό FE77



## Κεφάλαιο 4

### Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

#### 4.1 Γενικά

Σ' αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών και των αντίστοιχων αναλυτικών που προκύπτουν από το λογισμικό fe77. Συγκεκριμένα, τα πειράματα αφορούν τις δοκούς που εξετάστηκαν από τους Vecchio – Shim [10]. Η σύγκριση γίνεται προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο το φορτίο αστοχίας που προκύπτει από το λογισμικό προβλέπει το αντίστοιχο που καταγράφηκε πειραματικά. Στο λογισμικό fe77 έγινε ανάλυση εννέα δοκών από τα προαναφερόμενα πειράματα και στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δοκών και τα διαγράμματα φορτίου - μετακίνησης (P - δ).

#### 4.2 Ανάλυση της δοκού OA1

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού OA1.

b (mm)	h (mm)	d (mm)	L (mm)	S (mm)
305	552	457	4100	3660

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά οπλισμών δοκού OA1.

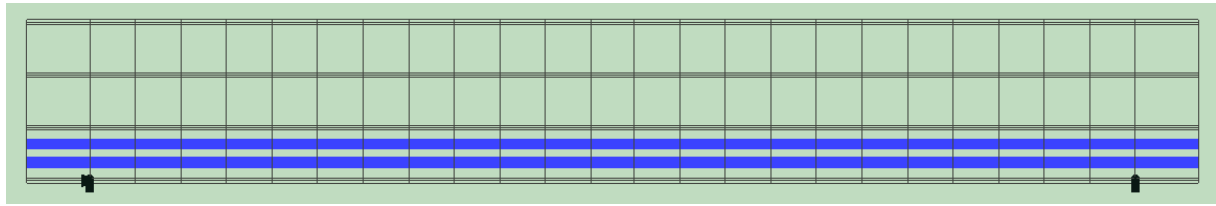
Είδος	Ποσότητα	D (mm)	f <sub>y</sub> (MPa)	E (MPa)
Κάτω οπλισμός	2 M30	29.9	436	200000
	2 M25 <sup>b</sup>	25.2	445	220000
Άνω οπλισμός	-	-	-	-
Συνδετήρες	-	-	-	-

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος δοκού OA1.

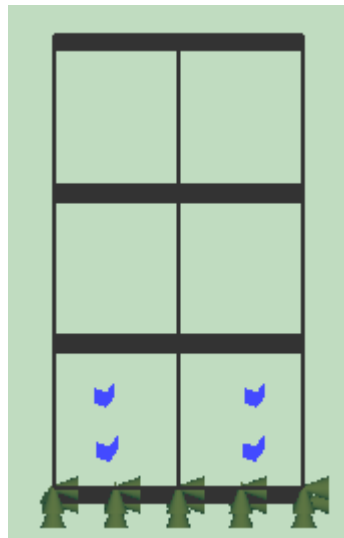
f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>sp</sub> (MPa)
22.6	32.9	2.37

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διαστάσεως 0.153 × 0.160 × 0.184 m 27 κόμβων στο καθαρό άνοιγμα της δοκού. Η φόρτιση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιωθεί καλύτερα ο πραγματικός τρόπος φόρτισης, που έγινε με πλάκα φόρτισης πλάτους 15 cm. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε επιφανειακή φόρτιση στα 2 κεντρικά πεπερασμένα στοιχεία με συνολικό μήκος 15cm σε όλο το πλάτος της δοκού. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το προσομοίωμα της δοκού OA1 στο λογισμικό fe77.

Κεφάλαιο 4  
Συγκριτική πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων



α)



β)

Σχήμα 4.1: Προσομοίωμα της δοκού ΟΑ1, στο οποίο διακρίνονται α) τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και β) η θέση των διαμήκων οπλισμών.

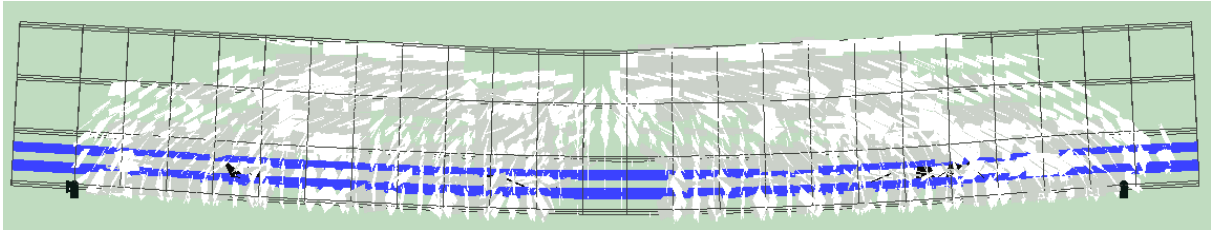
Από την ανάλυση προέκυψε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 312 kN, τιμή φορτίου που είναι πολύ κοντά στην τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή (331 kN), αλλά και στην τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την ανάλυση με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2 [10].



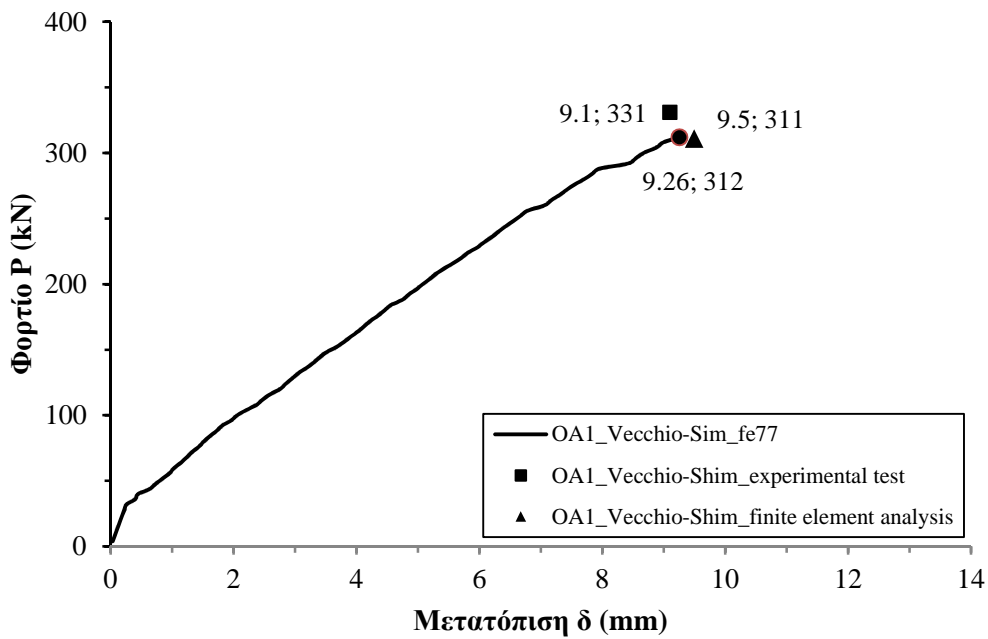
Σχήμα 4.2: Ρηγμάτωση (crack pattern) της δοκού ΟΑ1 στο στάδιο αστοχίας κατά την πειραματική δοκιμή [10].

## Κεφάλαιο 4

### Συγκριτική πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων



Σχήμα 4. 3: Η δοκός OA1 κατά το στάδιο της αστοχίας από το λογισμικό fe77.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) του μέσου της δοκού OA1, όπως προέκυψε από το λογισμικό fe77, παράλληλα απεικονίζονται με σημεία οι τιμές του φορτίου αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην πειραματική δοκιμή και την ανάλυση με τα διδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2.

### 4.3 Ανάλυση της δοκού OA2

Πίνακας 4. 4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού OA2.

<b>b (mm)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>S (mm)</b>
305	552	457	5010	4570

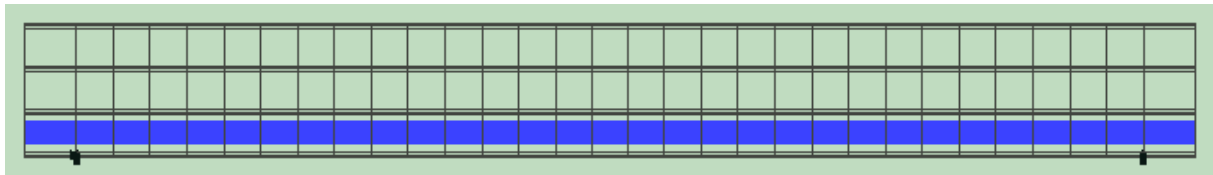
Πίνακας 4. 5: Χαρακτηριστικά οπλισμών δοκού OA2.

<b>Είδος</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>D (mm)</b>	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>
Κάτω οπλισμός	3 M30	29.9	436	200000
	2 M25 <sup>a</sup>	25.2	440	210000
Άνω οπλισμός	-	-	-	-
Συνδετήρες	-	-	-	-

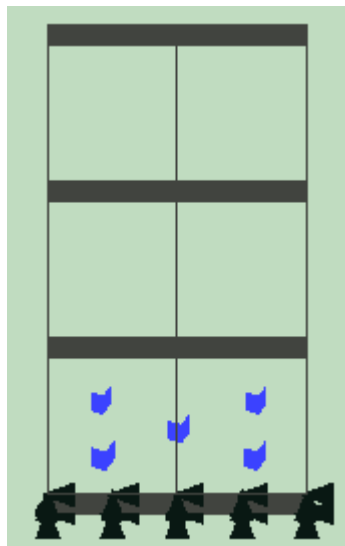
Πίνακας 4. 6: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος δοκού OA2.

<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>E<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>sp</sub> (MPa)</b>
25.9	34.3	3.13

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διαστάσεως  $0.153 \times 0.163 \times 0.184$  m 27 κόμβων στο καθαρό άνοιγμα της δοκού. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το προσομοίωμα της δοκού OA2 στο λογισμικό fe77.



α)



β)

Σχήμα 4.5: Προσομοίωμα της δοκού OA2, στο οποίο διακρίνονται α) τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και β) η θέση των διαμήκων οπλισμών.

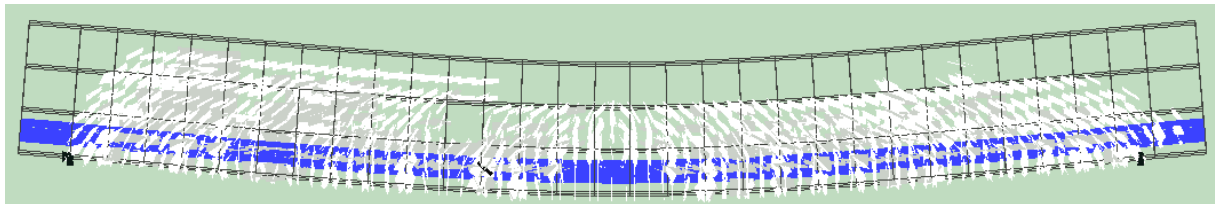
## Κεφάλαιο 4

### Συγκριτική πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

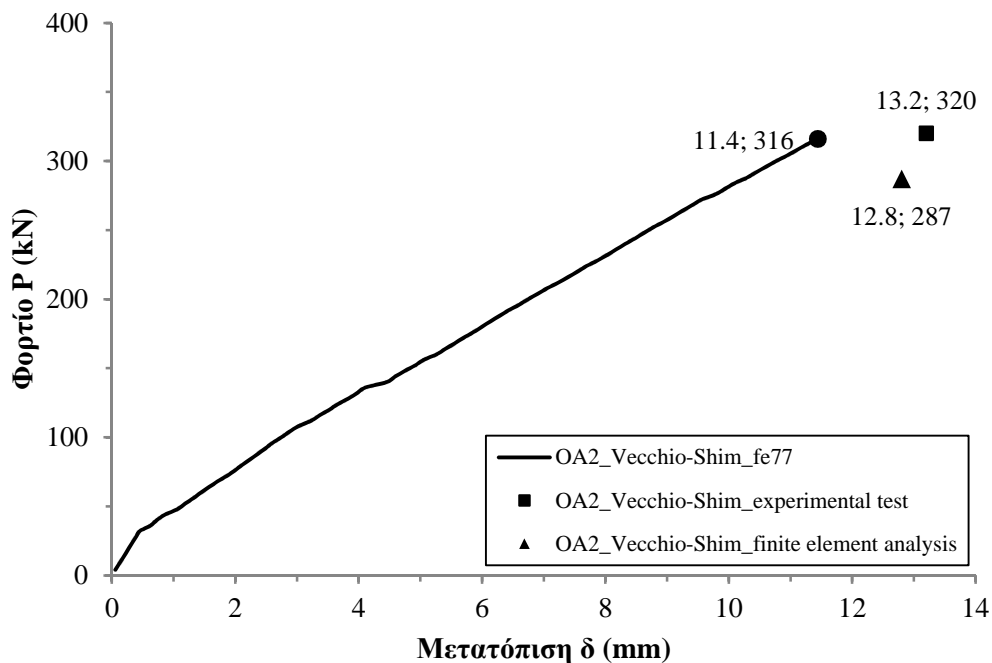
Από την ανάλυση προέκυψε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 316 kN, τιμή φορτίου που είναι πολύ κοντά στην τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή (320 kN), αλλά και στην τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την ανάλυση με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2 (287 kN) [10].



Σχήμα 4.6: Ρηγμάτωση (crack pattern) της δοκού OA2 στο στάδιο αστοχίας κατά την πειραματική δοκιμή [10].



Σχήμα 4.7: Η δοκός OA2 κατά το στάδιο της αστοχίας από το λογισμικό fe77.



Σχήμα 4. 8: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) του μέσου της δοκού OA2, όπως προέκυψε από το λογισμικό fe77, παράλληλα απεικονίζονται με σημεία οι τιμές του φορτίου αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην πειραματική δοκιμή και την ανάλυση με τα δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2.

#### 4.4 Ανάλυση της δοκού ΟΑ3

Πίνακας 4. 7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού ΟΑ3.

<b>b (mm)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>S (mm)</b>
305	552	457	6840	6400

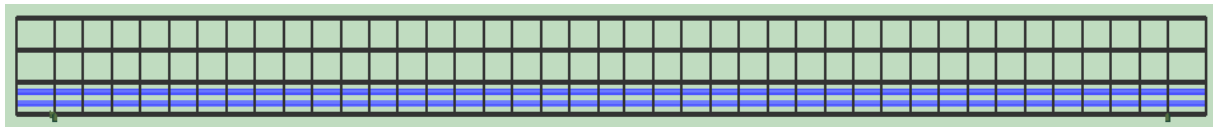
Πίνακας 4. 8: Χαρακτηριστικά οπλισμών δοκού ΟΑ3.

<b>Είδος</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>D (mm)</b>	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>
Κάτω οπλισμός	4 M30	29.9	436	200000
	2 M25 <sup>b</sup>	25.2	445	220000
Άνω οπλισμός	-	-	-	-
Συνδετήρες	-	-	-	-

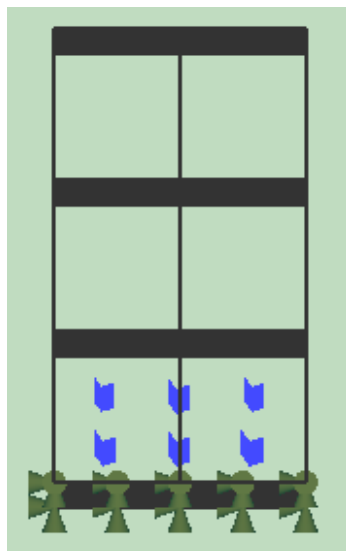
Πίνακας 4. 9: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος δοκού ΟΑ3.

<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>E<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>sp</sub> (MPa)</b>
43.5	36.5	3.37

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διαστάσεως  $0.153 \times 0.164 \times 0.184$  m 27 κόμβων στο καθαρό άνοιγμα της δοκούς. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το προσομοίωμα της δοκού ΟΑ3 στο λογισμικό fe77.



α)



β)

Σχήμα 4. 9: Προσομοίωμα της δοκού ΟΑ3, στο οποίο διακρίνονται α) τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και β) η θέση των διαμήκων οπλισμών.

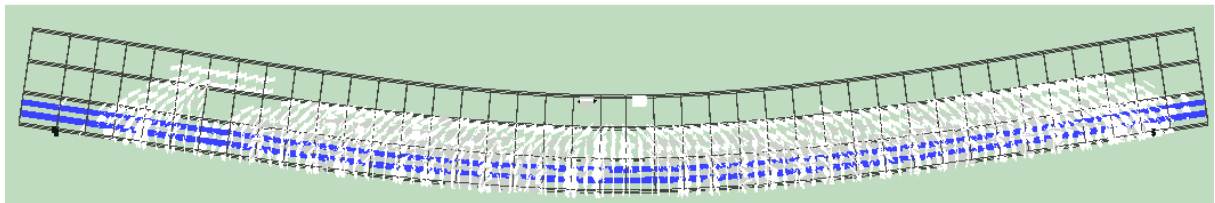
## Κεφάλαιο 4

### Συγκριτική πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

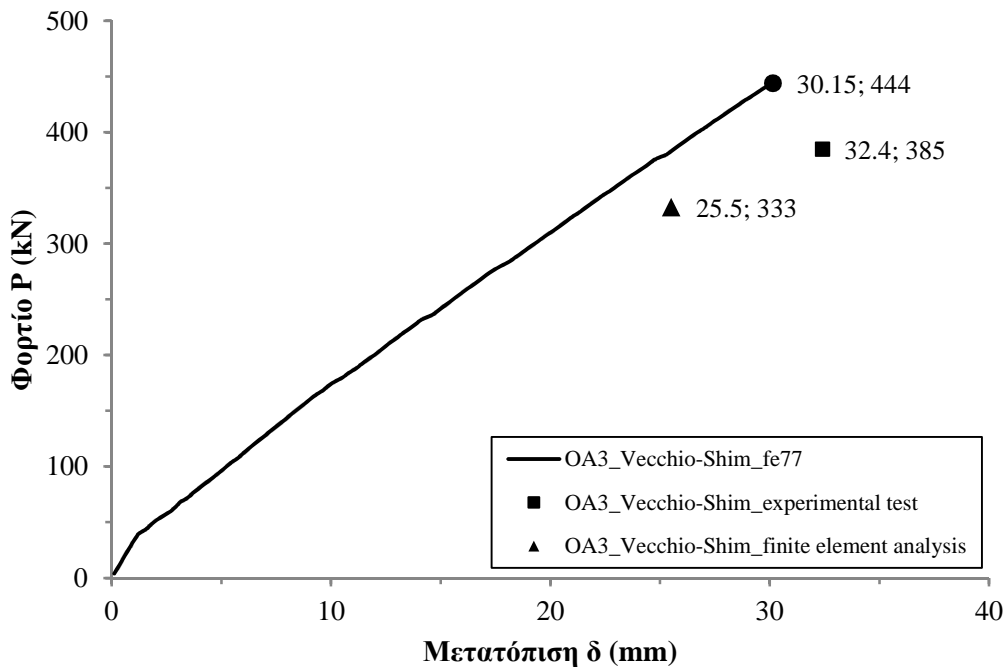
Από την ανάλυση προέκυψε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 444 kN, τιμή μεγαλύτερη από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή (385 kN), αλλά και αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την ανάλυση με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2 (333 kN) [10].



Σχήμα 4.10: Ρηγμάτωση (crack pattern) της δοκού OA3 στο στάδιο αστοχίας κατά την πειραματική δοκιμή [10].



Σχήμα 4. 51: Η δοκός OA3 κατά το στάδιο της αστοχίας από το λογισμικό fe77.



Σχήμα 4. 62: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) του μέσου της δοκού OA3, όπως προέκυψε από το λογισμικό fe77, παράλληλα απεικονίζονται με σημεία οι τιμές του φορτίου αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην πειραματική δοκιμή και την ανάλυση με τα δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2.

## 4.5 Ανάλυση της δοκού A1

Πίνακας 4.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού A1.

<b>b (mm)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>S (mm)</b>
305	552	457	4100	3660

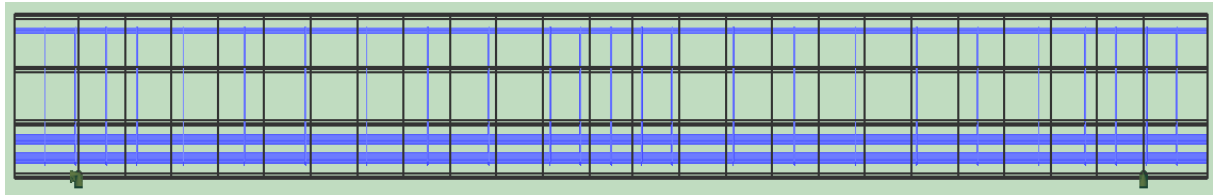
Πίνακας 4.11: Χαρακτηριστικά οπλισμών δοκού A1.

<b>Είδος</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>D (mm)</b>	<b><math>f_y</math> (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>
Κάτω οπλισμός	2 M30	29.9	436	200000
	2 M25 <sup>b</sup>	25.2	445	220000
Άνω οπλισμός	3 M10	11.3	315	200000
Συνδετήρες	D5	6.4	600	200000

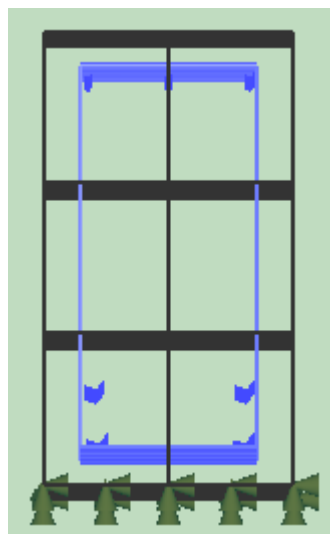
Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος δοκού A1.

<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b><math>E_c</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{sp}</math> (MPa)</b>
22.6	32.9	2.37

Επειδή η A1 και η OA1 έχουν την ίδια γεωμετρία, το μέγεθος και οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια με τα αντίστοιχα της δοκού OA1. Το προσομοίωμα της δοκού A1 στο λογισμικό fe77 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



α)



β)

Σχήμα 4.73: Προσομοίωμα της δοκού A1, στο οποίο διακρίνονται α) τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και β) η θέση των διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών.



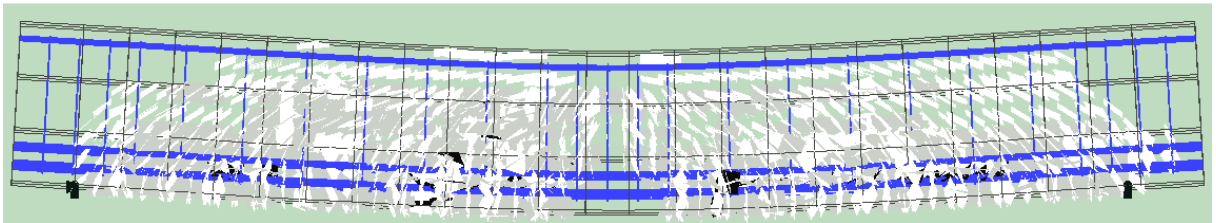
## Κεφάλαιο 4

### Συγκριτική πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

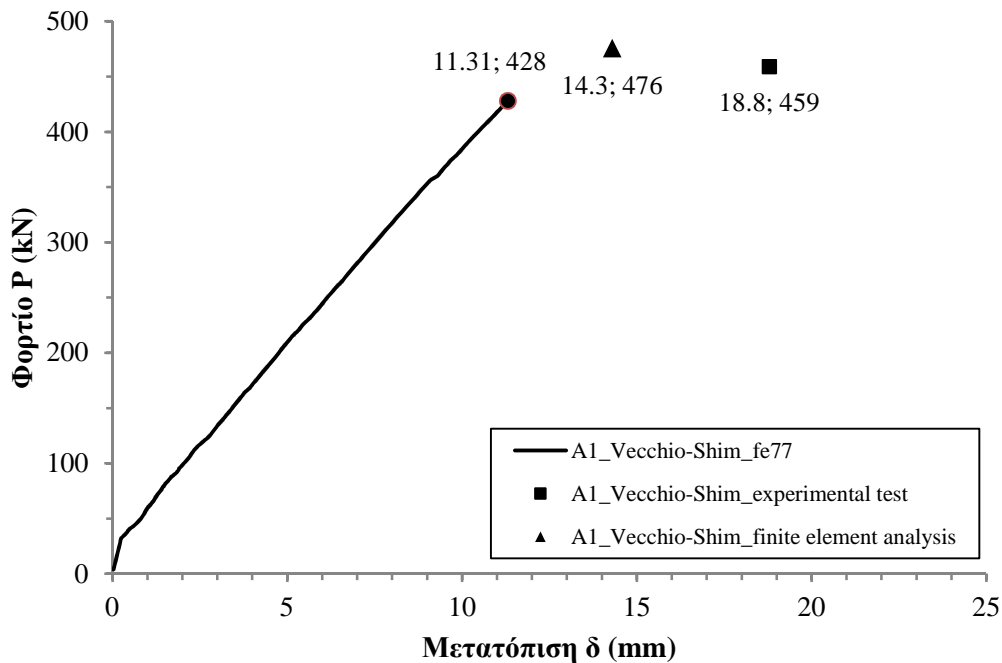
Από την ανάλυση προέκυψε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 428 kN, τιμή λίγο μεγαλύτερη από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή (459 kN), αλλά και από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την ανάλυση με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2 (476 kN) [10].



Σχήμα 4.84: Ρηγμάτωση (crack pattern) της δοκού A1 στο στάδιο αστοχίας κατά την πειραματική δοκιμή [10].



Σχήμα 4. 15: Η δοκός A1 κατά το στάδιο της αστοχίας από το λογισμικό fe77.



Σχήμα 4.96: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) του μέσου της δοκού A1, όπως προέκυψε από το λογισμικό fe77, παράλληλα απεικονίζονται με σημεία οι τιμές του φορτίου αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην πειραματική δοκιμή και την ανάλυση με τα δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2.

## 4.6 Ανάλυση της δοκού A2

Πίνακας 4. 13: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού A2.

b (mm)	h (mm)	d (mm)	L (mm)	S (mm)
305	552	457	5010	4570

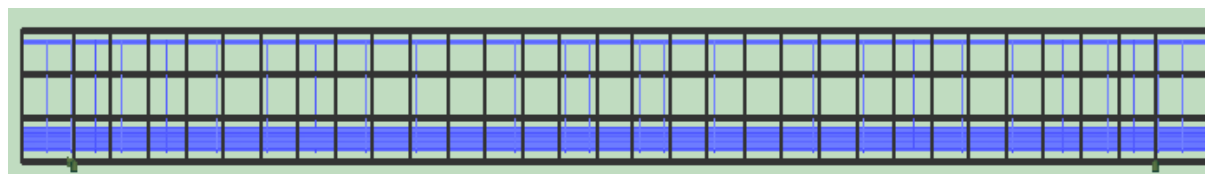
Πίνακας 4. 14: Χαρακτηριστικά οπλισμών δοκού A2.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Κάτω οπλισμός	3 M30	29.9	436	200000
	2 M25 <sup>a</sup>	25.2	440	210000
Άνω οπλισμός	3 M10	11.3	315	200000
Συνδετήρες	D5	6.4	600	200000

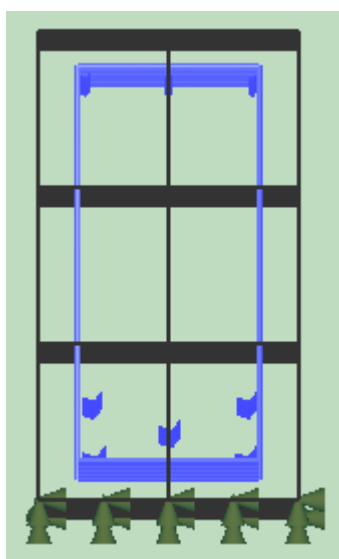
Πίνακας 4. 15: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος δοκού A2.

$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
25.9	34.3	3.13

Επειδή η A2 και η OA2 έχουν την ίδια γεωμετρία, το μέγεθος και οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια με τα αντίστοιχα της δοκού OA1. Το προσομοίωμα της δοκού A1 στο λογισμικό fe77 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



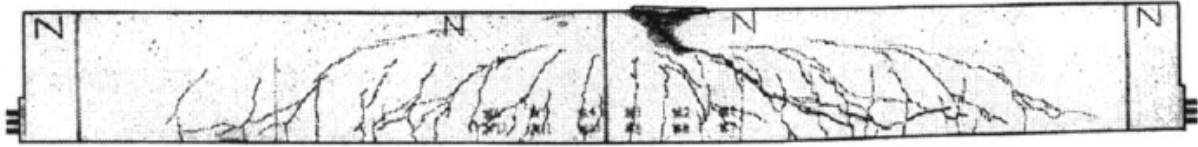
α)



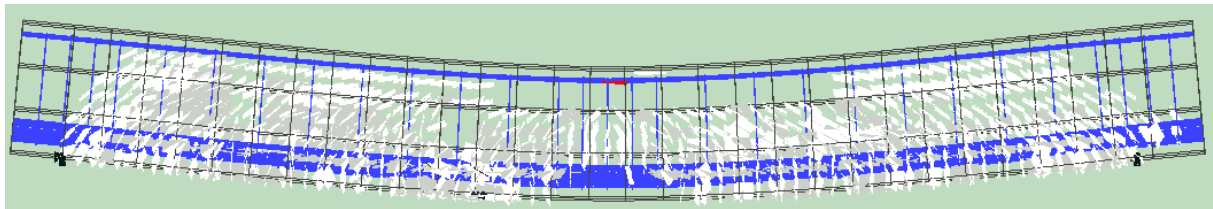
β)

Σχήμα 4. 17: Προσομοίωμα της δοκού A2, στο οποίο διακρίνονται α) τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και β) η θέση των διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών.

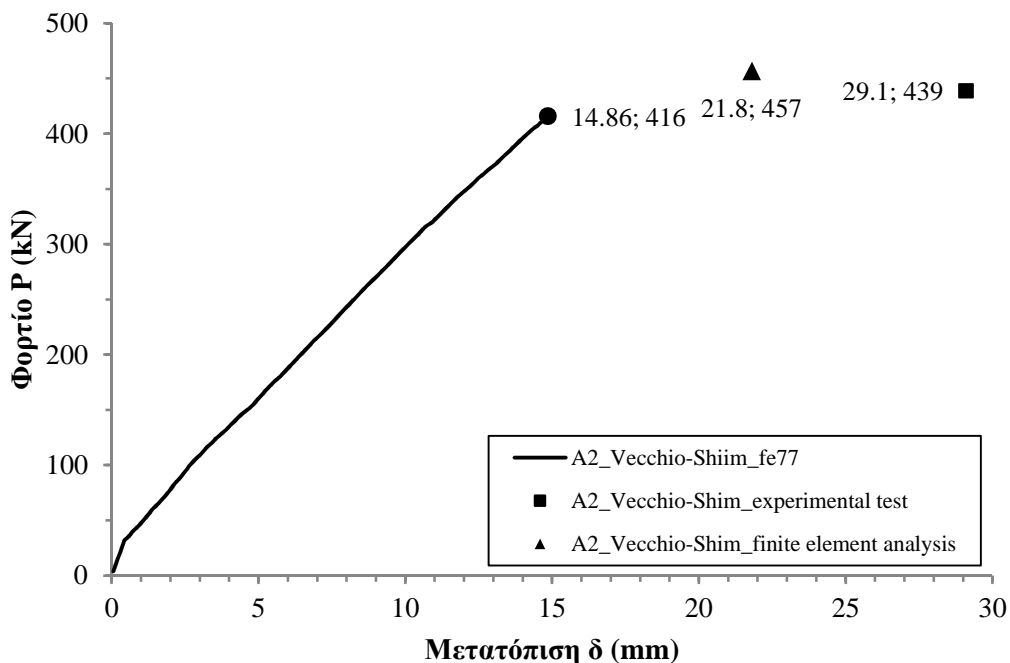
Από την ανάλυση προέκυψε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 416 kN, τιμή φορτίου που είναι λίγο μικρότερη από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή (439 kN), αλλά και από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την ανάλυση με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2 (457 kN) [10].



Σχήμα 4.108: Ρηγμάτωση (crack pattern) της δοκού A2 στο στάδιο αστοχίας κατά την πειραματική δοκιμή [10].



Σχήμα 4. 119: Η δοκός A2 κατά το στάδιο της αστοχίας από το λογισμικό fe77.



Σχήμα 4. 2012: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P -  $\delta$ ) του μέσου της δοκού A2, όπως προέκυψε από το λογισμικό fe77, παράλληλα απεικονίζονται με σημεία οι τιμές του φορτίου αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην πειραματική δοκιμή και την ανάλυση με τα δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2.

## 4.7 Ανάλυση της δοκού A3

Πίνακας 4.16: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού A3.

<b>b (mm)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>S (mm)</b>
305	552	457	6840	6400

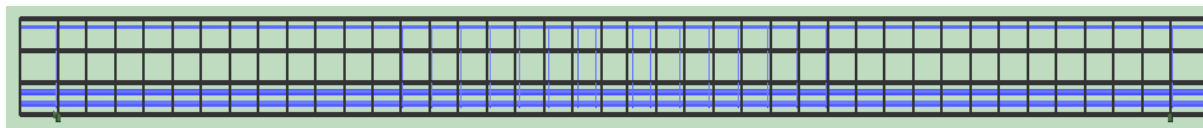
Πίνακας 4.17: Χαρακτηριστικά οπλισμών δοκού A3.

<b>Είδος</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>D (mm)</b>	<b>f<sub>y</sub> (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>
Κάτω οπλισμός	4 M30	29.9	436	200000
	2 M25 <sup>b</sup>	25.2	445	220000
Άνω οπλισμός	-	-	-	-
Συνδετήρες	-	-	-	-

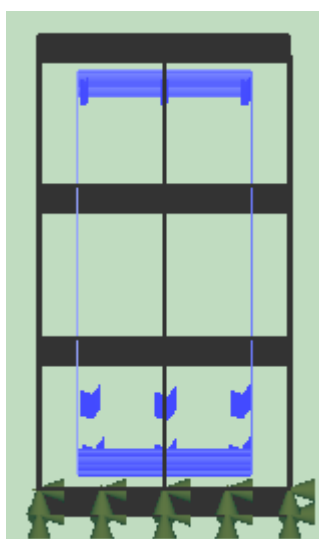
Πίνακας 4.18: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος δοκού A3.

<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>E<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>sp</sub> (MPa)</b>
43.5	36.5	3.37

Επειδή η A2 και η OA2 έχουν την ίδια γεωμετρία, το μέγεθος και οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια με τα αντίστοιχα της δοκού OA1. Το προσομοίωμα της δοκού A1 στο λογισμικό fe77 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



α)



β)

Σχήμα 4. 21: Προσομοίωμα της δοκού A3, στο οποίο διακρίνονται α) τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και β) η θέση των διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών.

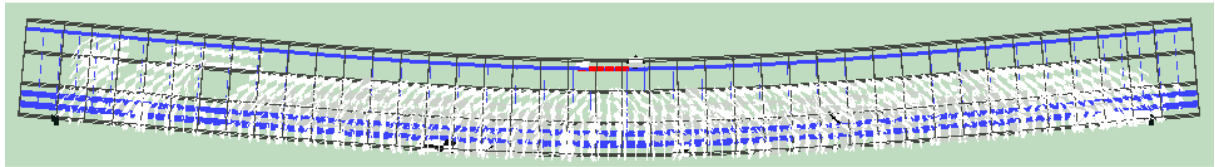
## Κεφάλαιο 4

### Συγκριτική πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

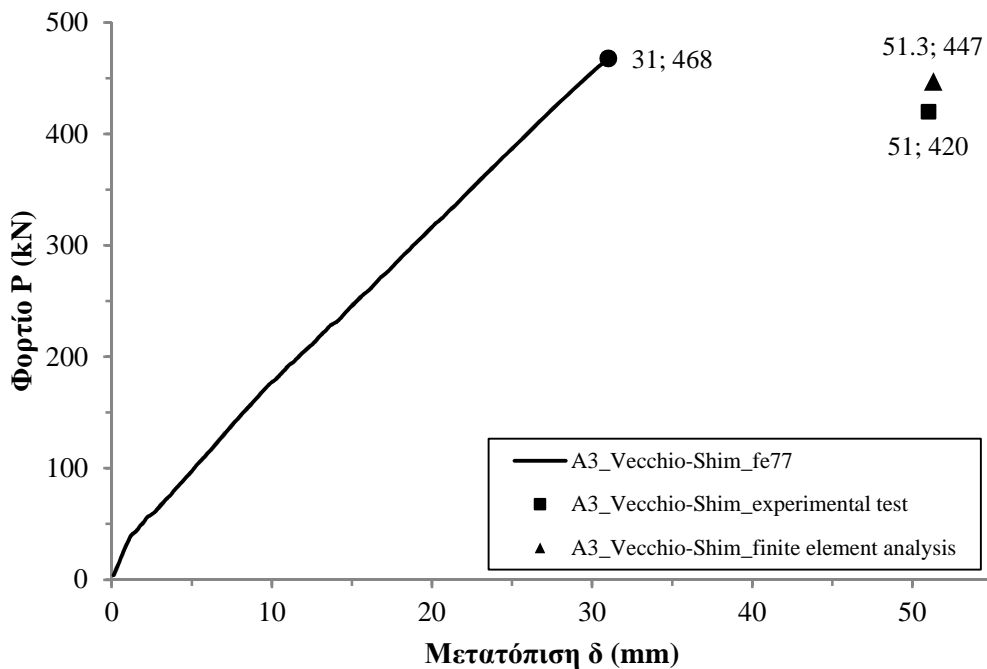
Από την ανάλυση προέκυψε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 468 kN, τιμή μεγαλύτερη από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή (420 kN), αλλά και αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή του φορτίου αστοχίας που προέκυψε από την ανάλυση με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2 (447 kN) [10].



Σχήμα 4.132: Ρηγματώση (crack pattern) της δοκού A3 στο στάδιο αστοχίας κατά την πειραματική δοκιμή [10].



Σχήμα 4.143: Η δοκός A3 κατά το στάδιο της αστοχίας από το λογισμικό fe77.



Σχήμα 4.154: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) του μέσου της δοκού A3, όπως προέκυψε από το λογισμικό fe77, παράλληλα απεικονίζονται με σημεία οι τιμές του φορτίου αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην πειραματική δοκιμή και την ανάλυση με τα δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό VecTor2.

## **4.8 Συμπεράσματα**

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αντιληπτή η ταύτιση σε μεγάλο βαθμό των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Έπειτα από αυτόν τον έλεγχο, διαπιστώνεται η καταλληλότητα του λογισμικού ως ένα αξιόπιστο εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του τρόπου αστοχίας και τη διερεύνηση του πραγματικού μήκους μέσα στο οποίο εκτείνεται η διαρροή των οπλισμών κατά το στάδιο της αστοχίας, πράγμα που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 5

### Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

#### 5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η προσπάθεια να οριστούν ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία της πλαστικής άρθρωσης σε προβόλους ωπλισμένου σκυροδέματος που υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση μέσα από τα αποτελέσματα που εξαγονται από το λογισμικό fe77. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση της ύπαρξης και εν συνεχεία της έκτασης της περιοχής μέσα στην οποία οι εφελκόμενοι χάλυβες υφίστανται διαρροή αφορά ένα σύνολο προβόλων με ίδια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (ύψος, στατικό ύψος, πλάτος, άνοιγμα), καθένας από τους οποίους διαφέρει ως προς τον οριζόμενο ως «πρότυπο» πρόβολο σε κάποιο μηχανικό χαρακτηριστικό. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων προβόλων παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων προβόλων.

<b>b (mm)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>L (mm)</b>
305	552	448	3000

Η φόρτιση των δοκών είναι μονοτονική και με γραμμικό φορτίο στην ακραία ακμή του προβόλου. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι πρόβολοι έχουν οπλιστεί επαρκώς έναντι τέμνουσας και επομένως δεν υπάρχει ενδεχόμενο ψαθυρής αστοχίας λόγω υπέρβασης της τέμνουσας αντοχής.

#### 5.2 Το μήκος πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς

Στο κεφάλαιο 2 έγινε εκτενής αναφορά στον τρόπο (θεωρίες, σχέσεις, τύποι υπολογισμού) που έχουν υιοθετήσει τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια για την αποτίμηση κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

Όσον αφορά το μήκος πλαστικής άρθρωσης, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι σχέσεις υπολογισμού του που προτείνονται από τους κανονισμούς που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2. Λεπτομέρειες που αφορούν τις παραπάνω σχέσεις υπολογισμού παρέχονται στο κεφάλαιο 2. Δεδομένου ότι όλοι οι πρόβολοι που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η φόρτιση περιλαμβάνει ένα συγκεντρωμένο φορτίο στην άκρη του, που επιβάλλεται σταδιακά και δεν επιτρέπεται η

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

διείσδυση της διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα εντός της στήριξης (επομένως ο όρος που αφορά τη διείσδυση της διαρροής μέσα στον κόμβο όπου αγκυρώνεται ο διαμήκης οπλισμός δεν υφίσταται) εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μήκος της πλαστικής άρθρωσης είναι ίδιο για όλες τις περιπτώσεις των προβόλων που εξετάζονται.

Πίνακας 5. 2: Σχέσεις υπολογισμού του μήκους πλαστικής άρθρωσης από τους διάφορους κανονισμούς.

Κανονισμός	$L_{pl}$	$L_{pl}$ (m) προβόλων
<b>FEMA</b>	-	-
<b>ATC-40</b>	0.5h	0.276
<b>NZSEE 2006</b>	0.5h $0.08L_s+0.022d_b f_y$	0.276 0.240
<b>ΚΑΝΕΠΕ</b>	-	-
<b>EC8-3</b>	$0.1L_v+0.17h+0.24d_b f_y/(f_c^{1/2})$ $L_v/30+0.2h+0.11d_b f_y/(f_c^{1/2})$	0.394 0.210
<b>CNR-DT 200/2004</b>	$0.1L_v+0.17h+0.24d_b f_y/(f_c^{1/2})$	0.394

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του λογισμικού και καταγράφονται παράλληλα χρήσιμες παρατηρήσεις και συμπεράσματα ποιοτικής φύσης καθώς και σχόλια που αφορούν την απόκλιση ή μη από τα αποτελέσματα των κανονισμών.

### 5.3 Αποτίμηση προβόλου I («πρότυπο» δομικό στοιχείο)

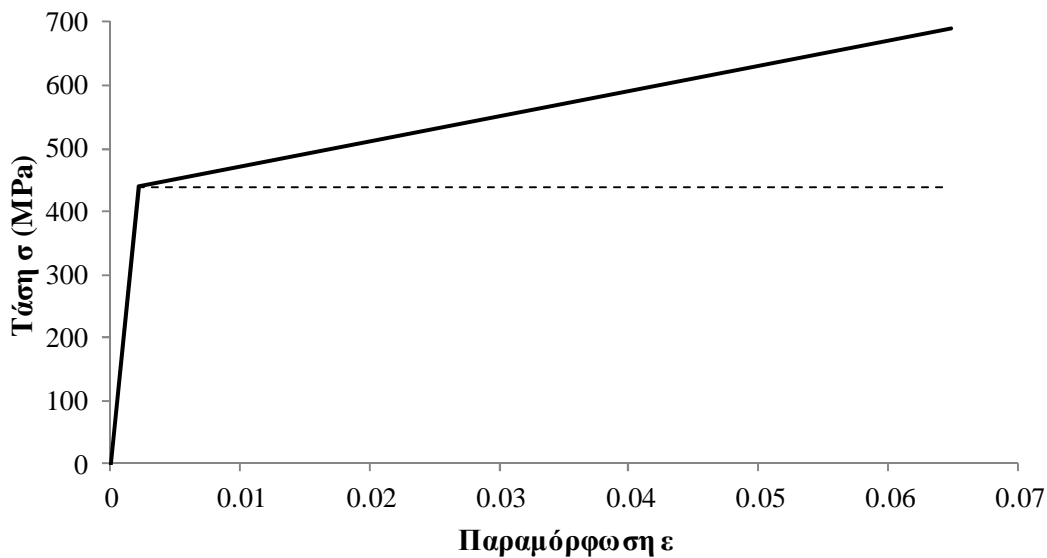
#### 5.3.1 Αποτίμηση προβόλου I με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Όπως προαναφέρθηκε, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όλων των προβόλων που εξετάζονται παραμένουν ίδια και μεταβάλλεται κάθε φορά ένα μηχανικό χαρακτηριστικό σε σχέση με τον «πρότυπο». Όσον αφορά την «πρότυπο» πρόβολο επιλέγεται αντοχή σκυροδέματος ίση με  $f_c=22.6$  MPa ( $E_c=32.9$  GPa), τάση διαρροής εφελκόμενου και θλιβόμενου χάλυβα ίση με  $f_y=439$  MPa ( $E_s=208$  GPa) και τάση διαρροής εγκάρσιων οπλισμών (συνδετήρων) ίση με  $f_{yv}=600$  MPa ( $E_{sv}=200$  GPa). Για όλους τους χάλυβες ο μετελαστικός κλάδος του διαγράμματος  $\sigma$ - $\epsilon$  παρουσιάζει κράτυνση ίση με 4 GPa, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. 1.



Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της τάσης διαρροής και του μέτρου ελαστικότητας του εφελκόμενου χάλυβα προέκυψαν με βάση τις αντίστοιχες τιμές και την ποσότητα των χάλυβων που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκό A1 των πειραμάτων Vecchio – Shim [10]. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι η τάση διαρροής του θλιβόμενου χάλυβα λήφθηκε ίση με την τάση διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα, παρόλο που στο πείραμα η τάση διαρροής του θλιβόμενου χάλυβα ήταν διαφορετική, καθώς συνηθίζεται η ποιότητα εφελκόμενου και θλιβόμενου χάλυβα να είναι ίδιες κατά το σχεδιασμό των κατασκευών.



Σχήμα 5. 1: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού.

Ο «πρότυπος» πρόβολος οπλίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρεί τις διατάξεις του του Ε.Κ.Ω.Σ.. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά του ελάχιστου και μέγιστου ποσοστού εφελκόμενου οπλισμού δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\rho_{\min} = 0.5 \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \quad \{5.1\}$$

$$\rho_{\max} = 0.65 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \frac{\rho'}{\rho} + 0.0015 \leq \frac{7}{f_{yd}} \quad \{5.2\}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν τα εξής ποσοστά:

$$\rho_{\min} = 0.5 \frac{2.37}{439/1.15} \Rightarrow \rho_{\min} = 0.0031$$

$$\rho_{\max} = 0.65 \frac{22.6/1.5}{439/1.15} \frac{1}{2} + 0.0015 \Rightarrow \rho_{\max} = 0.01433$$

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Έτσι, ο συνολικός εφελκόμενος οπλισμός της δοκού επιλέγεται ίσος με 4Φ18 ( $\rho=0.00684$ , ποσοστό περίπου ίσο με το ημιάθροισμα μέγιστου και ελάχιστου) και ο συνολικός θλιβόμενος ίσος με 3Φ14 ( $\rho'=0.00310$ ).

Όσον αφορά τον εγκάρσιο οπλισμό, η μέγιστη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων λαμβάνεται ίση με την ελάχιστη από τις παρακάτω αποστάσεις:

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} h_w / 3 \\ 24d_{bw} \\ 225 \\ 10d_{bL} \end{array} \right\} \quad \{5.3\}$$

$$\text{Άρα, } s = \min \left\{ \begin{array}{l} 552 / 3 \\ 20 \cdot 10 \\ 200 \\ 10 \cdot 14 \end{array} \right\} \Rightarrow s = 140 \text{ mm}$$

Επομένως, στη δοκό τοποθετούνται Φ10/120 σε όλο της το μήκος.

*Πίνακας 5. 3: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου I.*

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	439	208000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

*Πίνακας 5. 4: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου I.*

$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 2, Σχήμα 5. 3) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 6.

Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με  $P_u=76$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_u=31.25$  mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με  $P_y=70$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_y=19.95$  mm. Στο Σχήμα 5. 4 και στο Σχήμα 5. 5, παρουσιάζεται το δομικό στοιχείο κατά το στάδιο αστοχίας.

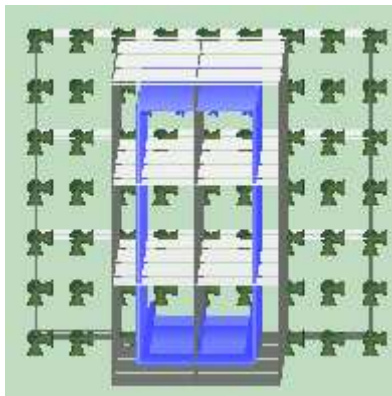
Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$  ως εξής:

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad \{5.4\}$$

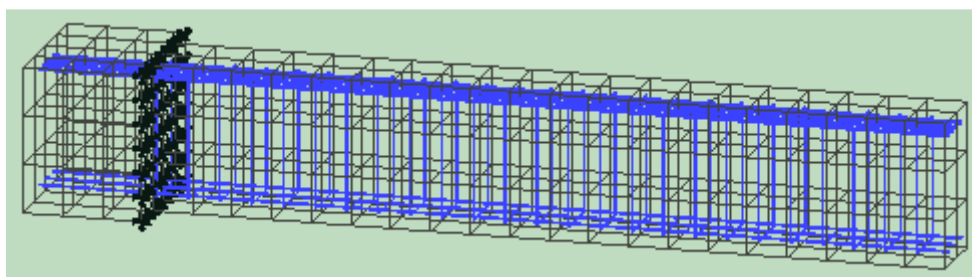
$$\mu_\delta = \frac{31.25}{19.95} \Rightarrow \mu_\delta = 1.57$$

## Κεφάλαιο 5

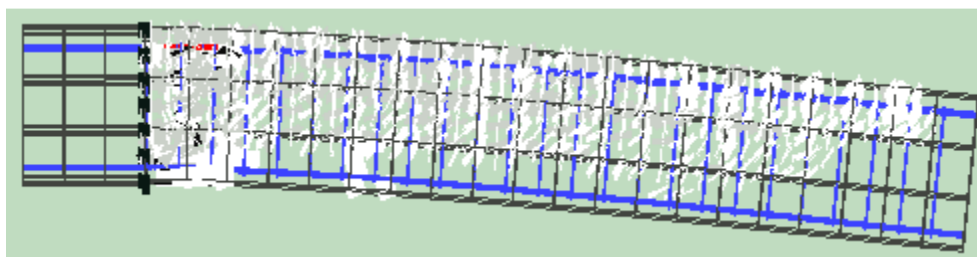
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



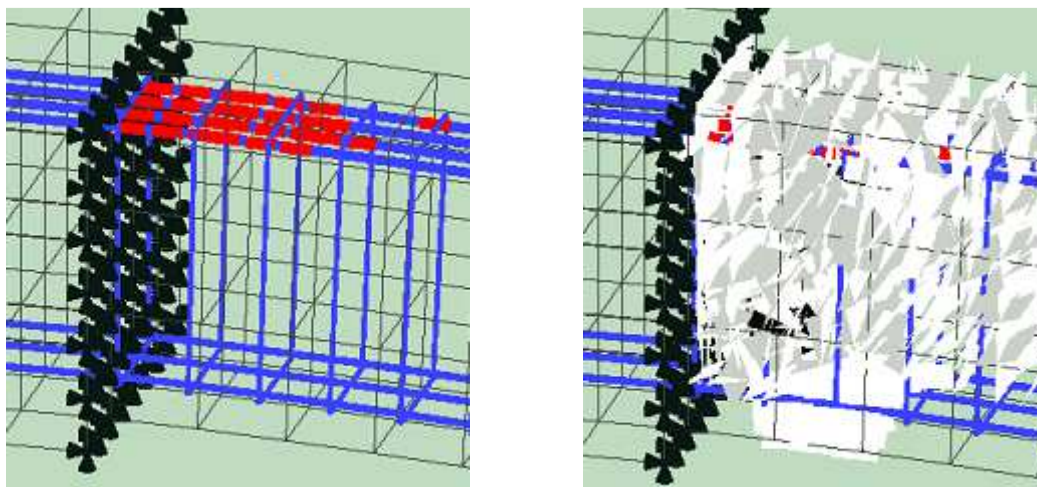
Σχήμα 5. 2: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου I στο λογισμικό fe77 (διακρίνονται οι στηρίξεις στις τρεις διευθύνσεις στην βάση του).



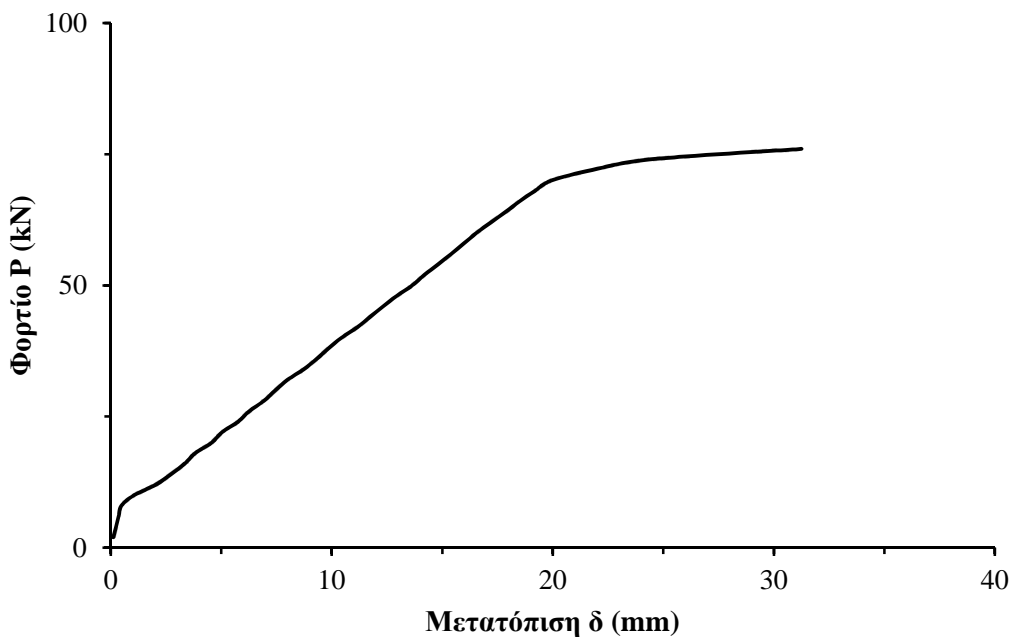
Σχήμα 5. 3: Προσομοίωμα του προβόλου I στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 4: Ο πρόβολος I κατά το στάδιο της αστοχίας.



Σχήμα 5. 5: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης κατά το στάδιο της αστοχίας του προβόλου I.



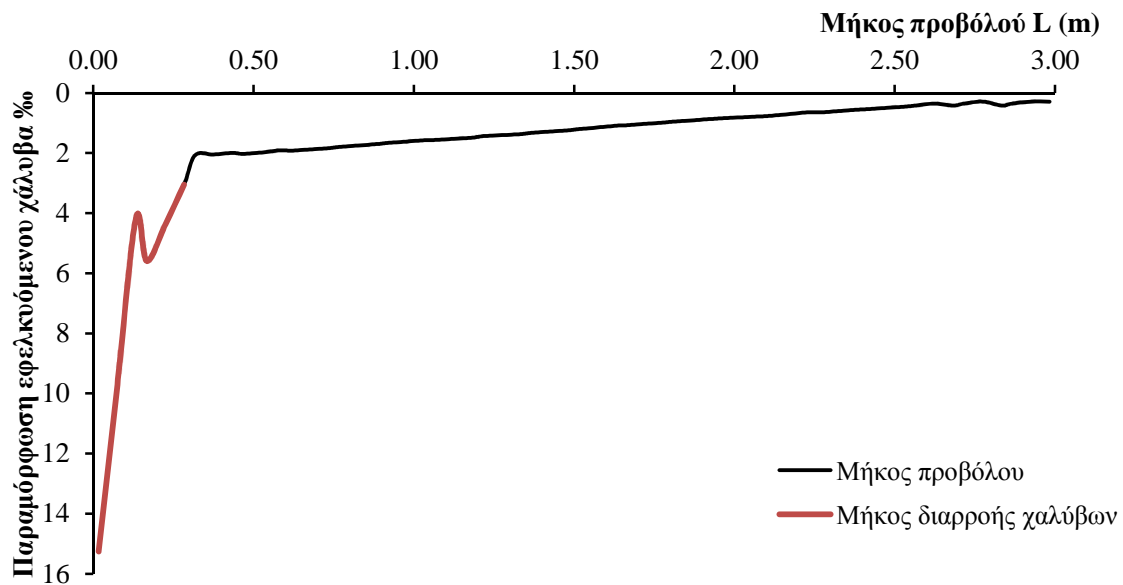
Σχήμα 5. 6: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( P- δ) στο άκρο του προβόλου I.

Προκειμένου να προσδιοριστεί το μήκος το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μήκος πλαστικής άρθρωσης, εξάγονται από τα αποτελέσματα του λογισμικού οι τάσεις του χάλυβα κατά μήκος του προβόλου στα gauss points των τεσσάρων ράβδων του εφελκόμενου οπλισμού και έτσι υπολογίζεται ο μέσος όρος των τάσεων από τις τέσσερις ράβδους για κάθε gauss point. Από τη μέση τάση, και με βάση το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του Σχήματος 5.1, εξάγονται οι μέσες παραμορφώσεις των τεσσάρων ράβδων κατά μήκος της δοκού και απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.7 στο οποίο ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το μήκος του προβόλου, ενώ ο κατακόρυφος τη μέση παραμόρφωση του εφελκόμενου χάλυβα.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.283$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\varepsilon_{su,max}=15.26$  ‰.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 7: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου I.

### 5.3.2 Αποτίμηση προβόλου I σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

#### Υπολογισμός γωνίας στροφής διαρροής $\theta_y$

Αν η διαρροή οφείλεται στη διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα ισχύουν τα εξής:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y} \Rightarrow A = 0.006839 + 0.003103 + 0.004292 + 0 \Rightarrow$$

$$A = 0.014233$$

$$B = \rho + \rho' \delta'' + 0.5 \cdot \rho_v \cdot (1 + \delta'') + \frac{N}{bdf_y} \Rightarrow B = 0.006839 + 0.11 \cdot 0.003103 + 0.5 \cdot 0.004292 \cdot (1 + 0.11) + 0 \Rightarrow$$

$$B = 0.009522$$

$$\xi_y = (a^2 A^2 + 2aB)^{1/2} - aA \Rightarrow \xi_y = (6.32^2 \cdot 0.014233^2 + 2 \cdot 6.32 \cdot 0.009522)^{1/2} - 6.32 \cdot 0.014233 \Rightarrow$$

$$\xi_y = 0.2685$$

Άρα, η καμπυλότητα διαρροής είναι ίση με:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{[E_s(1-\xi_y)d]} \Rightarrow (1/r)_y = \frac{439}{[208000 \cdot (1-0.2685) \cdot 448]} \Rightarrow$$

$$(1/r)_y = 0.005912 m^{-1}$$

Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε μη-γραμμικότητα του θλιβόμενου σκυροδέματος ισχύουν τα εξής:

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{\varepsilon_c \cdot E_s \cdot b \cdot d} \Rightarrow A = 0.006839 + 0.003103 + 0.004292 + 0 \Rightarrow$$

$$A = 0.014233$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \cdot \rho_v \cdot (1 + \delta') \Rightarrow B = 0.006839 + 0.11 \cdot 0.003103 + 0.5 \cdot 0.004292 \cdot (1 + 0.11) \Rightarrow$$

$$B = 0.009522$$

$$\xi_y = (a^2 A^2 + 2aB)^{1/2} - aA \Rightarrow \xi_y = (6.32^2 \cdot 0.014233^2 + 2 \cdot 6.32 \cdot 0.009522)^{1/2} - 6.32 \cdot 0.01233 \Rightarrow$$

$$\xi_y = 0.2685$$

Άρα, η καμπυλότητα διαρροής είναι ίση με:

$$(1/r)_y = \frac{1.8 \cdot f_c}{E_c \cdot \xi_y \cdot d} \Rightarrow (1/r)_y = \frac{1.8 \cdot 22.6}{32900 \cdot 0.2685 \cdot 0.488} \Rightarrow$$

$$(1/r)_y = 0.009437 m^{-1}$$

Επομένως, η διαρροή οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και η καμπυλότητα της διαρροής είναι η μικρότερη εκ των δύο και είναι ίση με:

$$(1/r)_y = \min(0.005912 m^{-1}; 0.009437 m^{-1}) \Rightarrow$$

$$(1/r)_y = 0.005912 m^{-1}$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ροπής διαρροής.

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

$$\frac{M_y}{0.305 \cdot 0.448^3} = 0.005912 \left\{ \begin{aligned} & 32.9 \cdot 10^6 \frac{0.2685^2}{2} \left( 0.5(1 + 0.11) - \frac{0.2685}{3} \right) + \\ & \left[ (1 - 0.2685) 0.006839 + (0.2685 - 0.11) \cdot 0.003103 + \frac{0.004292}{6} \cdot (1 - 0.11) \right] \cdot (1 - 0.11) \frac{208 \cdot 10^6}{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$M_y = 235.24 \text{ kNm}$$

Άρα, η τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής είναι ίση με:

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

$$V_{My} = M_y / L_s \Rightarrow V_{My} = 235.24 / 3 \Rightarrow$$

$$V_{My} = 78.41 \text{ kN}$$

Τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός της τέμνουσας που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση στο στοιχείο  $V_{R1}$ , που υπολογίζεται σύμφωνα με την προτεινόμενη σχέση του Ευρωκώδικα 8.

$$V_{R,c} = \left[ C_{R,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d$$

$$V_{R,c} = \left[ 0.18 \cdot 1.662 (100 \cdot 0.006839 \cdot 22.6)^{1/3} \right] 0.305 \cdot 0.448 \cdot 10^3 \Rightarrow$$

$$V_{R,c} = 109.46 \text{ kN}$$

Επομένως, η τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής είναι μικρότερη από την τέμνουσα που προκαλεί τη λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου και ο συντελεστής  $\alpha_v$  θα ληφθεί ίσος με 0.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνει την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής κατά τη διαρροή.

$$\theta_y = (1/r)_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0014 \left( 1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{d_b f_y (1/r)_y}{8 \sqrt{f_c}}$$

$$\theta_y = 0.005912 \frac{3 + 0 \cdot 0.406}{3} + 0.0014 \left( 1 + 1.5 \frac{0.552}{3.00} \right) \Rightarrow$$

$$\theta_y = 0.007699 \text{ rad}$$

Κατά τον υπολογισμό της  $\theta_y$  δεν λήφθηκε υπόψη ο τρίτος όρος που αφορά την ολίσθηση αφού στο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, δεν επιτράπηκε η διείδυση της διαρροής του οπλισμού μέσα στην βάση του προβόλου.

### **Υπολογισμός γωνίας στροφής αστοχίας $\theta_{um}$**

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. η διαθέσιμη γωνία στροφής χορδής  $\theta_u$  στο άκρο δομικού στοιχείου υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3)^v \left[ \frac{\max(0,01, \omega')}{\max(0,01, \omega)} f_c \right]^{0,225} (a_s)^{0,35} 25^{\left( a_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3)^0 \left[ \frac{\max(0,01, 0,003103 \cdot 439/22,6)}{\max(0,01, 0,006839 \cdot 439/22,6)} 22,6 \right]^{0,225} \left( \frac{3,00}{0,552} \right)^{0,35} 25^{\left( 0,162 \cdot 0,004292 \cdot \frac{600}{22,6} \right)} (1,25^0) \Rightarrow$$

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

$$\theta_{um} = 0.051848 \text{ rad}$$

Από την αποτίμηση κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ., προκύπτουν ορισμένα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αποτελέσματα της μη – γραμμικής ανάλυσης.

Η τιμή του φορτίου κατά τη διαρροή, υπολογίζεται όπως παραπάνω, δεδομένου ότι η δοκός συμπεριφέρεται ελαστικά.

Άρα ισχύει:

$$M_y = \frac{ql^2}{2} + P_y l \Rightarrow P_y = \left( M_y - \frac{ql^2}{2} \right) \frac{1}{l} \Rightarrow$$

$$P_y = \left( 235.24 - \frac{4.21 \cdot 3.00^2}{2} \right) \frac{1}{3.00} \Rightarrow$$

$$P_y = 72.10 \text{ kN}$$

Επίσης, η τιμή της πλαστιμότητας των στροφών  $\mu_\theta$ , που είναι ίση με την πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$ , εξάγεται ως εξής:

$$\mu_\delta = \frac{0.051848}{0.006839} \Rightarrow \mu_\delta = 6.74$$

### 5.3.3 Αποτίμηση προβόλου Ι σύμφωνα με τον EC8-3

Η τιμή της ικανότητας στροφής κατά τη διαρροή  $\theta_y$  στοιχείων Ω.Σ., που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «Περιορισμός βλαβών» υπολογίζεται για δοκούς και υποστυλώματα σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,00135 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d'} \frac{d_b f_y}{6 \sqrt{f_c}} \Rightarrow$$

$$\theta_y = 0,005912 \frac{3,00 + 0 \cdot 0,4104}{3} + 0,0013 \left( 1 + 1,5 \frac{0,552}{3,00} \right) \Rightarrow$$

$$\theta_y = 0,007571$$

Όσον αφορά την τιμή της  $\varphi_y$  λαμβάνεται η μικρότερη μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν από την ανάλυση διατομής και από την αντίστοιχη τιμή υπολογισμένη σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Για την τιμή του συντελεστή  $a_v$  πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της ροπής διαρροής και να συγκριθεί με την τιμή του γινομένου του διατμητικού μήκους επί τη διατμητική αντοχή του



## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση μέλους  $V_{R,c}$  χωρίς τη συμβολή του διατμητικού οπλισμού, σύμφωνα με την παράγραφο 6.2.2 του EN 1992-1-1: 2004.

Η τιμή της ροπής διαρροής υπολογισμένη σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ίση με  $M_y = 235.24 \text{ kNm}$ .

Η τιμή της  $V_{R,c}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{R,c} = \left[ C_{R,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d$$

με ελάχιστη τιμή την

$$V_{R,c} = (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$$

Άρα,

$$V_{R,c} = \left[ 0.18 \cdot 1.662 (100 \cdot 0.006839 \cdot 22.6)^{1/3} \right] 0.305 \cdot 0.488 \cdot 10^3 \Rightarrow$$

$$V_{R,c} = 109.46 \text{ kN}$$

και

$$V_{R,c \min} = 0.349 \cdot 0.305 \cdot 0.488 \Rightarrow$$

$$V_{R,c \min} = 52.02 \text{ kN}$$

Στους παραπάνω τύπους λήφθηκαν τα εξής:

$$C_{R,c} = 0.18$$

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \Rightarrow k = 1 + \sqrt{200/488} \Rightarrow k = 1.640$$

$$v_{\min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \Rightarrow v_{\min} = 0.035 \cdot 1.640^{3/2} \cdot 22.6^{1/2} \Rightarrow v_{\min} = 0.349$$

Επομένως, το γινόμενο του διατμητικού μήκους επί τη διατμητική αντοχή του μέλους  $V_{R,c}$  είναι ίσο με  $V_{R,c} \cdot L_v = 109.46 \cdot 3.00 = 328.37 \text{ kNm}$

Άρα,  $M_y < V_{R,c} \cdot L_v$  και ο συντελεστής  $\alpha_v$  λαμβάνεται ίσος με 0.

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Επίσης, σημειώνεται ότι ο τρίτος όρος δε λήφθηκε υπόψη, αφού στο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, δεν επιτράπηκε η διείδυση της διαρροής του οπλισμού μέσα στην βάση του προβόλου.

Η τιμή της ολικής ικανότητας στροφής (ελαστική και ανελαστική)  $\theta_u$  στοιχείων Ω.Σ. κάτω από ανακυκλιζόμενη φόρτιση, που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «Οιωνεί κατάρρευση» μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.016 \cdot (0.3^v) \left[ \frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left( \frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left( \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100\rho_d}) \Rightarrow$$

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.016 \cdot (0.3^0) \left[ \frac{\max(0.01; 0.003103 \cdot 439/22.6)}{\max(0.01; 0.006839 \cdot 439/22.6)} 22.6 \right]^{0.225} \left( \frac{3.00}{0.552} \right)^{0.35} 25^{\left( 0.162 \cdot 0.004292 \cdot \frac{600}{22.6} \right)} (1.25^0) \Rightarrow$$

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.051848$$

Άρα για  $\gamma_{el}=1.5$ , δηλαδή για κύρια σεισμικά στοιχεία, η γωνία στροφής κατά την αστοχία είναι ίση με  $\theta_{um} = 0.0345652$  rad.

Για  $\gamma_{el}=1.0$ , δηλαδή για δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία, η γωνία στροφής κατά την αστοχία είναι ίση με  $\theta_{um} = 0.051848$  rad.

Η εναλλακτική έκφραση για την εκτίμηση της συνολικής ικανότητας στροφής που προτείνει ο Ευρωκώδικας 8 είναι η εξής:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left( \theta_y + (\varphi_u + \varphi_y) L_{pL} \left( 1 - \frac{0.5L_{pL}}{L_v} \right) \right)$$

Όσον αφορά την τιμή της καμπυλότητας αστοχίας  $\varphi_u$ , αυτή λήφθηκε από την ανάλυση διατομής κατά το στάδιο της αστοχίας σε επίπεδο περισφιγμένου πυρήνα της διατομής, υιοθετώντας το προσομοίωμα της περίσφιγξης του EN1992-1-1: 2004 3.1.9. Σύμφωνα με το εν λόγω προσομοίωμα, η δρώσα ακτινική θλιπτική τάση στην οριακή κατάσταση αστοχίας εξαιτίας της περίσφιγξης  $\sigma_2$  λαμβάνεται ίση με:

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw} \quad \{5.5\}$$

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει:

$$\sigma_2 = 0.162 \cdot 0.004292 \cdot 600 \Rightarrow$$

$$\sigma_2 = 0.42MPa$$

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Επειδή  $\sigma_2 < 0.05f_{ck}$ , η αντοχή του σκυροδέματος λόγω της περίσφιγξης λαμβάνεται από τη σχέση:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1.000 + 5.0 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \{5.6\}$$

Άρα, η αντοχή του σκυροδέματος λόγω της περίσφιγξης είναι ίση με:

$$\begin{aligned} f_{ck,c} &= 22.6 \cdot (1.000 + 5.0 \cdot 0.42 / 22.6) \Rightarrow \\ f_{ck,c} &= 24.69 \text{MPa} \end{aligned}$$

Έπειτα, λοιπόν από την ανάλυση της διατομής η καμπυλότητα κατά το στάδιο της αστοχίας υπολογίστηκε ίση με  $0.043033 \text{ m}^{-1}$ .

Η σχέση υπολογισμού του μήκους πλαστικής άρθρωσης για το προσομοίωμα περίσφιγξης που χρησιμοποιήθηκε δίνει τιμή ίση με:

$$L_{pl} = 0.1L_v + 0.17h + 0.24 \frac{d_{bl}f_y \text{ (MPa)}}{\sqrt{f_c \text{ (MPa)}}} \Rightarrow$$

$$L_{pl} = 0.1 \cdot 3.00 + 0.17 \cdot 0.552 \Rightarrow$$

$$L_{pl} = 0.394 \text{ m}$$

Επομένως, η τιμή της γωνίας στροφής κατά την αστοχίας είναι ίση με:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left( 0.007571 + (0.044403 + 0.005912) \cdot 0.394 \left( 1 - \frac{0.5 \cdot 0.394}{3.00} \right) \right) \Rightarrow$$

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.026086$$

Άρα για  $\gamma_{el}=2.0$ , δηλαδή για κύρια σεισμικά στοιχεία, η γωνία στροφής κατά την αστοχία είναι ίση με  $\theta_{um} = 0.0130432 \text{ rad}$ .

Για  $\gamma_{el}=1.0$ , δηλαδή για δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία, η γωνία στροφής κατά την αστοχία είναι ίση με  $\theta_{um} = 0.026086 \text{ rad}$ .

Η τιμή της πλαστιμότητας των στροφών  $\mu_\theta$ , που είναι ίση με την πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$ , εξάγεται ως εξής για τις παραπάνω περιπτώσεις υπολογισμού της γωνίας στροφής κατά την αστοχία:

$$\mu_\delta = \frac{0.051848}{0.007571} \Rightarrow \mu_\delta = 6.85 \quad \text{και} \quad \mu_\delta = \frac{0.0345652}{0.007571} \Rightarrow \mu_\delta = 4.57$$

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Και για την εναλλακτική σχέση υπολογισμού:

$$\mu_{\delta} = \frac{0.026086}{0.007571} \Rightarrow \mu_{\delta} = 3.45 \quad \text{και} \quad \mu_{\delta} = \frac{0.0130432}{0.007571} \Rightarrow \mu_{\delta} = 1.72$$

για δευτερεύοντα και κύρια σεισμικά στοιχεία αντίστοιχα.

### 5.3.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου I

Πίνακας 5. 5: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο I.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\varepsilon_{su,max}$ (‰)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.57	70	76	0.283	15.26	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	6.74	72.10	72.10			χάλυβας
<b>EC8-3</b>	4.57			-		
<b>(κύρια)</b>	1.72			0.394	17.95	
<b>EC8-3</b>	6.85			-		
<b>(δευτερεύοντα)</b>	3.45			0.394		

## 5.4 Αποτίμηση προβόλου Πα

### 5.4.1 Αποτίμηση προβόλου Πα με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος Πα διαφέρει ως προς τον πρόβολο Ι στην ποσότητα του θλιβόμενου οπλισμού, καθώς αντί για 3Φ14, έχουν τοποθετηθεί 2Φ12.

Πίνακας 5. 6: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου Πα.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	439	208000
Κάτω οπλισμός	2 Φ12	12	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 7: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου Πα.

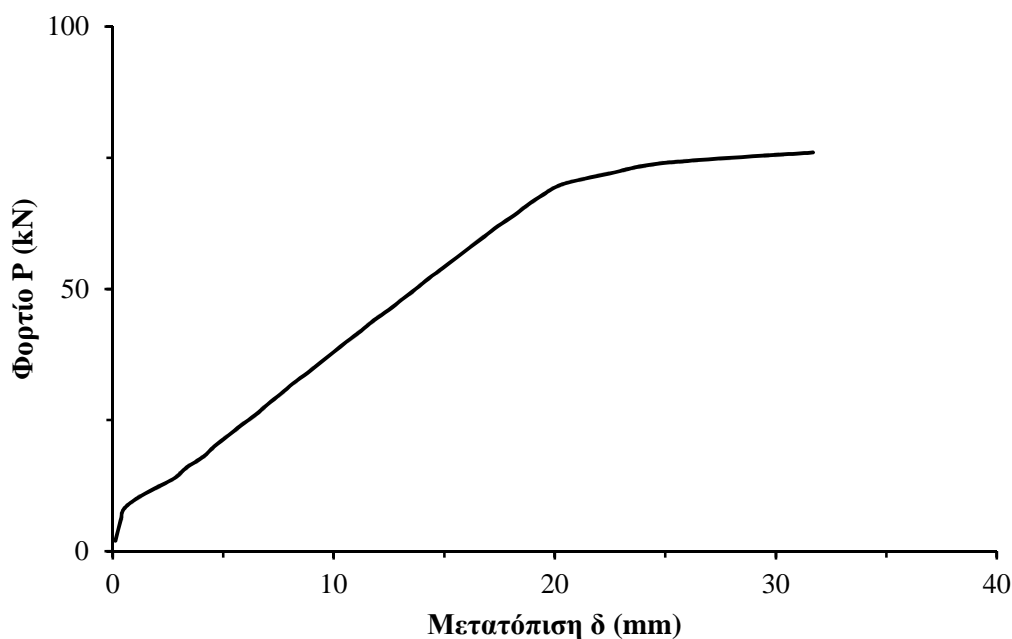
$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 9, Σχήμα 5. 10) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 8.

Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με  $P_u=76$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_u=31.68$  mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με  $P_y=70$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_y=20.39$  mm.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$  ως εξής:

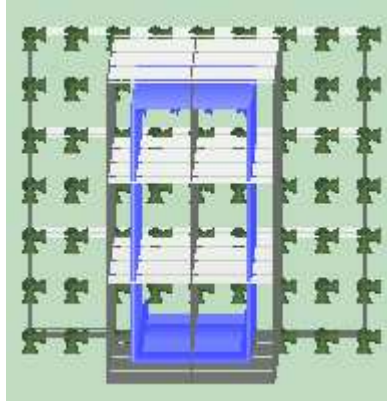
$$\mu_\delta = \frac{31.68}{20.39} \Rightarrow \mu_\delta = 1.55$$



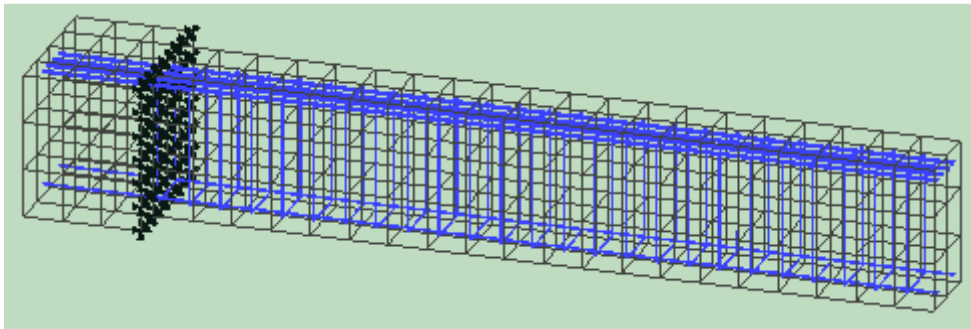
Σχήμα 5. 8: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) στο άκρο του προβόλου Πα.

## Κεφάλαιο 5

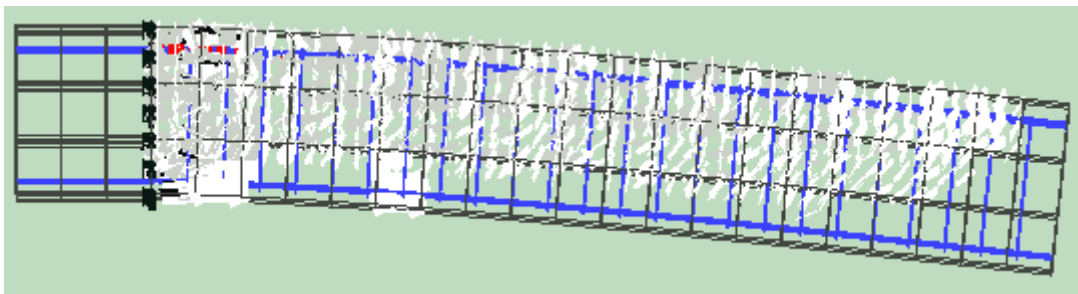
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



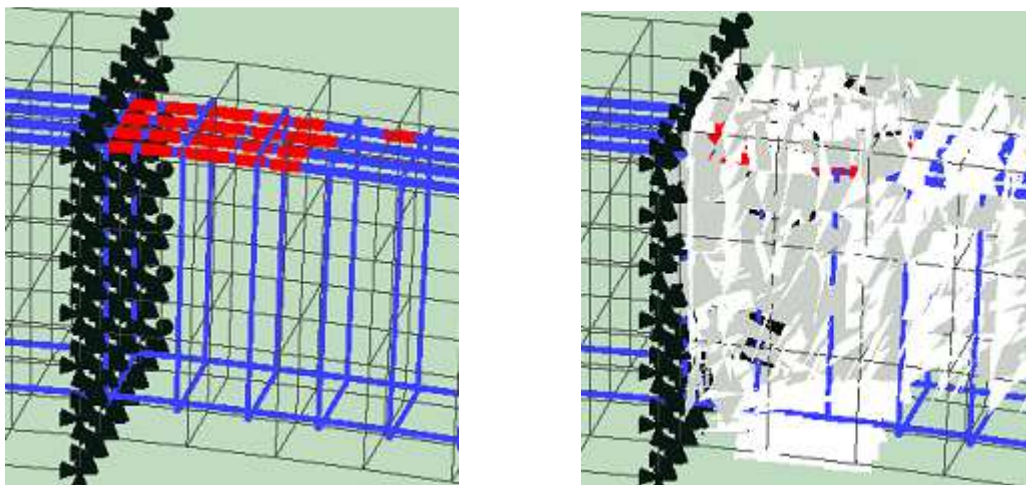
Σχήμα 5. 9: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου Ια στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 10: Προσομοίωμα του προβόλου Ια στο λογισμικό fe77.



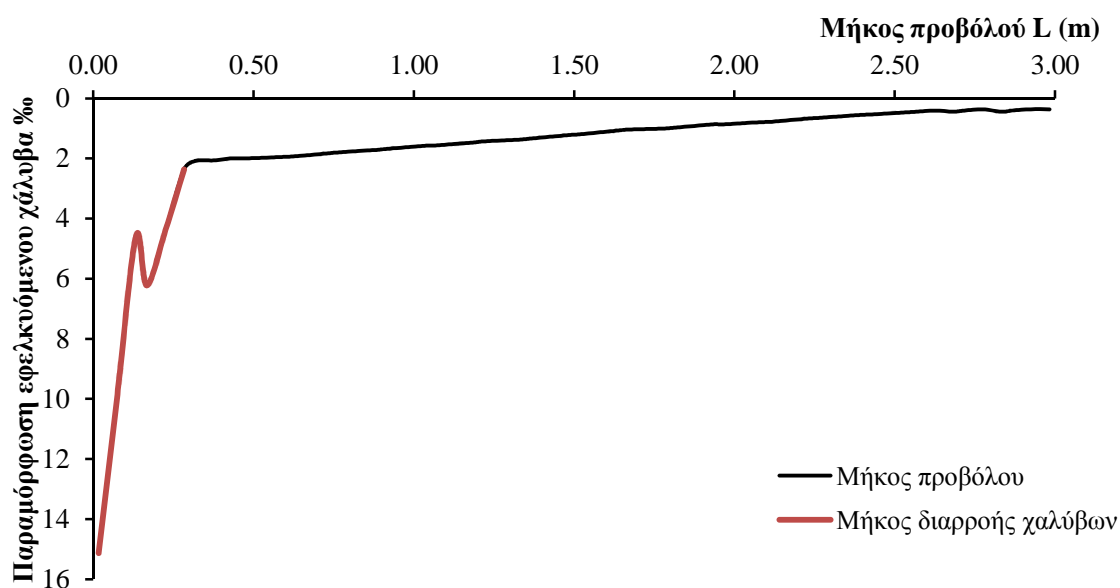
Σχήμα 5. 11: Ο πρόβολος Ια κατά το στάδιο της αστοχίας.



Σχήμα 5. 12: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης κατά το στάδιο της αστοχίας του προβόλου Ια.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Στο Σχήμα 5. 11 και στο Σχήμα 5. 12, παρουσιάζεται το δομικό στοιχείο κατά το στάδιο αστοχίας.



Σχήμα 5. 13: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου Ια.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκυσμένοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.283$  m και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 13. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\varepsilon_{su,max}=15.14$  %.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

#### 5.4.2 Αποτίμηση προβόλου Ια σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 8: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού Ια σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{My}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
<b>0.005951</b>	0.009274	234.80	78.27	109.46	0.007737	0.043840

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Πίνακας 5. 9: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού Πα σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_0$
71.95	5.67

### 5.4.3 Αποτίμηση προβόλου Πα σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 10: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Πα σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_v$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007610	0.0292267	0.043840	-
	0.0126144	0.025229	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 11: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου Πα σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_0$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_0$ (δευτερεύοντα)
3.84	5.76
1.66	3.32

### 5.4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Πα

Πίνακας 5. 12: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη – γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο Πα.

	$\mu_0 = \mu_\delta$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.55	70	76	0.283	15.14	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠΕ</b>	5.67	71.95	71.95			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	3.84			- 0.394		
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	5.76			- 0.394	16.75	
	3.32					



Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

## 5.5 Αποτίμηση προβόλου Πβ

### 5.5.1 Αποτίμηση προβόλου Πβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος Πβ διαφέρει ως προς τον πρόβολο Ι στην ποσότητα του θλιβόμενου οπλισμού, καθώς αντί για 3Φ14, έχουν τοποθετηθεί 3Φ18.

Πίνακας 5. 13: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου Πβ.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	439	208000
Κάτω οπλισμός	3 Φ18	18	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 14: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου Πβ.

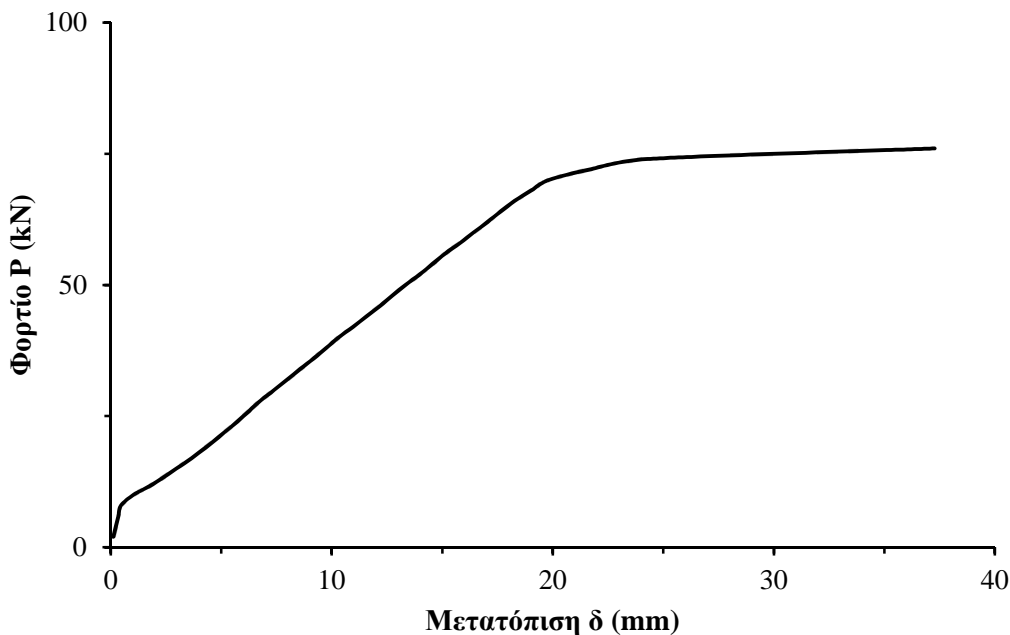
$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 15, Σχήμα 5. 16) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P-δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 14.

Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με  $P_u=76$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_u=37.28$  mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με  $P_y=70$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_y=19.82$  mm.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$  ως εξής:

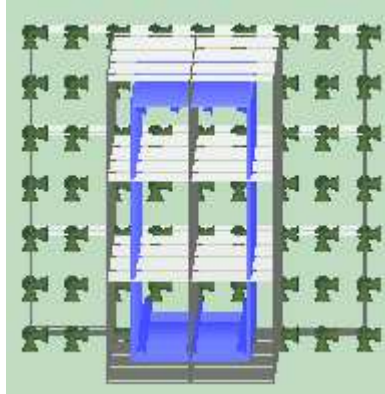
$$\mu_\delta = \frac{37.28}{19.82} \Rightarrow \mu_\delta = 1.88$$



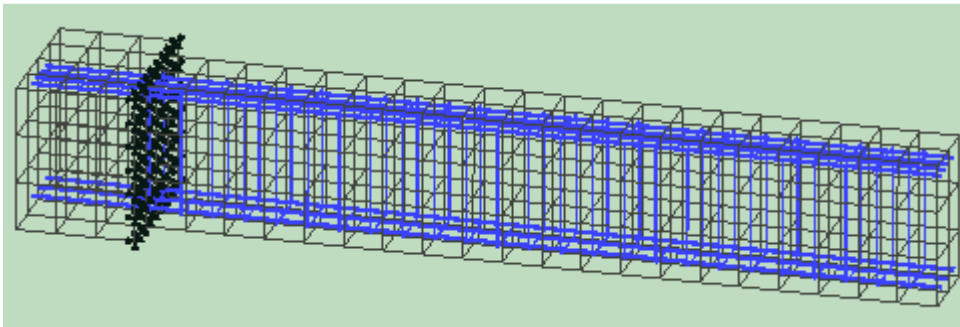
Σχήμα 5. 14: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P-δ) στο άκρο του προβόλου Πβ.

## Κεφάλαιο 5

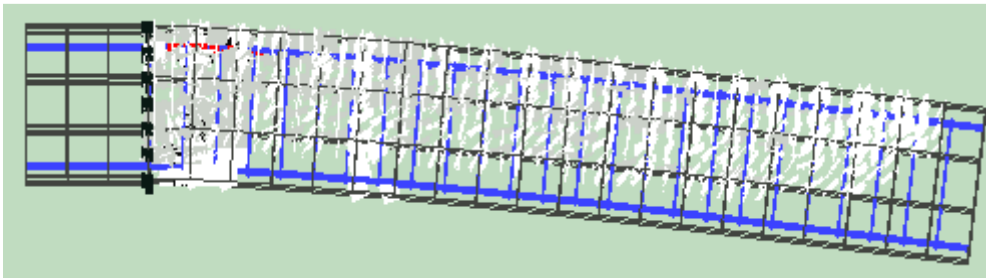
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



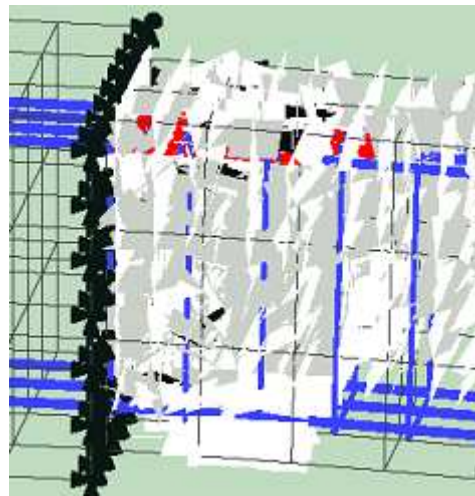
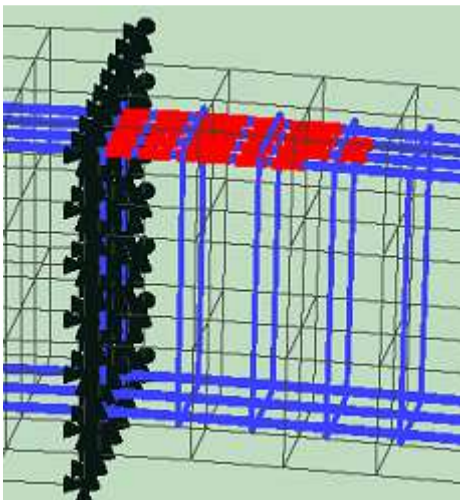
Σχήμα 5. 15: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου Πβ στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 16: Προσομοίωμα του προβόλου Πβ στο λογισμικό fe77.



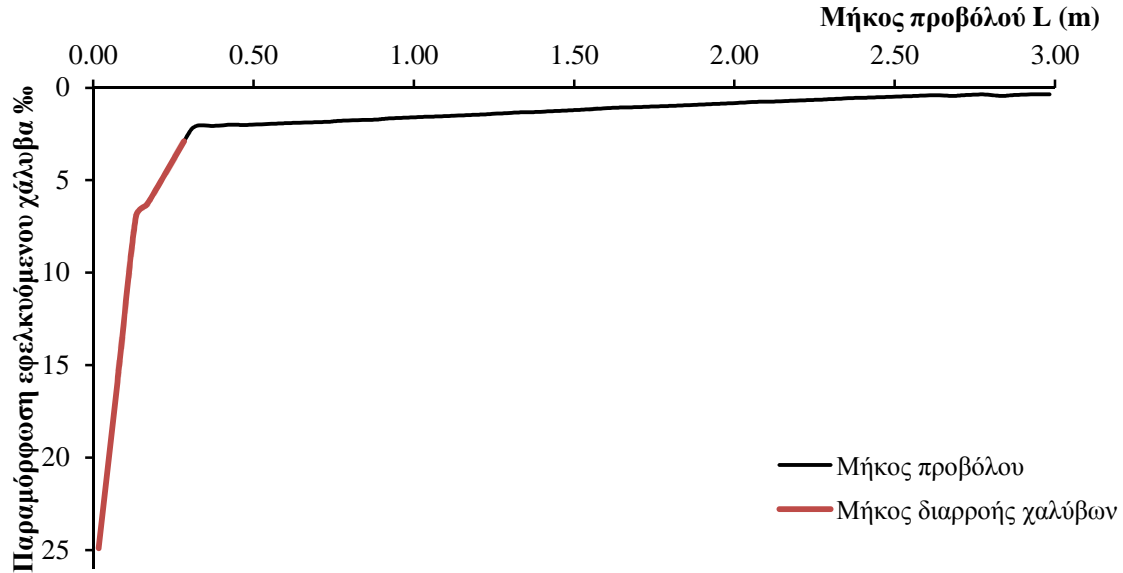
Σχήμα 5. 17: Ο πρόβολος Πβ κατά το στάδιο της αστοχίας.



Σχήμα 5. 18: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου Πβ κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκυσμένοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.283$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=24.90$  ‰.



Σχήμα 5. 19: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου Πβ.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ., ο EC8-3.

### 5.5.2 Αποτίμηση προβόλου Πβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 15: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού Πβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{My}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
<b>0.005866</b>	0.009645	235.73	78.58	109.46	0.007652	0.058056

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

Πίνακας 5. 16: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού Πα σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_0$
72.26	7.59

### 5.5.3 Αποτίμηση προβόλου Πβ σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 17: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Πβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_v$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007525	0.0387039	0.058056	-
	0.0144933	0.028987	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 18: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου Πβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_0$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_0$ (δευτερεύοντα)
5.14	7.72
1.82	3.64

### 5.5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Πβ

Πίνακας 5. 19: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη – γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο Πβ.

	$\mu_0 = \mu_\delta$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.88	70	76	0.283	24.90	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠΕ</b>	7.59	72.26	72.26			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	5.14			- 0.394	21.88	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	7.72			- 0.394		

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

## 5.6 Αποτίμηση προβόλου IIIα

### 5.6.1 Αποτίμηση προβόλου IIIα με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος IIIα διαφέρει ως προς τον πρόβολο I στην ποσότητα του εφελκυσμένου οπλισμού, καθώς αντί για 4Φ18, έχουν τοποθετηθεί 4Φ14.

Πίνακας 5. 20: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου IIIα.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	f <sub>y</sub> (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ14	14	439	208000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 21: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου IIIα.

f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>sp</sub> (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 20, Σχήμα 5. 21) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 24 .

Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>u</sub>=46 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>u</sub>=23.46 mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>y</sub>=44 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>y</sub>=18.07 mm.

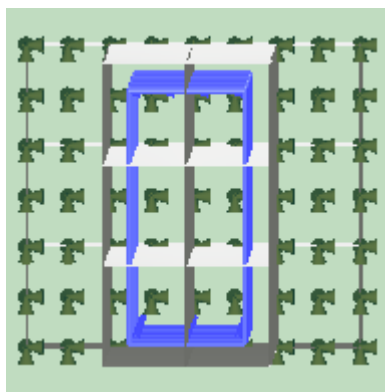
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ το τελευταίο βήμα της ανάλυσης είναι το βήμα 24, εδώ λαμβάνεται ως τελευταίο βήμα το 23, γιατί αποτελεί το τελευταίο βήμα στο οποίο οι θλιβόμενοι οπλισμοί λειτουργούν υπό θλίψη και ουσιαστικά η διατομή λειτουργεί καμπτικά, καθώς στο βήμα 24, όλη η διατομή λειτουργεί υπό εφελκυσμό.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων μ<sub>δ</sub> ως εξής:

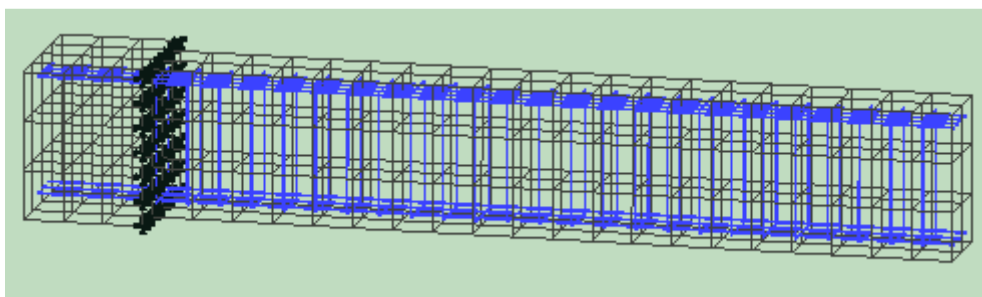
$$\mu_{\delta} = \frac{23.46}{18.07} \Rightarrow \mu_{\delta} = 1.30$$

## Κεφάλαιο 5

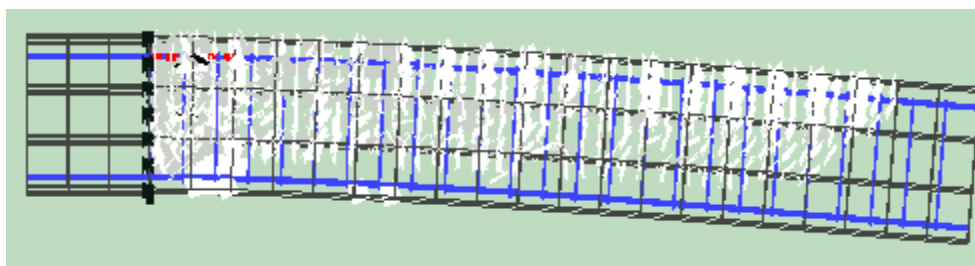
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



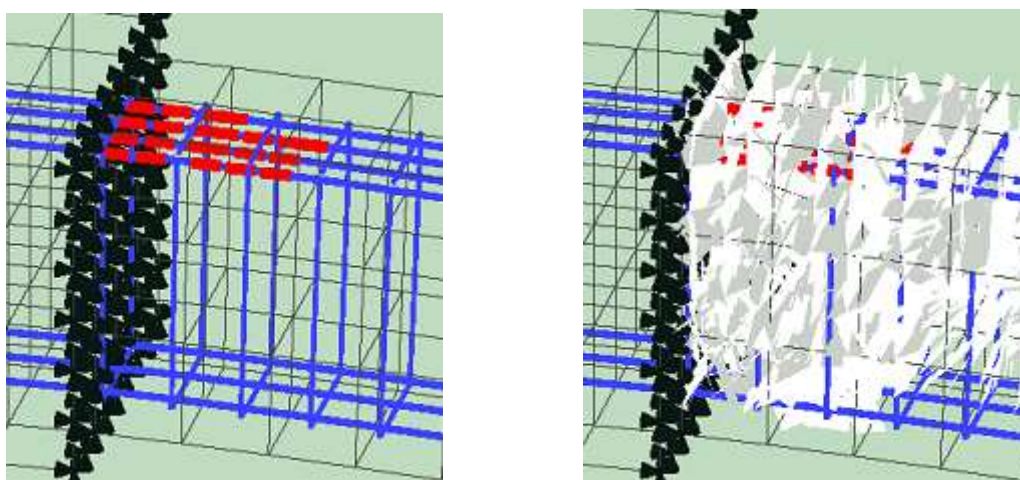
Σχήμα 5. 20: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου IIIa στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 21: Προσομοίωμα του προβόλου IIIa στο λογισμικό fe77.

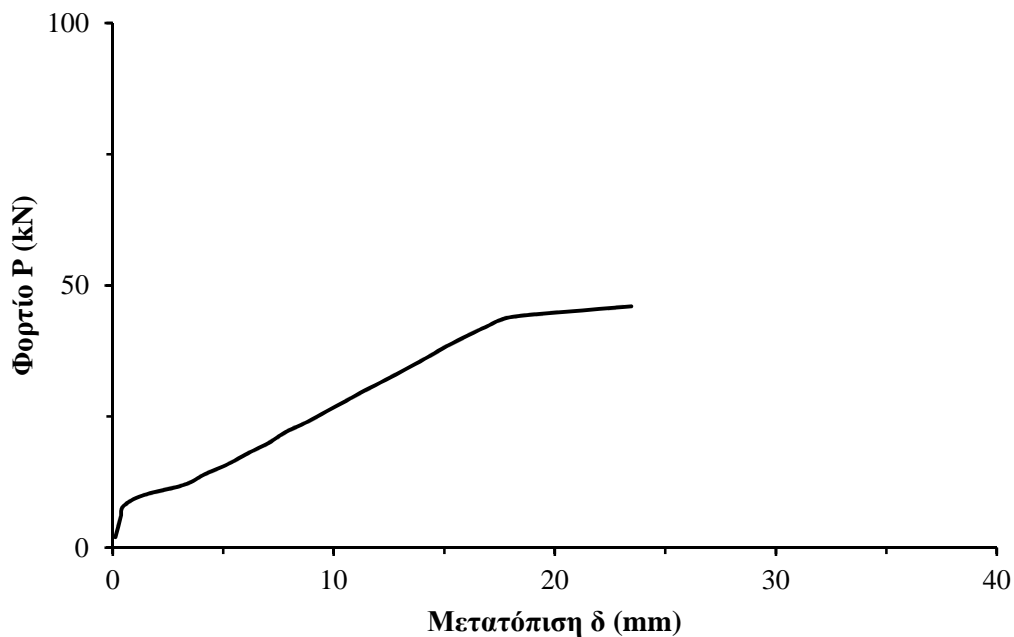


Σχήμα 5. 22: Ο πρόβολος IIIa κατά το στάδιο της αστοχίας.



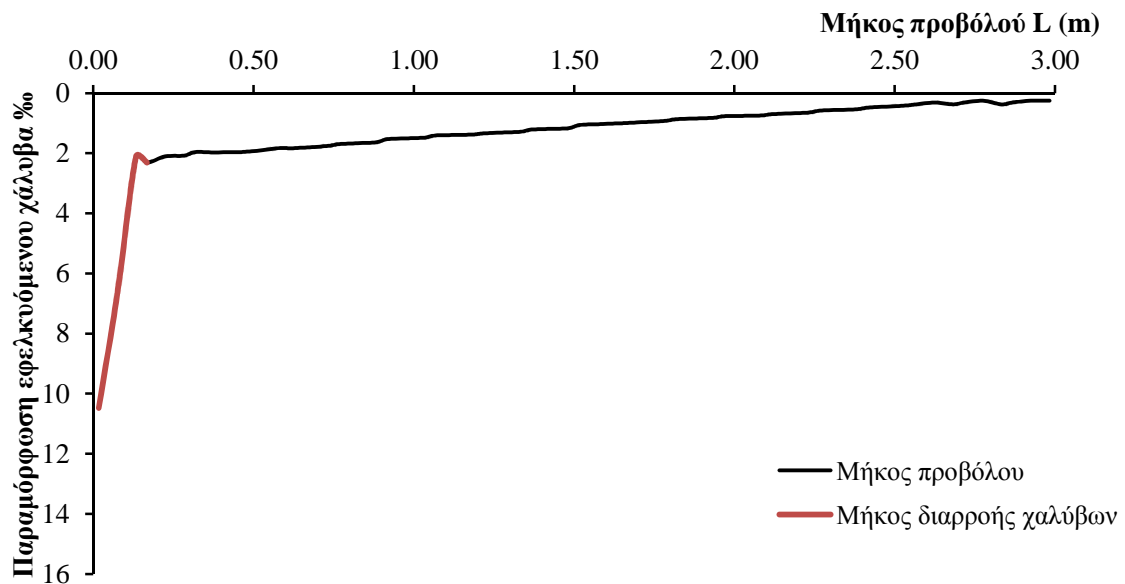
Σχήμα 5. 23: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου IIIa κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 24: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) στο άκρο του προβόλου IIIa.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.167$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=10.48$  %.



Σχήμα 5. 25: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου IIIa.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.6.2 Αποτίμηση προβόλου IIIa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 22: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού IIIa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{My}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
0.005614	0.011032	160.43	53.48	92.57	0.007401	0.058056

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 23: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού IIIa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
47.16	7.84

### 5.6.3 Αποτίμηση προβόλου IIIa σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 24: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IIIa σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007273	0.0387039	0.058056	-
	0.0183254	0.036651	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 25: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου IIIa σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
5.32	7.98
2.52	5.04



**5.6.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IIIα**

Πίνακας 5. 26: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο IIIα.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77_step23</b>	1.30	44	46	0.167	10.48	χάλυβας
<b>fe77_step24</b>	3.29	44	48	0.283	56.41	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	7.84	47.16	47.16			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	5.32 2.52			- 0.394	32.50	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	7.98 5.04			- 0.394		

## 5.7 Αποτίμηση προβόλου ΙΙβ

### 5.7.1 Αποτίμηση προβόλου ΙΙβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος ΙΙβ διαφέρει ως προς τον πρόβολο Ι στην ποσότητα του εφελκυσμένου οπλισμού, καθώς αντί για 4Φ18, έχουν τοποθετηθεί 4Φ22.

Πίνακας 5. 27: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου ΙΙβ.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	f <sub>y</sub> (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ22	22	439	208000
Κάτω οπλισμός	3 Φ18	14	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 28: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου ΙΙβ.

f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>sp</sub> (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 26, Σχήμα 5. 27) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 30.

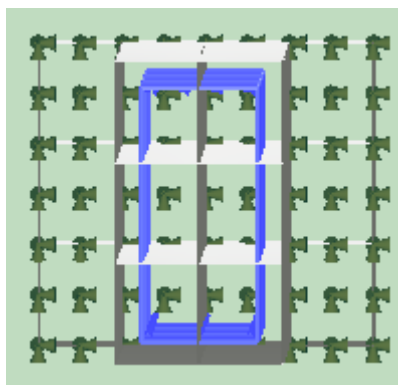
Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>u</sub>=106 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>u</sub>=24.92 mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>y</sub>=98 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>y</sub>=20.95 mm.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων μ<sub>δ</sub> ως εξής:

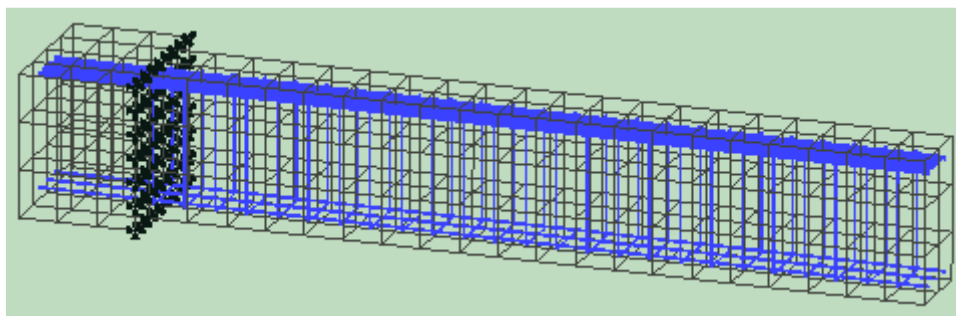
$$\mu_{\delta} = \frac{24.92}{20.95} \Rightarrow \mu_{\delta} = 1.19$$

## Κεφάλαιο 5

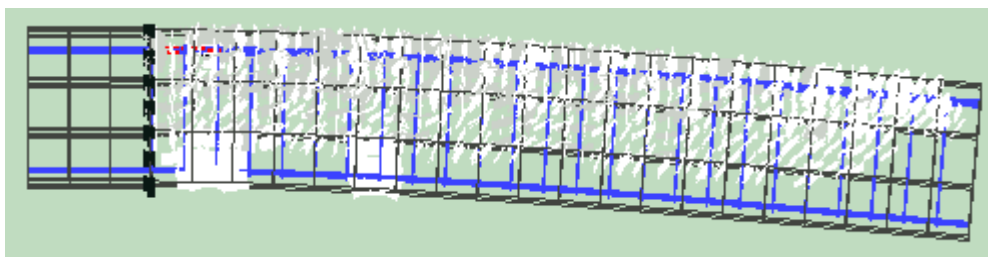
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



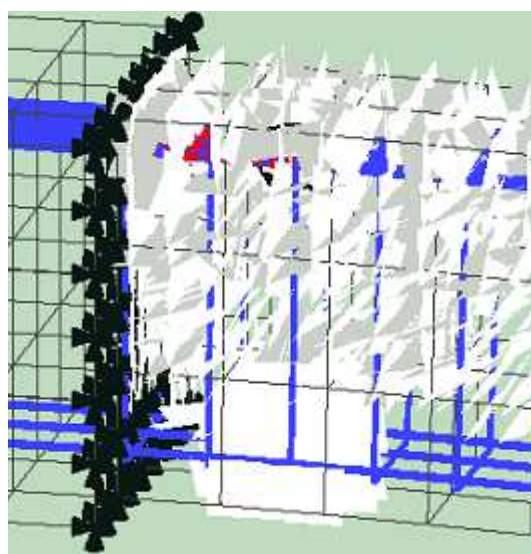
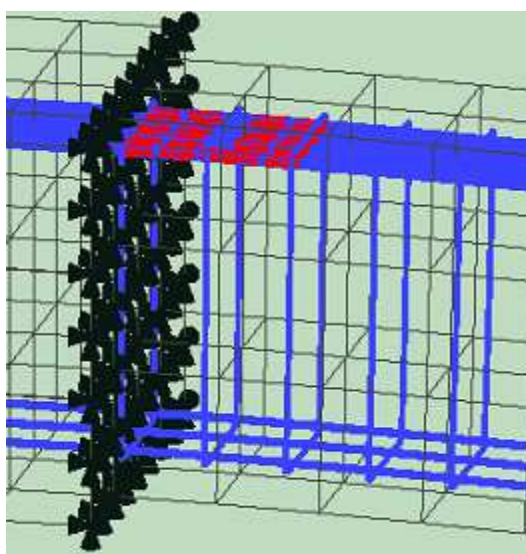
Σχήμα 5. 26: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου ΠΙβ στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 27: Προσομοίωμα του προβόλου ΠΙβ στο λογισμικό fe77.

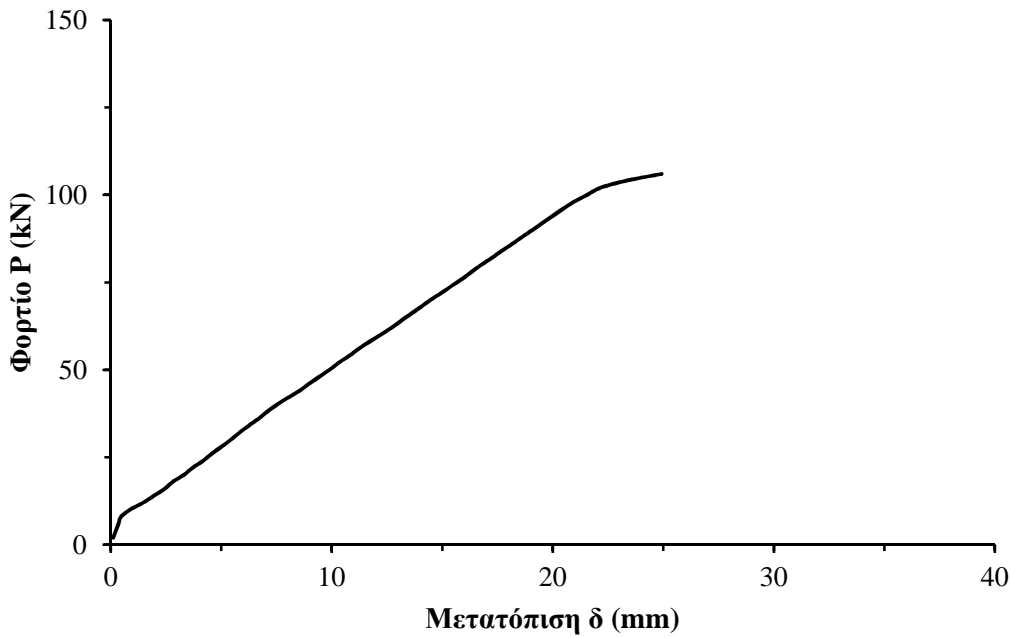


Σχήμα 5. 28: Ο πρόβοςλος ΠΙβ κατά το στάδιο της αστοχίας.



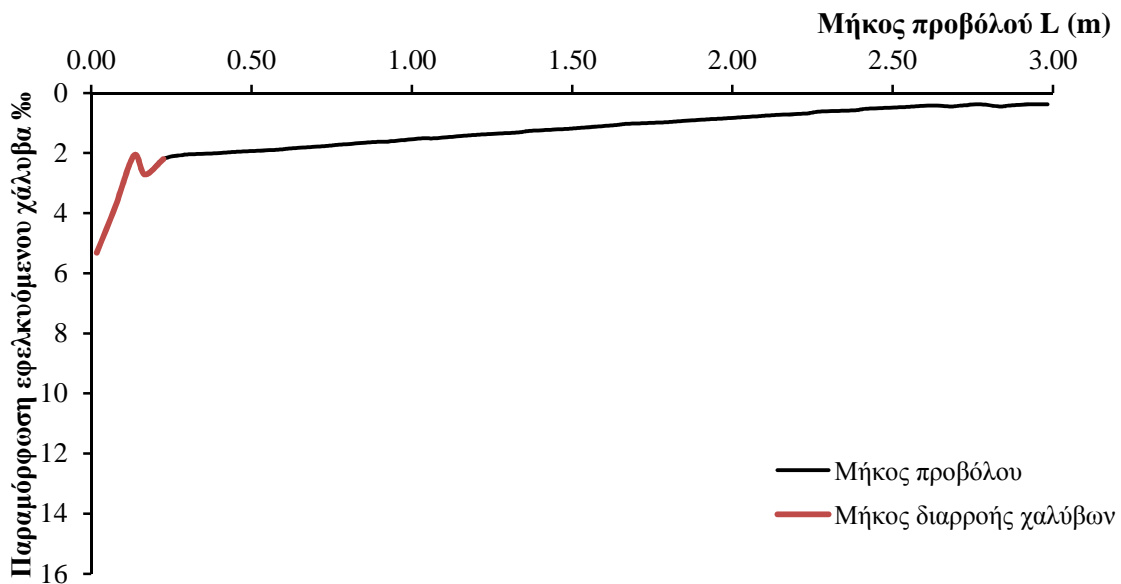
Σχήμα 5. 29: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου ΠΙβ κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 30: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) στο άκρο του προβόλου IIIβ.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.225$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=5.32$  ‰.



Σχήμα 5. 31: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου IIIα.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.7.2 Αποτίμηση προβόλου ΙΙβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 29: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού ΙΙβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{M,y}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
0.006246	0.008237	327.22	109.07	125.13	0.008033	0.047371

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 30: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού ΙΙβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
102.76	5.90

### 5.7.3 Αποτίμηση προβόλου ΙΙβ σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 31: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου ΙΙβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007905	0.0315807	0.047371	-
	0.0118012	0.023602	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 32: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου ΙΙβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
3.99	5.99
1.49	2.99

#### 5.7.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου ΙΙβ

Πίνακας 5. 33: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο ΙΙβ.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.19	98	106	0.225	5.23	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	5.90	102.76	102.76			χάλυβας
<b>EC8-3</b>	3.99			-		
<b>(κύρια)</b>	1.49			0.394	14.05	
<b>EC8-3</b>	5.99			-		
<b>(δευτερεύοντα)</b>	2.99			0.394		

## 5.8 Αποτίμηση προβόλου IVa

### 5.8.1 Αποτίμηση προβόλου IVa με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος IVa διαφέρει ως προς τον πρόβολο I στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, καθώς αντί για αντοχή 22.6 MPa, η αντοχή είναι ίση με 45 MPa.

Πίνακας 5. 34: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου IVa.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	439	208000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 35: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου IVa.

$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
45	36.0	3.80

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 32, Σχήμα 5. 33) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 36.

Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με  $P_u=78$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_u=26.90$  mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με  $P_y=72$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_y=17.93$  mm.

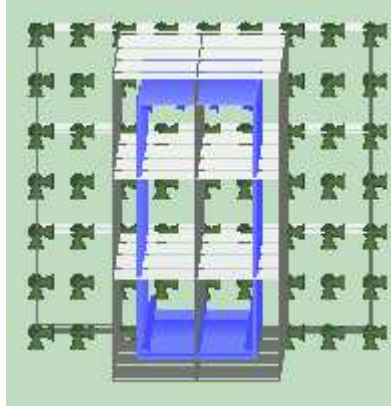
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ το τελευταίο βήμα της ανάλυσης είναι το βήμα 45, εδώ λαμβάνεται ως τελευταίο βήμα το 39, γιατί αποτελεί το τελευταίο βήμα στο οποίο οι θλιβόμενοι οπλισμοί λειτουργούν υπό θλίψη και ουσιαστικά η διατομή λειτουργεί καμπτικά, καθώς στο βήμα 45, όλη η διατομή λειτουργεί υπό εφελκυσμό.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$  ως εξής:

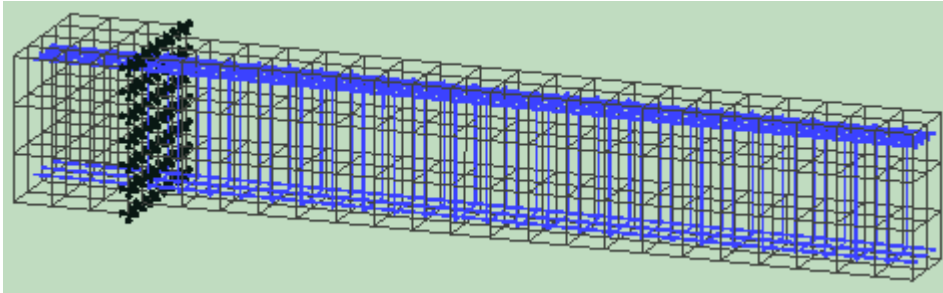
$$\mu_\delta = \frac{26.90}{17.93} \Rightarrow \mu_\delta = 1.50$$

## Κεφάλαιο 5

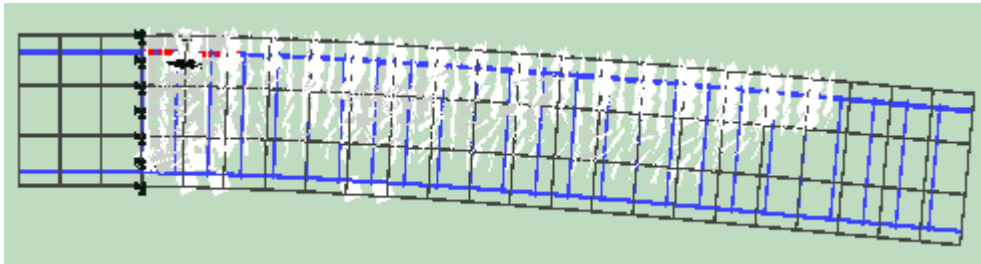
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



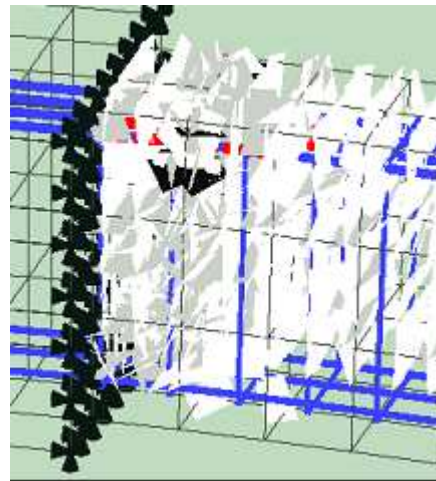
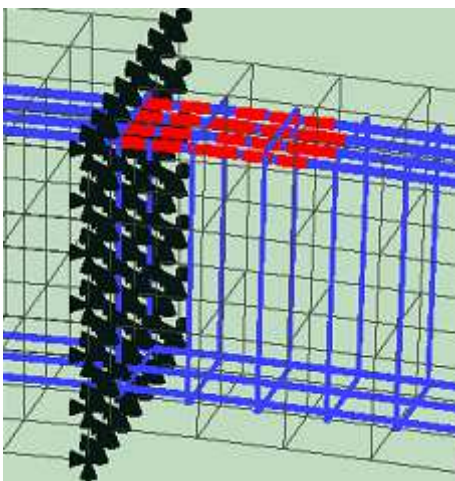
Σχήμα 5. 32: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου IVa στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 33: Προσομοίωμα του προβόλου IVa στο λογισμικό fe77.



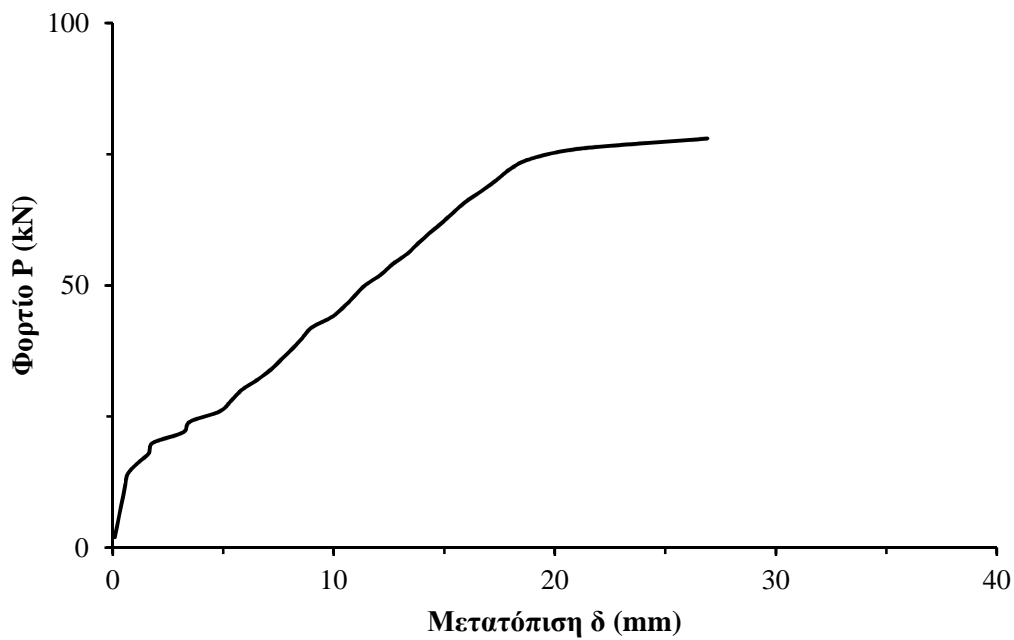
Σχήμα 5. 34: Ο πρόβολος IVa κατά το στάδιο της αστοχίας.



Σχήμα 5. 35: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου IVa κατά το στάδιο της αστοχίας.

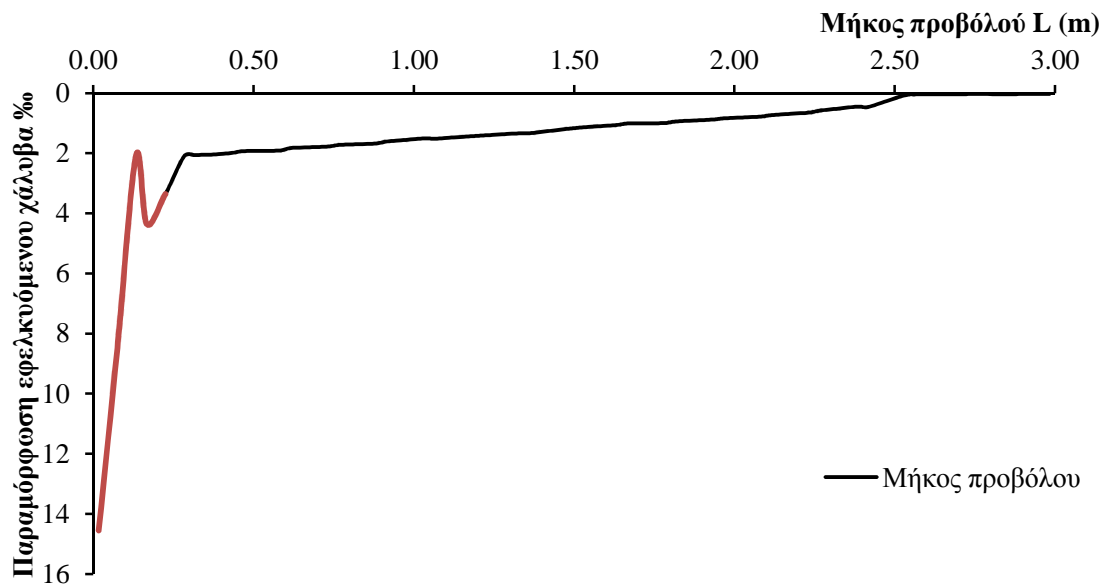


Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 36: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P-δ) στο άκρο του προβόλου IVa.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.225$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=14.55$  ‰.



Σχήμα 5. 37: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου IVa.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.8.2 Αποτίμηση προβόλου IVa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 36: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού IVa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{My}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
<b>0.005841</b>	0.017766	236.35	78.77	137.70	0.007627	0.058771

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 37: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού IVa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
72.46	7.71

### 5.8.3 Αποτίμηση προβόλου IVa σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 38: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IVa σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007500	0.0391806	0.058771	-
	0.0198906	0.039781	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 39: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου IVa σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
5.22	7.84
2.65	5.30

**5.8.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου IVa**

Πίνακας 5. 40: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο IVa.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (‰)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77_step39</b>	1.50	72	78	0.225	14.55	χάλυβας
<b>fe77_step45</b>	5.60	72	100.34	0.675	76.71	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	7.71	72.46	72.46			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	5.22 2.65			- 0.394	36.25	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	7.84 5.30			- 0.394		

## 5.9 Αποτίμηση προβόλου IVβ

### 5.9.1 Αποτίμηση προβόλου IVβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος IVβ διαφέρει ως προς τον πρόβολο I στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, καθώς αντί για αντοχή 22.6 MPa, η αντοχή είναι ίση με 12 MPa.

Πίνακας 5. 41: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου IVβ.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	439	208000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	439	208000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 42: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου IVβ.

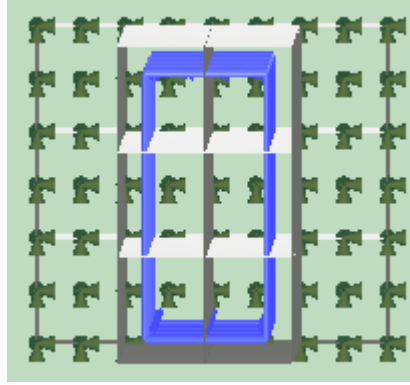
$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
12	27.0	1.60

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 38, Σχήμα 5. 39) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 42.

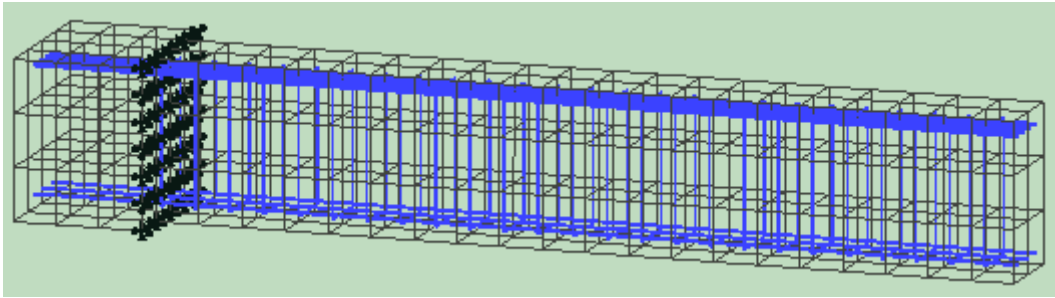
Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με  $P_u=30$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_u=8.53$  mm.

## Κεφάλαιο 5

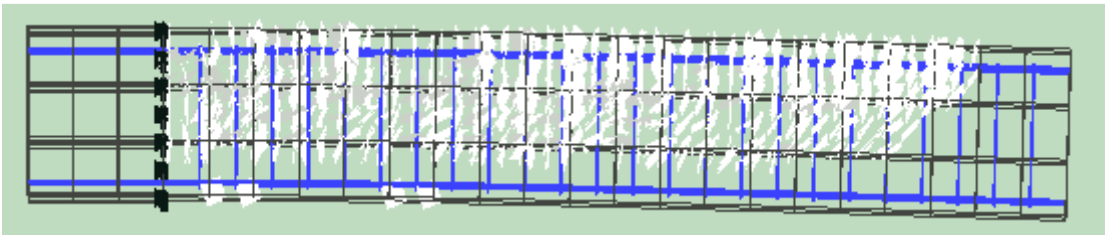
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



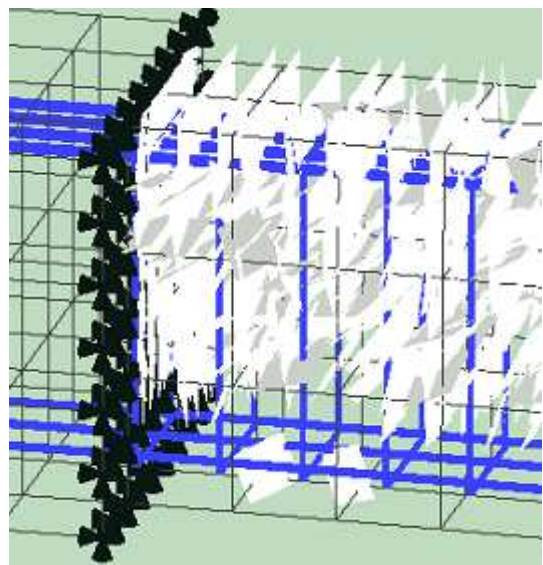
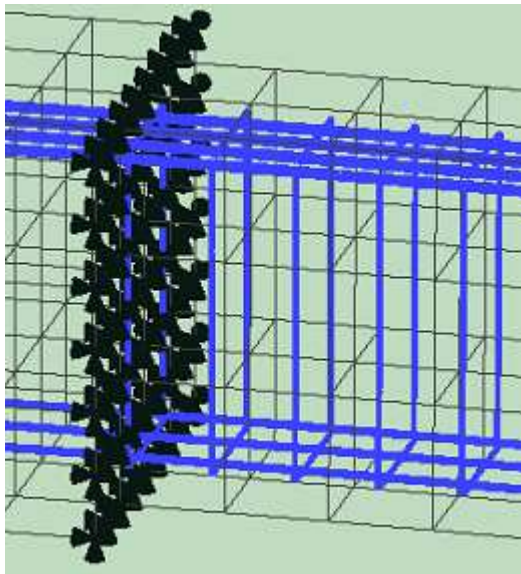
Σχήμα 5. 38: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου IVβ στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 39: Προσομοίωμα του προβόλου IVβ στο λογισμικό fe77.

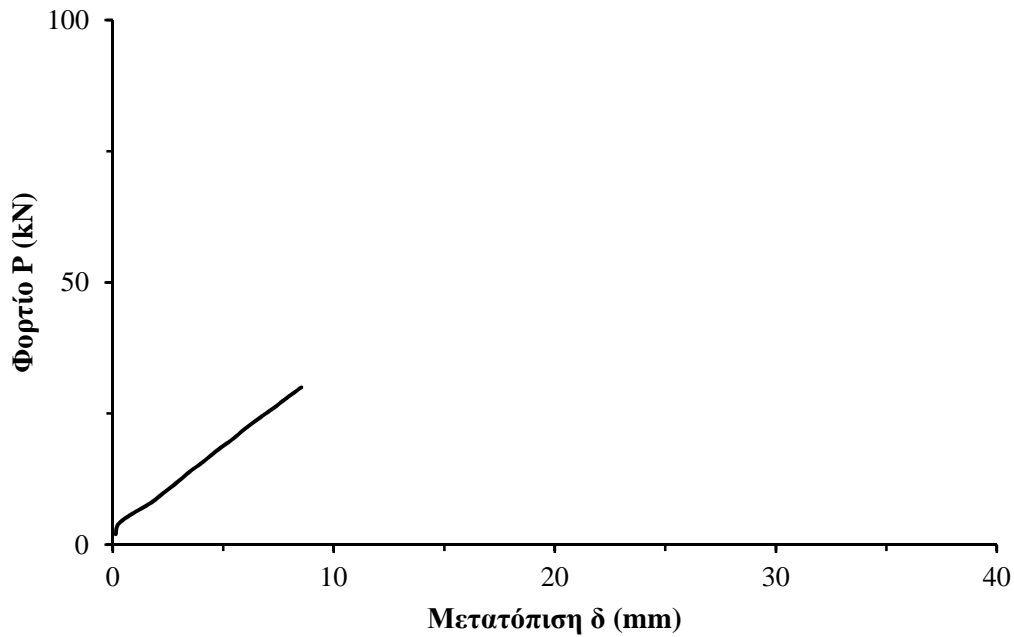


Σχήμα 5. 40: Ο πρόβολος IVβ κατά το στάδιο της αστοχίας.



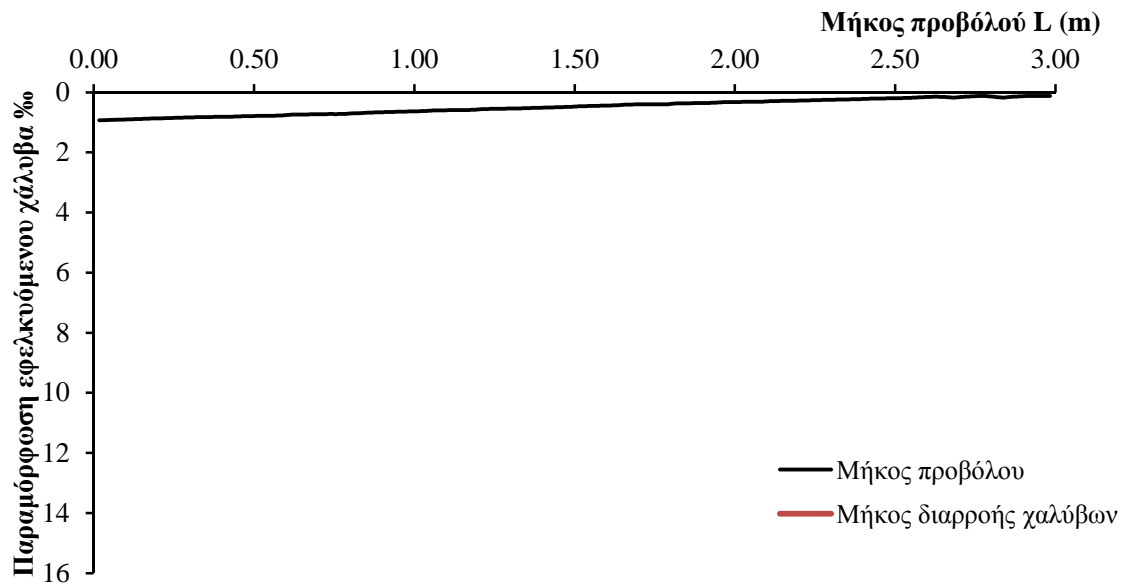
Σχήμα 5. 41: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου IVβ κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 42: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) στο άκρο του προβόλου IVβ.

Είναι αξιοσημείωτο ότι στο στάδιο της αστοχίας δεν παρατηρείται καμία διαρροή εφελκόμενου οπλισμού, όπως φαίνεται και στο σχετικό διάγραμμα. Η μέγιστη παραμόρφωση του εφελκόμενου οπλισμού είναι ίση με 0.93 ‰ και η αστοχία της διατομής οφείλεται στην θραύση του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης.



Σχήμα 5. 43: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου IVβ.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

## 5.10 Αποτίμηση προβόλου Va

### 5.10.1 Αποτίμηση προβόλου Va με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβολος Va διαφέρει ως προς τον πρόβολο I στην τάση διαρροής του διαμήκους χάλυβα, καθώς αντί για αντοχή 439 MPa, η αντοχή είναι ίση με 225 MPa.

Πίνακας 5. 43: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου Va.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	f <sub>y</sub> (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	225	200000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	225	200000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 44: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου Va.

f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>sp</sub> (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 44, Σχήμα 5. 45) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 48.

Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>u</sub>=40 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>u</sub>=14.56 mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>y</sub>=36 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>y</sub>=9.72 mm.

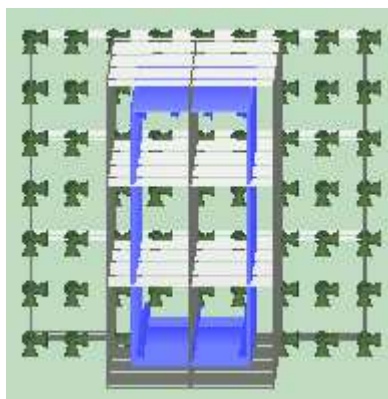
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ το τελευταίο βήμα της ανάλυσης είναι το βήμα 23, εδώ λαμβάνεται ως τελευταίο βήμα το 20, γιατί αποτελεί το τελευταίο βήμα στο οποίο οι θλιβόμενοι οπλισμοί λειτουργούν υπό θλίψη και ουσιαστικά η διατομή λειτουργεί καμπτικά, καθώς στο βήμα 24, όλη η διατομή λειτουργεί πλέον υπό εφελκυσμό.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων μ<sub>δ</sub> ως εξής:

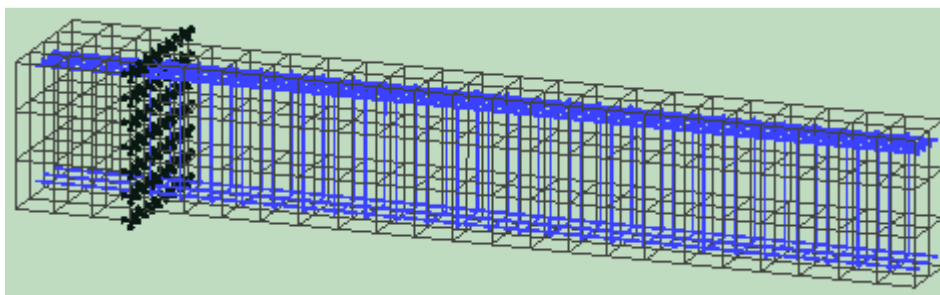
$$\mu_{\delta} = \frac{14.56}{9.72} \Rightarrow \mu_{\delta} = 1.50$$

## Κεφάλαιο 5

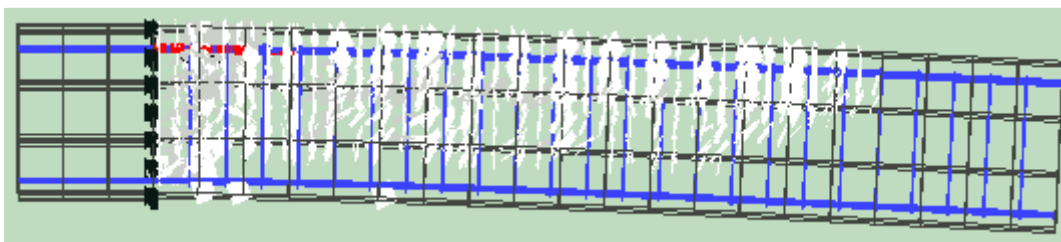
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



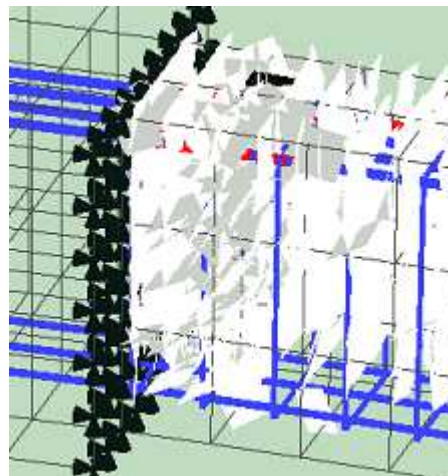
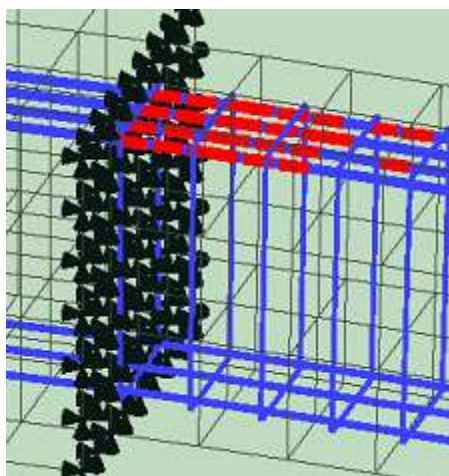
Σχήμα 5. 44: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου Va στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 45: Προσομοίωμα του προβόλου Va στο λογισμικό fe77.



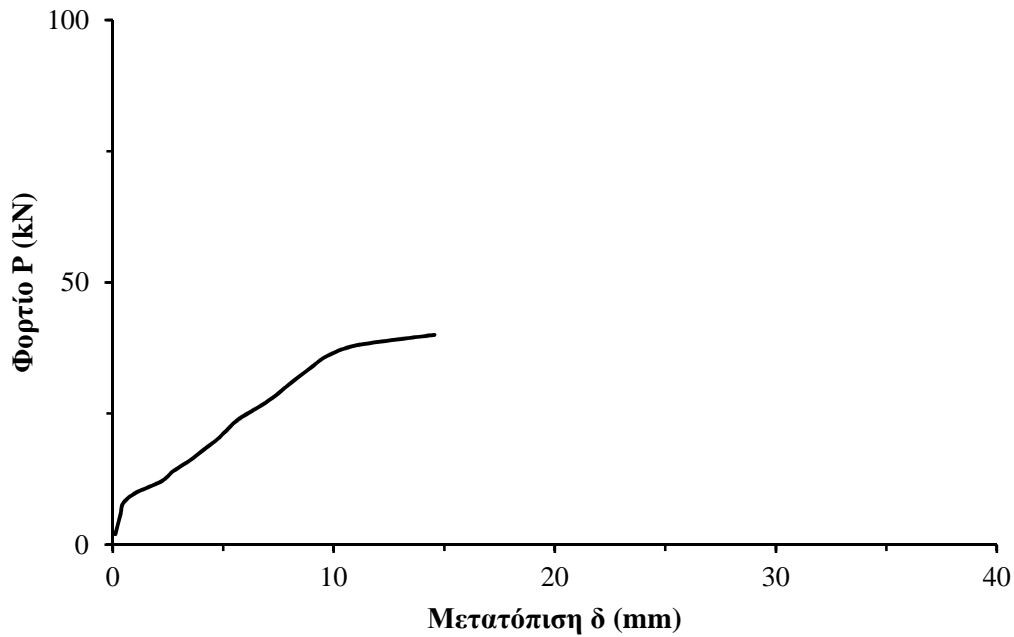
Σχήμα 5. 46: Ο πρόβος Va κατά το στάδιο της αστοχίας.



Σχήμα 5. 47: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου Va κατά το στάδιο της αστοχίας.

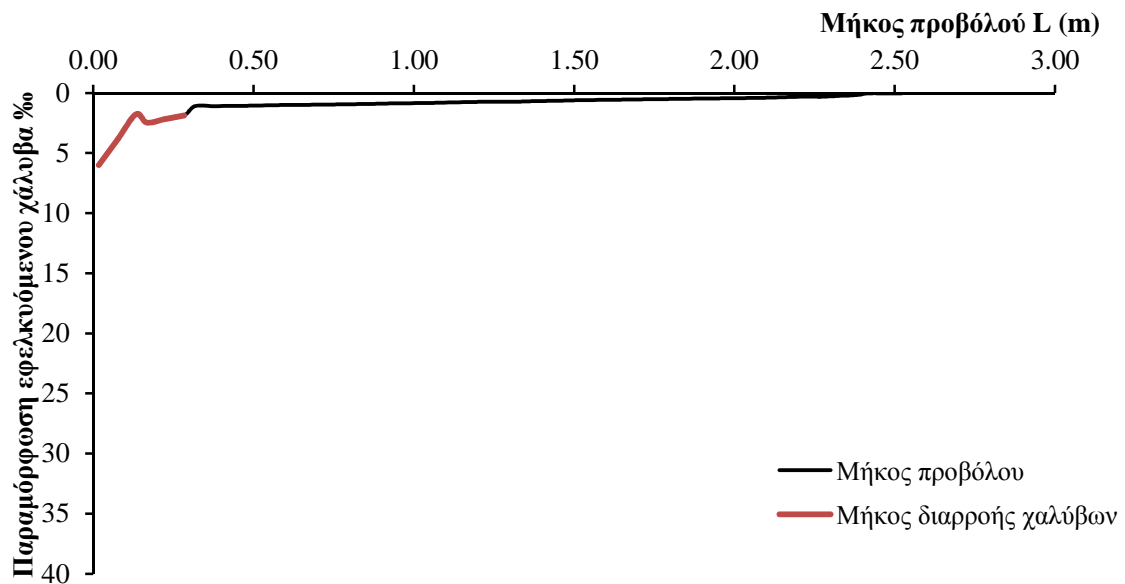


Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 48: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) στο άκρο του προβόλου Va.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.283$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\varepsilon_{su,max}=6.00$  ‰.



Σχήμα 5. 49: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου Va.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.10.2 Αποτίμηση προβόλου Va σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 45: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού Va σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{Mv}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
0.003135	0.009577	120.81	40.27	109.46	0.004921	0.051848

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 46: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού IVa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
33.95	10.53

### 5.10.3 Αποτίμηση προβόλου Va σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 47: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Va σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.004793	0.0345652	0.051848	-
	0.0163539	0.032708	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 48: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου Va σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
7.21	10.82
3.41	6.82

## Κεφάλαιο 5

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.10.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Va

Πίνακας 5. 49: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο Va.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (‰)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77_step20</b>	1.50	36	40	0.283	6.00	χάλυβας
<b>fe77_step23</b>	6.07	36	46	0.525	38.68	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	10.53	33.95	33.95			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	7.21 3.41			- 0.394	31.77	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	10.82 6.82			- 0.394		

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

## 5.11 Αποτίμηση προβόλου Vβ

### 5.11.1 Αποτίμηση προβόλου Vβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβoλος Vβ διαφέρει ως προς τον πρόβoλο I στην τάση διαρροής του διαμήκους χάλυβα, καθώς αντί για αντοχή 439 MPa, η αντοχή είναι ίση με 600 MPa.

Πίνακας 5. 50: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου Vβ.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	f <sub>y</sub> (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	600	200000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	600	200000
Συνδετήρες	Φ10/120	10	600	200000

Πίνακας 5. 51: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου Vβ.

f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>sp</sub> (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 50, Σχήμα 5. 51) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 54.

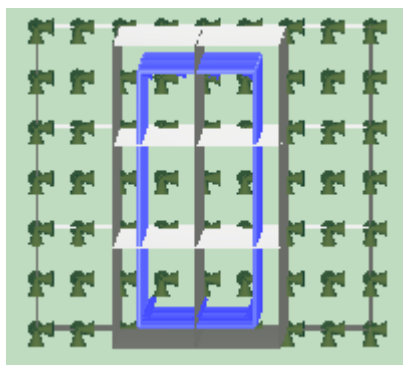
Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>u</sub>=96 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>u</sub>=30.19 mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>y</sub>=92 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>y</sub>=27.63 mm.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων μ<sub>δ</sub> ως εξής:

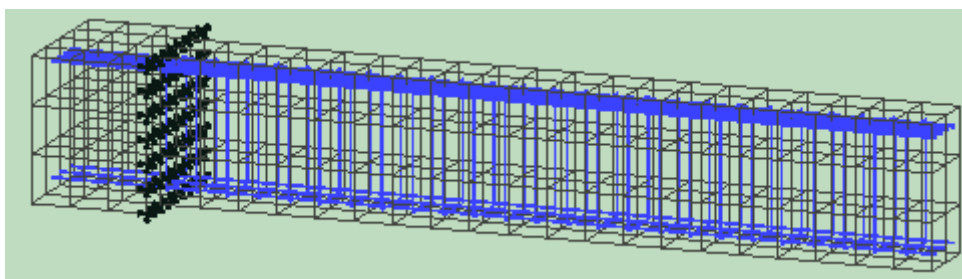
$$\mu_{\delta} = \frac{30.19}{27.63} \Rightarrow \mu_{\delta} = 1.09$$

## Κεφάλαιο 5

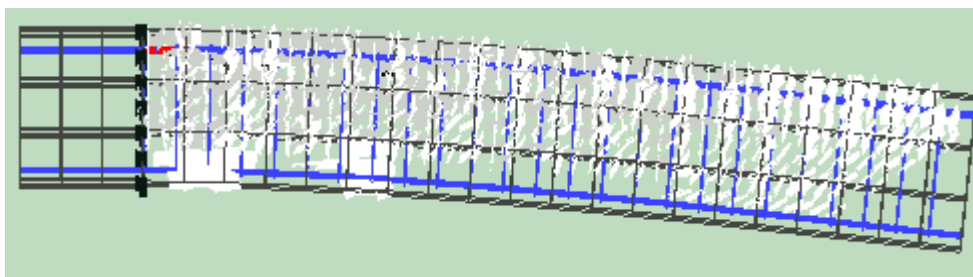
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



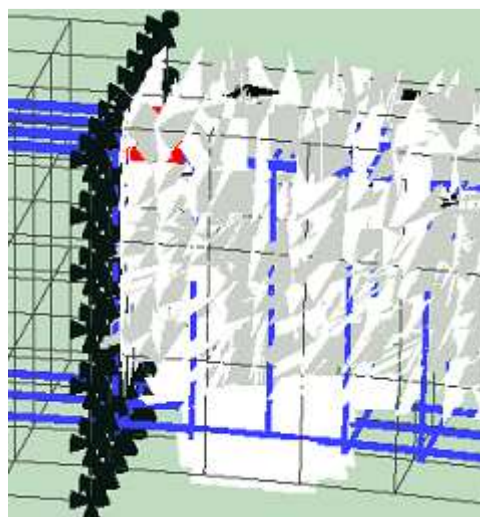
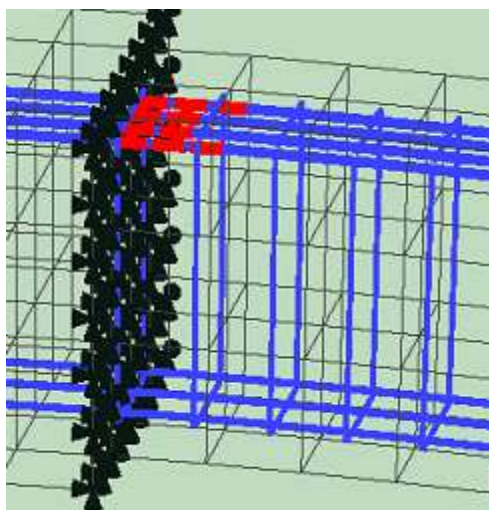
Σχήμα 5. 50: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου Vβ στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 51: Προσομοίωμα του προβόλου Vβ στο λογισμικό fe77.

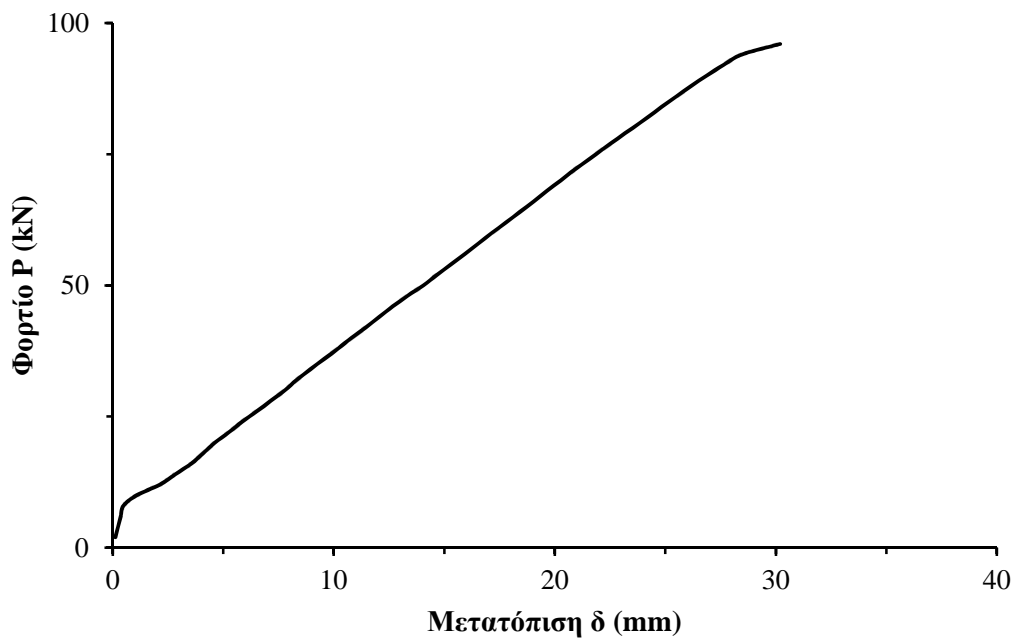


Σχήμα 5. 52: Ο πρόβολος Vβ κατά το στάδιο της αστοχίας.



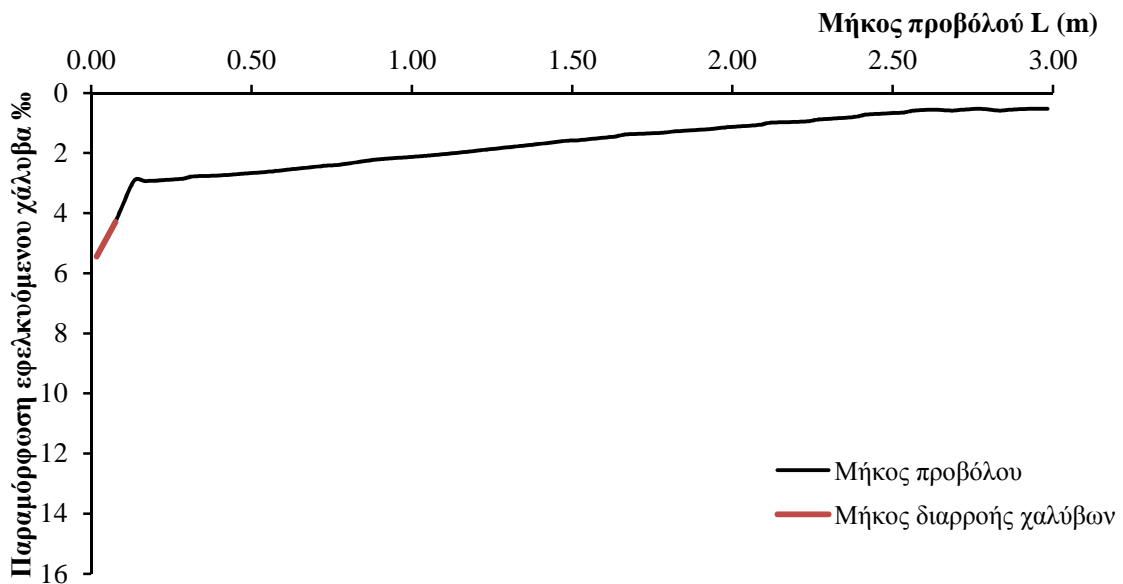
Σχήμα 5. 53: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου Vβ κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 54: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) στο άκρο του προβόλου Vβ.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.075$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=5.44$  ‰.



Σχήμα 5. 55: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου Vβ.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.11.2 Αποτίμηση προβόλου Vβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 52: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού Vβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{Mv}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
0.008359	0.009577	322.16	107.39	109.46	0.010145	0.051848

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 53: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού Vβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
101.07	5.11

### 5.11.3 Αποτίμηση προβόλου Vβ σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 54: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Vβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.010018	0.0345652	0.051848	-
	0.0138118	0.027624	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 55: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου Vβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
3.45	5.18
1.38	2.76

**5.11.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου Vβ**

Πίνακας 5. 56: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο Vβ.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.09	92	96	0.075	5.44	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	5.11	101.07	101.07			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	3.45 1.38			- 0.394	15.55	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	5.18 2.76			- 0.394		



Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

## 5.12 Αποτίμηση προβόλου VIa

### 5.12.1 Αποτίμηση προβόλου VIa με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβος VIa διαφέρει ως προς τον πρόβολο I στην απόσταση των εγκάρσιων οπλισμών, καθώς αντί για Φ10/120 έχουν τοποθετηθεί Φ10/50.

Πίνακας 5. 57: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου VIa.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	$f_y$ (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	225	200000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	225	200000
Συνδετήρες	Φ10/50	10	600	200000

Πίνακας 5. 58: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου VIa.

$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 56, Σχήμα 5. 57) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 60.

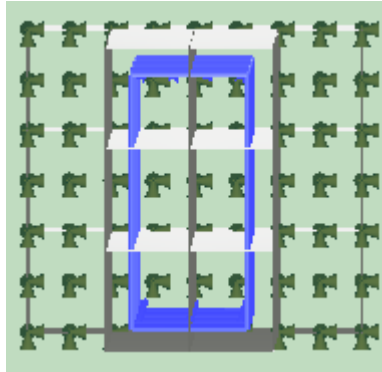
Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με  $P_u=76$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_u=32.50$  mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με  $P_y=70$  kN και η αντίστοιχη μετακίνηση  $\delta_y=19.87$  mm.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων  $\mu_\delta$  ως εξής:

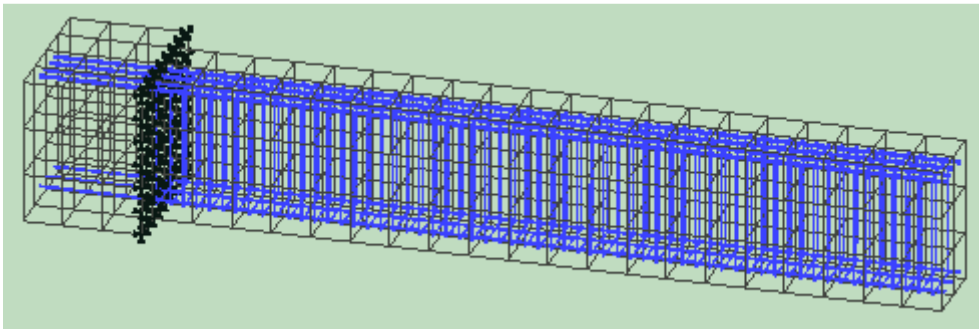
$$\mu_\delta = \frac{32.50}{19.87} \Rightarrow \mu_\delta = 1.64$$

## Κεφάλαιο 5

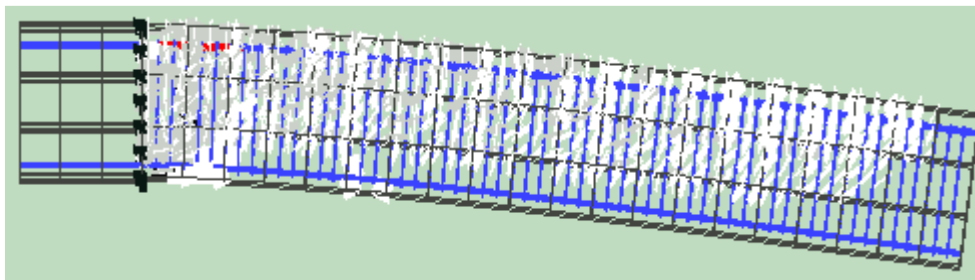
Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



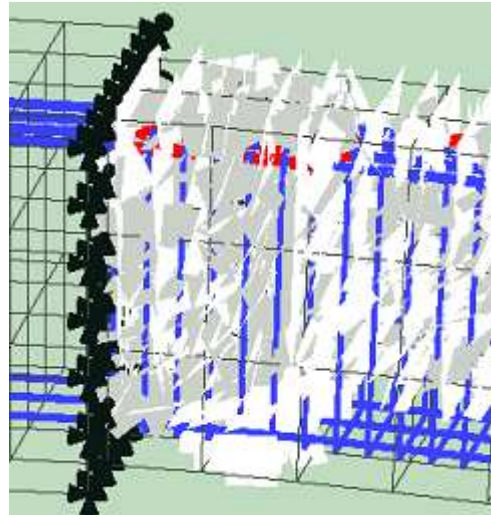
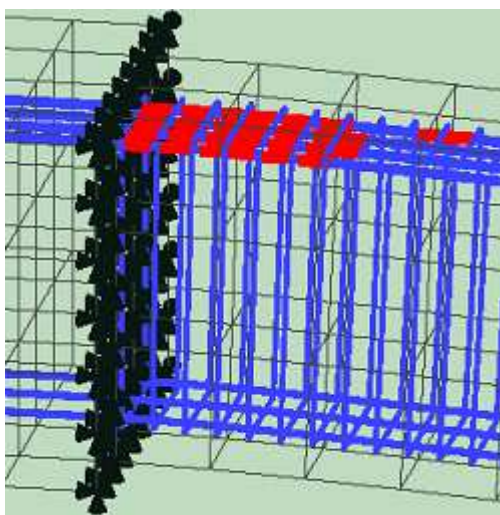
Σχήμα 5. 56: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου VIa στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 57: Προσομοίωμα του προβόλου VIa στο λογισμικό fe77.

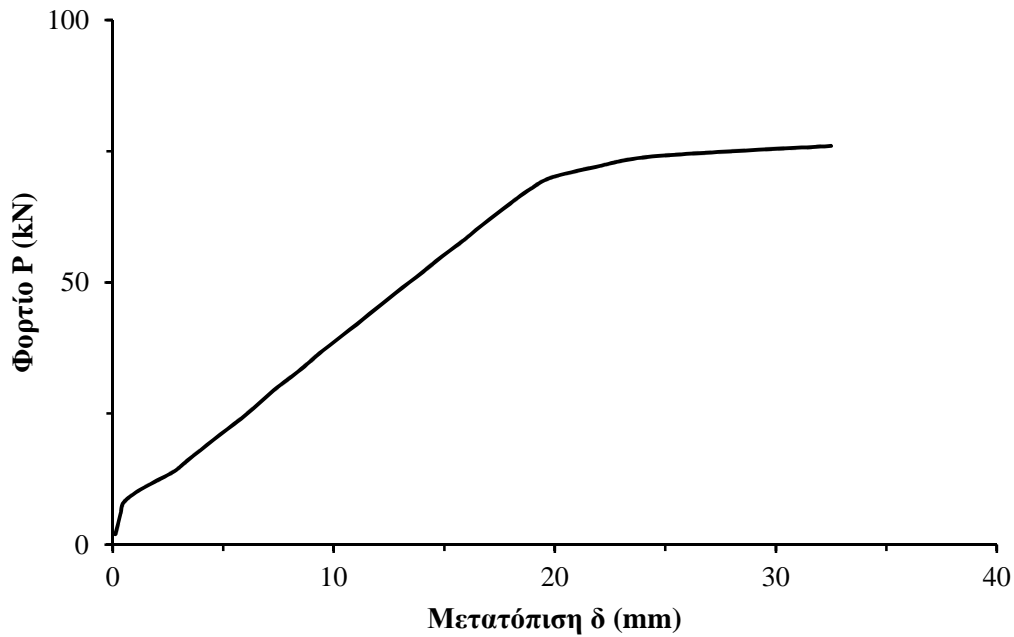


Σχήμα 5. 58: Ο πρόβολος VIa κατά το στάδιο της αστοχίας.



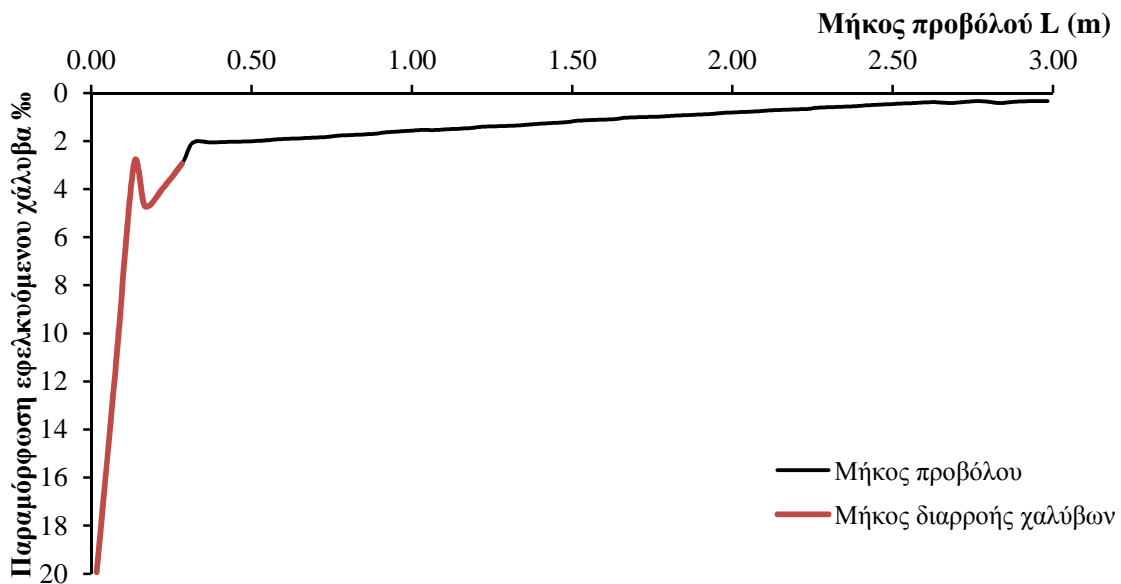
Σχήμα 5. 59: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου VIa κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 60: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης ( $P - \delta$ ) στο άκρο του προβόλου VIa.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκυσμένοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.283$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=19.94$  ‰.



Σχήμα 5. 61: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου VIa.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.12.2 Αποτίμηση προβόλου VIa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 59: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού VIa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{Mv}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
0.006132	0.008579	281.90	93.97	109.46	0.007919	0.059523

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 60: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού VIa σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
87.65	7.52

### 5.12.3 Αποτίμηση προβόλου VIa σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 61: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου VIa σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007791	0.0396823	0.059523	-
	0.0145423	0.029085	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 62: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου VIa σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
5.09	7.64
1.87	3.73

### 5.12.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου VIα

Πίνακας 5. 63: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο VIα.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.64	70	76	0.283	19.94	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	7.52	87.65	87.65			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	5.09 1.87			- 0.394	21.49	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	7.64 3.73			- 0.394		

### 5.13 Αποτίμηση προβόλου VIβ

#### 5.13.1 Αποτίμηση προβόλου VIβ με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού fe77

Ο πρόβος VIβ διαφέρει ως προς τον πρόβολο I στην απόσταση των εγκάρσιων οπλισμών, καθώς αντί για Φ10/120 έχουν τοποθετηθεί Φ10/500.

Πίνακας 5. 64: Χαρακτηριστικά οπλισμών προβόλου VIβ.

Είδος	Ποσότητα	D (mm)	f <sub>y</sub> (MPa)	E (MPa)
Άνω οπλισμός	4 Φ18	18	225	200000
Κάτω οπλισμός	3 Φ14	14	225	200000
Συνδετήρες	Φ10/500	10	600	200000

Πίνακας 5. 65: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος προβόλου VIβ.

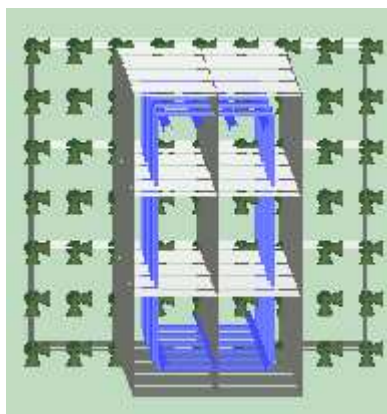
f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>sp</sub> (MPa)
22.6	32.9	2.37

Η ανάλυση της δοκού γίνεται στο λογισμικό fe77. Το προσομοίωμα του προβόλου παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5. 62, Σχήμα 5. 63) και το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 66.

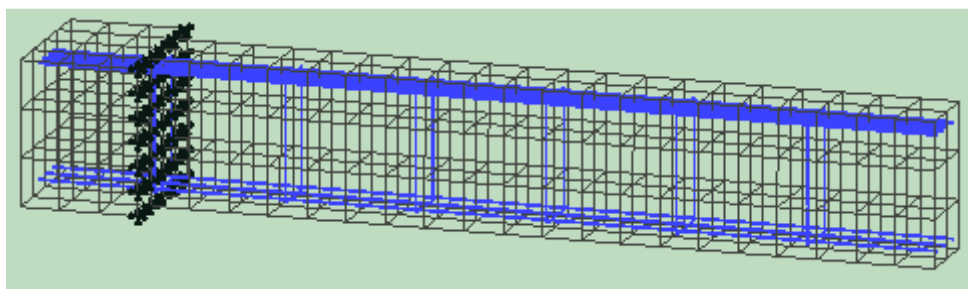
Κατά την αστοχία, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>u</sub>=76 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>u</sub>=25.07 mm. Στο στάδιο της διαρροής, κατά το οποίο συμβαίνει η πρώτη διαρροή, το φορτίο είναι ίσο με P<sub>y</sub>=70 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση δ<sub>y</sub>=20.33 mm.

Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να εξαχθεί η πλαστιμότητα των μετακινήσεων μ<sub>δ</sub> ως εξής:

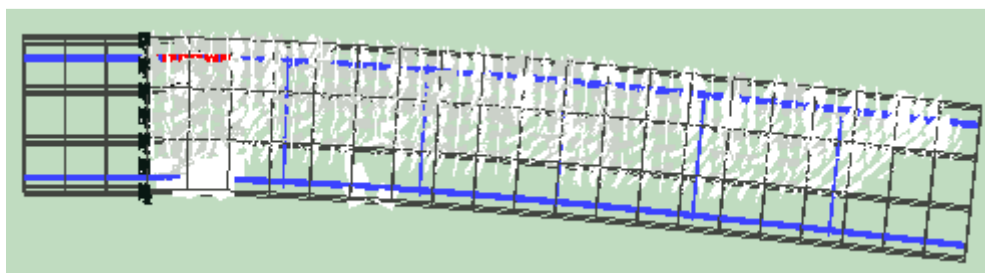
$$\mu_{\delta} = \frac{25.07}{20.33} \Rightarrow \mu_{\delta} = 1.23$$



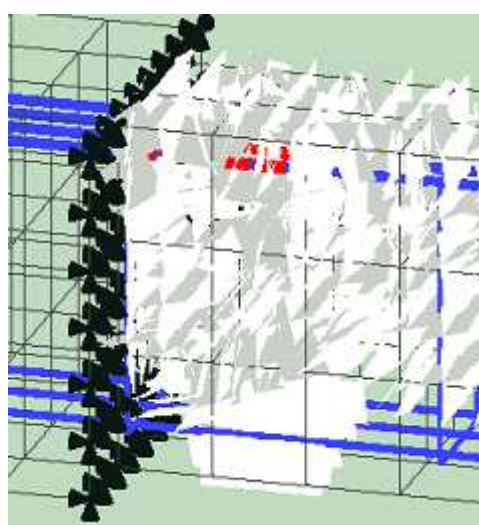
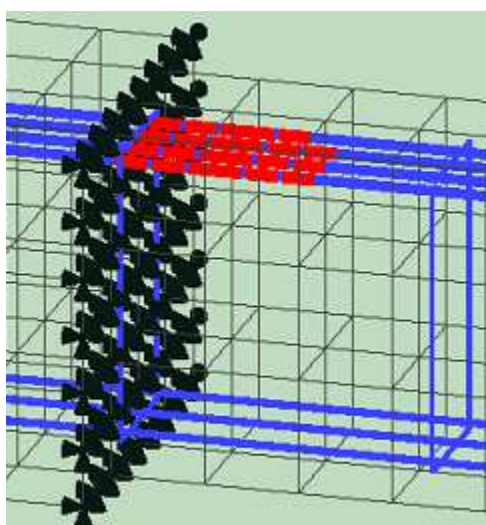
Σχήμα 5. 62: Προσομοίωμα καθ' ύψος του προβόλου VIβ στο λογισμικό fe77.



Σχήμα 5. 63: Προσομοίωμα του προβόλου VIβ στο λογισμικό fe77.

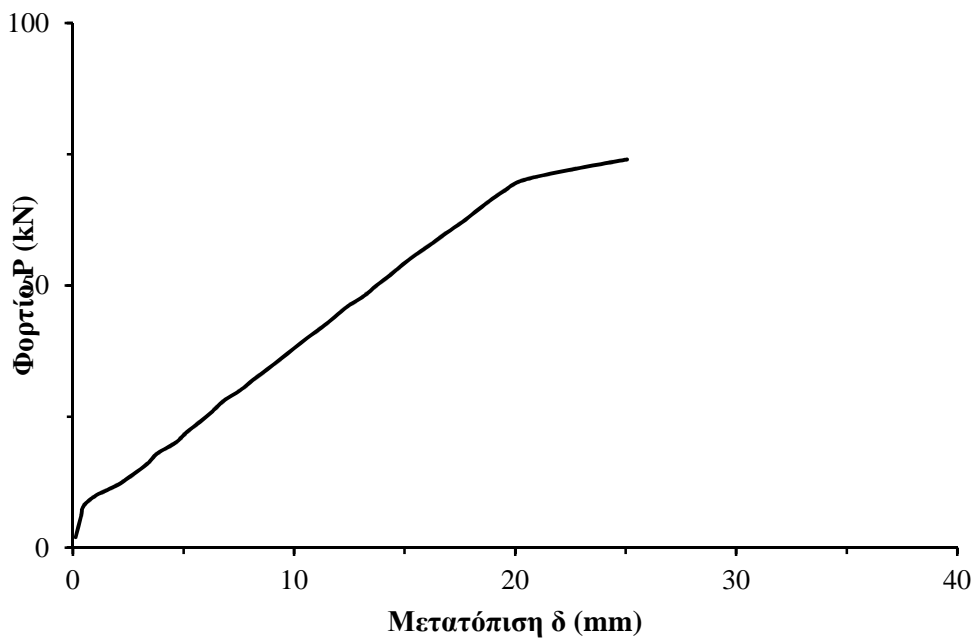


Σχήμα 5. 64: Ο πρόβολος VIβ κατά το στάδιο της αστοχίας.



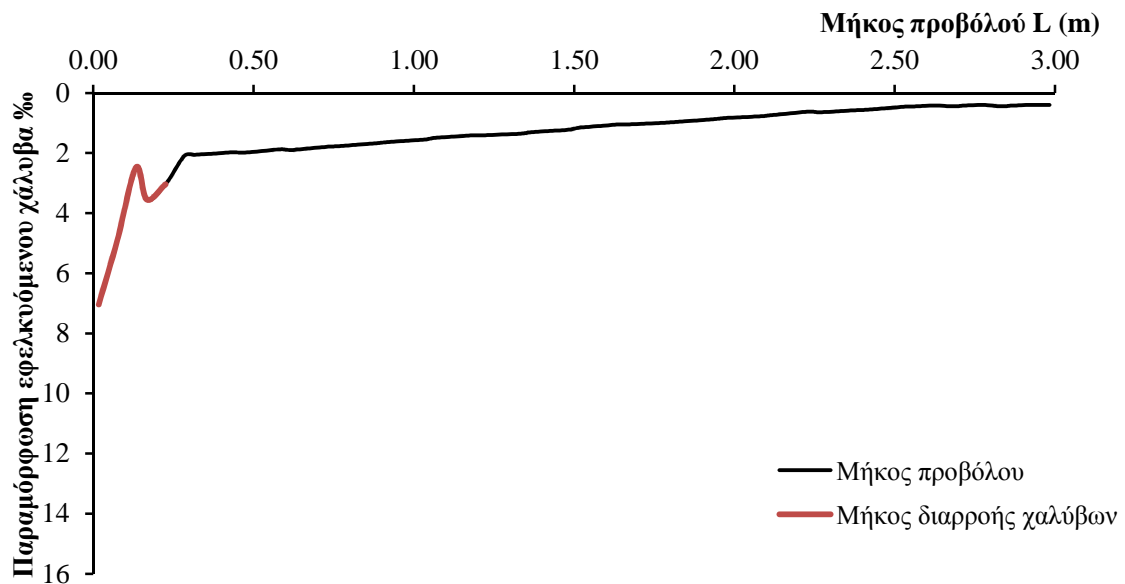
Σχήμα 5. 65: Η περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στην αρχή του προβόλου VIβ κατά το στάδιο της αστοχίας.

Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση



Σχήμα 5. 66: Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης (P - δ) στο άκρο του προβόλου VIβ.

Το μήκος μέσα στο οποίο οι διαμήκεις εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά το στάδιο της αστοχίας είναι ίσο με  $L_y=0.225$  m. Η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα εντός του παραπάνω μήκους είναι ίση με  $\epsilon_{su,max}=7.04$  ‰.



Σχήμα 5. 67: Μέση παραμόρφωση χάλυβα κατά μήκος του προβόλου VIβ.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια που ορίζουν ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο EC8-3.



Συγκριτική μελέτη αποτίμησης προβόλων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση

### 5.13.2 Αποτίμηση προβόλου VIβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Πίνακας 5. 66: Αποτελέσματα αποτίμησης δοκού VIβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Καμπυλότητα λόγω χάλυβα	Καμπυλότητα λόγω σκυροδέματος	Ροπή διαρροής $M_y$ (kNm)	Τέμνουσα κατά τη στιγμή της καμπτικής διαρροής $V_{Mv}$ (kN)	Τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση $V_{R,c}$ (kN)	Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad)
0.005772	0.010104	208.57	69.52	109.46	0.007559	0.048714

Τα συγκρίσιμα μεγέθη με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτουν από την αποτίμηση με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5. 67: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση της δοκού VIβ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Φορτίο κατά τη διαρροή (kN)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$
63.21	6.45

### 5.13.3 Αποτίμηση προβόλου VIβ σύμφωνα με τον EC8-3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τον EC8-3.

Πίνακας 5. 68: Αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου VIβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Γωνία στροφής κατά τη διαρροή $\theta_y$ (rad)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (κύρια)	Γωνία στροφής κατά την αστοχία $\theta_u$ (rad) (δευτερεύοντα)	Μήκος πλαστικής άρθρωσης $L_{pl}$ (m)
0.007431	0.0324757	0.048714	-
	0.0122657	0.024531	0.394

Το συγκρίσιμο μέγεθος (πλαστιμότητα στροφών) με τα αντίστοιχα της μη – γραμμικής ανάλυσης που προκύπτει από την αποτίμηση με βάση τον EC8-3 παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5. 69: Εξαγόμενα συγκρίσιμα αποτελέσματα από την αποτίμηση προβόλου VIβ σύμφωνα με τον EC8-3.

Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (κύρια)	Πλαστιμότητα στροφών $\mu_\theta$ (δευτερεύοντα)
4.37	6.56
1.65	3.30

**5.13.4 Συγκριτικά αποτελέσματα αποτίμησης προβόλου VIβ**

Πίνακας 5. 70: Συγκρίσιμα αποτελέσματα μη –γραμμικής ανάλυσης και κανονιστικών πλαισίων για τον πρόβολο VIβ.

	$\mu_{\theta}=\mu_{\delta}$	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kNm)	$L_p$ (m)	$\epsilon_{su,max}$ (%)	Κρίσιμο υλικό
<b>fe77</b>	1.23	70	74	0.225	7.04	χάλυβας
<b>ATC-40</b>				0.276		
<b>NZSEE 2006</b>				0.276 0.240		
<b>KANEΠE</b>	6.45	63.21	63.21			χάλυβας
<b>EC8-3 (κύρια)</b>	4.37 1.65			- 0.394	16.36	
<b>EC8-3 (δευτερεύοντα)</b>	6.56 3.30			- 0.394		

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

#### 6.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει συμπεράσματα και παρατηρήσεις σχετικά με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του προηγούμενου κεφαλαίου.

#### 6.2 Επιρροή του θλιβόμενου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των προβόλων I, Πα και Ιβ, στις οποίες το μοναδικό χαρακτηριστικό που παρουσίαζε μεταβολή ήταν το ποσοστό του θλιβόμενου οπλισμού, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή της ποσότητας του θλιβόμενου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης.

Πρώτα απ' όλα, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μη – γραμμική ανάλυση από το λογισμικό fe77, φαίνεται ότι η αυξομείωση του ποσοστού του θλιβόμενου οπλισμού δεν επηρεάζει τα φορτία διαρροής και αστοχίας, αλλά ούτε και το μήκος που συμβαίνει η διαρροή των εφελκόμενων χαλύβων οπλισμού, αφού και στις τρεις περιπτώσεις παραμένει το ίδιο.

Η πλαστιμότητα των μετακινήσεων συνιστά ένα δείκτη μέσα από τον οποίο μπορεί να εκτιμηθεί η συνεισφορά του θλιβόμενου οπλισμού. Η αύξησή του, λοιπόν, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πλαστιμότητας των μετακινήσεων και επομένως και την περισσότερη κατανάλωση ενέργειας κατά τη σεισμική διέγερση. Κρίνεται, συνεπώς, ευεργετική η παρουσία του θλιβόμενου οπλισμού σε ποσοστά μεγαλύτερα από το απαιτούμενα. Αντίστοιχα, η μείωσή του προκάλεσε μείωση του δείκτη πλαστιμότητας των μετακινήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση της πλαστιμότητας που επέφερε η μείωση του θλιβόμενου οπλισμού δεν ήταν ανάλογου βαθμού με εκείνον της αύξησης.

Η ίδια τάση επικρατεί και στην τιμή της παραμόρφωσης του εφελκόμενου χάλυβα κατά την αστοχία, αφού παρουσιάζει μία μεταβολή ανάλογα με την ποσότητα του θλιβόμενου οπλισμού, καθώς η παρουσία μεγαλύτερου ποσοστού, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραμορφωσιακής κατάστασης των εφελκόμενων χαλύβων.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που σχετίζονται με το δείκτη πλαστιμότητας του λογισμικού fe77 με τα αποτελέσματα των κανονισμών, φαίνεται να υπάρχει η ίδια τάση όσον

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

αφορά τη συνεισφορά του θλιβόμενου οπλισμού στην πλαστιμότητα, με την εναλλακτική σχέση που προτείνει ο EC8-3, να προσεγγίζει σε αρκετά μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της μη – γραμμικής ανάλυσης για κύρια σεισμικά στοιχεία για τα οποία έχει χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_{ei}$ . Μεγάλη υπερεκτίμηση του δείκτη φαίνεται να δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. καθώς και ο πρώτος τύπος υπολογισμού του EC8-3.

Το φορτίο διαρροής και αστοχίας προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ενώ το μήκος πλαστικής άρθρωσης σαν αυτούσιο μέγεθος φαίνεται να υπερεκτιμάται από τον EC8-3, ενώ καλύτερα προσεγγίζεται από τους ATC - 40 και NZSEE 2006.

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό fe77 και από την αποτίμηση με βάση τις διατάξεις των κανονισμών, που αφορούν το δείκτη πλαστιμότητας, τα φορτία διαρροής και αστοχία, το μήκος πλαστικής άρθρωσης και τη μέγιστη παραμόρφωση του εφελκόμενου χάλυβα κατά το στάδιο της αστοχίας.

Πίνακας 6. 1: Σύγκριση δεικτών πλαστιμότητας για τους προβόλους I, IIα, IIβ.

	fe77	ΚΑΝ.ΕΠΕ.	EC8-3 (κύρια)	EC8-3 (δευτερεύοντα)
<b>Πρόβολος I</b>	1.57	6.74	4.57 1.72	6.85 3.45
<b>Πρόβολος IIα</b>	1.55	5.67	3.84 1.66	5.76 3.32
<b>Πρόβολος IIβ</b>	1.88	7.59	5.14 1.93	7.72 3.85

Πίνακας 6. 2: Σύγκριση φορτίων διαρροής και αστοχίας για τους προβόλους I, IIα, IIβ.

	fe77	ΚΑΝ.ΕΠΕ.
<b>Πρόβολος I</b>	70 76	72.10
<b>Πρόβολος IIα</b>	70 76	71.95
<b>Πρόβολος IIβ</b>	70 76	72.26

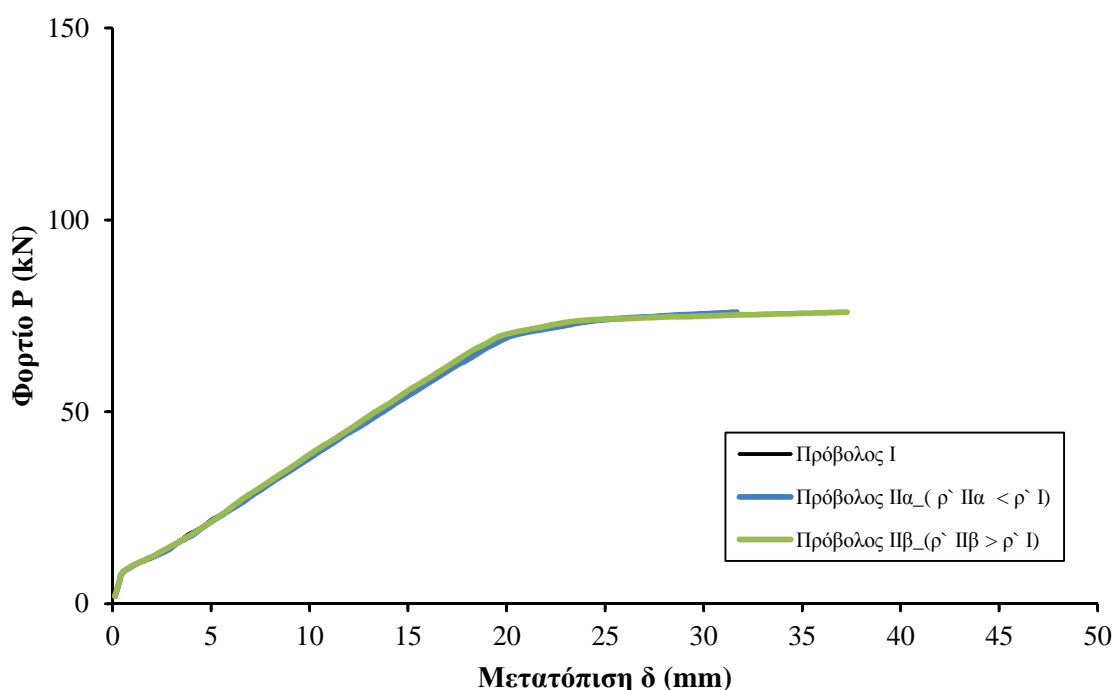
Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 3: Σύγκριση μηκών πλαστικής άρθρωσης για τους προβόλους I, IIα, IIβ.

	fe77	EC8-3	ATC-40	NZSEE 2006
<b>Πρόβολος I</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IIα</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IIβ</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240

Πίνακας 6. 4: Σύγκριση μέγιστης παραμόρφωσης εφελκόμενου χάλυβα στο στάδιο χάλυβας για τους προβόλους I, IIα, IIβ.

	fe77	KAN.EΠE.
<b>Πρόβολος I</b>	15.26	15.49
<b>Πρόβολος IIα</b>	15.14	16.75
<b>Πρόβολος IIβ</b>	24.90	21.88



Σχήμα 6. 1: Διαγράμματα φορτίου –μετακίνησης  $P-\delta$  των προβόλων I, IIα και IIβ.

### 6.3 Επιρροή του εφελκόμενου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των προβόλων I, IIIα και IIIβ, στις οποίες το μοναδικό χαρακτηριστικό που παρουσίαζε μεταβολή ήταν το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή της ποσότητάς του στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης.

Πρώτα απ' όλα, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μη – γραμμική ανάλυση από το λογισμικό fe77, φαίνεται ότι η αύξησή του έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής, καθώς τόσο τα φορτία διαρροής και αστοχίας είναι αυξημένα, ενώ η μείωση οδηγεί σε ανάλογη μείωση της αντοχής.

Για τα υπόλοιπα μεγέθη που εξετάζονται πρέπει να τονιστεί το εξής: Στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης του προβόλου IIIα, το μεγαλύτερο τμήμα της ακραίας διατομής λειτουργεί υπό εφελκυσμό, καθώς και οι θλιβόμενες ράβδοι εφελκούνται. Ουσιαστικά, η εντατική κατάσταση δε μπορεί πλέον να χαρακτηριστεί ως καμπτική και για το λόγο αυτό επιλέγεται ως στάδιο αστοχίας του προβόλου IIIα η κατάσταση του αμέσως προηγούμενου βήματος (step 23), το οποίο είναι και το τελευταίο βήμα κατά το οποίο στη διατομή κυριαρχεί η κάμψη.

Έτσι, λοιπόν, η μείωση του εφελκόμενου οπλισμού οδηγεί σε μείωση της τιμής του δείκτη πλαστιμότητας, του μήκους πλαστικής άρθρωσης όπως και της μέγιστης παραμόρφωσης του εφελκόμενου χάλυβα.

Στο μοναδικό στοιχείο στο οποίο υπάρχει συμφωνία των παραπάνω αποτελεσμάτων με τους κανονισμούς είναι η μείωση της αντοχής, καθώς τόσο για το δείκτη της πλαστιμότητας, όσο και για τη μέγιστη παραμόρφωση του εφελκόμενου χάλυβα καταγράφεται αύξηση. Εδώ παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των κανονισμών δείχνουν να είναι συγκρίσιμα με το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης (step 24) κατά το οποίο όμως όπως προαναφέρθηκε η διατομή βρίσκεται πλήρως υπό εφελκυσμό.

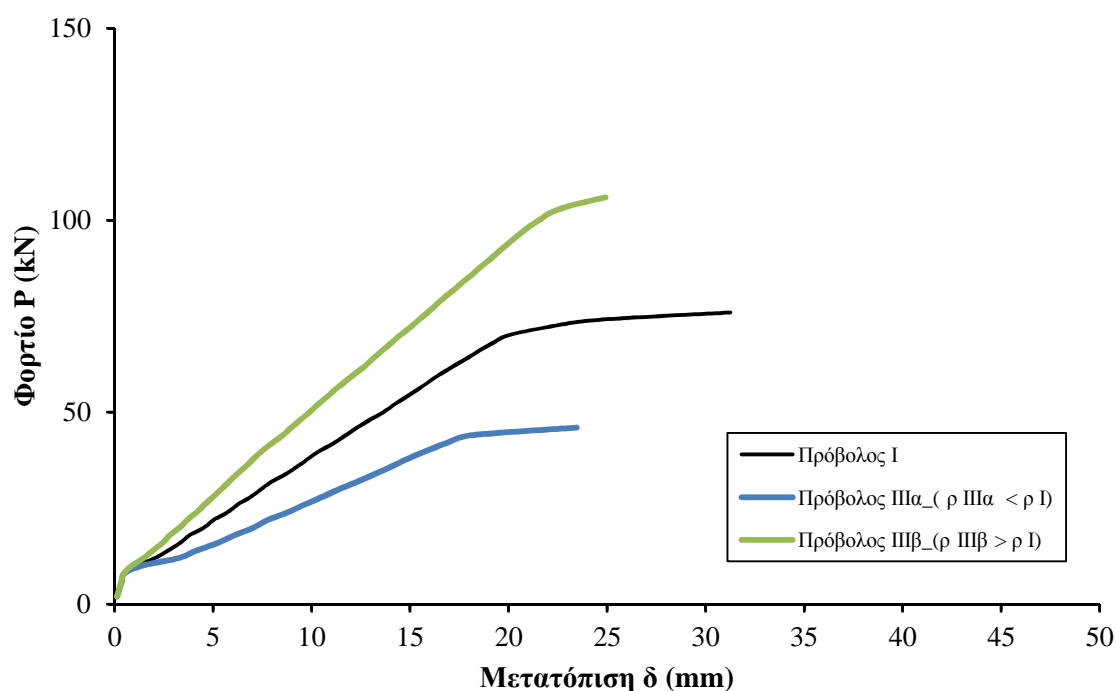
Οι συνέπειες της αύξησης του εφελκόμενου οπλισμού φαίνεται να εκτιμώνται κατά τον ίδιο τρόπο τόσο από τα αποτελέσματα του λογισμικού όσο και από τα αποτελέσματα των κανονισμών εκτός από το μήκος της πλαστικής άρθρωσης. Ο δείκτης πλαστιμότητας και η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα στο στάδιο της αστοχίας μειώνονται. Τα αποτελέσματα όμως των κανονισμών υπερεκτιμούν τα παραπάνω μεγέθη σε αρκετά μεγάλο βαθμό, όπως συμβαίνει στα μέχρι τώρα αποτελέσματα, με την εναλλακτική σχέση που προτείνει ο EC8-3,

να προσεγγίζει καλύτερα το αποτέλεσμα της μη – γραμμικής ανάλυσης για κύρια σεισμικά στοιχεία για τα οποία έχει χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_{el}$ .

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή του μήκους της πλαστικής άρθρωσης, που ενώ οι κανονισμοί προβλέπουν ένα σταθερό μήκος για όλα τα εξεταζόμενα δομικά στοιχεία, δείχνει από τις αναλύσεις να επηρεάζεται από τις μεταβολές του εφελκόμενου οπλισμού.

Πίνακας 6. 5: Σύγκριση δεικτών πλαστιμότητας για τους προβόλους I, IIIα, IIIβ.

	fe77	KAN.ΕΠΕ.	EC8-3 (κύρια)	EC8-3 (δευτερεύοντα)
<b>Πρόβολος I</b>	1.57	6.74	4.57 1.72	6.85 3.45
<b>Πρόβολος IIIα_step23</b>	1.30	7.84	5.32 2.52	7.98 5.04
<b>Πρόβολος IIIα_step24</b>	3.29	7.84	5.32 2.52	7.98 5.04
<b>Πρόβολος IIIβ</b>	1.19	5.90	3.99 1.49	5.99 2.99



Σχήμα 6. 2: Διαγράμματα φορτίου –μετακίνησης P –δ των προβόλων I, IIIα και IIIβ.

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 6: Σύγκριση φορτίων διαρροής και αστοχίας για τους προβόλους I, IIIα, IIIβ.

	fe77	KAN.ΕΠΕ.
<b>Πρόβολος I</b>	70 76	72.10
<b>Πρόβολος IIIα_step23</b>	44 46	47.16
<b>Πρόβολος IIIα_step24</b>	44 48	47.16
<b>Πρόβολος IIIβ</b>	98 106	102.76

Πίνακας 6. 7: Σύγκριση μηκών πλαστικής άρθρωσης για τους προβόλους I, IIIα, IIIβ.

	fe77	EC8-3	ATC-40	NZSEE 2006
<b>Πρόβολος I</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IIIα_step23</b>	0.167	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IIIα_step24</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IIIβ</b>	0.225	0.394	0.276	0.276 0.240

Πίνακας 6. 8: Σύγκριση μέγιστης παραμόρφωσης εφελκόμενου χάλυβα στο στάδιο χάλυβας για τους προβόλους I, IIIα, IIIβ.

	fe77	EC8-3
<b>Πρόβολος I</b>	15.26	15.49
<b>Πρόβολος IIIα_step23</b>	10.48	32.50
<b>Πρόβολος IIIα_step24</b>	56.41	32.50
<b>Πρόβολος IIIβ</b>	5.23	14.05



#### **6.4 Επιρροή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης**

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των προβόλων I, IVα και IVβ, στις οποίες το μοναδικό χαρακτηριστικό που παρουσίαζε μεταβολή ήταν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή της στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης.

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μη – γραμμική ανάλυση από το λογισμικό fe77, φαίνεται ότι η αύξησή του έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση της αντοχής, καθώς τόσο τα φορτία διαρροής και αστοχίας είναι ελαφρώς αυξημένα, ενώ η μείωση οδηγεί σε ανάλογη μείωση της αντοχής.

Για τα υπόλοιπα μεγέθη που εξετάζονται πρέπει να τονιστεί το εξής: Στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης του προβόλου IVα, το μεγαλύτερο τμήμα της ακραίας διατομής λειτουργεί υπό εφελκυσμό, καθώς και οι θλιβόμενες ράβδοι εφελκύνονται. Ουσιαστικά, η εντατική κατάσταση δε μπορεί πλέον να χαρακτηριστεί ως καμπτική και για το λόγο αυτό επιλέγεται ως στάδιο αστοχίας του προβόλου IVα η κατάσταση του βήματος εκείνου (step 39), στο οποίο είναι και το τελευταίο βήμα κατά το οποίο στη διατομή κυριαρχεί η κάμψη.

Έτσι, λοιπόν, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος οδηγεί σε μείωση της τιμής του δείκτη πλαστιμότητας, του μήκους πλαστικής άρθρωσης όπως και της μέγιστης παραμόρφωσης του εφελκυσμένου χάλυβα. Αλλά σε γενικές γραμμές δε δείχνει να επηρεάζει ιδιαίτερα τη συνολική συμπεριφορά της διατομής. Το μήκος της πλαστικής άρθρωσης παρουσιάζει μείωση.

Τα αποτελέσματα των κανονισμών από την άλλη πλευρά εκτιμούν ότι η αύξηση της θλιπτικής αντοχής αυξάνει την πλαστιμότητα, όπως φαίνεται τόσο από την αύξηση του δείκτη όσο και από την αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης του χάλυβα.

Εδώ παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των κανονισμών δείχνουν να είναι συγκρίσιμα με το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης (step 45) κατά το οποίο όμως όπως προαναφέρθηκε η διατομή βρίσκεται πλήρως υπό εφελκυσμό.

Όσον αφορά τον πρόβολο IVβ με μικρή θλιπτική αντοχή, η ανάλυση στο λογισμικό έδειξε ότι η αστοχία του είναι ψαθυρή, χωρίς να συνοδεύεται από διαρροή εφελκυσμένων οπλισμών και οφείλεται στη σύνθλιψη του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης. Επομένως, δε μπορεί να συνεχιστεί η αποτίμηση σύμφωνα με τα κανονιστικά πλαίσια.

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 9: Σύγκριση δεικτών πλαστιμότητας για τους προβόλους I, IVα, IVβ.

	fe77	ΚΑΝ.ΕΠΕ.	EC8-3 (κύρια)	EC8-3 (δευτερεύοντα)
<b>Πρόβολος I</b>	1.57	6.74	4.57 1.72	6.85 3.45
<b>Πρόβολος IVα_step39</b>	1.50	7.71	5.22 2.65	7.84 5.30
<b>Πρόβολος IVα_step45</b>	5.60	7.71	5.22 2.65	7.84 5.30
<b>Πρόβολος IVβ</b>	-			

Πίνακας 6. 10: Σύγκριση φορτίων διαρροής και αστοχίας για τους προβόλους I, IVα, IVβ.

	fe77	ΚΑΝ.ΕΠΕ.
<b>Πρόβολος I</b>	70 76	72.10
<b>Πρόβολος IVα_step39</b>	72 78	72.46
<b>Πρόβολος IVα_step45</b>	72 100.34	72.46
<b>Πρόβολος IVβ</b>	30	

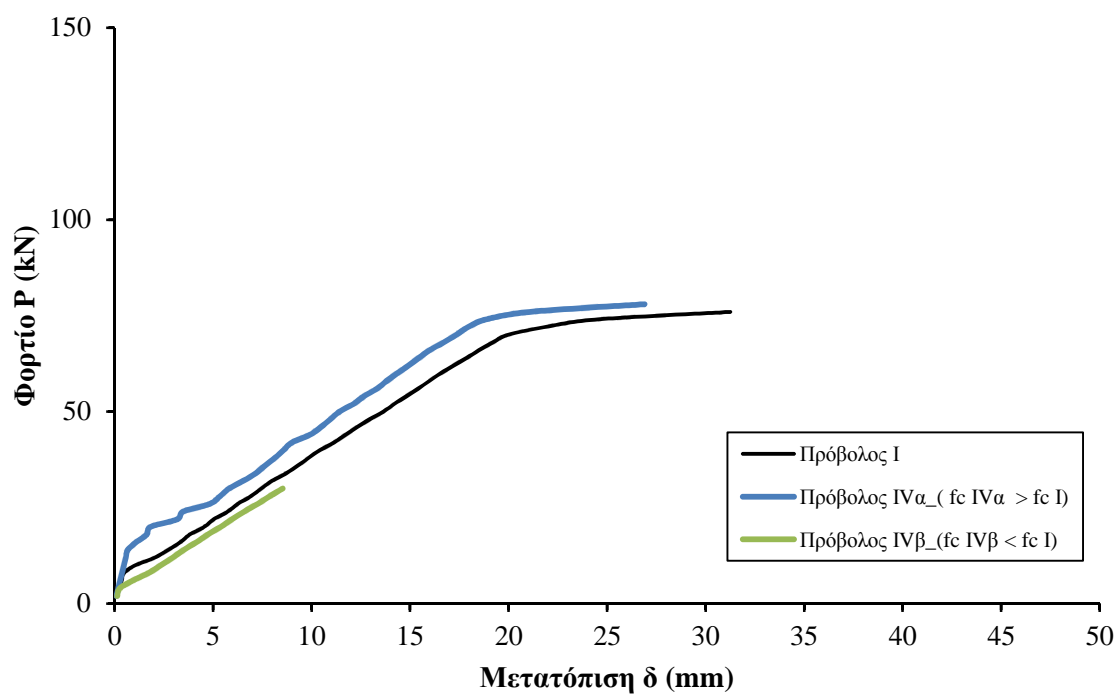
Πίνακας 6. 11: Σύγκριση μηκών πλαστικής άρθρωσης για τους προβόλους I, IVα, IVβ.

	fe77	EC8-3	ATC-40	NZSEE 2006
<b>Πρόβολος I</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IVα_step39</b>	0.225	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IVα_step45</b>	0.675	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος IVβ</b>				

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 12: Σύγκριση μέγιστης παραμόρφωσης εφελκόμενου χάλυβα στο στάδιο χάλυβας για τους προβόλους I, IVα, IVβ.

	fe77	EC8-3
<b>Πρόβολος I</b>	15.26	15.49
<b>Πρόβολος IVα_step39</b>	14.55	36.25
<b>Πρόβολος IVα_step45</b>	76.71	36.25
<b>Πρόβολος IVβ</b>	0.93	



Σχήμα 6. 3: Διαγράμματα φορτίου –μετακίνησης  $P - \delta$  των προβόλων I, IVα και IVβ.

## **6.5 Επιρροή της τάσης διαρροής του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης**

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των προβόλων I, Va και Vb, στις οποίες το μοναδικό χαρακτηριστικό που παρουσίαζε μεταβολή ήταν η τάση διαρροής του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή της στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης.

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μη – γραμμική ανάλυση από το λογισμικό fe77, φαίνεται ότι η αύξησή της έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της πλαστιμότητας καθώς τόσο ο δείκτης όσο και η μέγιστη παραμόρφωση αλλά και το μήκος πλαστικής άρθρωσης παρουσιάζουν μείωση.

Η ίδια τάση φαίνεται να επικρατεί και στα αποτελέσματα των κανονισμών, καθώς προβλέπουν τα παραπάνω αποτελέσματα (εκτός της μείωσης του μήκους πλαστικής άρθρωσης που παραμένει ίδιο) αλλά με αυξημένες τις αντίστοιχες τιμές.

Η μείωση της τάσης διαρροής φαίνεται κατά τους κανονισμούς να αυξάνει την πλαστιμότητα και να μειώνει την αντοχή. Αυτό παρατηρείται να συμβαίνει για τα αποτελέσματα του λογισμικού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης (step 23), που όμως κατά το οποίο, το μεγαλύτερο τμήμα της ακραίας διατομής λειτουργεί υπό εφελκυσμό, καθώς και οι θλιβόμενες ράβδοι εφελκύνονται. Επομένως, αν η σύγκριση γίνει με το τελευταίο βήμα (step 20) κατά το οποίο η ακραία διατομή διατηρεί την καμπτική εντατική κατάσταση, τα αποτελέσματα δείχνουν να παρουσιάζουν αντίθεση με εκείνα των κανονισμών σε θέματα πλαστιμότητας, καθώς ο δείκτης πλαστιμότητας, το μήκος πλαστικής άρθρωσης και η μέγιστη παραμόρφωση του εφελκυσμένου οπλισμού παρουσιάζουν μείωση σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του προβόλου I.

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 13: Σύγκριση δεικτών πλαστιμότητας για τους προβόλους I, Va, Vβ.

	fe77	ΚΑΝ.ΕΠΕ.	EC8-3 (κύρια)	EC8-3 (δευτερεύοντα)
<b>Πρόβολος I</b>	1.57	6.74	4.57 1.72	6.85 3.45
<b>Πρόβολος Va_step20</b>	1.50	10.53	7.21 3.41	10.82 6.82
<b>Πρόβολος Va_step23</b>	6.07	10.53	7.21 3.41	10.82 6.82
<b>Πρόβολος Vβ</b>	1.09	5.11	3.45 1.38	5.18 2.76

Πίνακας 6. 14: Σύγκριση φορτίων διαρροής και αστοχίας για τους προβόλους I, Va, Vβ.

	fe77	ΚΑΝ.ΕΠΕ.
<b>Πρόβολος I</b>	70 76	72.10
<b>Πρόβολος Va_step20</b>	36 40	33.95
<b>Πρόβολος Va_step23</b>	36 40	33.95
<b>Πρόβολος Vβ</b>	92 96	101.07

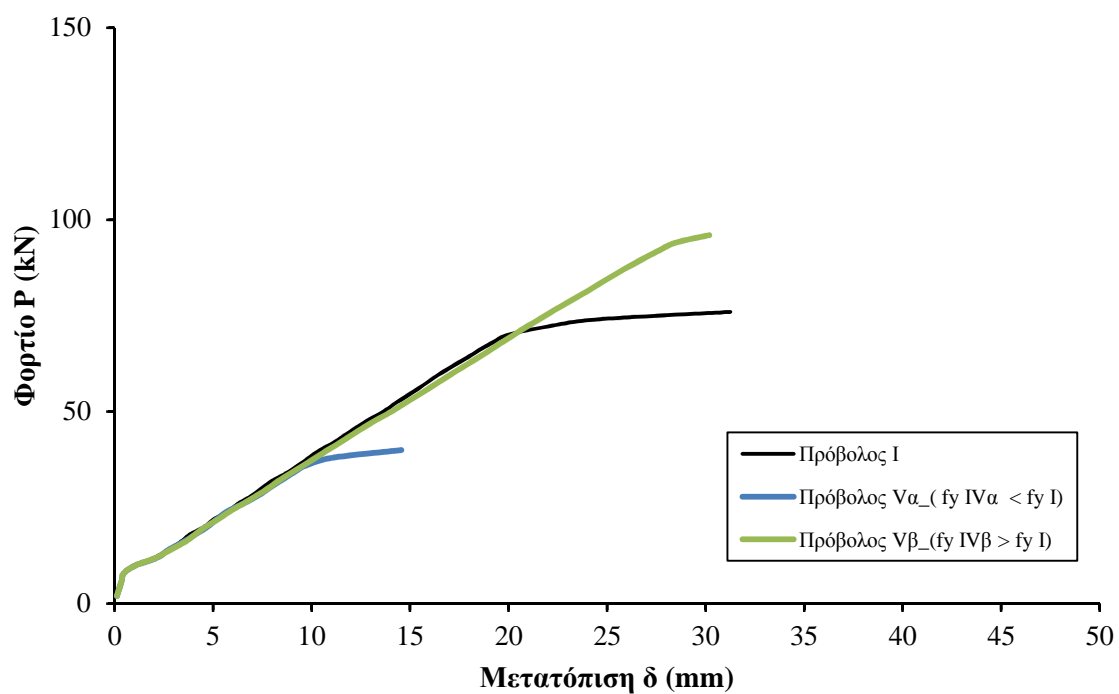
Πίνακας 6. 15: Σύγκριση μηκών πλαστικής άρθρωσης για τους προβόλους I, Va, Vβ.

	fe77	EC8-3	ATC-40	NZSEE 2006
<b>Πρόβολος I</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος Va_step20</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος Va_step23</b>	0.525	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος Vβ</b>	0.075	0.394	0.276	0.276 0.240

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 16: Σύγκριση μέγιστης παραμόρφωσης εφελκόμενου χάλυβα στο στάδιο χάλυβας για τους προβόλους I, Va, Vβ.

	fe77	EC8-3
<b>Πρόβολος I</b>	15.26	15.49
<b>Πρόβολος Va_step20</b>	6.00	31.77
<b>Πρόβολος Va_step23</b>	38.68	31.77
<b>Πρόβολος Vβ</b>	5.44	15.55



Σχήμα 6. 4: Διαγράμματα φορτίου –μετακίνησης  $P-\delta$  των προβόλων I, Va και Vβ.

## 6.6 Επιρροή του εγκάρσιου οπλισμού στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των προβόλων I, VIα και VIβ, στις οποίες το μοναδικό χαρακτηριστικό που παρουσίαζε μεταβολή ήταν το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή του στη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης.

Τόσο τα αποτελέσματα του λογισμικού, όσο και τα αποτελέσματα της αποτίμησης σύμφωνα με τους κανονισμούς δείχνουν την ευεργετική επιρροή της αύξησης του εγκάρσιου οπλισμού στην πλαστιμότητα.

Από τα αποτελέσματα της μη – γραμμικής ανάλυσης από το λογισμικό fe77, παρατηρείται αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας και της μέγιστης παραμόρφωσης του εφελκυσμένου χάλυβα, ενώ το μήκος της πλαστικής άρθρωσης και η αντοχή δεν παρουσιάζουν μεταβολή.

Στο ίδιο μήκος κύματος με υπερεκτίμηση των μεγεθών (εκτός του μήκους πλαστικής άρθρωσης) κινούνται και οι κανονισμοί με τη μόνη διαφορά την αύξηση της αντοχής.

Η μείωση του εγκάρσιου οπλισμού φαίνεται να οδηγεί σε μείωση του δείκτη πλαστιμότητας, της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης και του μήκους πλαστικής άρθρωσης, με τα φορτία διαρροής και αστοχίας να μην παρουσιάζουν διαφορά.

Οι κανονισμοί προβλέπουν τη μείωση της πλαστιμότητας, με τιμές των αντίστοιχων μεγεθών μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από τη μη – γραμμική ανάλυση. Επίσης προβλέπεται και μείωση των φορτίων διαρροής και αστοχίας.

Πίνακας 6. 17: Σύγκριση δεικτών πλαστιμότητας για τους προβόλους I, VIα, VIβ.

	fe77	KAN.ΕΠΕ.	EC8-3 (κύρια)	EC8-3 (δευτερεύοντα)
<b>Πρόβολος I</b>	1.57	6.74	4.57 1.72	6.85 3.45
<b>Πρόβολος VIα</b>	1.64	7.52	5.09 1.87	7.64 3.73
<b>Πρόβολος VIβ</b>	1.23	6.45	4.37 1.65	6.56 3.30

Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα

Πίνακας 6. 18: Σύγκριση φορτίων διαρροής και αστοχίας για τους προβόλους I, VIα, VIβ.

	fe77	KAN.ΕΠΕ.
<b>Πρόβολος I</b>	70 76	72.10
<b>Πρόβολος VIα</b>	70 76	87.65 87.65
<b>Πρόβολος VIβ</b>	70 74	63.21 63.21

Πίνακας 6. 19: Σύγκριση μηκών πλαστικής άρθρωσης για τους προβόλους I, VIα, VIβ.

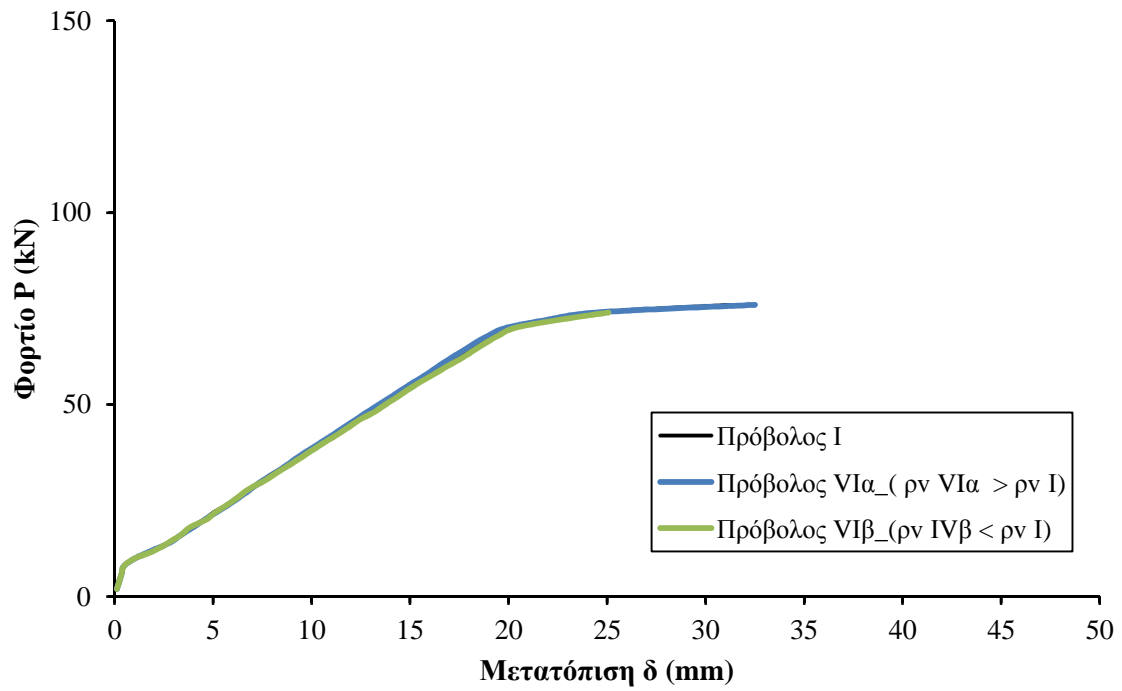
	fe77	EC8-3	ATC-40	NZSEE 2006
<b>Πρόβολος I</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος VIα</b>	0.283	0.394	0.276	0.276 0.240
<b>Πρόβολος VIβ</b>	0.225	0.394	0.276	0.276 0.240

Πίνακας 6. 20: Σύγκριση μέγιστης παραμόρφωσης εφελκόμενου χάλυβα στο στάδιο χάλυβας για τους προβόλους I, VIα, VIβ.

	fe77	EC8-3
<b>Πρόβολος I</b>	15.26	15.49
<b>Πρόβολος VIα</b>	19.94	21.49
<b>Πρόβολος VIβ</b>	7.04	16.36



Κεφάλαιο 6  
Συμπεράσματα



Σχήμα 6. 5: Διαγράμματα φορτίου –μετακίνησης  $P - \delta$  των προβόλων I, VIα και VIβ.

## 6.7 Σχόλια - παρατηρήσεις

Από την παραπάνω σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων μη – γραμμικής ανάλυσης και αποτελεσμάτων αποτίμησης των κανονισμών προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

1) Υπάρχουν περιπτώσεις που τα αποτελέσματα των δύο αποτιμήσεων παρουσιάζουν μία ποιοτική σύγκλιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι κανονισμοί φαίνεται να υπερεκτιμούν την πλαστιμότητα των στοιχείων. Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, αυτό φαίνεται να οφείλεται στην υπερεκτίμηση των παραμορφωσιακών μεγεθών κυρίως κατά το στάδιο της αστοχίας και όχι τόσο κατά το στάδιο της διαρροής.

2) Η δεύτερη κατηγορία αποτελεσμάτων είναι αυτή στην οποία τα αποτελέσματα της μη – γραμμικής ανάλυσης προκύπτουν αντίθετα με εκείνα των κανονισμών όσον αφορά το στάδιο της αστοχίας. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, ομοιότητα στα αποτελέσματα φάνηκε να υπάρχει σε στάδιο κατά το οποίο η ακραία διατομή λειτουργούσε πλέον υπό πλήρη εφελκυσμό και δεν υπήρχε καμπτική ένταση.

3) Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σταθερή τιμή του μήκους πλαστικής άρθρωσης που προβλέπεται από τους κανονισμούς για όλα τα εξεταζόμενα δομικά στοιχεία, που σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μη – γραμμικών αναλύσεων φαίνεται να επηρεάζεται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του στοιχείου και όχι μόνο από τα γεωμετρικά.

4) Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., η τιμή του δείκτη πλαστιμότητας για μετακινήσεις και στροφές που αποτελεί όριο μεταξύ ψαθυρής και πλάστιμης συμπεριφοράς είναι ίση με 2.00. Από τις αναλύσεις φάνηκε ότι διατομές που επέδειξαν πλάστιμη συμπεριφορά, χαρακτηρίστηκαν από δείκτη πλαστιμότητας με τιμή μικρότερης του 2.00.

5) Η έννοια της ψαθυρής συμπεριφοράς στα κανονιστικά πλαίσια φαίνεται να εντοπίζεται μόνο στην αστοχία λόγω διάτμησης, δηλαδή εφόσον η δρώσα ξεπεράσει τη συνολική τέμνουσα αντοχής και όχι στο ενδεχόμενο «καμπτικής ψαθυρής» αστοχίας, με σύνθλιψη του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης, κατάσταση που παρατηρείται σε υπεροπλισμένα στοιχεία και στοιχεία με μικρή αντοχή σκυροδέματος.

## Βιβλιογραφία

- [1] "Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes", New Zealand Society for Earthquake Engineering, June 2006.
- [2] "ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", Applied Technology Institute, California, November 1996.
- [3] "CNR-DT 200/2004 "Guide for the design and the construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures", Rome, July 13 2004.
- [4] "Eurocode 2: Design of concrete structures", European Committee for Standardisation (CEN), 2004.
- [5] "Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings", European Committee for Standardisation (CEN), March 2005.
- [6] "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", European Committee for Standardisation (CEN), 2004.
- [7] "FEMA 356 - PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS", Washington D.C., November 2000.
- [8] "Ε.Κ.Ω.Σ. 2000 Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000", Ο.Α.Σ.Π. - Σ.Π.Μ.Ε., 2000.
- [9] "ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) 1η Αναθεώρηση Ιούλιος 2013", Ο.Α.Σ.Π., Αθήνα, 2013.
- [10] F. J. Vecchio, W. Shim., "Experimental and Analytical Reexamination of Classic Concrete Beam Tests", Journal of Structural Engineering © ASCE, pp. 460-469, March 2004.
- [11] K. V. Spiliopoulos, G. Ch. Lykidis, "An efficient three-dimensional solid finite element dynamic analysis of reinforced concrete structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 137-157, July 26, 2005.
- [12] Mpampatsikos V., "A critical review of the R.C. frame existing building assessment procedure according to Eurocode 8 and Italian Seismic Code", A dissertation submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master Degree in Earthquake Engineering, Instituto Universitario di Studi Superiori, Università degli Studi di Pavia, May 2008.
- [13] Paulay T. & Priestley M., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley & Sons, New York, 1992.

[14] Αντωνόπουλος Θεμιστοκλής, "Σεισμική συμπεριφορά παλαιών κτιρίων με pilotis και πρακτικές προτάσεις βελτίωσής της", Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης", Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2008.

[15] Καραγιάννης Γ. Χρήστος "Σχεδιασμός κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα έναντι σεισμού", Εκδόσεις "σοφία", Θεσσαλονίκη, 2008.

[16] Λυκίδης Γεώργιος, "Στατική και δυναμική ανάλυση κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με χρήση τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων διανεμημένης ρηγμάτωσης", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ιούνιος 2007.

[17] Μπισκίνης Διονύσης, "Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ή χωρίς ενίσχυση", Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2007.