

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ  
ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΕΡΓΟΥ**

ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ  
ΕΚΘΕΣΗ

ΤΕΛΙΚΗ

Τίτλος Έργου : **Διερεύνηση της συμπεριφοράς παλαιού τύπου  
υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

Α/Α ΕΚΘΕΣΗΣ: **3 (Επανυποβολή τελικής έκθεσης – Αναθεώρηση 7-2-2012)**

**Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος  
& Φέρουσας Τοιχοποιίας  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**



## Περιεχόμενα

### 1. Στοιχεία έργου

1.1. Τίτλος έργου.....	4
1.2. Επιστημονικός Υπεύθυνος Έργου.....	4
1.3. Ανάδοχος.....	4
1.4. Διάρκεια έργου.....	4
1.5. Απόφαση έγκρισης εκτέλεσης έργου και τροποποιήσεις αυτής.....	4

### 2. Φυσικό αντικείμενο

2.1. Περίληψη πραγματοποιηθεισών εργασιών.....	5
2.2. Διάρθρωση παρούσας έκθεσης.....	6
2.3. Αναλυτική Περιγραφή των Πακέτων Εργασίας που υλοποιήθηκαν.....	7

#### Πακέτο Εργασίας 1.1 (Προσομοίωμα διεπιφάνειας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση)

1.1.1. Εισαγωγή.....	7
1.1.2. Αναλυτικό προσομοίωμα στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.....	8
1.1.2.1. Μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.....	9
1.1.2.2. Καθορισμός απαίτησης διατμητικών τάσεων στις διεπιφάνειες μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα.....	17
1.1.3. Παρουσίαση υπολογιστικού αλγορίθμου.....	19
1.1.4. Βιβλιογραφία Π.Ε. 1.1.....	22

#### Πακέτο Εργασίας 1.2 (Πειραματική βάση δεδομένων)

1.2.1. Εισαγωγή.....	24
1.2.2. Ποιοτικά χαρακτηριστικά της πειραματικής βάσης.....	24
1.2.3. Παρουσίαση των μελετών της πειραματικής βάσης.....	25
1.2.4. Επεξεργασία των δεδομένων.....	26
1.2.4.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες όπλισης αρχικού και ενισχυμένου στοιχείου.....	26
1.2.4.2. Διγραμμική προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών απόκρισης.....	32
1.2.5. Αποτελέσματα της επεξεργασίας.....	34
1.2.6. Βιβλιογραφία Π.Ε. 1.2.....	40
Παράρτημα Π.Ε. 1.2.....	41

#### Πακέτο Εργασίας 1.3 (Ανάπτυξη λογισμικού βάσει προτεινόμενου προσομοιώματος)

1.3.1. Γενικά.....	56
1.3.2. Γενικό προγραμματιστικό πλαίσιο.....	56
1.3.3. Μονοαξονικός καταστατικός νόμος χάλυβα (TSteelMP).....	57
1.3.4. Μονοαξονικός καταστατικός νόμος σκυροδέματος (TConcreteConstantConfinement).....	61
1.3.5. Μονοαξονικός καταστατικός νόμος διεπιφάνειας (TInterface).....	67
1.3.5.1. Περιβάλλουσες καταστατικών νόμων δράσης βλήτρου και τριβής.....	68
1.3.5.2. Αλληλεπίδραση φαινομένων δράσης βλήτρου και τριβής.....	70
1.3.5.3. Κανόνες ανακύκλισης για τους καταστατικούς νόμους δράσης βλήτρου και τριβής.....	71
1.3.6. Αναλυτικό προσομοίωμα στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.....	79
1.3.6.1. Γενικά.....	79
1.3.6.2. Δεδομένα του προβλήματος.....	79
1.3.6.3. Βασικοί υπολογισμοί διατομής.....	81
1.3.6.4. Επίλυση του μη-γραμμικού προβλήματος.....	84
1.3.7. Έλεγχος αξιοπιστίας προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος.....	90
1.3.8. Διερεύνηση παραμέτρων απομείωσης αντοχής λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης.....	94
1.3.9. Βιβλιογραφία Π.Ε. 1.3.....	98

<b>Πακέτο Εργασίας 2.1 (Ανάπτυξη υπολογιστικού προσομοιώματος πεπερ. στοιχείων)</b>	
2.1.1 Γενικά.....	99
2.1.2 Λογισμικό και μεθοδολογία προσομοίωσης).....	99
2.1.2.1 Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες.....	100
2.1.2.2 Καταστατικοί νόμοι.....	102
2.1.2.3 Φόρτιση.....	105
2.1.2.4 Διαδικασία επίλυσης.....	106
<b>Πακέτο Εργασίας 2.2 (Προσομοίωση πειραματικών δοκιμών και συγκρίσεις)</b>	
2.2.1 Γενικά.....	107
2.2.2 Πιλοτικό προσομοίωμα δοκιμίου Q-RC (Bousias et al., 2007).....	107
2.2.3 Βιβλιογραφία Π.Ε. 2.1 & 2.2.....	110
<b>Πακέτο Εργασίας 3.1 (Αναλυτικές εκφράσεις για τον καθορισμό δεικτών απόκρισης)</b>	
3.1.1 Εισαγωγή.....	111
3.1.2 Δείκτες απόκρισης.....	111
3.1.3 Αναλυτικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.....	115
3.1.4 Αξιολόγηση εκφράσεων ΚΑΝΕΠΕ (2011) για τους δείκτες απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.....	121
3.1.5 Βιβλιογραφία Π.Ε. 3.1.....	129
<b>Πακέτο Εργασίας 3.2 (Σχέσεις για τη συνολική στρόφη του σύνθετου στοιχείου)</b>	
3.2.1 Εισαγωγή.....	130
3.2.2 Υπολογισμός στρόφης διαρροής και αστοχίας στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ.....	131
3.2.3 Ορισμός συντελεστών μονολιθικότητας.....	133
3.2.4 Βιβλιογραφία Π.Ε. 3.2.....	134
<b>Πακέτο Εργασίας 3.3 (Παραμετρική διερεύνηση και συντελεστές μονολιθικότητας)</b>	
3.3.1 Εισαγωγή.....	135
3.3.2 Περιγραφή παραμετρικής διερεύνησης.....	135
3.3.3 Ορισμός σημείου διαρροής και αστοχίας.....	136
3.3.4 Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης.....	136
3.3.5 Αναλυτικές εκφράσεις για τους συντελεστές μονολιθικότητας δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.....	154
3.3.6 Πειραματικές τιμές για τους συντελεστές μονολιθικότητας δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.....	157
3.3.7 Σύγκριση προτεινόμενων εκφράσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες με πειραματικές τιμές.....	161
3.3.8 Σχολιασμός αποτελεσμάτων παραμετρικής – Συμπεράσματα.....	164
3.3.9 Βιβλιογραφία Π.Ε. 3.3.....	165
Παράρτημα Π.Ε. 3.3.....	166
2.4 Συνολικά αποτελέσματα και παραδοτέα του έργου.....	168
2.4.1 Αποτελέσματα και αξιοποίηση.....	168
2.4.2 Κατάλογος δημοσιεύσεων στο πλαίσιο του έργου.....	168
<b>3. Σχόλια – Προβλήματα – Παρατηρήσεις</b>	
3.1. Τεχνολογία / Τεχνογνωσία που αποκτήθηκε στο πλαίσιο του έργου.....	169
3.2. Λοιπές παρατηρήσεις.....	169

## 1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ

### 1.1. Τίτλος έργου

**Διερεύνηση της συμπεριφοράς παλαιού τύπου υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

### 1.2. Επιστημονικός Υπεύθυνος Έργου

Όνοματεπώνυμο	ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΑΠΠΟΣ
Φορέας:	ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
Θέση:	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Διεύθυνση:	ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥΠΟΛΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 54124
Τηλ.:	2310-995614
E-mail:	ajkap@civil.auth.gr

### 1.3. Ανάδοχος

Επωνυμία:	ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
Διεύθυνση:	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥΠΟΛΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 54124
Τηλ.:	2310 996709
E-mail:	research@rc.auth.gr

### 1.4. Διάρκεια έργου:

Μήνες	:	<b>16</b>
Ημερομηνία έναρξης	:	<b>21.02.2010</b>
Ημερομηνία λήξης	:	<b>21.06.2011</b>
Ημερομηνία υποβολής αναθεωρημένης τελικής έκθεσης	:	<b>7.2.2012</b>

### 1.5. Απόφαση έγκρισης εκτέλεσης έργου και τροποποιήσεις αυτής

	ΑΡ. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΙΤΙΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΑΡΧΙΚΗ ΑΠΟΦΑΣΗ (ΔΣ ΟΑΣΠ)	53	16-10-2009	
ΑΠΟΦΑΣΗ ΠΑΡΑΤΑΣΗΣ (ΔΣ ΟΑΣΠ)	111	25-2-2011	βλ.σχετικό έγγραφο ερευν. ομάδας (21/1/11)

## 2. ΦΥΣΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

### 2.1. Περίληψη πραγματοποιηθεισών εργασιών

#### **ΦΑΣΗ 1: Ανάπτυξη αναλυτικού προσομοιώματος υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

- Π.Ε. 1.1:** Αναπτύχθηκε προσομοίωμα για τη διατμητική συμπεριφορά στη διεπιφάνεια υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Αφτηρία του προσομοιώματος αποτέλεσε το αντίστοιχο υπό συνθήκες μονότονης φόρτισης των Thermou et al. (2004, 2007), Θερμού (2007), το οποίο λαμβάνει υπόψη τους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας και τη σχετική ολίσθηση κατά μήκος των διεπιφανειών που δημιουργούνται μεταξύ των διαφόρων φάσεων του στοιχείου μετά την ενίσχυση / επισκευή, υπό μονότονη φόρτιση.
- Π.Ε. 1.2:** Συγκροτήθηκε πειραματική βάση δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τα πειραματικά δεδομένα υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία (με χρήση και διαφορετικών προσεγγίσεων) για την εξαγωγή μηχανικών χαρακτηριστικών όπως μετακίνηση διαρροής και αστοχίας, στροφή διαρροής και αστοχίας, αντοχή διαρροής, μέγιστη αντοχή, πλαστιμότητα μετακινήσεων, πλαστιμότητα στροφών.
- Π.Ε. 1.3:** Αναπτύχθηκε λογισμικό βάσει του προτεινόμενου υπολογιστικού αλγορίθμου, τόσο σε επίπεδο καταστατικών νόμων υλικών όσο και σε επίπεδο απόκρισης της ενισχυμένης διατομής σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση με συνυπολογισμό της δράσης διεπιφάνειας. Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος.

#### **ΦΑΣΗ 2: Ανάπτυξη υπολογιστικού προσομοιώματος με πεπερασμένα στοιχεία στο χώρο υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

- Π.Ε. 2.1:** Ολοκληρώθηκε η περιγραφή της γενικής μεθοδολογίας προσομοίωσης υποστυλωμάτων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ, με τη μέθοδο των μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο.
- Π.Ε. 2.2:** Ολοκληρώθηκε η προσομοίωση πραγματικών πειραματικών δοκιμών με στόχο τη βέλτιστη δυνατή σύγκλιση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων και εξήχθησαν συγκριτικά αποτελέσματα.

#### **ΦΑΣΗ 3: Εκτεταμένη παραμετρική διερεύνηση με στόχο την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων παραμορφωσιμότητας, αντοχής και συντελεστών μονολιθικότητας**

- Π.Ε. 3.1:** Συγκεντρώθηκαν και παρουσιάστηκαν οι αναλυτικές εκφράσεις που προτείνονται για τον καθορισμό διαφόρων δεικτών απόκρισης (αντοχής και παραμορφωσιμότητας) στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ 2011) και τον Ευρωκώδικα 8–

Μέρος 3 (2005). Διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης αναλυτικών εκφράσεων από τη βιβλιογραφία για τον καθορισμό δεικτών απόκρισης υφιστάμενων στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ. Η πειραματική βάση του Π.Ε. 1.2 χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των παραπάνω εκφράσεων. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία των προτεινόμενων αναλυτικών εκφράσεων και εξήχθησαν νέες προτεινόμενες σχέσεις για τον προσδιορισμό δεικτών απόκρισης.

**Π.Ε. 3.2:** Παρουσιάστηκαν οι σχέσεις που ορίζουν την παραμόρφωση του σύνθετου στοιχείου σε όρους στροφών σύμφωνα με το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα. Επιπλέον, για τους σκοπούς του παρόντος έργου, ορίστηκαν διάφοροι συντελεστές μονολιθικότητας, οι οποίοι σχετίζονται με δείκτες παραμορφωσιμότητας και αντοχής.

**Π.Ε. 3.3:** Ολοκληρώθηκε η εκπόνηση εκτεταμένης παραμετρικής μελέτης με στόχο τον καθορισμό των συντελεστών μονολιθικότητας που παρουσιάστηκαν στο Π.Ε. 3.2. Προτάθηκαν σύνθετες και απλοποιημένες σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών αυτών συναρτήσει των κυριότερων παραμέτρων τους.

## 2.2. Διάρθρωση παρούσας έκθεσης

Η παρούσα τελική έκθεση φυσικού αντικείμενου περιλαμβάνει τη λεπτομερή περιγραφή των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν και το σύνολο των αποτελεσμάτων του ερευνητικού έργου. Με τον τρόπο αυτόν το όλο υλικό διαρθρώνεται με μια λογική σειρά, ενώ είναι ευχερέστερη και η κοινοποίηση - διανομή του προς τυχόν ενδιαφερομένους (πέραν του φορέα χρηματοδότησης).

Για διευκόλυνση των κριτών του ερευνητικού πρόγρμματος στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται λεπτομερώς η αντιστοιχία των προβλεπόμενων στη σύμβαση παραδοτέων με τις ενότητες της παρούσας έκθεσης.

<b>Π1</b>	Πειραματική βάση δεδομένων για τη μηχανική συμπεριφορά στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ	§1.2.1÷1.2.6 και Παράρτ. ΠΕ1.2
<b>Π2</b>	Αναλυτικό προσομοίωμα για την περιγραφή της συμπεριφοράς στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ	§1.1.1÷1.1.3
<b>Π3</b>	Έλεγχος αξιοπιστίας του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος με πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας	§1.3.7÷1.3.8
<b>Π4</b>	Ανάπτυξη λογισμικού βάσει του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος	§1.3.1÷1.3.6
<b>Π5</b>	Χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στο χώρο (3D Finite Element Analysis) για την προσομοίωση του σύνθετου συστήματος υπό το πρίσμα και του αναλυτικού προσομοιώματος – Προσομοίωση φαινομένων στη διεπιφάνεια όπως η απόσχιση του μανδύα - Σύγκριση υπολογιστικού με αναλυτικό προσομοίωμα	§2.1.1÷2.1.2 §2.2.1÷2.2.2
<b>Π6</b>	Εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων παραμορφωσιμότητας, αντοχής καθώς και συντελεστών μονολιθικότητας για διάφορες περιπτώσεις σύνθετων διατομών μέσω εκτεταμένης παραμετρικής διερεύνησης, κάνοντας χρήση του αναλυτικού και του υπολογιστικού προσομοιώματος – Συγκρίσεις με τιμές Κεφ. 8 ΚΑΝΕΠΕ.	§3.1.1÷3.1.4 §3.2.1÷3.2.3 §3.3.1÷3.3.8 και Παράρτ. ΠΕ 3.3

## 2.3. Αναλυτική Περιγραφή των Πακέτων Εργασίας που υλοποιήθηκαν

### ΦΑΣΗ 1: Ανάπτυξη αναλυτικού προσομοιώματος υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ

#### Πακέτο Εργασίας 1.1 (Προσομοίωμα διεπιφάνειας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση)

##### 1.1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν ερευνητικό έργο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε μια πολύ διαδεδομένη και ευρέως εφαρμοζόμενη (και στην Ελλάδα) μέθοδο, τους μανδύες Ο/Σ, οι οποίοι εφαρμόζονται σε περιπτώσεις στοιχείων όπου επιδιώκεται η αύξηση της καμπτικής αντοχής και δυσκαμψίας. Η μέθοδος θεωρείται καθολικού (σε αντιδιαστολή με το τοπικού) χαρακτήρα όταν ο διαμήκης οπλισμός του μανδύα διαπερνάει την πλάκα σκυροδέματος και τοποθετείται νέο σκυρόδεμα στον κόμβο δοκού - υποστυλώματος (Σχήμα 1.1.1). Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο ό,τι μπορεί να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή της αντίστασης σε σεισμικές δράσεις, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στην περίπτωση προσθήκης τοιχωμάτων (Rodríguez & Park 1991). Μειονεκτήματα στην κατασκευή του μανδύα θεωρούνται ότι η παρουσία δοκών επιβάλλει την τοποθέτηση των περισσοτέρων από τις διαμήκεις ράβδους του μανδύα στις γωνίες του, καθώς και ότι ο πυρήνας του μανδύα (υφιστάμενο υποστύλωμα) θέτει περιορισμούς στην επιλογή του τύπου των συνδετήρων που μπορούν να τοποθετηθούν.



**Σχήμα 1.1.1:** Εφαρμογή μανδυών Ο/Σ ως καθολική μέθοδος ενίσχυσης (Θερμού, 2007).

Το αντικείμενο των επισκευών / ενισχύσεων είναι ιδιαίτερα σύνθετο και συχνά εφαρμόζονται εμπειρικές σχέσεις για τη διαστασιολόγηση των διαφόρων μεθόδων επέμβασης ελλείψει συνεπών αναλυτικών προσομοιωμάτων για την περιγραφή της πολύπλοκης μηχανικής της σύνθετης δράσης των συστημάτων αυτών. Στην περίπτωση στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ, η συνήθης πρακτική, η οποία υιοθετείται και από τους σχετικούς κανονισμούς προς απλούστευση της πολύπλοκης διαδικασίας υπολογισμών που ενέχει η συνεπής χρήση της μηχανικής της σύμμικτης δράσης στοιχείων ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, αφορά στην αντιμετώπιση της ενισχυμένης διατομής ως μονολιθικής (παραδοχή πλήρους πρόσφυσης στη διεπιφάνεια μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος) όπου η διαστασιολόγηση των μανδυών Ο/Σ γίνεται

με βάση τα χαρακτηριστικά της μονολιθικής διατομής, πολλαπλασιασμένα με κατάλληλους μειωτικούς συντελεστές ή συντελεστές μονολιθικότητας.

Αντικείμενο του παρόντος ερευνητικού έργου, το οποίο εντάσσεται στο πλαίσιο της αποτίμησης και σεισμικής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών Ο/Σ, είναι η συστηματική διερεύνηση της συμπεριφοράς παλαιού τύπου υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ, και η εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων για τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου συστήματος και τους σχετικούς συντελεστές μονολιθικότητας. Για το σκοπό αυτόν αναπτύσσεται αναλυτικό προσομοίωμα, το οποίο έχει ως αφετηρία προγενέστερη έρευνα των Theriou *et al.* (2004, 2007), Θερμού (2007), για την εκτίμηση της απόκρισης στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ. Η σύμικτη δράση που αναπτύσσουν τα ενισχυμένα στοιχεία εξαρτάται σημαντικά από τη μεταφορά δυνάμεων μεταξύ του πυρήνα (υφιστάμενο στοιχείο) και του μανδύα. Η εκτίμηση της αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσης τέτοιων στοιχείων είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα μηχανικής, το οποίο γίνεται ακόμη πιο σύνθετο και λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης αλλά και λόγω της περιορισμένης γνώσης των μηχανισμών αντίστασης της διεπιφάνειας, όπως τριβή, αλληλεμπλοκή των αδρανών, και δράση βλήτρου.

Το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα μετά τον έλεγχο αξιοπιστίας του με πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της Φάσης 3 για την εξαγωγή εκφράσεων σχεδιασμού και συντελεστών μονολιθικότητας και βαθμονόμησης των σχετικών διατάξεων του ΚΑΝΕΠΕ (2011) (κυρίως της §8.2.1.5).

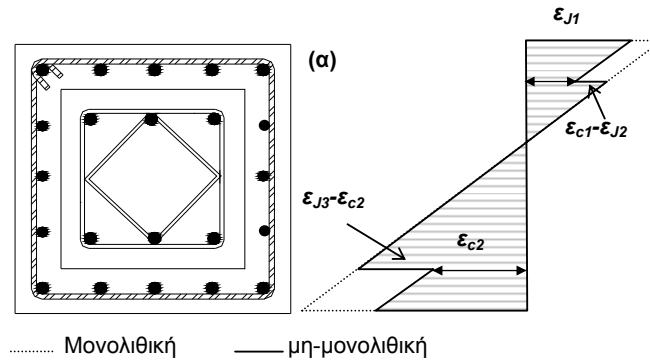
### **1.1.2 Αναλυτικό προσομοίωμα στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση**

Το αναλυτικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου για να περιγράψει την απόκριση υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ έχει ως αφετηρία προγενέστερη έρευνα των Theriou *et al.* (2004, 2007), Θερμού (2007), με επέκτασή της σε συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης, κάτι το οποίο απαιτεί μια σειρά ουσιαδών προσαρμογών και προσθηκών. Σύμφωνα με το προσομοίωμα αυτό εισάγεται ένας βαθμός ελευθερίας, επιτρέποντας τη σχετική ολίσθηση μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα. Η ολίσθηση κατά μήκος του στοιχείου οφείλεται στη διαφορά των ορθών παραμορφώσεων στις δυο διεπιφάνειες που δημιουργούνται (Σχήμα 1.1.2). Για την ανάλυση της αντοχής σε κάμψη, η διατομή χωρίζεται σε τρία τμήματα, τα οποία κάμπτονται με την ίδια καμπυλότητα,  $\varphi$  (Σχήμα 1.1.2). Τα δυο εξωτερικά αντιπροσωπεύουν τη συμβολή του μανδύα, ενώ το μεσαίο τμήμα αποτελείται από τον πυρήνα (υφιστάμενη διατομή) και τον κορμό του μανδύα.

Η ολίσθηση ενεργοποιεί τους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας στις διεπιφάνειες, όπως την αλληλεμπλοκή των αδρανών, την τριβή λόγω λειτουργίας σφινγκτήρα του οπλισμού, και τη δράση βλήτρου των ράβδων οπλισμού. Βασικό στοιχείο του προσομοιώματος είναι η σχέση τάσεων - παραμορφώσεων που περιγράφει τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Η περιγραφή του κάθε μηχανισμού μεταφοράς τέμνουσας γίνεται από αντίστοιχα μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (βλ. §1.1.2.1), με κατάλληλη προσαρμογή όπου απαιτείται. Η απαίτηση σε διατμητική τάση στη διεπιφάνεια καθορίζεται από τις τάσεις που αναπτύσσονται λόγω κάμψης και από την απόσταση μεταξύ διαδοχικών ρωγμών στη διαμήκη διεύθυνση, ενώ η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας είναι συνάρτηση



της ολίσθησης. Οι παραμορφώσεις ουσιαστικά ελέγχονται από την αντοχή της διεπιφάνειας, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει η απόσταση των ρωγμών. Η διατμητική ροή στη διεπιφάνεια υπολογίζεται ως η διαφορά της συνισταμένης των τάσεων δυο διαδοχικών διατομών. Η διαδικασία εφαρμόζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο που χρησιμοποιεί ανάλυση ‘διπλής διατομής’.



**Σχήμα 1.1.2:** Κατανομή παραμορφώσεων μονολιθικής και μη-μονολιθικής διατομής.

### 1.1.2.1 Μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Η μεταφορά τέμνουσας στη διεπιφάνεια μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος κατά την ολίσθηση αυτής πραγματοποιείται μέσω της ενεργοποίησης των εξής μηχανισμών αντίστασης:

- (i) αλληλεμπλοκή των αδρανών στις επιφάνειες επαφής,
- (ii) τριβή λόγω λειτουργίας σφιγκτήρα του οπλισμού, και
- (iii) δράση βλήτρου των ράβδων οπλισμού με επαρκές μήκος και επικαλύψεις εφόσον διατέμνουν υπό γωνία τη διεπιφάνεια.

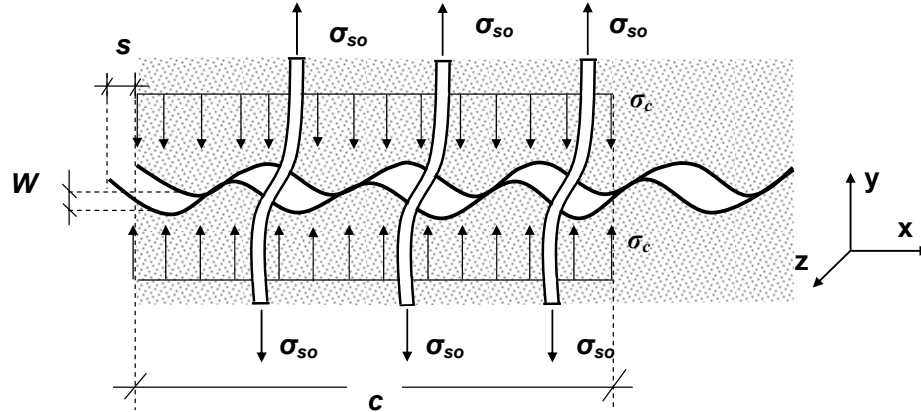
Οι δυο πρώτοι μηχανισμοί αναφέρονται στη συνεισφορά του σκυροδέματος, καθώς βασίζονται στην αντίσταση των διεπιφανειών σε τριβή. Η εξίσωση που περιγράφει την συνεισφορά των επιμέρους μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας είναι:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{agr}} + \sigma_f + \sigma_D = \sigma_{\text{agr}} + \mu\sigma_c + \sigma_D \quad (1.1.1)$$

όπου  $\sigma_{\text{agr}}$  είναι η αντίσταση σε διάτμηση του μηχανισμού αλληλεμπλοκής των αδρανών,  $\mu$  είναι ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια,  $\sigma_c$  είναι η τάση περίσφιγξης που δρα κάθετα στη διεπιφάνεια και  $\sigma_D$  είναι η συμβολή στη διατμητική αντίσταση που οφείλεται στη δράση βλήτρου. Η τάση περίσφιγξης,  $\sigma_c$ , αντιστοιχεί σε κάθε εξωτερική πίεση που ασκείται κάθετα στη διεπιφάνεια, αλλά επίσης και στην τάση περίσφιγξης του οπλισμού που διατέμνει κάθετα τη διεπιφάνεια (Σχήμα 1.1.3). Από την συνθήκη ισορροπίας των κατακόρυφων δυνάμεων προκύπτει ότι:

$$\sigma_c = \nu f_c + \rho \sigma_{so} \quad (1.1.2)$$

όπου  $\sigma_c$  είναι εξωτερική πίεση που ασκείται κάθετα στη διεπιφάνεια,  $\sigma_{so}$  είναι η αξονική τάση των ράβδων οπλισμού που διασχίζουν τη διεπιφάνεια,  $\rho$  είναι το αντίστοιχο ποσοστό οπλισμού,  $v=N/(A_c f_c)=\sigma_c/f_c$  είναι το ανηγμένο αξονικό φορτίο στη διεπιφάνεια (εμβαδού  $A_c$ ) και  $f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.



Σχήμα 1.1.3: Ολίσθηση των ράβδων που διατρέχουν τη διεπιφάνεια

Επομένως, η τελική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει τους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας διαμορφώνεται ως εξής (Σχήμα 1.1.4):

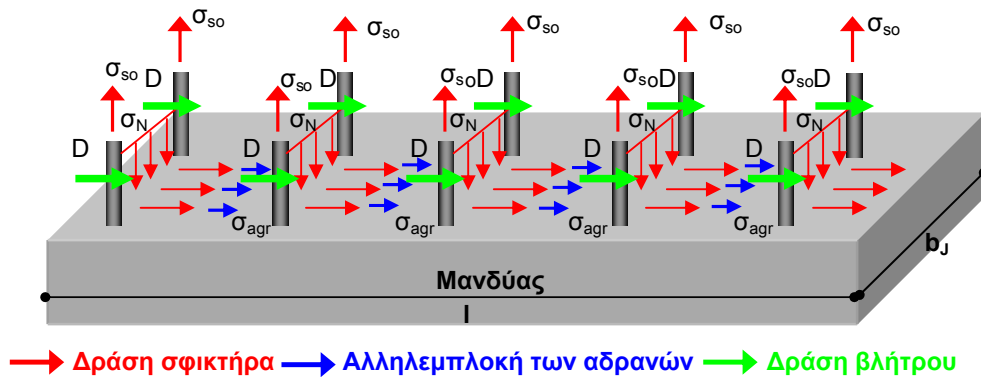
$$\sigma_{tot} = \sigma_{agr} + \sigma_f + \sigma_D = \underbrace{\sigma_{agr}}_{\text{αλληλεμπλοκή αδρανών}} + \underbrace{\mu(vf_c + \rho\sigma_{so})}_{\text{τριβή}} + \underbrace{\sigma_D}_{\text{δράση βλήτρου}} \quad (1.1.3)$$

Για τις ανάγκες του παρόντος έργου διεξήχθη λεπτομερής βιβλιογραφική έρευνα προκειμένου να εντοπιστούν προσομοιώματα που να περιγράφουν τους επιμέρους μηχανισμούς αντίστασης που ενεργοποιούνται στη διεπιφάνεια έναντι ολίσθησης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η μεταφορά δυνάμεων στις διεπιφάνειες οπλισμένου σκυροδέματος αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας στο παρελθόν. Αναλυτικά μοντέλα και εκφράσεις έχουν προταθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές, η πλειονότητα των οποίων είτε είναι εμπειρικού τύπου είτε στηρίζονται σε απλουστεύσεις και ενγίνει περιορίζονται στην περιγραφή των μηχανισμών υπό συνθήκες μονότονης φόρτισης.

Τα μοντέλα της βιβλιογραφίας κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν τα μοντέλα στα οποία το σύνολο των δυνάμεων παραλαμβάνεται αποκλειστικά από τον οπλισμό (ACI 318 1995, 1999, 2002, Birkeland & Birkeland 1966, Walraven 1981, Loon & Patnaik 1994), ενώ στη δεύτερη, εκείνα, τα οποία εκτός από τη συμμετοχή του οπλισμού περιλαμβάνουν και έναν όρο συνοχής (Climaco & Regan 2001, Mattock & Hawkins 1972, Mattock et al. 1976, Vecchio & Collins 1986, Tassios & Vintzēleou 1987, Vintzēleou & Tassios 1986, 1987, Mattock 2001, Vassilopoulou & Tassios 2003).

Από τα παραπάνω μοντέλα αυτό των Tassios & Vintzēleou (1987), Vintzēleou & Tassios (1986, 1987) επιλέχθηκε για την περιγραφή των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την απόφαση είναι: (i) μετά από

συστηματική διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας στο πλαίσιο του έργου δεν προέκυψε κάποιο άλλο μοντέλο που να περιγράφει τους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας σε συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης (σημειώνεται ότι το μόνο μοντέλο που συνεκτιμά την ολίσθηση στη διεπιφάνεια μανδύων Ο/Σ είναι των Τσιουλίου & Dritsos (2011) που αναπτύχθηκε για συνθήκες μονότονης φόρτισης), (ii) η αξιοπιστία του μοντέλου στο να εκτιμά με ικανοποιητική ακρίβεια τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος σε συνθήκες μονότονης φόρτισης έχει ήδη πιστοποιηθεί μετά από σύγκριση με τα κυριότερα αναλυτικά προσομοιώματα της διεθνούς βιβλιογραφίας και με πειραματικά δεδομένα της μελέτης των Δημητριάδου και Συνεργ. (2005), όπου μελετήθηκαν οι μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας κατά μήκος διεπιφανειών οπλισμένου σκυροδέματος για 24 δοκίμια διπλής διεπιφάνειας (Θερμού 2007), (iii) το μοντέλο αυτό είναι συμβατό με τις διατάξεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011) που περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 6 (§ 6.1.1.4, § 6.1.1.5, § 6.1.2.2). Σημειώνεται ότι το μοντέλο εκτιμά το συνδυασμό της δράσης βλήτρου και των δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια για δεδομένη τιμή ολίσθησης υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης.



**Σχήμα 1.1.4:** Μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας στη διεπιφάνεια μεταξύ μανδύα και υφιστάμενου στοιχείου.

#### (α) Αντίσταση σε τριβή

##### Μοντέλο των Tassios & Vintzēleou (1987):

Η διατμητική τάση που μεταφέρεται μέσω τριβής συναρτῆσει της ολίσθησης περιγράφεται από την ακόλουθη ομάδα εξισώσεων:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_u} = 1.14 \left( \frac{s}{s_u} \right)^{1/3} \quad \text{για} \quad \frac{s}{s_u} \leq 0.5 \quad (1.1.4\alpha)$$

$$\frac{\tau(s)}{\tau_u} = 0.81 + 0.19 \left( \frac{s}{s_u} \right) \quad \text{για} \quad \frac{s}{s_u} > 0.5 \quad (1.1.4\beta)$$

όπου  $s_u (\approx 2 \text{ mm})$  είναι η μέγιστη τιμή της ολίσθησης, ενώ η μέγιστη διατμητική τάση που μεταφέρεται μέσω τριβής,  $\tau_u$ , ισούται με:

$$\tau_u = \mu (f_c^2 \sigma_c (s_u))^{1/3} \quad (1.1.5)$$

όπου  $\mu$  είναι ο συντελεστής τριβής, ο οποίος συνιστάται να λαμβάνεται ίσος με 0.44,  $f_c$  η θλιπτική αντοχή του ασθενέστερου από τα δύο σκυροδέματα της διεπιφάνειας (συνήθως το σκυρόδεμα του πυρήνα) και  $s$  η τιμή της μέγιστης ολίσθησης.

Η μέγιστη διατμητική τάση που μεταφέρεται μέσω τριβής,  $\tau_u$ , σύμφωνα με την §6.1.1.4 του ΚΑΝΕΠΕ (2011) εξαρτάται από τη θλιπτική αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος της διεπιφάνειας. Σε πρόσφατη πειραματική μελέτη των Júlio et al. (2006) διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος της νέας στρώσης έναντι της θλιπτικής αντοχής της υφιστάμενης, οδηγεί σε βελτίωση της αντοχής της διεπιφάνειας. Επομένως, η επιλογή του να λαμβάνεται υπόψη μόνο η θλιπτική αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος είναι συντηρητική (κάτι που διαπιστώθηκε και στις αναλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο του παρόντος έργου). Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτή η παράμετρος, η σχέση (1.1.5) τροποποιήθηκε με βάση τα πειραματικά δεδομένα των Júlio et al. (2006) ως εξής:

$$\tau_u = \beta \cdot \mu (f_c^2 \sigma_c (s_u))^{1/3} \quad (1.1.6)$$

όπου  $\beta$  είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αύξηση της μέγιστης διατμητικής τάσης που μεταφέρεται λόγω τριβής και εξαρτάται από το λόγο των θλιπτικών αντοχών νέου προς παλαιού σκυροδέματος. Έτσι λοιπόν,  $\beta=1.13$  αν  $f_{c,new}/f_{c,old}=1\sim 1.36$ ,  $\beta=1.13\sim 1.25$  αν  $f_{c,new}/f_{c,old}=1.36\sim 2.75$  και  $\beta=1.25$  αν  $f_{c,new}/f_{c,old} \geq 2.75$ .

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό θεωρείται ότι οι ράβδοι που διατέμνουν κάθετα τη διεπιφάνεια εξολκεύονται συμμετρικά και ως προς τις δυο πλευρές των επιφανειών επαφής σε μήκος ίσο με  $w/2$  ανά πλευρά, όπου  $w$  το εύρος της ρωγμής (βλ. Σχ. 1.1.3). Το εύρος της ρωγμής είναι συνάρτηση της ολίσθησης και τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση:  $w=0.6 \cdot s^{2/3}$ . Η αξονική τάση της ράβδου,  $\sigma_{so}$ , δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

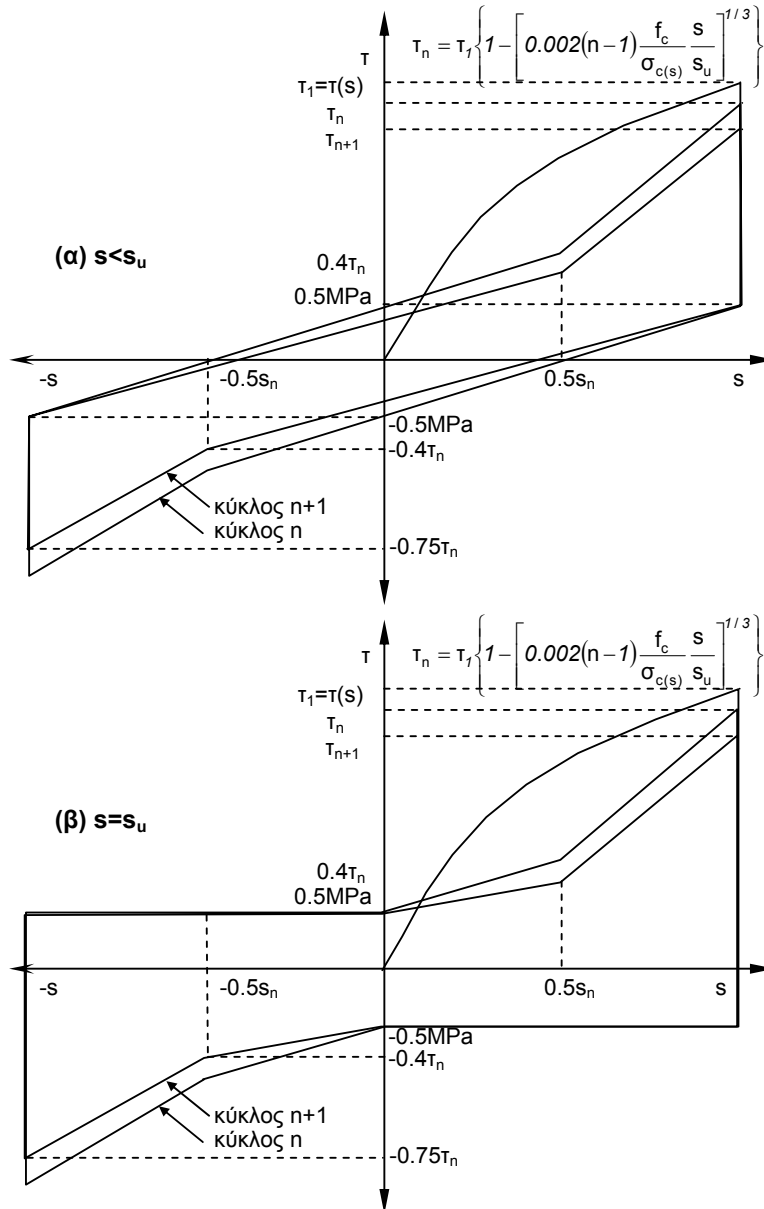
$$\sigma_{so}(s) = \left( \frac{0.3s^{2/3} E_s f_c}{d_b} \right)^{1/2} \quad (1.1.7)$$

όπου  $E_s$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και  $d_b$  είναι η διάμετρος των ράβδων που περισφίγγουν τη διεπιφάνεια (ήτοι τα σκέλη των συνδετήρων του μανδύα). Σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης η διατμητική αντίσταση που μεταφέρεται μέσω τριβής απομειώνεται ανά κύκλο φόρτισης. Η απομειωμένη τιμή της διατμητικής αντίστασης σε κάθε νέο κύκλο δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau_n = \tau_1 \left\{ 1 - \left[ 0.002(n-1) \frac{f_c}{\sigma_c(s)} \frac{s}{s_u} \right]^{1/3} \right\} \quad (1.1.8)$$

όπου  $\tau_1$  είναι η τιμή της μέγιστης διατμητικής αντίστασης στον πρώτο κύκλο. Το υστερητικό μοντέλο που περιγράφει τη διατμητική αντίσταση λόγω τριβής διαφοροποιείται ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης στην οποία γίνεται η ανακύκλιση. Σύμφωνα με αυτό διακρίνονται δυο

περιπτώσεις, στην πρώτη η αποφόρτιση γίνεται σε τιμές μικρότερες της μέγιστης τιμής της ολίσθησης  $s < s_u$  (Σχήμα 1.1.5(α), Vassilopoulou & Tassios 2003), ενώ στη δεύτερη περίπτωση στην τιμή της μέγιστης ολίσθησης  $s_u$  (Σχήμα 1.1.5(β), Tassios & Vintzēleou 1987).



**Σχήμα 1.1.5:** Καταστατικοί νόμοι για τη διαμητική αντίσταση λόγω τριβής για (α)  $s < s_u$  (Vassilopoulou & Tassios 2003), (β)  $s = s_u$  (Tassios & Vintzēleou 1987).

Προσαρμογή του προσομοιώματος στις πρόσφατες εξελίξεις:

Το μοντέλο των Tassios & Vintzēleou (1987), Vassilopoulou & Tassios (2003) είναι καταρχήν συμβατό με το μοντέλο που υιοθετείται από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011) και βασίζεται στις πλέον πρόσφατες εξελίξεις στο διεθνή χώρο, ωστόσο υπάρχουν κάποιες περαιτέρω διατάξεις στον ΚΑΝΕΠΕ (2011) που διαφοροποιούν ορισμένα σημεία, όπως:

- (1) Η μέγιστη τιμή ολίσθησης,  $s_u=2$  mm, ισχύει όταν η αντίσταση της διεπιφάνειας οφείλεται μόνον σε τριβή. Στην περίπτωση, κατά την οποία η αντίσταση οφείλεται σε ταυτόχρονη δράση τριβής και βλήτρου, η μέγιστη αντίσταση της διεπιφάνειας επιστρατεύεται για τιμές της ολισθήσεως οι οποίες δεν υπερβαίνουν το 1 mm (§6.1.14).
- (2) Η μέγιστη διατμητική τάση που μεταφέρεται μέσω τριβής,  $\tau_u$ , η οποία παρουσιάζεται στον ΚΑΝΕΠΕ (2011) στην Εξ. (6.7), λαμβάνει το συντελεστή τριβής  $\mu=0.4$ . Αυτό βεβαίως δεν είναι σύμφωνο με το Σχ. Σ6.1, όπου στο γράφημα που δίνει τη μεταβολή του συντελεστή τριβής (κατά μήκος τραχειάς διεπιφάνειας ή ρωγμής) συναρτήσει της θλιπτικής τάσεως στη διεπιφάνεια, εμφανίζεται ο όρος 0.44. Επιλέγεται ο συντελεστής τριβής,  $\mu=0.4$ . Επίσης, τίθεται ένα κάτω όριο στη μέγιστη διατμητική τάση λόγω τριβής,  $\leq 0.3f_c$  (Εξ. (6.7)).
- (3) Η διατμητική αντίσταση λόγω τριβής μετά από  $n$  κύκλους υπολογίζεται μειωμένη βάσει της σχέσης:

$$\tau_n = \tau_1 \left\{ 1 - \left[ 0.05(n-1)^{1/2} \left( \frac{f_c}{\sigma_c(s)} \right)^{1/2} \left( \frac{s}{s_u} \right)^{1/3} \right] \right\} \quad (1.1.9)$$

Από τη σύγκριση της σχέσης (1.1.7) και (1.1.8) προκύπτει ότι για τους ίδιους κύκλους φόρτισης,  $n$ , η (1.1.8) δίνει μικρότερη απομείωση της τιμής της διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής.

Στην ανάπτυξη του λογισμικού στο Π.Ε. 1.3 λαμβάνονται υπόψη οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις ώστε να υπάρχει πλήρης συμβατότητα με τις διατάξεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011), που είναι, άλλωστε, και πλέον πρόσφατες από τις εργασίες των Tassios & Vintzēleou (1987), Vassilopoulou & Tassios (2003).

**(β) Δράση βλήτρου των ράβδων οπλισμού**Μοντέλο των Vintzēleou & Tassios (1986, 1987):

Στο μοντέλο που προτείνεται από τους Vintzēleou & Tassios (1986, 1987) θεωρείται ότι η ράβδος οπλισμού προσομοιώνεται με έναν πάσσαλο ελευθέρως κεφαλής εμπηγμένο σε συνεκτικό έδαφος και ότι η διαρροή του βλήτρου και η σύνθλιψη του σκυροδέματος συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η δύναμη βλήτρου,  $D(s)$ , δίνεται ως συνάρτηση της ολίσθησης,  $s$ , από την ακόλουθη ομάδα εξισώσεων:

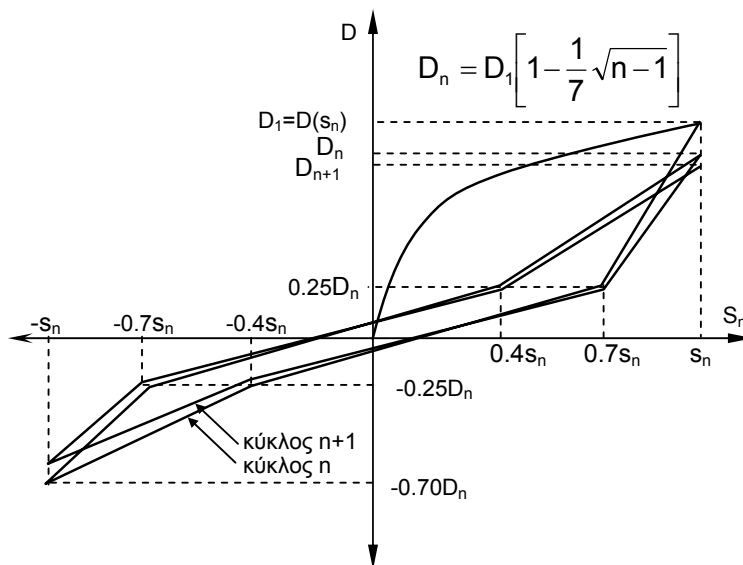
$$\frac{D(s)}{D_u} = 0.5 \frac{s}{s_{el}} \quad \text{για } s \leq s_{el} = 0.006d_b \quad (1.1.10\alpha)$$

$$\text{για } \frac{D(s)}{D_u} \geq 0.5 \Rightarrow s = 0.006d_b + 1.76s_{uD} \left[ \left( \frac{D(s)}{D_u} \right)^4 - 0.5 \left( \frac{D(s)}{D_u} \right)^3 \right] \quad (1.1.10\beta)$$

όπου  $s_{el}$  είναι η ελαστική τιμή της ολίσθησης,  $s_{uD}$  είναι η τιμή της ολίσθησης στην αστοχία,  $D_u$  είναι η δύναμη βλήτρου στη θραύση και  $d_b$  είναι η διάμετρος των βλήτρων (δηλ. η διάμετρος των σκελών των συνδετήρων του μανδύα). Η αντοχή θραύσης του βλήτρου και η αντίστοιχη ολίσθηση στη διεπιφάνεια δίνονται από τις εξισώσεις:

$$D_u = 1.3d_b^2 (f_c f_y)^{1/2}; \quad s_{uD} = 0.05d_b \quad (1.1.11)$$

όπου  $f_c$  είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, και  $f_y$  είναι η αντοχή διαρροής του χάλυβα. Το μοντέλο σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.6.



**Σχήμα 1.1.6:** Καταστατικοί νόμοι για τη δράση βλήτρου Vintzēleou & Tassios (1986, 1987).

#### Προσαρμογή του προσομοιώματος στις πρόσφατες εξελίξεις:

Σύμφωνα με την §6.1.2.2 του ΚΑΝΕΠΕ (2011), για την τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας,  $D_u$ , που μπορεί να μεταφερθεί από μιά ράβδο με διάμετρο  $d_b$ , τίθεται ένα κάτω όριο:

$$D_u \leq \frac{A_s f_y}{\sqrt{3}} \quad (1.1.12)$$

όπου  $A_s$  είναι το εμβαδόν της διατομής της ράβδου και  $f_y$  είναι η αντοχή διαρροής του χάλυβα. Επίσης, συνιστάται σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης η αντοχή θραύσης του βλήτρου να λαμβάνεται μειωμένη σύμφωνα με (Εξ. (6.9), ΚΑΝΕΠΕ 2011):

$$D_u = 0.65d_b^2(f_c f_y)^{1/2} \leq \frac{A_s f_y}{\sqrt{3}} \quad (1.1.13)$$

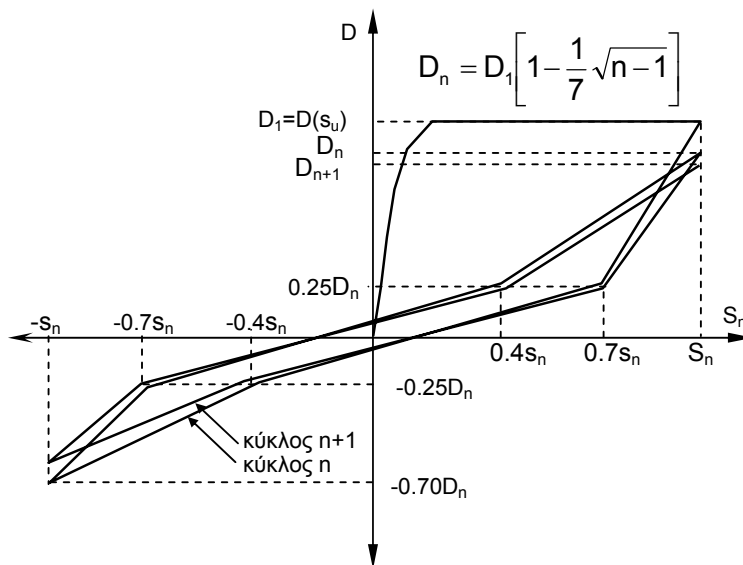
### (γ) Αλληλεπίδραση μηχανισμού βλήτρου και εξόλκευσης

Στην περίπτωση όπου οι ράβδοι υποβάλλονται ταυτόχρονα σε εφελκυσμό (εξόλκευση λόγω αντίστασης σε τριβή) και σε διάτμηση (δράση βλήτρου), τότε η διαθέσιμη αντοχή διαρροής των βλήτρων “καταναλώνεται” και από τους δυο μηχανισμούς αντίστασης. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση των δυο μηχανισμών αντίστασης, οι μέγιστες τιμές της αντίστασης σε τριβή και της δράσης βλήτρου καθορίζονται από την ακόλουθη σχέση (Vassilopoulou & Tassios 2003):

$$\left( \frac{\sigma_{so}(s) - \sigma_{SN}}{f_y} \right)^{3/2} + \left( \frac{D(s)}{D_u} \right)^{1.5} = 1; \sigma_{SN} = \frac{\nu \cdot f_c}{\rho + E_c/E_s} \quad (1.1.14)$$

όπου  $\sigma_{so}$  είναι η τάση εξόλκευσης που ενεργοποιείται κατά την ολίσθηση,  $f_c$  είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $E_c$ ,  $E_s$ , είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και του χάλυβα, αντίστοιχα,  $\nu(=N/(A_c f_c))$  είναι το ανηγμένο αξονικό φορτίο,  $\rho$  είναι το ανηγμένο ποσοστό του οπλισμού που τέμνει τη διεπιφάνεια.

Η λύση της Εξ. (1.1.13) αντιστοιχεί σε εκείνη την τιμή ολίσθησης,  $s_{crit}$ , για την οποία δεν μπορούν να αυξηθούν περαιτέρω η τέμνουσα δύναμη λόγω δράσης βλήτρου και η δύναμη εξόλκευσης λόγω τριβής. Η παραδοχή αυτή οδηγεί σε τροποποίηση του διαγράμματος δράσης βλήτρου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση σύμφωνα με το Σχήμα 1.1.7.



**Σχήμα 1.1.7:** Καταστατικοί νόμοι για τη δράση βλήτρου στην περίπτωση αλληλεπίδρασης με το μηχανισμό αντίστασης λόγω τριβής (Vassilopoulou & Tassios 2003).



### 1.1.2.2 Καθορισμός απαίτησης διατμητικών τάσεων στις διεπιφάνειες μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα

Για τον καθορισμό των διατμητικών τάσεων στις διεπιφάνειες μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου (πυρήνα) και μανδύα σκυροδέματος υιοθετείται το προσομοίωμα των Theriou et al. (2004, 2007), Θεριμού (2007), σύμφωνα με το οποίο η μεταφορά της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια μεταξύ του υφιστάμενου στοιχείου και του μανδύα λαμβάνει χώρα στο μεσοδιάστημα μεταξύ των ρωγμών κατά μήκος του ενισχυμένου στοιχείου, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ανάλυσης για την εκτίμηση της συνάφειας. Απαραίτητο στοιχείο για τον καθορισμό των διατμητικών τάσεων στις διεπιφάνειες είναι η εκτίμηση της απόστασης των ρωγμών.

#### Εκτίμηση της απόστασης των ρωγμών

Κατά τα αρχικά στάδια της φόρτισης αναπτύσσονται ρωγμές μόνο στο μανδύα (εξωτερικό τμήμα), ενώ όσο αυξάνει το φορτίο τόσο οι ρωγμές αυξάνονται και κάποιες από αυτές εισχωρούν και στο εσωτερικό τμήμα (πυρήνας) της σύνθετης διατομής μέχρι τη σταθεροποίησή τους (Theriou et al. 2004, 2007, Θεριμού 2007). Η απόσταση των ρωγμών,  $c$ , υπολογίζεται μετά τη σταθεροποίηση αυτών και όταν η τάση του οπλισμού του μανδύα στη ρωγμή,  $\sigma_{s,cr}$ , ξεπερνάει το όριο (*fib* 2010b):

$$\sigma_{s,cr} > f_{ctm} \frac{1 + \eta \rho_{s,eff}}{\rho_{s,eff}} \quad (1.1.15)$$

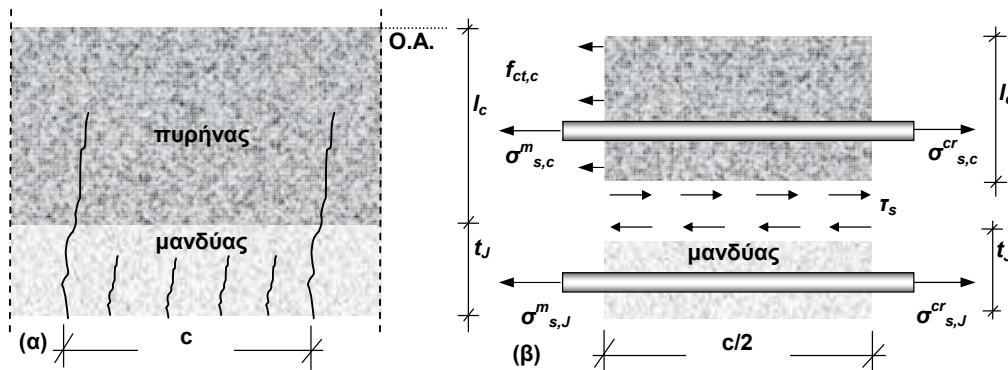
όπου  $f_{ctm}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,  $\eta (=E_s/E_c)$  είναι ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας χάλυβα και σκυροδέματος και  $\rho_{s,eff}$  είναι το ενεργό ποσοστό του οπλισμού που διαιρείται με το συνολικό εμβαδόν σκυροδέματος που βρίσκεται σε εφελκυσμό, και συνήθως λαμβάνεται ίσο με κυκλικό τομέα ακτίνας  $2.5D_b$  (*fib* Model Code 2010).

Σύμφωνα με τη θεώρηση ότι η μεταφορά της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια μεταξύ του υφιστάμενου στοιχείου και του μανδύα λαμβάνει χώρα στο μεσοδιάστημα μεταξύ των ρωγμών κατά μήκος του ενισχυμένου στοιχείου διαμορφώνεται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος (Δ.Ε.Σ., Σχήμα 1.1.8(α)). Μετά τη σταθεροποίηση των ρωγμών και βάσει της υπόθεσης ότι ο ουδέτερος άξονας είναι περίπου σταθερός σε διαδοχικές διατομές, από την ισορροπία του ελεύθερου σώματος του εξωτερικού τμήματος και την ισορροπία του ελεύθερου σώματος της εφελκυστικής ζώνης του πυρήνα της σύνθετης διατομής (Σχήμα 1.1.8(β)) προκύπτει για τον υπολογισμό της απόστασης των ρωγμών,  $c$ , η ακόλουθη σχέση:

$$c = \frac{2 b_J l_c f_{ct,c}}{\pi n_c d_{b,c} f_{b,c} + \pi n_J d_{b,J} f_{b,J}} \quad (1.1.16)$$

όπου  $b_J$  είναι το πλάτος της ενισχυμένης διατομής με μανδύα,  $l_c$  είναι το ύψος της εφελκυστικής ζώνης στον πυρήνα της σύνθετης διατομής,  $f_{ct,c}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα,  $n_c$  είναι ο αριθμός των ράβδων του πυρήνα σε εφελκυσμό,  $d_{b,c}$  είναι η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού του πυρήνα,  $f_{b,c}$  είναι η μέση τιμή τάσης συνάφειας

του οπλισμού του πυρήνα,  $n_j$  είναι ο αριθμός των ράβδων του μανδύα που εφελκούνται,  $d_{b,j}$  είναι η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού του μανδύα, και  $f_{b,j}$  είναι η μέση τιμή τάσης συνάφειας του οπλισμού του μανδύα.



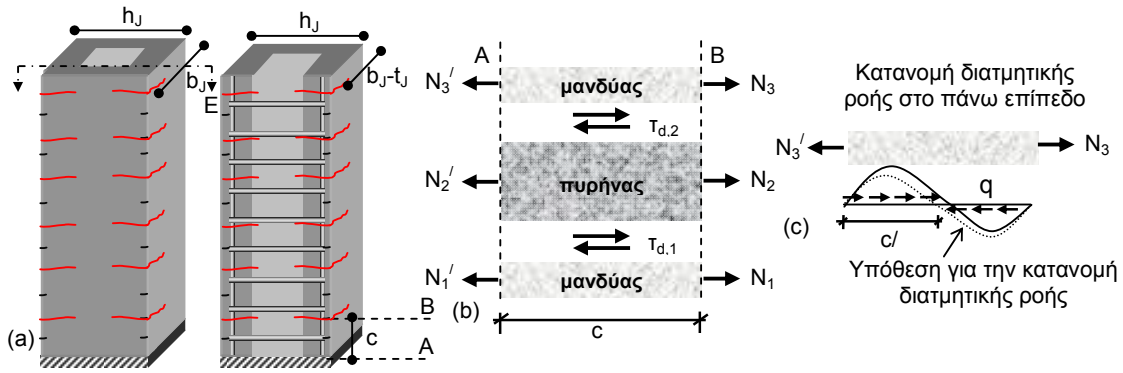
Σχήμα 1.1.8 (α) Απόσταση ρωγμών, (β) Δ.Ε.Σ. για τον προσδιορισμό της απόστασης των ρωγμών.

### Υπολογισμός απαιτούμενης διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας

Η απαιτούμενη διατμητική αντοχή διεπιφάνειας,  $v_{d,i}$ , υπολογίζεται για δεδομένο μέγεθος ολίσθησης,  $s_i$ . Εξετάζοντας τη διατομή καθ' ύψος και σε μήκος ίσο με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών ρωγμών,  $c$ , εξάγεται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.9(α). Σύμφωνα με το Δ.Ε.Σ.,  $\Sigma N_i$  είναι η συνισταμένη κάθε επιπέδου (δηλαδή το άθροισμα των δυνάμεων του σκυροδέματος και των οπλισμών) και  $\tau_{di}$  είναι η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια και η οποία αποδίδεται στους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας που ενεργοποιούνται κατά την ολίσθηση της διεπιφάνειας. Κάνοντας την παραδοχή ότι η συνισταμένη των δυνάμεων του κάθε επιπέδου αριστερά,  $\Sigma N_i'$ , είναι περίπου ίση με τη συνισταμένη των δυνάμεων κάθε επιπέδου δεξιά,  $\Sigma N_i$ , τότε η αντιστροφή του προσήμου της διατμητικής ροής,  $q$ , λαμβάνει χώρα σε μήκος  $c/2$  (Σχήμα 1.1.9(β)). Με την ανάλυση διπλής διατομής (Vecchio & Collins 1988), όπου η μια διατομή που εξετάζεται βρίσκεται στην θέση της ρωγμής και η άλλη στο μεσοδιάστημα μεταξύ ρωγμών, υπολογίζεται η επιβαλλόμενη διατμητική τάση στις διεπιφάνειες παλιού και νέου σκυροδέματος. Έτσι, η διατμητική αντοχή στο τμήμα  $i$ ,  $\tau_{d,i}$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{d,i} = \frac{\Sigma N_i}{0.5 c b_j} \quad (1.1.17)$$

είναι δηλαδή ίση με το λόγο της συνισταμένης δύναμης που προκύπτει από την ισορροπία των δυνάμεων σε κάθε επίπεδο προς τη διατμητική επιφάνεια.



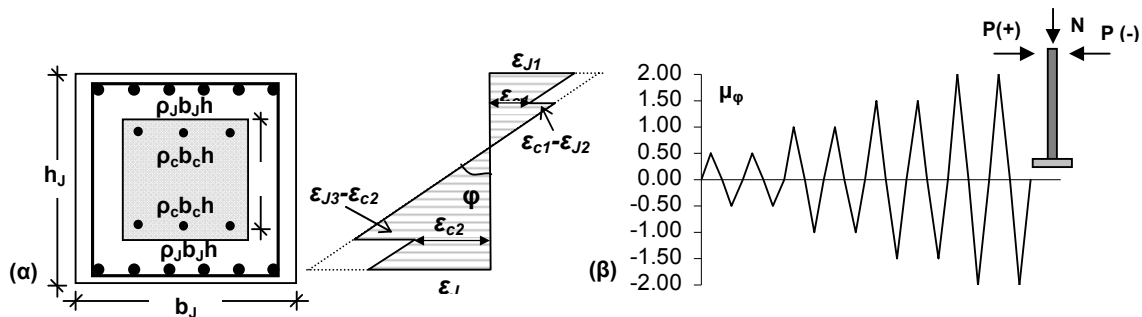
Σχήμα 1.1.9 (α) Στοιχείο Ο/Σ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ, (β) Δ.Ε.Σ. μεταξύ διαδοχικών ρωγμών καθ' ύψος της διατομής, (γ) Υπόθεση για τον υπολογισμό της διατμητικής ροής,  $q$ .

1.1.3 Παρουσίαση υπολογιστικού αλγορίθμου

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναλυτική παρουσίαση του υπολογιστικού αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη συγγραφή λογισμικού σύμφωνα με το Π.Ε. 1.3.

Στόχος του αλγορίθμου είναι η εξαγωγή καμπυλών απόκρισης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση στις διεπιφάνειες μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται βάσει ενός ιστορικού φόρτισης σε όρους καμπυλοτήτων (Σχήμα 1.1.10(β)), όπου για κάθε στάθμη καμπυλότητας στόχοι είναι: (i) η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της διαθέσιμης και της απαιτούμενης διατμητικής τάσης στις διεπιφάνειες για το μέγεθος ολίσθησης που έχει αναπτυχθεί από το μεσοδιάστημα μεταξύ ρωγμών μέχρι την ρηγματωμένη διατομή, και (ii) η επίτευξη ισορροπίας δυνάμεων που ασκούνται στη διατομή. Η ισορροπία επιτυγχάνεται με επαναληπτική διαδικασία μέχρι σύγκλισης.



Σχήμα 1.1.10 (α) Προφίλ παραμορφώσεων σύνθετης διατομής, (β) Ιστορικό φόρτισης σε όρους πλαστιμότητας καμπυλοτήτων.

Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης (για πολύ μικρές τιμές καμπυλότητας) το προφίλ των διαμήκων παραμορφώσεων είναι πανομοιότυπο με αυτό της μονολιθικής θεώρησης, δηλαδή η ολίσθηση στη διεπιφάνεια λαμβάνεται μηδενική και στις δυο επιφάνειες επαφής. Σε κάθε επόμενο βήμα αυξανόμενης καμπυλότητας σύμφωνα με το ιστορικό φόρτισης, η κλίση του διαγράμματος των διαμήκων παραμορφώσεων τροποποιείται (επιτρέποντας συνεχώς

αυξανόμενη διαφορά παραμορφώσεων στις διεπιφάνειες) προκειμένου να εξασφαλιστεί η ισορροπία της διατομής.

Τα βήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

Για κύκλο φόρτισης λ:

Βήμα 1: Σύμφωνα με το ιστορικό φόρτισης, τίθεται η τιμή καμπυλότητας, θετική  $\varphi^n(+)$  ή αρνητική  $\varphi^n(-)$ . Άγνωστοι του προβλήματος είναι η ορθή παραμόρφωση στην άνω ίνα της ενισχυμένης διατομής,  $\varepsilon_{j1}^{n,m}$ , και η ολίσθηση στην άνω ( $s_1^{n,r}$ ) και κάτω ( $s_2^{n,r}$ ) διεπιφάνεια.

Βήμα 2: Τίθεται τιμή για την ορθή παραμόρφωση στην άνω ίνα της διατομής,  $\varepsilon_{j1}^{n,m}$ .

Βήμα 3: Εκτιμάται η ολίσθηση στην άνω και κάτω διεπιφάνεια,  $s_1^{n,r}$  και  $s_2^{n,r}$ . Η ολίσθηση στη διεπιφάνεια σχετίζεται με το μέγεθος της διαφοράς παραμορφώσεων στην άνω και κάτω διεπιφάνεια,  $\Delta\varepsilon_1^{n,r}$  και  $\Delta\varepsilon_2^{n,r}$ , ως εξής:

$$s_1^{n,r} = \Delta\varepsilon_1^{n,r} c = (\varepsilon_{c1}^{n,r} - \varepsilon_{j2}^{n,r}) c, \quad s_2^{n,r} = \Delta\varepsilon_2^{n,r} c = (\varepsilon_{j3}^{n,r} - \varepsilon_{c2}^{n,r}) c \quad (1.1.18)$$

όπου οι μεταβλητές  $\varepsilon_{c1}^{n,r}$ ,  $\varepsilon_{j2}^{n,r}$  και  $\varepsilon_{j3}^{n,r}$ , και  $\varepsilon_{c2}^{n,r}$  είναι οι ορθές παραμορφώσεις στα επίπεδα της διατομής στις άνω και κάτω επιφάνειες επαφής (Σχήμα 1.1.10(α)) και  $c$  είναι η μέση τιμή της απόστασης μεταξύ διαδοχικών ρωγμών (Εξ. 1.1.15, Σχήμα 1.1.8(α)).

Βήμα 4: Έλεγχος της αντοχής των διεπιφανειών - Υπολογίζεται η διατμητική δύναμη που εισάγεται στην άνω και κάτω διεπιφάνεια επαφής  $t_1^{n,r}$  και  $t_2^{n,r}$ , από τις αντίστοιχες τιμές ολίσθησης,  $s_1^{n,r}$  και  $s_2^{n,r}$  σύμφωνα με τις καταστατικές σχέσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Εξ. (1.1.4)÷(1.1.10)). Η απαίτηση σε διατμητικές τάσεις στην άνω και κάτω διεπιφάνεια,  $t_{d,1}^{n,r}$  και  $t_{d,2}^{n,r}$ , αντίστοιχα, καθορίζονται από την Εξ. (1.1.16). Γίνεται ο έλεγχος: αν  $t_1^{n,r} = t_{d,1}^{n,r}$  και  $t_2^{n,r} = t_{d,2}^{n,r}$  τότε έχει επιτευχθεί ισορροπία, οπότε ακολουθεί το Βήμα 5. Σε περίπτωση όπου δεν εξασφαλισθεί ισορροπία τότε ορίζεται μια νέα τιμή για τις ολισθήσεις στην άνω και κάτω διεπιφάνεια  $s_1^{n,r+1} = s_1^{n,r} + ds_1$ ,  $s_2^{n,r+1} = s_2^{n,r} + ds_2$ , αντίστοιχα, όπου  $ds_i$  είναι το αυξητικό βήμα για τις τιμές ολίσθησης (αυθαίρετα ορισμένο). Σε περίπτωση όπου η ισορροπία δεν έχει επιτευχθεί, τότε η ολίσθηση εκτιμάται εκ νέου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι σύγκλισης.

Βήμα 5: Έλεγχος ισορροπίας δυνάμεων στη σύνθετη διατομή: Υπολογίζεται η συνισταμένη δύναμη για κάθε επίπεδο  $\Sigma N_i$  (Σχήμα 1.1.9(α)). Στην περίπτωση όπου η διατομή δεν ισορροπεί, δηλαδή  $\Sigma(N_i) - N_{ext} \geq \text{ανοχή}$ , τότε το προφίλ των παραμορφώσεων της διατομής διορθώνεται επιστρέφοντας στο Βήμα 2 με τον ορισμό νέας τιμής:  $\varepsilon_{j1}^{n,m+1} = \varepsilon_{j1}^{n,m} + d\varepsilon_j$ , όπου  $d\varepsilon_j$  είναι το αυξητικό βήμα της άνω παραμόρφωσης της ενισχυμένης διατομής (αυθαίρετα ορισμένο).

Βήμα 6: Αποθήκευση τιμών για τις οποίες επιτυγχάνεται τόσο ισορροπία στη διατομή όσο και στις δυο διεπιφάνειες. Τίθενται  $\varepsilon_{j1}^n = \varepsilon_{j1}^{n,m}$ ,  $s_1^n = s_1^{n,r}$ ,  $s_2^n = s_2^{n,r}$  και αποθηκεύονται οι τιμές στις οποίες επιτεύχθηκε σύγκλιση.

Βήμα 7: Εκτίμηση της συνισταμένης των ροπών  $M_n$ .

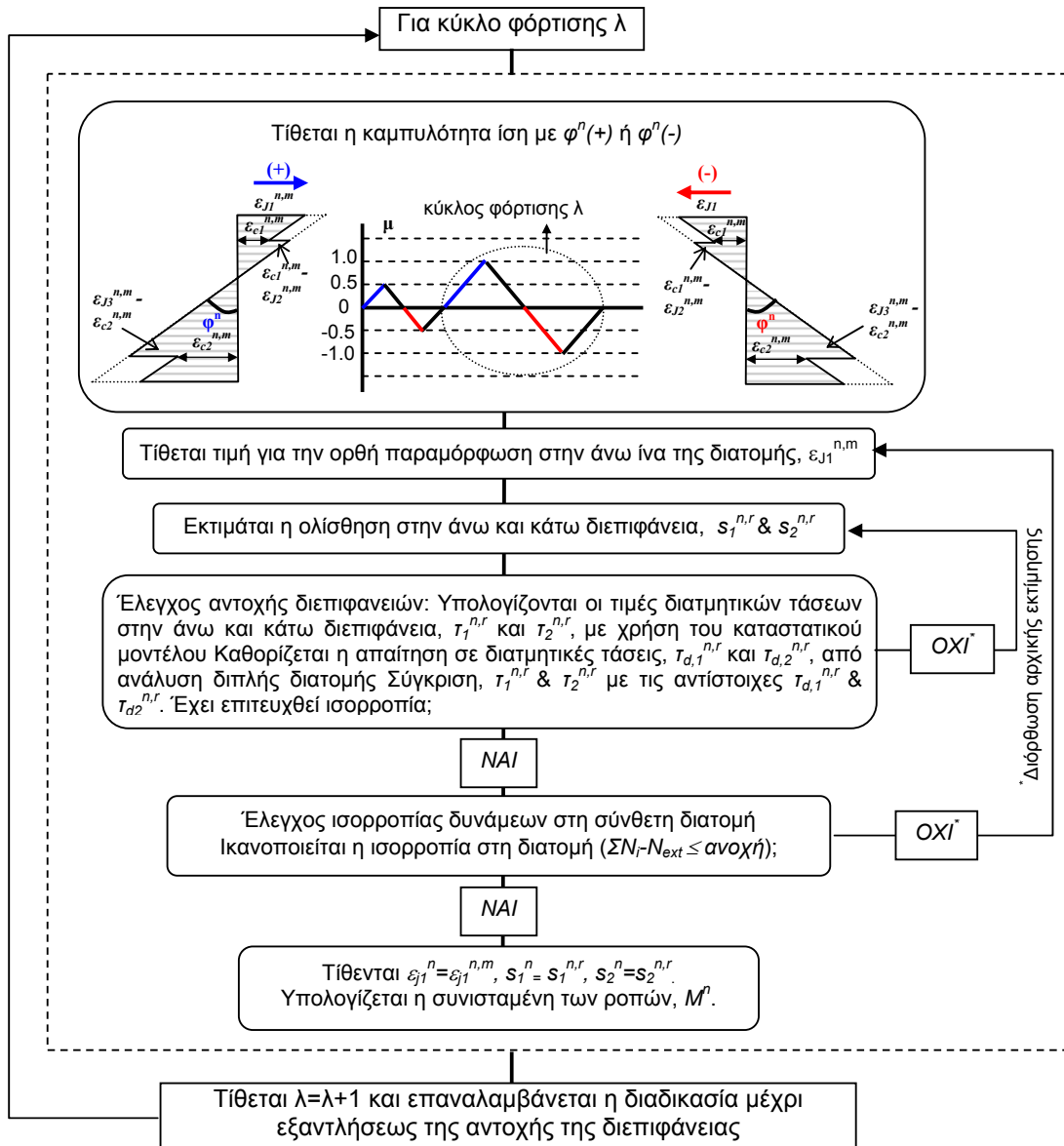
Βήμα 8: Αποφόρτιση

**Βήμα 9:** Επανάληψη των Βημάτων 1 ως 7 για αρνητική καμπυλότητα,  $\varphi^n(-)$ , σύμφωνα με το ιστορικό φόρτισης

**Βήμα 10:** Αποφόρτιση

**Βήμα 11:** Επανάληψη των Βημάτων 1 ως 11 για  $\lambda=\lambda+1$ . Οι υπολογισμοί σταματούν όταν η αντοχή της διεπιφάνειας εξαντλείται.

Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται σχηματικά στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 1.1.11. Αναλυτική περιγραφή του κάθε βήματος και των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε κάθε ενότητα υπολογισμών γίνεται στο Π.Ε. 1.3 (Ενότητα 1.3.6).



Σχήμα 1.1.11 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου.

### 1.1.4 Βιβλιογραφία Π.Ε. 1.1

- ACI Committee 318 (1995). "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary ACI 318 R-95." *American Concrete Institute*, Detroit, 16-1 -16-10.
- ACI Committee 318 (1999). "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99) and Commentary ACI 318 R-99." *American Concrete Institute*, Detroit, 133 – 142.
- ACI Committee 318 (2002) "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02) and Commentary ACI 318 R-02." *American Concrete Institute*, Detroit, 139–154.
- Birkeland, P. W., and Birkeland, H. W. (1966). "Connections in precast concrete construction." *Journal of American Concrete Institute*, 63(3), 345-368.
- CEB-FIP Model Code 90 (1993). Design Code. Thomas Telford Ltd., eds., London, 460.
- Climaco, J. C. T. S., and Regan, P. E. (2001). "Evaluation of bond strength between old and new concrete in structural repairs." *Magazine of Concrete Research*, 53(6), 377-390
- fib (2010a). Model Code 2010, First complete draft - Vol. 1, *fib Bull.* 55, Lausanne, March.
- fib (2010b). Model Code 2010, First complete draft - Vol. 2, *Bull.* 56, Lausanne, April.
- Júlio, E. N. B. S., Branco, F. A. B, Silva, V.D and Lourenço, J.F. (2006). "Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate," *Building and Environment*, 41, 1934-1939.
- Loov, E. R., and Patnaik, K. A. (1994). "Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface." *PCI Journal*, 48-69.
- Mattock, H. A., and Hawkins, M. N. (1972). "Shear transfer in reinforced concrete- recent research." *PCI Journal*, 55-75.
- Mattock, H. A., Li, K. W., and Wang, C. T. (1976) "Shear transfer in lightweight reinforced concrete." *PCI Journal*, 20-39.
- Mattock, H.A. (2001). "Shear friction and high-strength concrete." *Structural Journal, ACI*, 98(1), 50-59.
- Rodríguez, M., and Park, R. (1991). "Repair and strengthening of reinforced concrete buildings for seismic resistance." *Earthquake Spectra, EERI*, 7(3), 439-459.
- Tassios T. and Vintzēleou V.E. (1987). "Concrete-to-concrete friction. ASCE J. Struct. Eng., 113(4), 832-849.
- Thermou, G. E., Pantazopoulou, S. J., and Elnashai, A. S. (2004). "Analytical modeling of interface behavior in reinforced concrete jacketed members." *Proc., 2004 Structures Congress (ASCE)* "Building on the past, securing the future", Nashville, Tennessee, Paper No. 349.
- Thermou, G. E., Pantazopoulou, S. J., and Elnashai, A.S. (2007) "Flexural behavior of brittle RC members rehabilitated with concrete jacketing" *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 133(10), 1373-1384.
- Tsioulou, O.T. and Dritsos, S.E. (2011). "A theoretical model to predict interface slip due to bending." *Materials and Structures*, 44(4), 825-843.
- Vassilopoulou, I., and Tassios, P. (2003). "Shear transfer capacity along a RC crack under cyclic sliding." *Proc., fib Symposium*, TCG (Technical Chamber of Greece), Athens, Greece, Paper No. 271.
- Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1988). "Predicting the response of RC. beams subjected to shear using the MCFT." *ACI Journal*, 86(3), 258-268.
- Vecchio, F. J., and Collins, M. P., (1986). "The modified compression-filed theory for reinforced concrete elements subjected to shear." *ACI Journal*, 83(2), 219-581.
- Vintzēleou, E., and Tassios, T. (1986). "Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions." *Magazine of Concrete Research*, 38(134), 13-22.
- Vintzēleou, E., and Tassios, T. (1987). "Behavior of dowels under cyclic deformations." *ACI Structural Journal*, 84(1), 18-30.
- Walraven, J. C. (1981). "Fundamental analysis of aggregate interlock." *Structural Division, ASCE*, 107, No. ST11, 2245-2270.
- Δημητριάδου, Ο., Κοτσόγλου, Β., Θερμού, Γ. Ε., Σάββα, Α., και Παναζοπούλου, Σ. Ι. (2005). "Πειραματική μελέτη διεπιφανειών σκυροδέματος σε διάτμηση." *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ*, 25(2-3), 123-136.

- Θερμού, Γ.Ε. (2007). “Μοντέλα και φάσματα σχεδιασμού και αποτίμησης επισκευασμένων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα.” *Διδακτορική διατριβή*, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- ΚΑΝΕΠΕ (2011). “Κανονισμός Επεμβάσεων.” Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Τελικό Κείμενο, Σεπτέμβριος 2011.

## Πακέτο Εργασίας 1.2 (Πειραματική βάση δεδομένων)

### 1.2.1 Εισαγωγή

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος που προτείνεται στο Π.Ε. 1.1 συγκροτήθηκε πειραματική βάση δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τα πειραματικά υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία, για την εξαγωγή μηχανικών χαρακτηριστικών όπως μετακίνηση διαρροής και αστοχίας, στροφή διαρροής και αστοχίας, αντοχή διαρροής, μέγιστη αντοχή, πλαστιμότητα μετακινήσεων, πλαστιμότητα στροφών. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν στην Φάση 3 για την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων παραμορφωσιμότητας, αντοχής και συντελεστών μονολιθικότητας.

### 1.2.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά της πειραματικής βάσης

Η πειραματική βάση συγκεντρώνει τις πιο πρόσφατες πειραματικές μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίες αφορούν στην ενίσχυση πρισματικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ για την βελτίωση της καμπτοδιατμητικής συμπεριφοράς των στοιχείων στα οποία τοποθετούνται οι μανδύες Ο/Σ.

Η κατασκευή των μανδύων γίνεται είτε με έγχυση σκυροδέματος είτε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επίσης, στις διάφορες πειραματικές μελέτες που παρουσιάζονται τα μέσα σύνδεσης μεταξύ του πυρήνα του στοιχείου (παλαιάς διατομής) και του μανδύα ποικίλλουν. Η διακύμανση των παραμέτρων της βάσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1. Τα σύμβολα επεξηγούνται στην §1.2.4.1.

**Πίνακας 1.2.1** Διακύμανση των παραμέτρων της πειραματικής βάσης.

Υφιστάμενη διατομή		Μανδύας	
$b_c$ (mm)	200~350	$b_J$ (mm)	260~550
$h_c$ (mm)	200~500	$h_J$ (mm)	260~650
$d_{b,c}$ (mm)	10~20	$d_{b,J}$ (mm)	10~20
$\rho_c$ (%)	0.81~2.05	$\rho_{J^*}$ (%)	0.75~1.64
$d_{bs,c}$ (mm)	6~8	$d_{bs,J}$ (mm)	6~10
$s_c$ (mm)	50~265	$s_J$ (mm)	50~100
$\rho_{isc}$ (%)	0.12~0.57	$\rho_{isJ}$ (%)	0.20~0.79
$f_c$ (MPa)	22.9~58.2	$f_c$ (MPa)	7~68.7
$f_y$ (MPa)	313~550	$f_y$ (MPa)	400~520
$f_{yw}$ (MPa)	350~520	$f_{yw}$ (MPa)	330~599
$L_V/h_c$	3.2~11.7	$L_V/h_J$	2.5~7.0
<b>Μάτιση (<math>d_{b,c}</math>)</b>	15~45	$L_V$ (mm)	1000~3500
		$v^*$ (%)	0~23



### 1.2.3 Παρουσίαση των μελετών της πειραματικής βάσης

Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης στοιχείων Ο/Σ με μανδύες Ο/Σ αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας την τελευταία περίπου εικοσαετία και τεκμηριώθηκε από μια σειρά πειραματικών δοκιμών. Η πειραματική βάση αποτελείται από σαράντα τέσσερα (44) δοκίμια τα οποία προέρχονται από έντεκα (11) διαφορετικές πειραματικές μελέτες.

Οι πειραματικές μελέτες από τις οποίες αντλήθηκαν στοιχεία για τη σύνταξη της πειραματικής βάσης είναι των Rodriguez & Park (1994), Gomes & Appleton (1998), Ilki et al. (1998), Vandoros & Dritsos (2006a), Vandoros & Dritsos (2006b), Vandoros & Dritsos (2008), Júlio et al. (2005), Bousias et al. (2006), Bousias et al. (2007a), Bousias et al. (2007b), Júlio & Branco (2008).

Οι Rodriguez & Park (1994) μελέτησαν τη σεισμική συμπεριφορά τεσσάρων υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ, όπου τα δυο δοκίμια είχαν υποστεί πρότερη βλάβη και πριν την τοποθέτηση του μανδύα Ο/Σ εκτραχύνθηκε ελαφρώς η διεπιφάνεια, ενώ τα άλλα δυο κατασκευάστηκαν μονολιθικά εξαρχής. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής κατέδειξαν ότι αντοχή, δυσκαμψία και πλαστιμότητα βελτιώθηκαν σημαντικά. Οι Gomes & Appleton (1998) μελέτησαν τρία δοκίμια τετραγωνικής διατομής, όπου τα δυο είχαν υποστεί πρότερη βλάβη πριν την τοποθέτηση του μανδύα, ενώ στο τρίτο ο μανδύας κατασκευάστηκε μονολιθικά. Η σύγκριση μεταξύ αρχικών και ενισχυμένων δοκιμών (η διεπιφάνεια δεν υπέστη καμιά επεξεργασία) κατέδειξε σημαντική βελτίωση της αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητας. Επιπλέον, η σύγκριση του στοιχείου με μονολιθικά κατασκευασμένο μανδύα Ο/Σ με τα άλλα δυο δοκίμια έδωσαν τα πρώτα αποτελέσματα για συντελεστές μονολιθικότητας. Οι Ilki et al. (1998) μελέτησαν τρία δοκίμια τετραγωνικής διατομής, όπου και τα τρία είχαν υποβληθεί σε μονότονη φόρτιση πριν την τοποθέτηση του μανδύα. Κατά την κατασκευή των μανδύων δεν ελήφθησαν ειδικά μέτρα σύνδεσης του μανδύα με το υφιστάμενο στοιχείο. Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν την επιτυχία της μεθόδου στην αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας. Οι Bousias et al. (2006, 2007a) μελέτησαν δυο ομάδες δοκιμών με παλαιού τύπου λεπτομέρειες όπλισης (λείοι χάλυβες, ανεπαρκή μήκη ακυρώσεων) τετραγωνικής (επτά δοκίμια) και ορθογωνικής διατομής (τρία δοκίμια), αντίστοιχα, τα οποία ενισχύθηκαν με μανδύες Ο/Σ. Τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης έδειξαν ότι: (i) υπήρξε σημαντική αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης ανεξάρτητα από το μήκος των αγκυρώσεων, (ii) η πρότερη βλάβη δεν μείωσε ουσιαδώς την αποτελεσματικότητα των μανδύων Ο/Σ και (iii) η έλλειψη μέτρων σύνδεσης της υφιστάμενης διατομής με τον μανδύα δημιούργησε σημαντική ολίσθηση στη διεπιφάνεια, αλλά δεν επηρέασε δυσμενώς την αντίσταση, την ικανότητα παραμόρφωσης και έκλυσης ενέργειας των ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ στοιχείων. Οι Bousias et al. (2007β) μελέτησαν την επιρροή της επεξεργασίας της διεπιφάνειας (εκτράχυνση ή φυσική) και των διαφόρων μέσων σύνδεσης (βλήτρα, αναρτήρες) στην απόκριση έξι ενισχυμένων δοκιμών με μανδύες Ο/Σ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ενισχυμένα δοκίμια είχαν παρόμοια συμπεριφορά με τα αντίστοιχα μονολιθικά, ανεξάρτητα από τα μέτρα που ελήφθησαν για τη βελτίωση της σύνδεσης του μανδύα με το υφιστάμενο στοιχείο. Η επιρροή των διαφόρων μέσων σύνδεσης της υφιστάμενης διατομής (πυρήνας) με το μανδύα στην απόκριση της σύνθετης διατομής αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης και για τους Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008). Επιπλέον, οι ίδιοι ερευνητές μελέτησαν και την επιρροή της προφόρτισης με αξονικό φορτίο της υφιστάμενης διατομής κατά τη διάρκεια κατασκευής του μανδύα Ο/Σ (έξι

δοκίμια). Τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης έδειξαν ότι: (i) ο τρόπος επεξεργασίας της διεπιφάνειας επηρεάζει το μηχανισμό αστοχίας και ότι ο συνδυασμός εκτράχυνσης της διεπιφάνειας και χρήσης βλήτρων ενδείκνυται για την έκλυση ενέργειας, και (ii) η προφόρτιση της αρχικής διατομής κατά την κατασκευή του μανδύα βελτιώνει την αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης του σύνθετου συστήματος. Οι Júlio et al. (2005), Júlio & Branco (2008) μελέτησαν την επιρροή της επεξεργασίας της διεπιφάνειας στην απόκριση στοιχείων που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ τόσο σε μονότονη όσο και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Μελετήθηκαν συνολικά δώδεκα δοκίμια (έξι για την κάθε περίπτωση φόρτισης) στα οποία υιοθετήθηκαν έξι διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης της υφιστάμενης διατομής με το μανδύα. Το κύριο συμπέρασμα της μελέτης αυτής ήταν ότι σε στοιχεία με άνοιγμα διάτμησης ίσο ή μεγαλύτερο της μονάδας, η μονολιθική συμπεριφορά του σύνθετου στοιχείου μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την επεξεργασία της διεπιφάνειας αρκεί το πάχος του μανδύα να ικανοποιεί ένα ελάχιστο όριο (17.5% του πάχους του αρχικού στοιχείου).

Παρατηρείται ότι ενώ ο αριθμός των πειραματικών προγραμμάτων που αφορούσαν μανδύες Ο/Σ σε υποστυλώματα δεν είναι μεγάλος, το εύρος των παραμέτρων που έχουν μελετηθεί (ιδιαίτερα από Έλληνες ερευνητές) είναι σημαντικός και μπορεί να ειπωθεί ότι καλύπτει τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην πρακτική εφαρμογή (ύπαρξη προφόρτισης, τρόπος σύνδεσης οπλισμών μανδύα με τους υφιστάμενους, επιμέλεια στη διαμόρφωση της διεπιφάνειας κλπ.). Βεβαίως, όπως συμβαίνει κατά κανόνα στα πειραματικά προγράμματα, η διαμόρφωση των κατασκευαστικών λεπτομερειών στο εργαστήριο είναι ενγένει πιο επιμελημένη απ' ό,τι στην εφαρμογή στο εργοτάξιο και σε 'μαζική κλίμακα'.

Επισημαίνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία βρέθηκαν έξι (6) επιπλέον πειραματικές μελέτες για επισκευή / ενίσχυση στοιχείων Ο/Σ με μανδύες Ο/Σ, οι οποίες δεν ικανοποιούν τα κριτήρια που τέθηκαν για τη σύνταξη της συγκεκριμένης πειραματικής βάσης γι' αυτό και δεν συμπεριλήφθηκαν. Πιο συγκεκριμένα στη μελέτη των Choudhuri et al. (1992) παρουσιάζεται η κατασκευή μανδύα σε ένα μόνο δοκίμιο όπου δεν ακολουθούνται οι συμβατικοί κανόνες κατασκευής (η συνήθης πρακτική) όπως εφαρμόζονται και στην Ελλάδα και περιγράφονται από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011). Οι διαμήκεις οπλισμοί, οι οποίοι αποτελούνται από υψηλής αντοχής χάλυβα συγκολλούνται σε μεταλλική βάση έδρασης, η οποία τοποθετείται στη βάση του δοκιμίου. Επίσης, αντί συνδετήρων χρησιμοποιήθηκε συνεχής τετραγωνική σπείρα. Οι Bett et al. (1998) εφάρμοσαν την τεχνική των μανδύων Ο/Σ για την ενίσχυση της διατμητικής μόνο αντοχής κοντών υποστυλωμάτων, χωρίς συνέχεια του διαμήκους οπλισμού. Τα πειράματα των Ersoy et al. (1993) διεξήχθησαν υπό σταθερό διάγραμμα ροπών (χωρίς παρουσία διάτμησης). Οι Iliya & Bertero (1980) μελέτησαν την συμπεριφορά τοιχωμάτων που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ. Ο Altun (2004) χρησιμοποίησε την τεχνική των μανδύων Ο/Σ για την ενίσχυση δοκών Ο/Σ. Οι Cotofana Popa (2006) κατασκεύασαν μανδύες Ο/Σ σε υποστυλώματα Ο/Σ μόνο για την αύξηση της διατμητικής τους αντοχής.

#### **1.2.4 Επεξεργασία των δεδομένων**

##### **1.2.4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες όπλισης αρχικού και ενισχυμένου στοιχείου**

Σε πρώτη φάση έγινε μια επεξεργασία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των λεπτομερειών όπλισης τόσο του παλαιού στοιχείου που αποτελεί τον πυρήνα της σύνθετης

διατομής, όσο και του μανδύα. Μετά από επεξεργασία των πειραματικών μελετών αντλήθηκαν πληροφορίες σχετικές με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων, τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής, το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο, την ποιότητα των διαμήκων ράβδων οπλισμού (λείες ή με ραβδώσεις), το μήκος των ματίσεων (όπου υπάρχουν), το είδος φόρτισης (μονότονη ή ανακυκλιζόμενη), την ύπαρξη ή όχι προγενέστερης βλάβης, τον τρόπο κατασκευής του μανδύα και τον τρόπο σύνδεσής του με το υφιστάμενο στοιχείο καθώς και τον τρόπο αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού του μανδύα. Επίσης, παρέχονται πληροφορίες για τη μορφή των δοκιμίων, την πειραματική διάταξη και τον τρόπο επιβολής της φόρτισης και του αξονικού φορτίου (Σχήμα 1.2.1). Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.2 για τα υφιστάμενα στοιχεία και στον Πίνακα 1.2.3 για τα ενισχυμένα με μανδύες Ο/Σ στοιχεία. Τα διάφορα σύμβολα που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στη συνέχεια.

#### Συμβολισμοί:

$b_c$ : πλάτος αρχικής διατομής  
 $b_J$ : πλάτος ενισχυμένης διατομής  
 $d_{b,c}$ : διάμετρος διαμήκους οπλισμού αρχικής διατομής  
 $d_{b,J}$ : διάμετρος διαμήκους οπλισμού μανδύα  
 $d_{bs,c}$ : διάμετρος διαμήκους οπλισμού συνδετήρων αρχικής διατομής  
 $d_{bs,J}$ : διάμετρος διαμήκους οπλισμού συνδετήρων ενισχυμένης διατομής  
 $d_c$ : στατικό ύψος αρχικής διατομής  
 $d_J$ : στατικό ύψος ενισχυμένης διατομής  
 $f_{c,c}$ : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος αρχικής διατομής  
 $f_{c,J}$ : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μανδύα  
 $f_{y,c}$ : αντοχή διαρροής διαμήκους οπλισμού αρχικής διατομής  
 $f_{y,J}$ : αντοχή διαρροής διαμήκους οπλισμού μανδύα  
 $f_{yw,c}$ : αντοχή διαρροής συνδετήρων αρχικής διατομής  
 $f_{yw,J}$ : αντοχή διαρροής συνδετήρων ενισχυμένης διατομής  
 $h_c$ : ύψος αρχικής διατομής  
 $h_J$ : ύψος ενισχυμένης διατομής  
 $L_v$ : διατμητικό άνοιγμα  
 $n_{c,mid}$ : συνολικός αριθμός ράβδων διαμήκους οπλισμού του κορμού αρχικής διατομής  
 $n_c$ : συνολικός αριθμός ράβδων διαμήκους οπλισμού αρχικής διατομής  
 $n_{J,mid}$ : συνολικός αριθμός ράβδων διαμήκους οπλισμού του κορμού μανδύα  
 $n_J$ : συνολικός αριθμός ράβδων διαμήκους οπλισμού μανδύα  
 $s_c$ : απόσταση συνδετήρων αρχικής διατομής  
 $s_J$ : απόσταση συνδετήρων ενισχυμένης διατομής

#### Ελληνικά σύμβολα:

$\nu^*$ : ανηγμένο αξονικό φορτίο % υπολογισμένο βάσει της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος του μανδύα και του πυρήνα ( $N/[(b_J \cdot h_J - b_c \cdot h_c) \cdot f_{c,J} + b_c \cdot h_c \cdot f_{c,c}]$ )  
 $\rho_c$ : ποσοστό διαμήκους οπλισμού αρχικής διατομής ορισμένο ως  $A_{sc,tot}/(b_c h_c)$ , όπου  $A_{sc,tot} = (n_c + n_{c,mid}) d_{b,c}^2 / 4$   
 $\rho_J$ : ποσοστό διαμήκους οπλισμού μανδύα ορισμένο ως  $A_{sJ,tot}/(b_J h_J - b_c h_c)$ , όπου  $A_{sJ,tot} = (n_J + n_{J,mid}) d_{b,J}^2 / 4$   
 $\rho_{isc}$ : ανηγμένο ποσοστό συνδετήρων αρχικής διατομής  
 $\rho_{isJ}$ : ανηγμένο ποσοστό συνδετήρων ενισχυμένης διατομής

Πίνακας 1.2.2: Χαρακτηριστικά αρχικών δοκιμών (πιρρήνας σύνθετης διατομής)

Αναφορά	A/A	Ονομασία Δοκιμών	Αρχικά Δοκίμια																	
			$b_c^*$	$h_c^*$	$d_c^*$	$n_c$	$n_{c,mid}$	$d_{b,c}^*$	$\rho_c^{\#}$	Σκέλη συνδ.	$d_{b,s,c}^*$	$s_c^*$	$\rho_{b,c}^{\#}$	$f_{c,c}^{\$}$	Τύπος ράβδου	$f_{y,c}^{\$}$	$f_{yw,c}^{\$}$	$L_s/h_c$	Μάτση ( $d_{b,c}$ )	
Rodríguez & Park (1994)	1	SS1	350	350	295	6	2	20	2.05	4	6	265	0.16	29.5	pl	325	350	4.1	-	
	2	SS2	350	350	295	6	2	20	2.05	4	6	265	0.16	29.5	pl	325	350	4.1	-	
	3	SS3	350	350	295	6	2	20	2.05	4	6	265	0.16	29.5	pl	325	350	4.1	-	
	4	SS4	350	350	295	6	2	20	2.05	4	6	265	0.16	25.9	pl	325	350	4.1	-	
Gomes & Appleton (1998)	5	P2R	200	200	173	4	0	12	1.13	2	6	150	0.22	53.2	def	480	480	5.0	-	
	6	P3R	200	200	173	4	0	12	1.13	2	6	50	0.66	58.2	def	480	480	5.0	-	
	7	P4	200	200	173	4	0	12	1.13	2	6	150	0.22	56.2	def	480	480	5.0	-	
Ilki et al. (1998)	8	7	300	300	269	6	2	16	1.79	2	8	100	0.38	50.6	def	550	425	11.7	-	
	9	8	300	300	269	6	2	16	1.79	2	8	100	0.38	47.1	def	531	425	11.7	-	
	10	9	300	300	269	6	2	16	1.79	2	8	100	0.38	44.3	def	531	425	11.7	-	
Vandoros Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	11	M	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	24.7	pl	313	425	6.4	-	
	12	W	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	22.9	pl	313	425	6.4	-	
	13	D	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27	pl	313	425	6.4	-	
	14	R	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27	pl	313	425	6.4	-	
	15	RD	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27	pl	313	425	6.4	-	
	16	N	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27	pl	313	425	6.4	-	
	17	NP	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	23.8	pl	313	425	6.4	-	
18	E	250	250	225	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	36.8	pl	313	425	6.4	-		
Júlio et al. (2005)	19	M2	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.9	def	400	400	5.0	-	
	20	M3	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.4	def	400	400	5.0	-	
	21	M4	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.3	def	400	400	5.0	-	
	22	M5	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.4	def	400	400	5.0	-	
	23	M6	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.7	def	400	400	5.0	-	
	24	M7	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.8	def	400	400	5.0	-	

Πίνακας 1.2.2: Χαρακτηριστικά αρχικών δοκιμών (πιρρήνας σύνθετης διατομής) (συνέχεια)

Αναφορά	A/A	Όνομασία Δοκιμών	Αρχικά Δοκίμια																
			$b_c^*$	$h_c^*$	$d_c^*$	$n_c$	$n_{c,mid}$	$d_{b,c}^*$	$\rho_c^{\#}$	Σκέλη συνδ.	$d_{bs,c}^*$	$s_c^*$	$\rho_{bs,c}^{\#}$	$f_{c,c}^{\S}$	Τύπος ράβδου	$f_{y,c}^{\S}$	$f_{yk,c}^{\S}$	$L_{sp}/h_c$	Μάτιση ( $d_{b,c}$ )
Bousias et al. (2006)	25	R-RCL1	250	500	470	4	0	18	0.81	2	8	200	0.24	36.7	def	514	425	3.2	15
	26	R-RCL3	250	500	470	4	0	18	0.81	2	8	200	0.24	36.8	def	514	425	3.2	30
	27	R-RCL4	250	500	470	4	0	18	0.81	2	8	200	0.24	36.3	def	514	425	3.2	45
Bousias et al. (2007a)	28	Q-RCW	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	22.9	pl	313	425	6.4	-
	29	Q-RCD	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27.4	pl	313	425	6.4	-
	30	Q-RCR	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27.7	pl	313	425	6.4	-
	31	Q-RCRD	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	26.3	pl	313	425	6.4	-
	32	Q-RC	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	26.3	pl	313	425	6.4	-
	33	Q-RCM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bousias et al. (2007b)	34	Q-RCpd*	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	23.1	pl	313	425	6.4	-
	35	Q-RCL1	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	27.5	pl	313	425	6.4	15
	36	Q-RCL2	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	25.6	pl	313	425	6.4	25
	37	Q-RCL01pd	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	28.1	pl	313	425	6.4	15
	38	Q-RCL02pd	250	250	220	4	0	14	0.98	2	8	200	0.24	28.1	pl	313	425	6.4	25
Júlio & Branco (2008)	39	M2	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.9	def	520	520	5.0	-
	40	M3	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.6	def	520	520	5.0	-
	41	M4	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.5	def	520	520	5.0	-
	42	M5	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.6	def	520	520	5.0	-
	43	M6	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.7	def	520	520	5.0	-
	44	M7	200	200	180	6	0	10	1.18	2	6	150	0.22	28.9	def	520	520	5.0	-

\* mm, # %, § MPa, Μάτιση ( $D_b$ ): το μήκος της μάτισης δίνεται ως συνάρτηση της διαμέτρου των διαμήκων οπλισμών ( $D_b$ ), Τύπος ράβδου: pl λείες ράβδοι, def – ράβδοι με ραβδώσεις

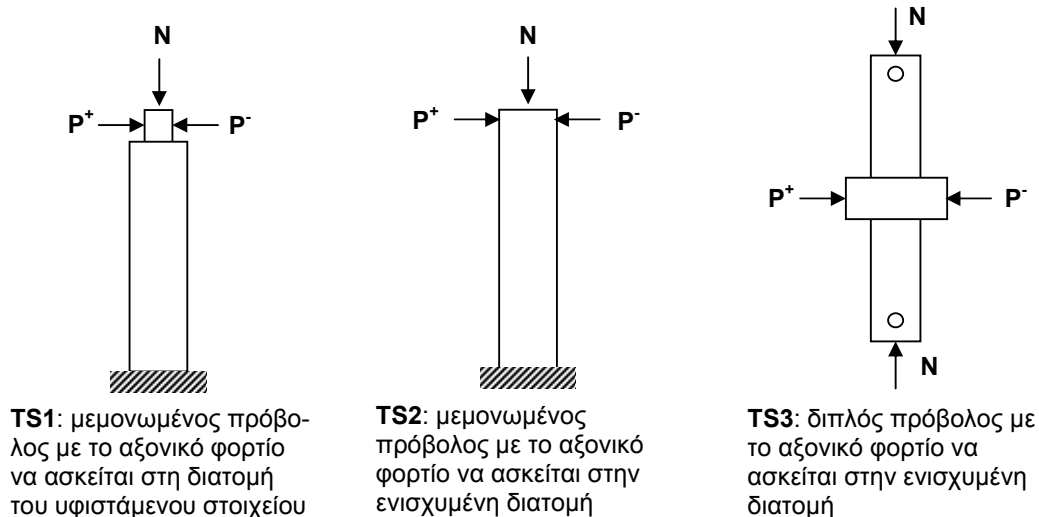
Πίνακας 1.2.3: Χαρακτηριστικά πρισματικών στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ

Αναφορά	Α/Α	Ονομασία Δοκιμίων	Ενισχυμένα Δοκίμια																	Αρχική βλάβη	Φόρτιση	Τρόπος σύνδεσης	Κατασκευή μανδύα	Αγκύρωση διαμ. Οπλ.	Πειραμ. Διάταξη	
			$b_J^*$	$h_J^*$	$d_J^*$	$n_J$	$n_{J,mid}$	$d_{b,J}^*$	$\rho_{J,r}^{\#}$	Σκέλη συνδ.	$d_{bs,J}^*$	$s_J^*$	$\rho_{ls,J}^{\#}$	$f_{c,J}^{\$}$	Τύπος ράβδου	$f_{y,J}^{\$}$	$f_{m,J}^{\$}$	$L_v/h_J$	$\nu^{\#}$							$L_v^*$
Rodriquez & Park (1994)	1	SS1	550	550	512	8	0	16	0.89	2	10	95	0.36	32.9	def	502	340	2.6	10.4	1425	√	c	R	C	HS	TS3
	2	SS2	550	550	512	8	0	16	0.89	2	10	95	0.36	34	def	502	340	2.6	10.6	1425	-	c	R	C	HS	TS3
	3	SS3	550	550	503	8	4	12	0.75	4	10	72	0.94	19.4	def	491	330	2.6	8.3	1425	-	c	R	C	HS	TS3
	4	SS4	550	550	503	8	4	12	0.75	4	10	72	0.94	25.2	def	491	330	2.6	9.9	1425	√	c	R	C	HS	TS3
Gomes & Appleton (1998)	5	P2R	260	260	233	4	0	12	1.64	2	6	75	0.33	58.2	def	480	480	3.8	6.4	1000	√	c	RE	C	E	TS2
	6	P3R	260	260	233	4	0	12	1.64	2	6	50	0.49	49.6	def	480	480	3.8	6.5	1000	√	c	RE	C	E	TS2
	7	P4	260	260	233	4	0	12	1.64	2	6	75	0.33	56.2	def	480	480	3.8	6.3	1000	M	c	-	-	-	TS2
Ilki et al. (1998)	8	7	500	500	470	10	6	14	1.54	2	8	100	0.22	14.9	def	501	425	7.0	0.0	3500	M	m	R	C	E	TS2
	9	8	500	500	470	10	6	14	1.54	2	8	100	0.22	7	def	501	425	7.0	0.0	3500	√	c	R	C	E	TS2
	10	9	500	500	470	10	6	14	1.54	2	8	100	0.22	12.9	def	501	425	7.0	0.0	3500	√	c	R	C	E	TS2
Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	11	M	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	24.7	def	487	599	4.0	23.0	1600	-	c	-	C	AF	TS1
	12	W	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	18.8	def	487	599	4.0	22.1	1600	-	c	W	C	AF	TS1
	13	D	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	55.8	def	487	599	4.0	11.3	1600	-	c	D	S	AF	TS1
	14	R	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	55.8	def	487	599	4.0	11.3	1600	-	c	R	S	AF	TS1
	15	RD	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	55.8	def	487	599	4.0	11.3	1600	-	c	RD	S	AF	TS1
	16	N	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	17.8	def	487	599	4.0	21.6	1600	-	c	Ws	C	AF	TS1
	17	NP	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	34.5	def	487	599	4.0	15.9	1600	-	c	WsP	C	AF	TS1
18	E	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	24	def	487	599	4.0	19.9	1600	-	c	DWs	C	AF	TS1	
Júlio et al. (2005)	19	M2	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	68.6	def	400	400	3.7	5.0	900	-	m	GL	C	E	TS1
	20	M3	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	28.4	def	400	400	3.7	8.2	900	M	m	-	C	E	TS1
	21	M4	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	64.8	def	400	400	3.7	5.2	900	-	m	NS	C	E	TS1
	22	M5	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	67.8	def	400	400	3.7	5.0	900	-	m	R	C	E	TS1
	23	M6	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	66.7	def	400	400	3.7	5.1	900	-	m	RD	C	E	TS1
	24	M7	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	65.5	def	400	400	3.7	5.1	900	-	m	RP	C	E	TS1

Πίνακας 1.2.3: Χαρακτηριστικά πρισματικών στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ (συνέχεια)

Αναφορά	A/A	Όνομασία Δοκιμίων	Ενισχυμένα Δοκίμια																		Αρχική βλάβη	Φόρτιση	Τρόπος σύνδεσης	Κατασκευή μανδύα	Αγκύρωση διαμ. Οπλ.	Πειραμ. Διάταξη
			b <sub>j</sub> <sup>*</sup>	h <sub>j</sub> <sup>*</sup>	d <sub>j</sub> <sup>*</sup>	n <sub>j</sub>	n <sub>j, mid</sub>	d <sub>b, j</sub> <sup>*</sup>	ρ <sub>j</sub> <sup>#</sup>	Σκέλη συνδ.	d <sub>b, j</sub> <sup>*</sup>	s <sub>j</sub> <sup>*</sup>	ρ <sub>b, j</sub> <sup>#</sup>	f <sub>c, j</sub> <sup>§</sup>	Τύπος ράβδου	f <sub>y, j</sub> <sup>§</sup>	f <sub>yw, j</sub> <sup>§</sup>	L <sub>v</sub> /h <sub>j</sub>	v <sup>#</sup>	L <sub>v</sub> <sup>*</sup>						
Bousias et al. (2006)	25	R-RCL1	400	650	600	6	0	18	1.13	2	10	100	0.44	55.3	def	514	599	2.5	7.9	1600	-	c	NS	S	AF	TS1
	26	R-RCL3	400	650	605	6	0	18	1.13	2	10	100	0.44	55.3	def	514	599	2.5	7.9	1600	-	c	NS	S	AF	TS1
	27	R-RCL4	400	650	600	6	0	18	1.13	2	10	100	0.44	55.3	def	514	599	2.5	6.2	1600	-	c	NS	S	AF	TS1
Bousias et al. (2007a)	28	Q-RCW	400	400	355	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	28.7	def	487	599	4.0	14.1	1600	-	c	W	S	AF	TS1
	29	Q-RCD	400	400	355	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	55.3	def	487	599	4.0	10.6	1600	-	c	D	S	AF	TS1
	30	Q-RCR	400	400	355	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	55.3	def	487	599	4.0	11.2	1600	-	c	R	S	AF	TS1
	31	Q-RCRD	400	400	355	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	53.2	def	487	599	4.0	11.7	1600	-	c	RD	S	AF	TS1
	32	Q-RC	400	400	355	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	55.3	def	487	599	4.0	10.1	1600	-	c	-	S	AF	TS1
	33	Q-RCM	400	400	350	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	30.6	def	487	599	4.0	18.0	1600	M	c	-	S	AF	TS1
Bousias et al. (2007b)	34	Q-RCpd*	400	400	355	4	0	20	1.29	2	10	100	0.45	24.1	def	487	599	4.0	8.1	1600	√	c	-	C	AF	TS1
	35	Q-RCL1	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	55.3	def	487	599	4.0	10.6	1600	-	c	-	S	AF	TS1
	36	Q-RCL2	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	55.3	def	487	599	4.0	10.8	1600	-	c	-	S	AF	TS1
	37	Q-RCL01pd	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	28.7	def	487	599	4.0	16.1	1600	√	c	R	S	AF	TS1
	38	Q-RCL02pd	400	400	360	4	0	20	1.29	2	10	100	0.44	28.7	def	487	599	4.0	17.6	1600	√	c	R	S	AF	TS1
Júlio & Branco (2008)	39	M2	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	68.7	def	520	520	3.7	5.0	900	-	c	GL	C	E	TS1
	40	M3	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	28.6	def	520	520	3.7	8.2	900	M	c	-	C	E	TS1
	41	M4	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	63.3	def	520	520	3.7	5.2	900	-	c	NS	C	E	TS1
	42	M5	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	61	def	520	520	3.7	5.0	900	-	c	R	C	E	TS1
	43	M6	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	65	def	520	520	3.7	5.1	900	-	c	RD	C	E	TS1
	44	M7	270	270	250	6	0	10	1.43	2	6	75	0.31	65.9	def	520	520	3.7	5.1	900	-	c	RP	C	E	TS1

\* mm, # %, § MPa, Μάτιση (D<sub>b</sub>): το μήκος της μάτισης δίνεται ως συνάρτηση της διαμέτρου των διαμήκων οπλισμών (D<sub>b</sub>), Τύπος ράβδου: ρl λείες ράβδοι, def – ράβδοι με ραβδώσεις, Αρχική βλάβη: M – μονολιθική κατασκευή, Φόρτιση: c – ανακυκλιζόμενη φόρτιση, m – μονότονη φόρτιση, Τρόπος σύνδεσης: NS – φυσική διεπιφάνεια, W – συγκόλληση παλαιών και νέων οπλισμών μέσω οπλισμών σχήματος U, D – βλήτρα, R – εκτράχυνση επιφάνειας παλαιάς διατομής, RD – βλήτρα και εκτράχυνση επιφάνειας παλαιάς διατομής, RE – εκτράχυνση και επάλειψη με ρητίνη, GL – επάλειψη με λιπαντικό, RP – εκτράχυνση και κατασκευή μανδύα παρουσία αξονικού φορτίου, Ws: συγκόλληση των σκελών των πρώτων 4 συνδετήρων από τη βάση, WsP: συγκόλληση των σκελών των πρώτων 4 συνδετήρων από τη βάση και κατασκευή μανδύα παρουσία αξονικού φορτίου, DWs: βλήτρα και συγκόλληση των σκελών των πρώτων 4 συνδετήρων από τη βάση, Κατασκευή μανδύα: C – έγχυτος μανδύας, S – εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, Αγκύρωση διαμ. οπλισμού μανδύα: AF – τοποθέτηση διαμήκους οπλισμού κατά τη σκυροδέτηση του θεμελίου, E: διάνοιξη οπών και έγχυση ρητίνης για τη στερέωση του διαμήκους οπλισμού. TS1, TS2, TS3 βλέπε Σχήμα 1.2.1



**Σχήμα 1.2.1** Ορισμός των πειραματικών διατάξεων και του τρόπου επιβολής του αξονικού φορτίου για τα δοκίμια της πειραματικής βάσης.

#### 1.2.4.2 Διγραμμική προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών απόκρισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δύο μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Σημαντικός είναι ο ορισμός του σημείου διαρροής και του σημείου αστοχίας. Σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ, §7.1.2.2, “Η προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης μέσω ενός πολυγραμμικού διαγράμματος είναι γενικώς επαρκής για τις ανάγκες 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.”, δεν δίνεται ένας μονοσήμαντος ορισμός για το σημείο διαρροής, αλλά είναι αποδεκτή η διγραμμική προσέγγιση διαγραμμάτων δυνάμεων – παραμορφώσεων. Σε ό,τι αφορά στην παραμόρφωση αστοχίας στην §7.1.2.4 δίνεται ο εξής ορισμός: “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,  $\delta_w$ , επομένως, ορίζεται εκείνη η τιμή που αντιστοιχεί σε απόκριση  $F$  μειωμένη κατά 20% έναντι της μέγιστης.”

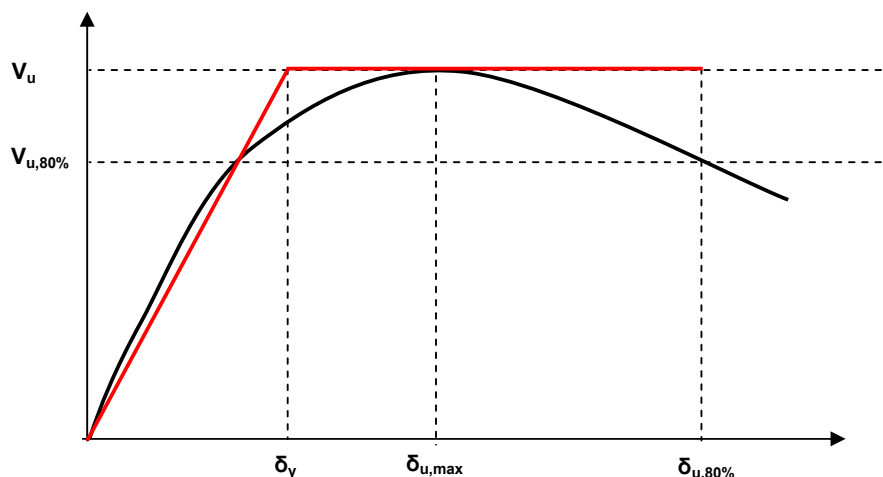
Για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, εξήχθησαν οι περιβάλλουσες των υστερητικών καμπυλών απόκρισης. Επίσης, έγινε ψηφιοποίηση των υστερητικών καμπυλών προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στις συγκρίσεις με το αναλυτικό μοντέλο του Π.Ε 1.1. Οι περιβάλλουσες πολυγραμμικές καμπύλες μετατράπηκαν σε διγραμμικές ακολουθώντας δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Αυτό συνεπάγεται διαφορετικό ορισμό του σημείου διαρροής και αστοχίας για την κάθε διαδικασία μετατροπής της πολυγραμμικής καμπύλης σε διγραμμική, με σημαντικότερη τη διαφορά που παρατηρείται στον ορισμό του σημείου διαρροής. Σημειώνεται ότι οι υστερητικές καμπύλες στις διάφορες πειραματικές μελέτες δίνονται είτε σε όρους δυνάμεων – μετακινήσεων ( $F-\delta$ ) είτε σε όρους δυνάμεων – στρωφών ( $F-\theta$ ).



**Πρώτη μεθοδολογία:** Σύμφωνα με την πρώτη μεθοδολογία ορίζεται μια ελαστοπλαστική (χωρίς κράτυνση) καμπύλη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.2. Ορίζονται δυο παράλληλες ευθείες με τον άξονα των μετακινήσεων που η μια περνάει από το μέγιστο φορτίο,  $V_u$ , και η δεύτερη από το 80% του μέγιστου φορτίου,  $80\%V_u$ . Η ευθεία που ενώνει το σημείο της αρχής των αξόνων με το σημείο που ορίζεται από την τομή πολυγραμμικής καμπύλης με την ευθεία που αντιστοιχεί στο  $80\%V_u$  αποτελεί τον ελαστικό κλάδο της διγραμμικής καμπύλης. Το σημείο διαρροής ορίζεται ως το σημείο τομής του ελαστικού κλάδου με την ευθεία που αντιστοιχεί στο  $V_u$ .

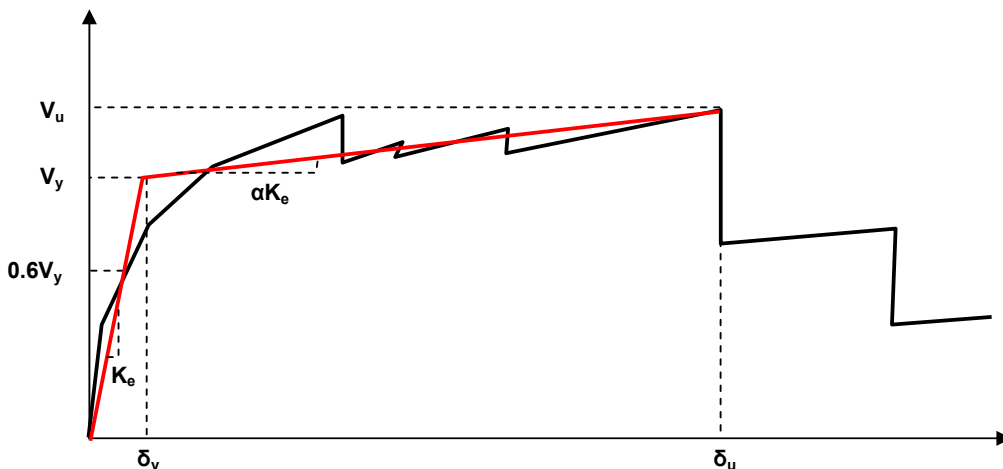
Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή ορίζονται τα εξής μεγέθη:

- $\delta_y$ : μετακίνηση διαρροής
- $\delta_{u,max}$ : μετακίνηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή
- $\delta_{u,80\%}$ : μετακίνηση αστοχίας που αντιστοιχεί σε πτώση αντοχής 80%
- $V_u$ : μέγιστη αντοχή η οποία συμπίπτει με την αντοχή διαρροής,  $V_y$
- $V_{u,80\%}$ : αντοχή μειωμένη κατά 80% σε σχέση με τη μέγιστη,  $V_u$



Σχήμα 1.2.2 Ορισμός διγραμμικής καμπύλης.

**Δεύτερη μεθοδολογία:** Στη δεύτερη περίπτωση για την κατασκευή της διγραμμικής προσεγγιστικής καμπύλης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Bilin (Παναγόπουλος και Κάππος 2009), το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Κατασκευών Ο/Σ και Φέρουσας Τοιχοποιίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Στη μεθοδολογία που ακολουθείται θεωρείται ότι για συγκεκριμένη πτώση της μέγιστης αντοχής που μπορεί να ορισθεί από τον χρήστη θα πρέπει να ισχύει ο κανόνας των ίσων εμβαδών μεταξύ πραγματικού και διγραμμικού διαγράμματος (ίση απορρόφηση ενέργειας), καθώς και ότι η κλίση του ελαστικού κλάδου ορίζεται από το σημείο της αρχής των αξόνων και το σημείο στο οποίο η αντοχή είναι ίση με το 60% της δύναμης διαρροής  $V_y$  (Σχήμα 1.2.3). Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της βάσης είναι (i) πτώση της μέγιστης αντοχής κατά 80%, (ii) να υπάρχει κράτυνση στο μετελαστικό κλάδο και (iii) περιορισμός της κλίσης του μετελαστικού κλάδου μεταξύ 0 και 10%.



**Σχήμα 1.2.3** Ορισμός διγραμμικής καμπύλης με βάση την αρχή της ίσης απορρόφησης ενέργειας (Παναγόπουλος και Κάππος, 2009)

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή ορίζονται τα εξής μεγέθη:

- $\delta_y$ : μετακίνηση διαρροής
- $\delta_u$ : μετακίνηση αστοχίας
- $V_y$ : αντοχή διαρροής
- $V_u$ : μέγιστη αντοχή

Εκτός από τις τιμές των μετακινήσεων στις διάφορες θέσεις, όπως ορίζονται στα Σχήματα 1.2.2 και 1.2.3, στα αποτελέσματα δίνονται και οι τιμές των αντίστοιχων στρωφών ( $\theta_y$ ,  $\theta_{u,max}$ ,  $\theta_{u,80\%}$ ,  $\theta_u$ ). Επίσης, η αντοχή δίνεται και σε όρους ροπών ( $M_y$ ,  $M_{u,max}$ ,  $M_{u,80\%}$ ,  $M_u$ ). Επιπλέον, ορίζονται οι εξής όροι πλαστιμότητας:

- Πλαστιμότητες μετακινήσεων:  
1<sup>η</sup> Μεθοδολογία:  $\mu_{u,\delta,max} = \delta_{u,max} / \delta_y$ ,  $\mu_{u,\delta,80\%} = \delta_{u,80\%} / \delta_y$ , 2<sup>η</sup> Μεθοδολογία:  $\mu_{u,\delta} = \delta_u / \delta_y$
- Πλαστιμότητες στρωφών:  
1<sup>η</sup> Μεθοδολογία:  $\mu_{u,\theta,max} = \theta_{u,max} / \theta_y$ ,  $\mu_{u,\theta,80\%} = \theta_{u,80\%} / \theta_y$ , 2<sup>η</sup> Μεθοδολογία:  $\mu_{u,\theta} = \theta_u / \theta_y$

Σημειώνεται ότι λόγω της έλλειψης κοινής πρακτικής σε διεθνές επίπεδο αναφορικά με τη διγραμμική προσέγγιση της καμπύλης 'δύναμης' - 'παραμόρφωσης', είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η επιρροή της μεθόδου διγραμμικοποίησης, όπως γίνεται στο παρόν έργο.

### 1.2.5 Αποτελέσματα της επεξεργασίας

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας παρουσιάζονται στους Πίνακες 1.2.4 και 1.2.5 για την πρώτη και δεύτερη μεθοδολογία αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι τιμές που αφορούν σε όρους αντοχής για τα δοκίμια M3, M4, M5 και M7 έχουν παρθεί από την εργασία Júlio et al. (2005) δεδομένου ότι δεν δίνονται περαιτέρω στοιχεία στο σώμα της εργασίας.

Πίνακας 1.2.4: Επεξεργασία δεδομένων βάσει της 1<sup>ης</sup> μεθοδολογίας διγραμμικοποίησης

Αναφορά	Α/Α	Ονομασία Δοκιμίων	Αποτελέσματα επεξεργασίας βάσει 1 <sup>ης</sup> Μεθοδολογίας													
			$\theta_y$	$\theta_{u,max}$	$\theta_{u,80\%}$	$\mu_{u,\beta,max}$	$\mu_{u\beta,80\%}$	$\delta^*_y$	$\delta^*_{u,max}$	$\delta^*_{u,80\%}$	$\mu_{u,\delta,max}$	$\mu_{u\delta,80\%}$	$M^*_{u,max}$	$M^*_{u,80\%}$	$V_{u,max}$	$V_{u,80\%}$
Rodriquez & Park (1994)	1	SS1	0.64%	1.21%	3.60%	1.90	5.66	9.08	17.20	51.34	1.90	5.66	545.3	436.2	382.6	306.1
	2	SS2	0.68%	1.56%	3.13%	2.29	4.60	9.69	22.17	44.60	2.29	4.60	566.0	452.8	397.2	317.7
	3	SS3	0.56%	0.88%	2.78%	1.58	4.98	7.97	12.57	39.66	1.58	4.98	423.7	338.9	297.3	237.8
	4	SS4	0.68%	1.86%	2.80%	2.73	4.10	9.71	26.50	39.87	2.73	4.10	478.8	383.1	336.0	268.8
Gomes & Appleton (1998)	5	P2R	1.00%	3.04%	4.66%	3.05	4.67	9.97	30.35	46.55	3.05	4.67	82.3	65.8	82.3	65.8
	6	P3R	1.01%	2.58%	6.84%	2.56	6.80	10.06	25.75	68.37	2.56	6.80	81.7	65.4	81.7	65.4
	7	P4	1.15%	3.55%	6.39%	3.09	5.55	11.50	35.51	63.89	3.09	5.55	79.4	63.5	79.4	63.5
Ilki et al. (1998)	8	7	1.92%	3.21%	3.21%	1.67	1.67	67.25	112.42	112.42	1.67	1.67	348.0	278.4	99.4	79.5
	9	8	1.40%	2.35%	2.95%	1.68	2.11	48.86	82.23	103.24	1.68	2.11	225.2	180.2	64.4	51.5
	10	9	1.78%	2.30%	2.30%	1.29	1.29	62.47	80.66	80.66	1.29	1.29	244.1	195.3	69.7	55.8
Vandoros Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	11	M	0.73%	2.05%	4.87%	2.82	6.71	11.61	32.74	77.92	2.82	6.71	286.6	229.3	179.2	143.3
	12	W	0.95%	2.06%	5.73%	2.17	6.02	15.23	33.00	91.68	2.17	6.02	231.0	184.8	144.4	115.5
	13	D	1.20%	3.42%	6.16%	2.84	5.12	19.25	54.71	98.53	2.84	5.12	235.6	188.4	147.2	117.8
	14	R	1.02%	2.74%	5.65%	2.69	5.54	16.32	43.91	90.44	2.69	5.54	250.5	200.4	156.6	125.2
	15	RD	0.79%	3.35%	5.41%	4.24	6.85	12.63	53.56	86.54	4.24	6.85	268.6	214.9	167.9	134.3
	16	N	0.79%	1.08%	3.65%	1.36	4.60	12.68	17.28	58.32	1.36	4.60	240.8	192.7	150.5	120.4
	17	NP	1.58%	3.42%	4.41%	2.16	2.78	25.36	54.73	70.51	2.16	2.78	281.0	224.8	175.6	140.5
Júlio et al. (2005)	18	E	1.18%	2.92%	5.98%	2.47	5.06	18.91	46.76	95.70	2.47	5.06	262.1	209.7	163.8	131.0
	19	M2	1.07%	7.90%	7.90%	7.38	7.38	10.70	78.97	78.97	7.38	7.38	72.1	57.7	72.1	57.7
	20	M3											73.5	58.8	73.5	58.8
	21	M4											77.5	62.0	77.5	62.0
	22	M5											96.9	77.5	96.9	77.5
	23	M6	0.53%	9.12%	9.12%	17.30	17.30	5.27	91.20	91.20	17.30	17.30	83.7	42.7	83.7	42.7
24	M7											80.7	64.6	80.7	64.6	

\*mm, \*\*kNm, <sup>§</sup>kN

Πίνακας 1.2.4: Επεξεργασία δεδομένων βάσει της 1<sup>ης</sup> μεθοδολογίας διγραμμικοποίησης (συνέχεια).

Αναφορά	A/A	Ονομασία Δοκιμών	Αποτελέσματα επεξεργασίας βάσει 1 <sup>ης</sup> Μεθοδολογίας													
			$\theta$ $\gamma$	$\theta$ $u_{i,max}$	$\theta$ $u_{i,80\%}$	$\mu$ $u_{\theta,max}$	$\mu$ $u_{\theta,80\%}$	$\delta^*$ $\gamma$	$\delta^*$ $u_{i,max}$	$\delta^*$ $u_{i,80\%}$	$\mu$ $u_{\delta,max}$	$\mu$ $u_{\delta,80\%}$	$M^{**}$ $u_{i,max}$	$M^{**}$ $u_{i,80\%}$	$V$ & $u_{i,max}$	$V$ & $u_{i,80\%}$
Bousias et al. (2006)	25	R-RCL1	0.83%	1.48%	3.81%	1.79	4.62	13.21	23.61	61.00	1.79	4.62	569.9	455.9	356.2	284.9
	26	R-RCL3	0.94%	2.40%	4.07%	2.55	4.33	15.04	38.34	65.07	2.55	4.33	657.9	526.4	411.2	329.0
	27	R-RCL4	0.84%	2.38%	4.59%	2.83	5.47	13.44	38.04	73.44	2.83	5.47	580.1	464.1	362.6	290.1
Bousias et al. (2007a)	28	Q-RCW	1.16%	2.99%	5.43%	2.58	4.70	18.50	47.78	86.85	2.58	4.70	237.5	190.0	148.4	118.7
	29	Q-RCD	1.00%	1.77%	6.18%	1.77	6.15	16.06	28.37	98.81	1.77	6.15	249.6	199.7	156.0	124.8
	30	Q-RCR	1.02%	3.44%	5.92%	3.38	5.83	16.25	54.99	94.78	3.38	5.83	274.1	219.3	171.3	137.1
	31	Q-RCRD	1.03%	3.71%	6.00%	3.59	5.81	16.50	59.31	95.96	3.59	5.81	262.9	210.3	164.3	131.4
	32	Q-RC	1.03%	3.93%	5.52%	3.83	5.38	16.41	62.90	88.35	3.83	5.38	241.4	193.2	150.9	120.7
	33	Q-RCM	1.03%	2.66%	5.09%	2.59	4.95	16.45	42.54	81.39	2.59	4.95	274.1	219.3	171.3	137.0
Bousias et al. (2007b)	34	Q-RCpd	1.26%	2.10%	4.86%	1.67	3.87	20.09	33.54	77.84	1.67	3.87	264.2	211.3	165.1	132.1
	35	Q-RCL1	1.10%	2.13%	5.08%	1.94	4.63	17.56	34.03	81.26	1.94	4.63	227.8	182.3	142.4	113.9
	36	Q-RCL2	0.59%	1.93%	4.71%	3.30	8.03	9.39	30.95	75.42	3.30	8.03	256.1	204.9	160.1	128.1
	37	Q-RCL01pd	0.94%	1.84%	4.45%	1.96	4.73	15.07	29.46	71.24	1.96	4.73	209.6	167.7	131.0	104.8
	38	Q-RCL02pd	0.81%	2.27%	5.03%	2.81	6.24	12.91	36.25	80.54	2.81	6.24	257.1	205.7	160.7	128.5
Júlio Branco (2008)	39	M2	0.71%	1.61%	6.80%	2.28	9.63	7.06	16.13	67.98	2.28	9.63	69.4	55.5	69.4	55.5
	40	M3	0.83%	2.95%	4.87%	3.55	5.87	8.30	29.46	48.67	3.55	5.87	73.1	58.5	73.1	58.5
	41	M4	0.87%	2.30%	4.72%	2.65	5.44	8.67	23.00	47.17	2.65	5.44	80.8	64.6	80.8	64.6
	42	M5	0.51%	2.22%	4.74%	4.33	9.22	5.14	22.24	47.40	4.33	9.22	80.2	64.2	80.2	64.2
	43	M6	0.69%	2.29%	5.16%	3.31	7.48	6.90	22.87	51.63	3.31	7.48	81.8	65.4	81.8	65.4
	44	M7	0.86%	2.84%	5.58%	3.29	6.47	8.63	28.36	55.83	3.29	6.47	83.0	66.4	83.0	66.4

\*mm, \*\*kNm,  $\delta$ kN

Πίνακας 1.2.5: Επεξεργασία δεδομένων βάσει της 2<sup>ης</sup> μεθοδολογίας διγραμμοποίησης

Αναφορά	A/A	Ονομασία Δοκιμών	Αποτελέσματα επεξεργασίας βάσει 2 <sup>ης</sup> Μεθοδολογίας							
			$\theta_{\gamma}$	$\theta_{\mu}$	$\mu_{\text{υθ}}$	$\delta^*_{\gamma}$	$\delta^*_{\mu}$	$\mu_{\text{υδ}}$	$M^*_{\mu}$	$V^*_{\mu}$
Rodriquez & Park (1994)	1	SS1	0.62%	3.60%	5.85	8.78	51.34	5.85	527.6	370.2
	2	SS2	0.54%	3.09%	5.68	7.75	44.01	5.68	533.5	374.4
	3	SS3	0.26%	2.68%	10.12	3.77	38.15	10.12	395.4	277.5
	4	SS4	0.50%	2.80%	5.62	7.09	39.87	5.62	464.9	326.2
Gomes & Appleton (1998)	5	P2R	0.91%	4.66%	5.11	9.11	46.55	5.11	75.2	75.2
	6	P3R	0.92%	6.84%	7.46	9.16	68.37	7.46	74.4	74.4
	7	P4	1.09%	6.39%	5.88	10.86	63.89	5.88	74.9	74.9
Ilki et al. (1998)	8	7	0.89%	3.21%	3.59	31.28	112.42	3.59	348.0	99.4
	9	8	0.89%	2.94%	3.31	31.16	103.07	3.31	214.9	61.4
	10	9	0.69%	2.30%	3.34	24.17	80.66	3.34	244.1	69.7
Vandoros Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	11	M	0.27%	4.87%	18.28	4.26	77.92	18.28	267.5	167.2
	12	W	0.55%	5.73%	10.50	8.73	91.68	10.50	218.1	136.3
	13	D	0.76%	6.16%	8.16	12.08	98.53	8.16	221.4	138.4
	14	R	0.58%	5.65%	9.78	9.24	90.44	9.78	233.8	146.1
	15	RD	0.40%	5.41%	13.64	6.34	86.54	13.64	252.7	157.9
	16	N	0.41%	3.65%	8.85	6.59	58.32	8.85	224.8	140.5
	17	NP	1.21%	4.41%	3.65	19.34	70.51	3.65	262.3	163.9
Júlio et al. (2005)	18	E	0.91%	5.98%	6.59	14.51	95.70	6.59	244.6	152.9
	19	M2	0.68%	7.90%	11.69	6.75	78.97	11.69	70.3	70.3
	20	M3							73.5	73.5
	21	M4							77.5	77.5
	22	M5							96.9	96.9
	23	M6	0.59%	9.12%	15.38	5.93	91.20	15.38	80.3	80.3
	24	M7							80.7	80.7

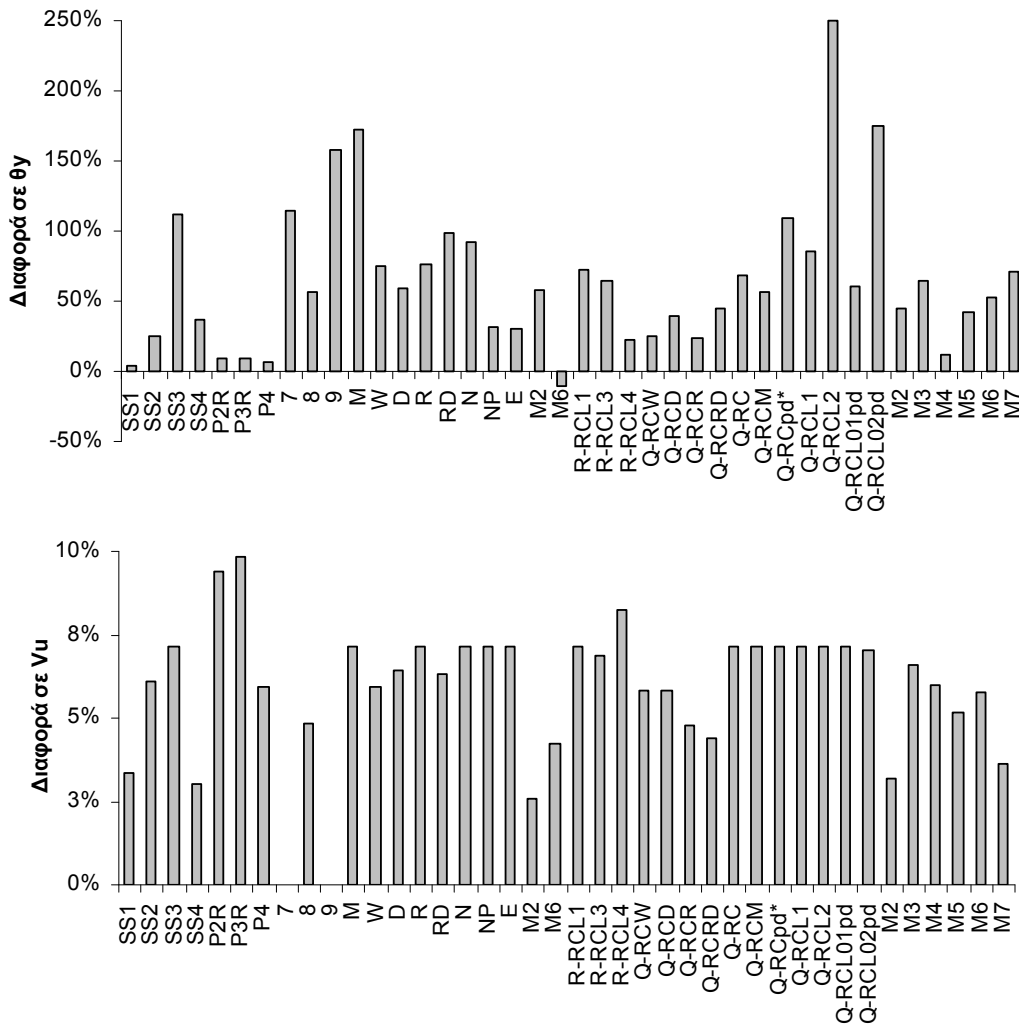
\*mm, \*\*kNm, <sup>δ</sup>kN

**Πίνακας 1.2.5:** Επεξεργασία δεδομένων βάσει της 2<sup>ης</sup> μεθοδολογίας διγραμμικοποίησης (συνέχεια)

Αναφορά	A/A	Ονομασία Δοκιμίων	Αποτελέσματα επεξεργασίας βάσει 2 <sup>ης</sup> Μεθοδολογίας							
			$\sigma_y$	$\sigma_u$	$\mu_{u\theta}$	$\sigma_y^*$	$\sigma_u^*$	$\mu_{u\theta}$	$M_u^{**}$	$V_u^{\delta}$
Bousias et al. (2006)	25	R-RCL1	0.48%	3.81%	7.97	7.66	61.00	7.97	531.9	332.4
	26	R-RCL3	0.57%	4.07%	7.13	9.12	65.07	7.13	615.6	384.7
	27	R-RCL4	0.68%	4.67%	6.83	10.94	74.71	6.83	536.0	335.0
Bousias et al. (2007a)	28	Q-RCW	0.92%	5.43%	5.88	14.78	86.85	5.88	224.4	140.2
	29	Q-RCD	0.72%	6.18%	8.58	11.52	98.81	8.58	235.9	147.4
	30	Q-RCR	0.82%	5.92%	7.18	13.19	94.78	7.18	261.7	163.6
	31	Q-RCRD	0.71%	6.00%	8.42	11.40	95.96	8.42	251.8	157.4
	32	Q-RC	0.61%	5.52%	9.04	9.77	88.35	9.04	225.3	140.8
	33	Q-RCM	0.65%	5.09%	7.77	10.48	81.39	7.77	255.8	159.9
Bousias et al. (2007b)	34	Q-RCpd	0.60%	4.86%	8.12	9.58	77.84	8.12	246.6	154.1
	35	Q-RCL1	0.59%	5.08%	8.56	9.50	81.26	8.56	212.6	132.9
	36	Q-RCL2	0.17%	4.71%	28.06	2.69	75.42	28.06	239.1	149.4
	37	Q-RCL01pd	0.59%	4.45%	7.59	9.39	71.24	7.59	195.6	122.3
	38	Q-RCL02pd	0.29%	5.03%	17.13	4.70	80.54	17.13	240.2	150.1
Júlio Branco (2008)	39	M2	0.49%	6.81%	13.94	4.88	68.08	13.94	67.3	67.3
	40	M3	0.51%	4.87%	9.64	5.05	48.67	9.64	68.6	68.6
	41	M4	0.77%	4.74%	6.13	7.73	47.37	6.13	76.2	76.2
	42	M5	0.36%	4.74%	13.13	3.61	47.40	13.13	76.3	76.3
	43	M6	0.45%	5.15%	11.37	4.53	51.49	11.37	77.3	77.3
	44	M7	0.50%	5.58%	11.08	5.03	55.76	11.08	80.1	80.1

\*mm, \*\*kNm, <sup>δ</sup>kN

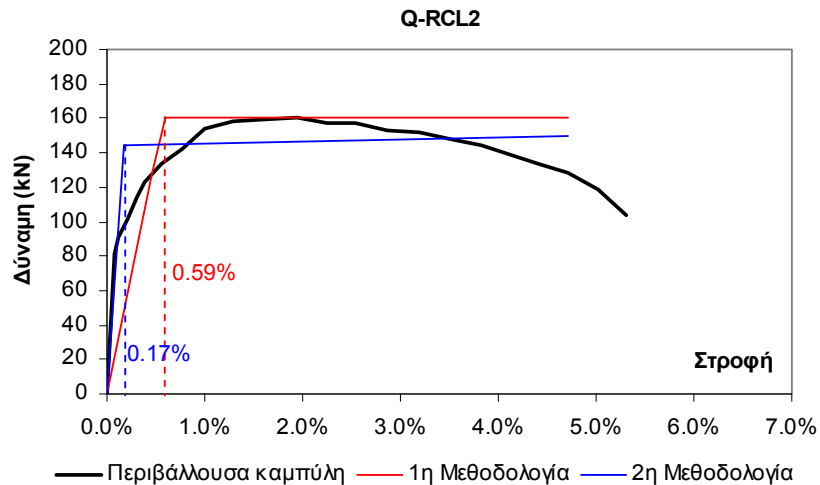
**Σύγκριση αποτελεσμάτων με τις δύο μεθοδολογίες:** Η διαφορά στην εκτίμηση της στροφής διαρροής,  $\theta_y$ , και της μέγιστης αντοχής,  $V_u$ , κάνοντας χρήση της πρώτης μεθοδολογίας σε σχέση με τη δεύτερη παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2.4. Στην περίπτωση της μέγιστης αντοχής η διαφορά στις εκτιμώμενες τιμές φτάνει μέχρι 10%. Σε ό,τι αφορά στη διαφορά στη στροφή διαρροής,  $\theta_y$ , παρατηρείται μεγάλο εύρος διακύμανσης, από -10% μέχρι 250%. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει το πόσο αυθαίρετος μπορεί να είναι ο ορισμός του σημείου διαρροής. Στο Σχήμα 1.2.5 παρουσιάζεται η περίπτωση του δοκιμίου Q-RCL2 όπου παρατηρείται η μέγιστη διαφορά (250%). Η στροφή διαρροής που υπολογίζεται από την πρώτη μεθοδολογία είναι  $\theta_y=0.59\%$  (Πίνακας 1.2.4), ενώ από τη δεύτερη  $\theta_y=0.17\%$  (Πίνακας 1.2.5). Στη δεύτερη περίπτωση είναι πολύ ουσιώδης η επιρροή της κλίσης του ελαστικού κλάδου που ορίζεται από το σημείο της αρχής των αξόνων και το σημείο στο οποίο η αντοχή είναι ίση με το 60% της τέμνουσας διαρροής  $V_y$ .



**Σχήμα 1.2.4** Διαφορά στις τιμές του  $\theta_y$  και  $V_u$  μετά από επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων με τις δυο μεθοδολογίες.

Για την αποφυγή τέτοιων διαφορών στον ορισμό της παραμόρφωσης διαρροής θα ήταν σκόπιμο να υιοθετηθεί διεθνώς ένα κριτήριο με φυσική σημασία, π.χ. η κλίση του πρώτου κλάδου του διαγράμματος να ορίζεται με βάση το σημείο στο οποίο παρατηρείται για πρώτη φορά διαρροή σπλισμού. Βεβαίως στις περισσότερες πειραματικές μελέτες δεν δίνεται αυτή η

πληροφορία και τότε η χρήση απλουστευτικών μεθοδολογιών για τη διγραμμική προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών είναι η μόνη λύση.



**Σχήμα 1.2.5** Διαφορά στις τιμές του  $\theta_y$  με τις 2 μεθόδους επεξεργασίας για το δοκίμιο Q-RCL2 από την εργασία των Bousias et al. (2007b).

### 1.2.6 Βιβλιογραφία Π.Ε. 1.2

- Altun, F., "An Experimental Study of the Jacketed Reinforced-Concrete Beams under Bending," *Construction and Building Materials*, V. 18, 2004, pp. 611-618.
- Bett, B. J., Klinger, R. E., and Jirsa, J. O. (1998). "Lateral load response of strengthened and repaired r.c. columns." *ACI Struct. J.*, 85(5), 499-507.
- Bousias, S., Biskinis, D., Fardis, M. and Spathis, A. (2007a). "Strength, stiffness, and cyclic deformation capacity of the concrete jacketed members." *ACI Struct. J.*, 104(5), 521-531.
- Bousias, S., Spathis, A.-L., Fardis, M.N. (2006). "Concrete or FRP jacketing of columns with lap splices for seismic rehabilitation." *Journal of Advanced Concrete Technology* 4 (3), 431-444.
- Bousias, S., Spathis, A.-L., Fardis, M.N. (2007b). "Seismic retrofitting of columns with lap-spliced smooth bars through FRP or Concrete Jackets." *Journal of Earthq. Engineering* 11, 653-674.
- Choudhuri, D.; Mander, J. B.; and Reinhorn, A. M., "Evaluation of Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Frame Structures: Part I Experimental Performance of Retrofitted Subassemblages," Report No. NCEER-92-0030, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, N.Y., 1992, 173 pp.
- Cotofana, D., and Popa, V., "Experimental Study on Reinforced Concrete Jacketed Columns," Paper 1017, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 2006. (CD-ROM).
- Ersoy, U., Tankut, T., and Suleiman, R. (1993). "Behavior of jacketed columns." *ACI Struct. J.*, 93(3), 288-293.
- Gomes, A. M., and Appleton J. (1998). "Repair and strengthening of R.C. elements under cyclic loading." Proc., 11th Europ. Conf. Earthq. Eng., A.A. Balkema (Rotterdam, The Netherlands), Paris, France, CD-ROM.
- Iliya, R., and Bertero, V. V., "Effects of Amount and Arrangement on Wall-Panel Reinforcement on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Walls," Report No. UCB/EERC-80/04, University of California, Berkeley, Calif, 1980, 154 pp.
- Ilki, A.; Darilmaz, K.; Bakan, I.; Zorbozan, M.; Yuksel, E.; Saruhan, H.; and Karadogan, F., "Jacketing of Prefabricated Columns," Proceedings of the 2nd Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 1998, pp. 329-336.
- Júlio, E. N. B. S.; and Branco, F. A. B., "Reinforced Concrete Jacketing—Interface Influence on Cyclic Loading Response," *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 4, July -Aug. 2008, pp. 471-477.
- Júlio, E. N. B. S.; Branco, F. A. B.; and Silva, V. D., "Reinforced Concrete Jacketing—Interface Influence on Monotonic Loading Response," *ACI Structural Journal*, V. 102, No. 2, Mar.-Apr. 2005, pp. 252-257.

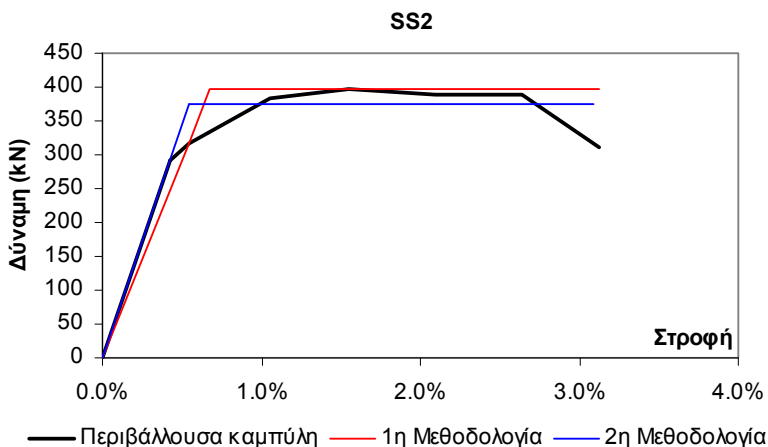
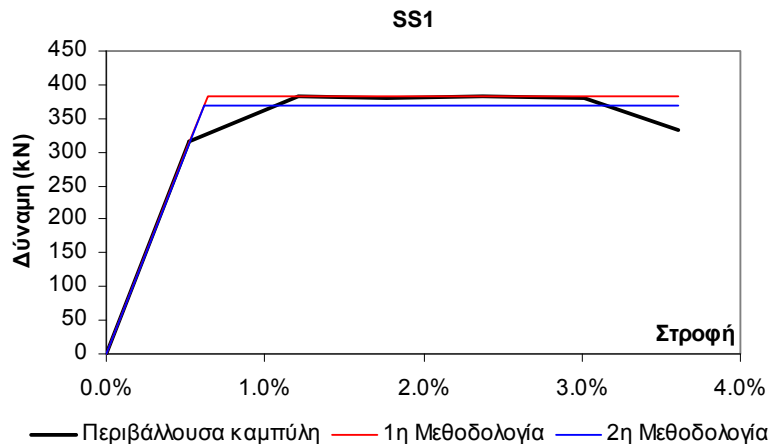


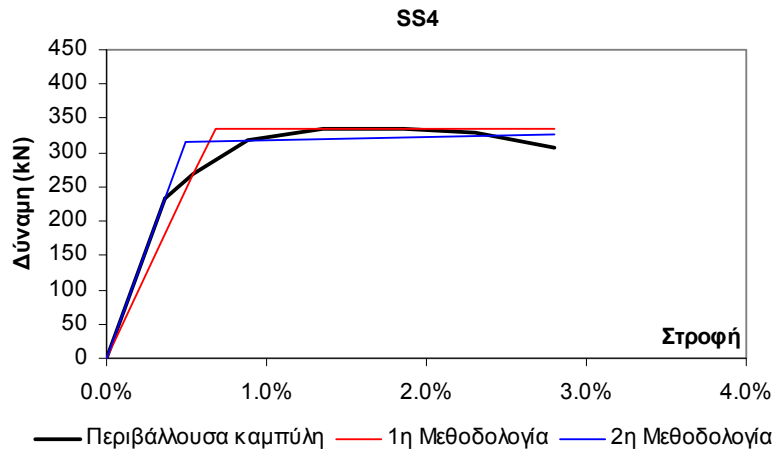
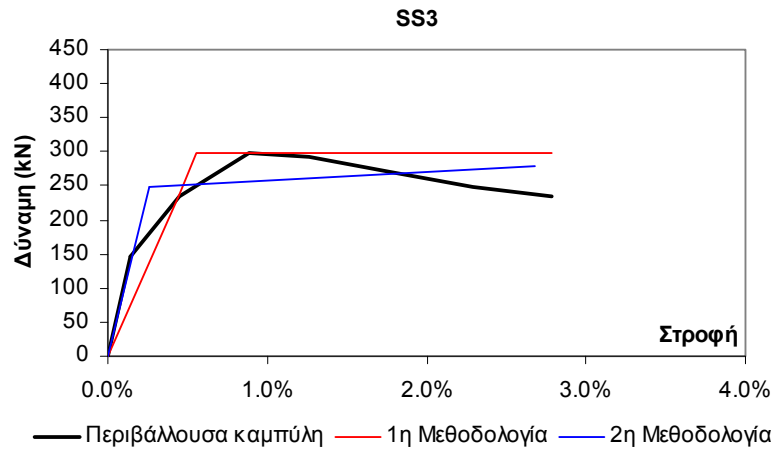
- Rodriguez, M., and Park, R. (1994). "Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing." ACI Struct. J., 91(2), 150-159.
- Vandoros, K. G. and Dritsos, S. E. (2006a). "Interface treatment in shotcrete jacketing of reinforced concrete columns to improve seismic performance." J. Struct. Eng. and Mech., 23(1), 43-61.
- Vandoros, K. G. and Dritsos, S. E. (2006b). "Axial preloading effects when reinforced concrete columns are strengthened by concrete." Progress in Struct. Eng. and Mat. J., 8(3), 79-92.
- Vandoros, K. G. and Dritsos, S. E. (2008). "Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns." Construction and Building Materials, 22, 264-276.
- ΚΑΝΕΠΕ (2011). "Κανονισμός Επεμβάσεων." Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Τελικό Κείμενο, Σεπτέμβριος 2011.
- Παναγόπουλος Γ. και Κάππος Α. «Διγραμμική προσέγγιση διαγραμμάτων μεγεθών δυνάμεων – παραμορφώσεων», 16ο Ελλ. Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, 2009, εργ. αρ. 121105.

### Παράρτημα Π.Ε. 1.2

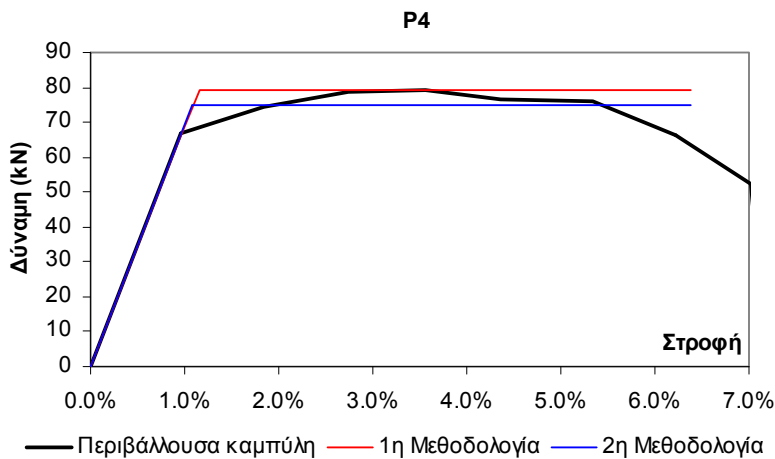
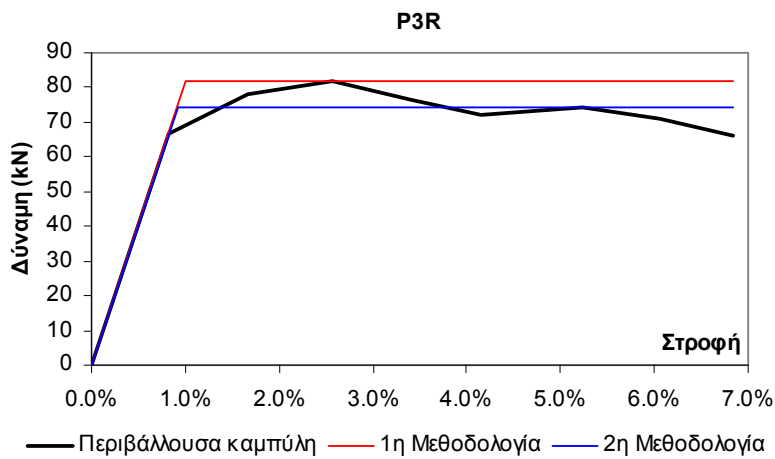
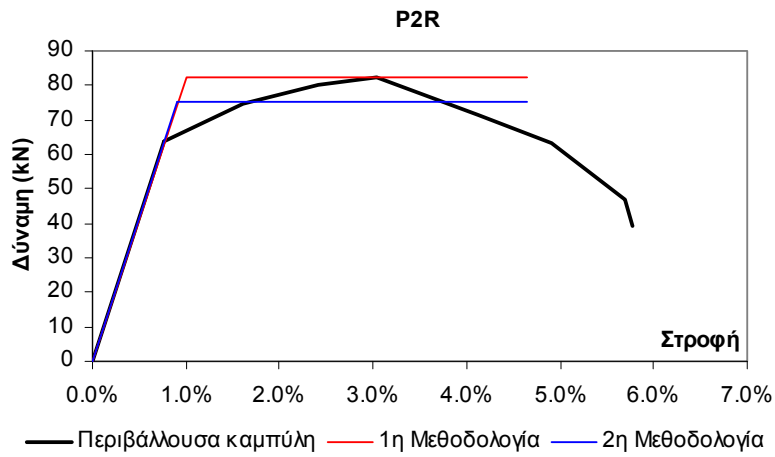
Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται σύγκριση της περιβάλλουσας πειραματικής καμπύλης και των καμπυλών που δίνει η πρώτη και η δεύτερη μεθοδολογία διγραμμοποίησης. Στην περίπτωση των δοκιμών M3, M4, M5, M7 της εργασίας Júlio et al. (2005) δεν δίνονται αποτελέσματα μετά από διγραμμοποίηση διότι στην εργασία δεν υπάρχουν πληροφορίες για τις καμπύλες απόκρισης αυτών των δοκιμών παρά μόνο κάποια αποτελέσματα σε όρους δυνάμεων.

Εργασία των Rodriguez & Park (1994):

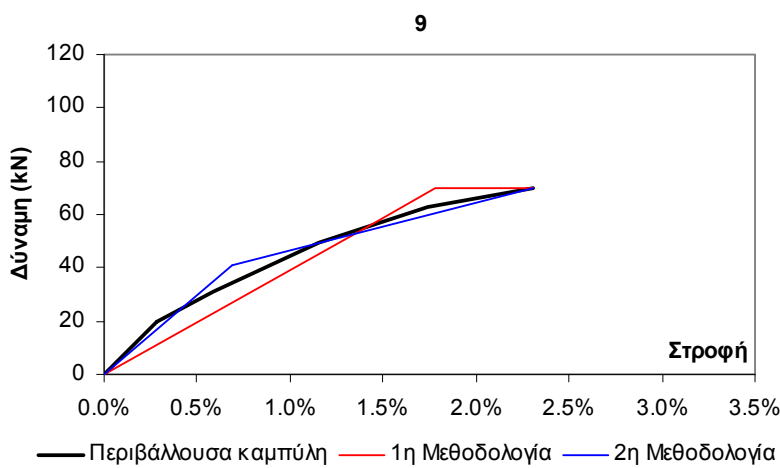
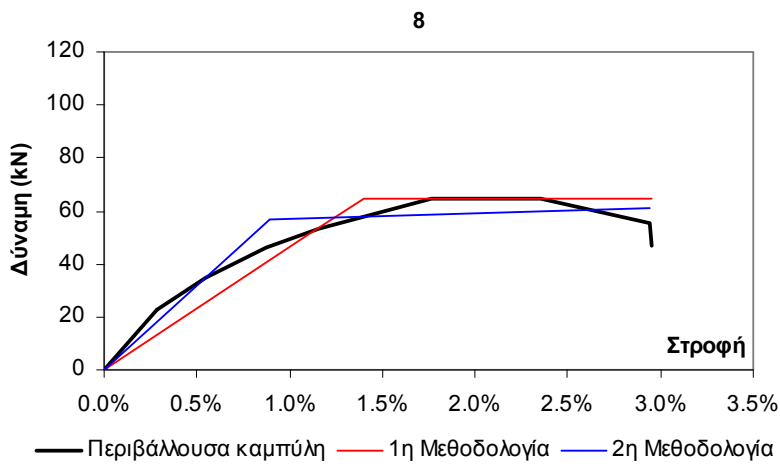
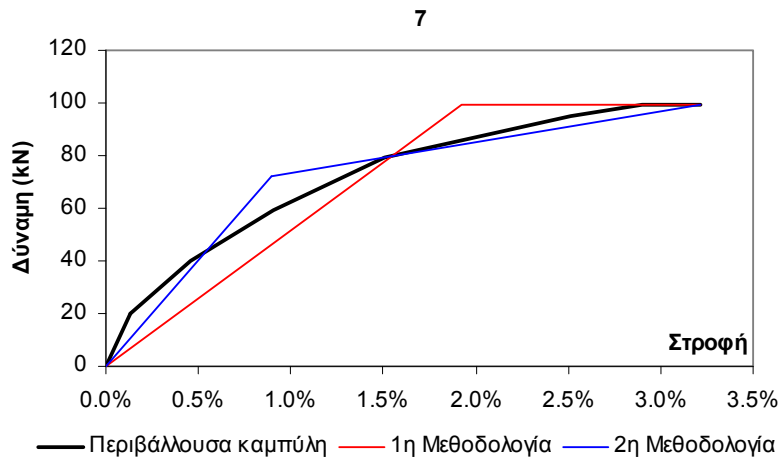




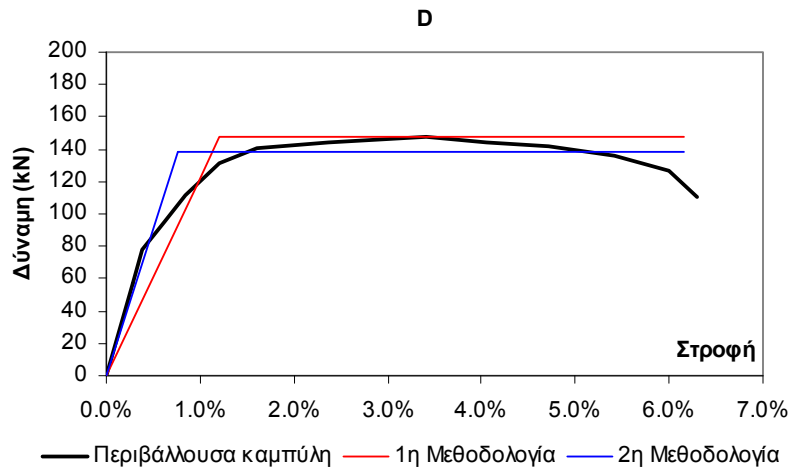
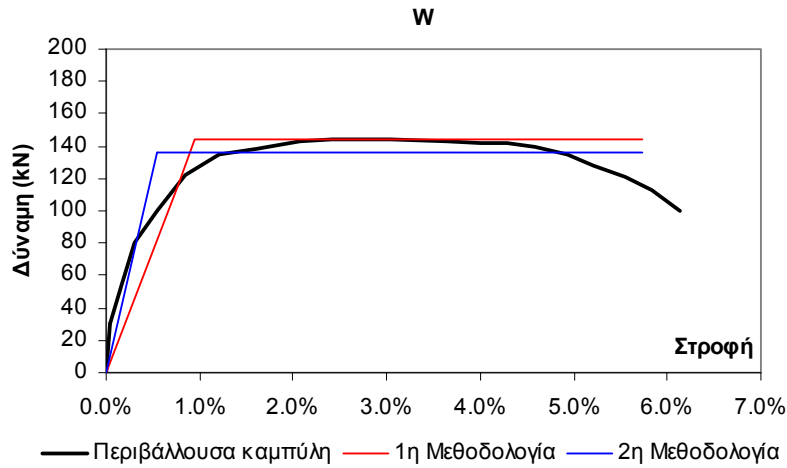
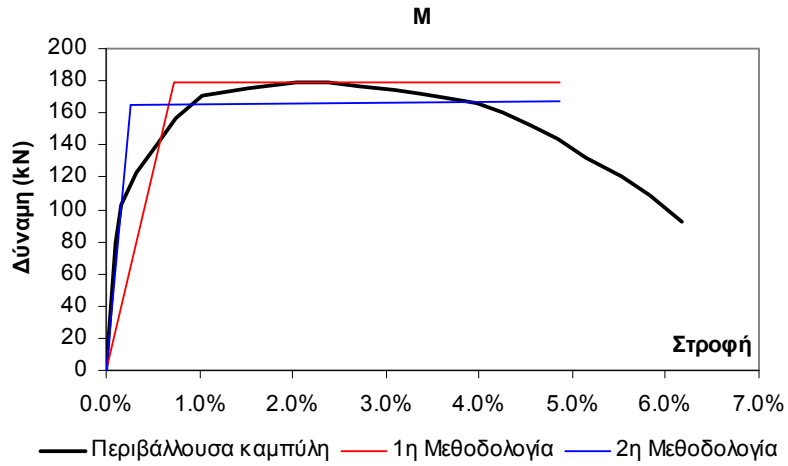
Εργασία των Gomes & Appleton (1998):

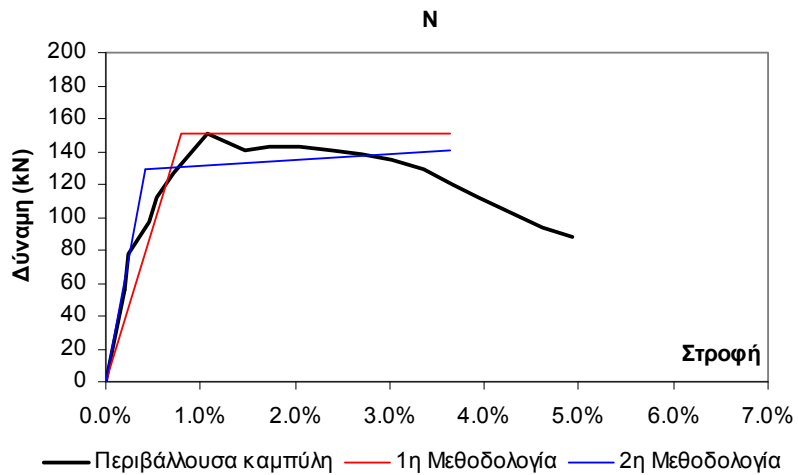
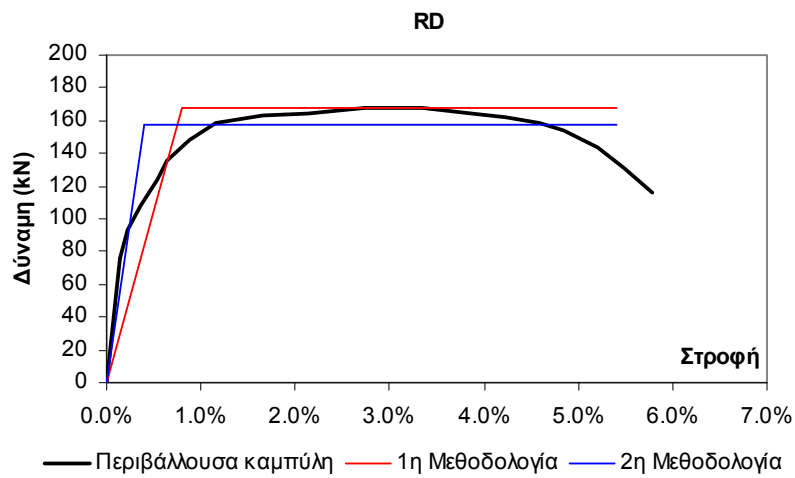
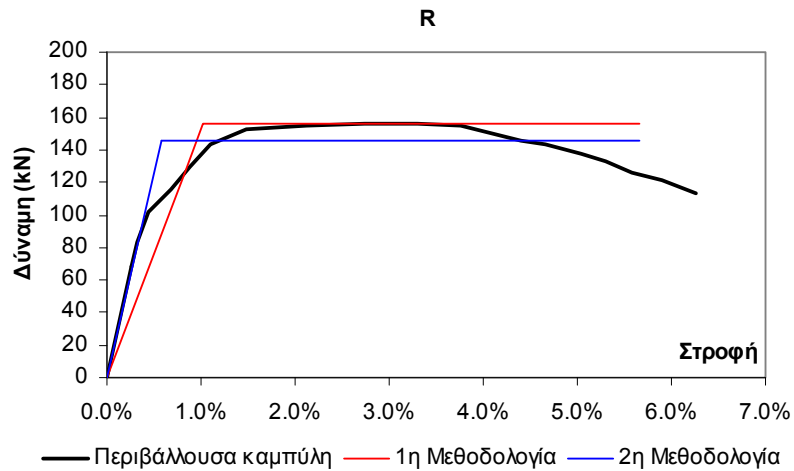


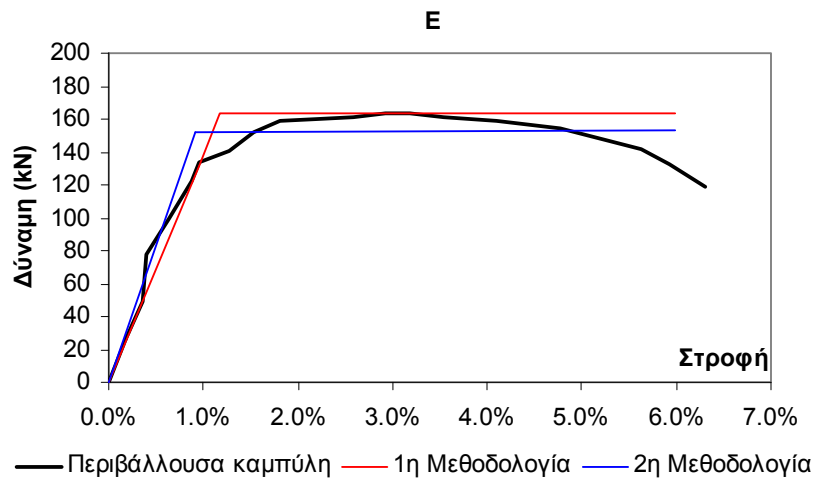
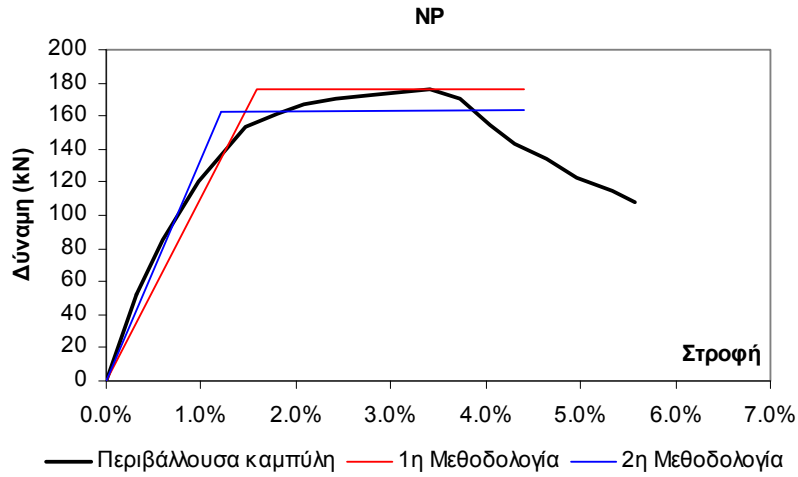
Εργασία των Ilki et al. (1998):



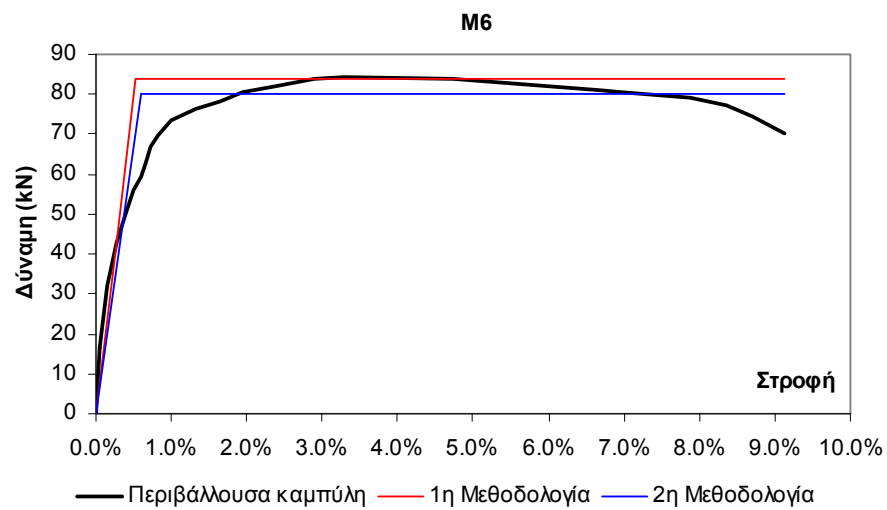
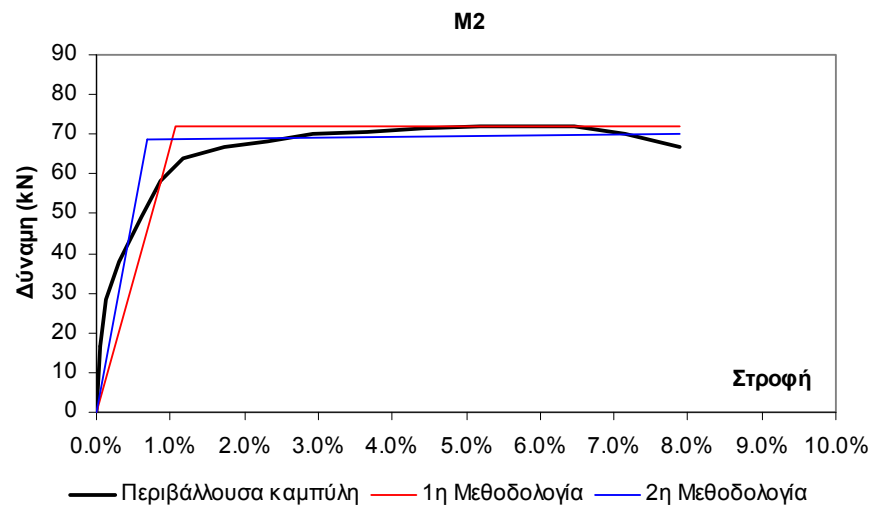
Εργασία των Vандoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008):





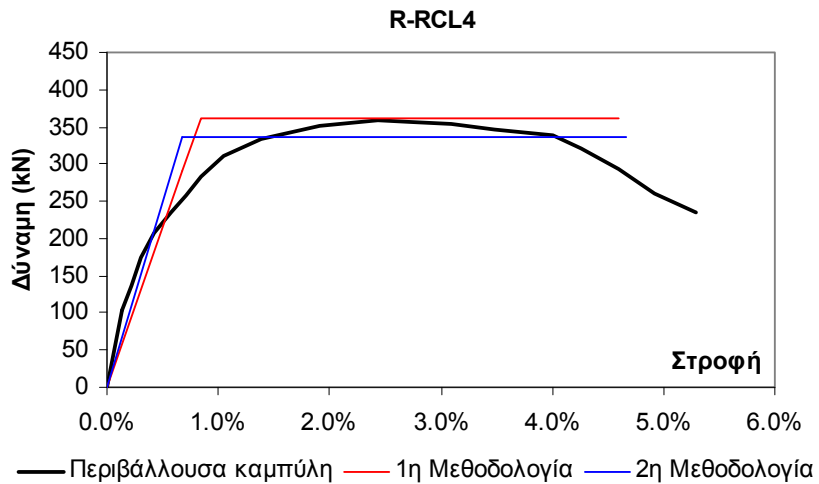
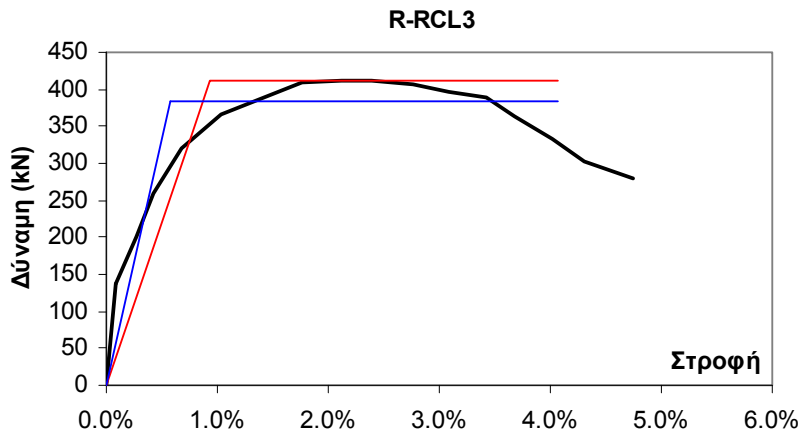
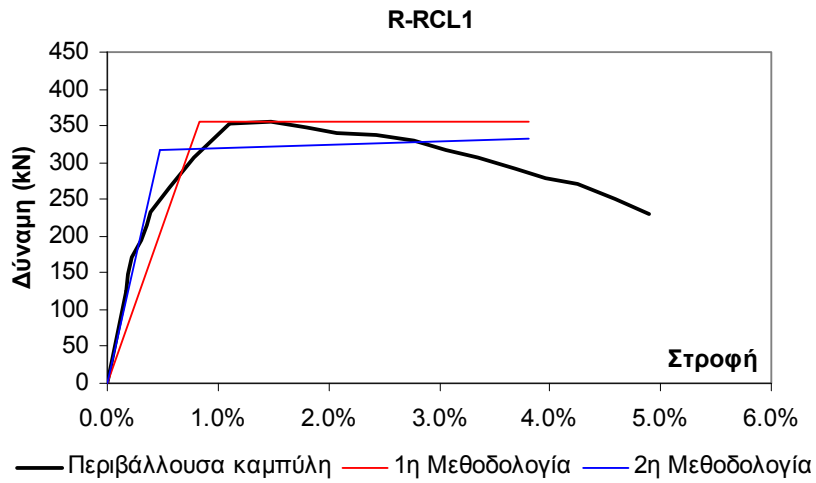


Julio et al. (2005):

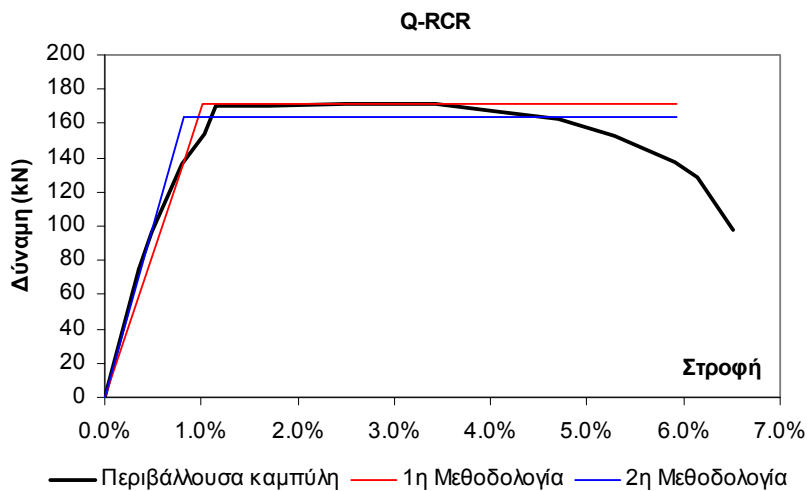
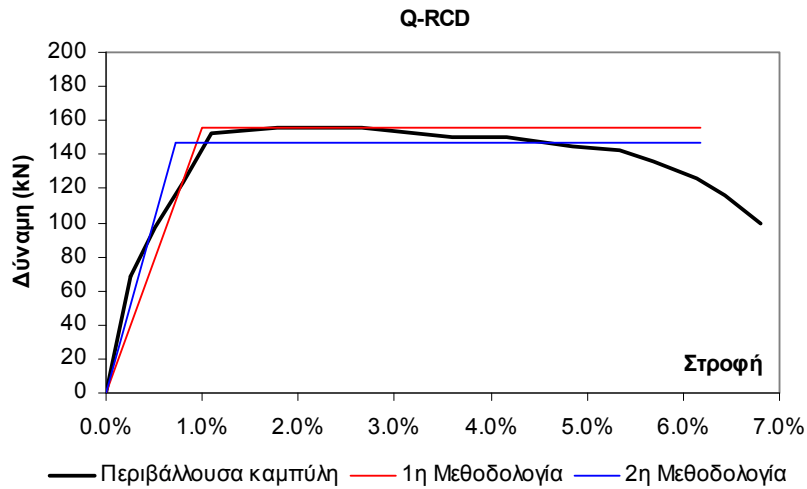
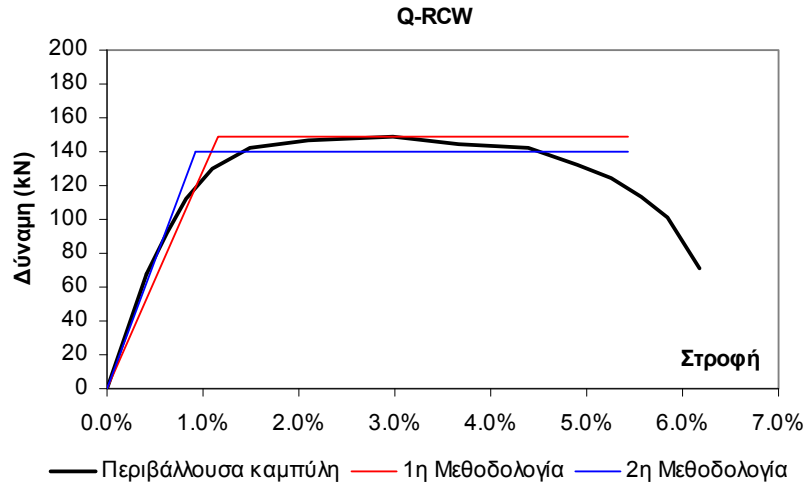


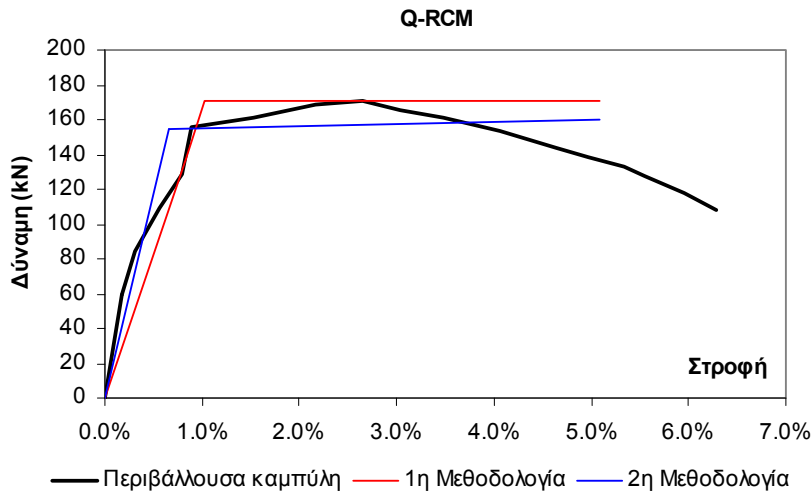
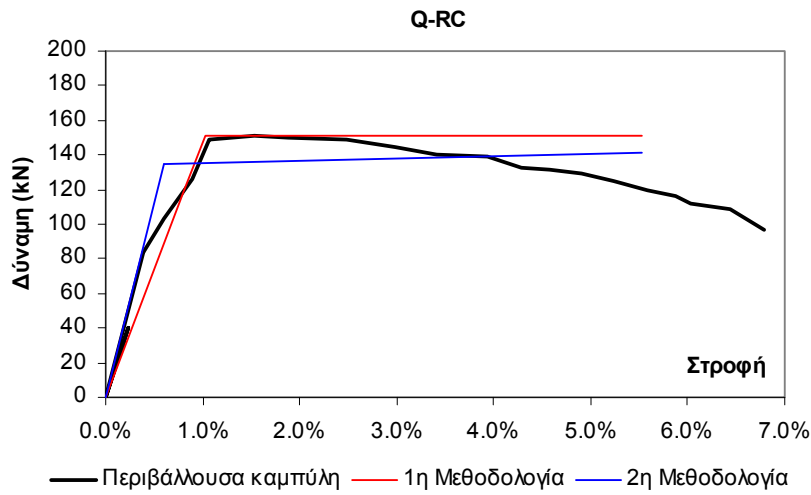
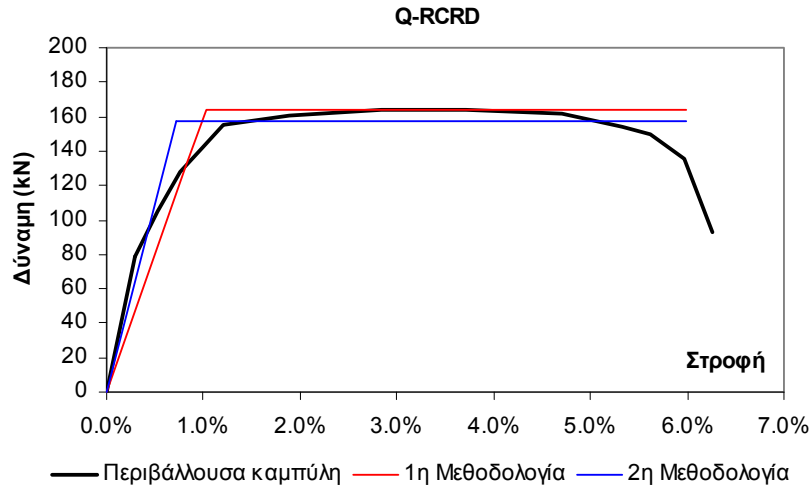


Εργασία των Bousias et al. (2006):

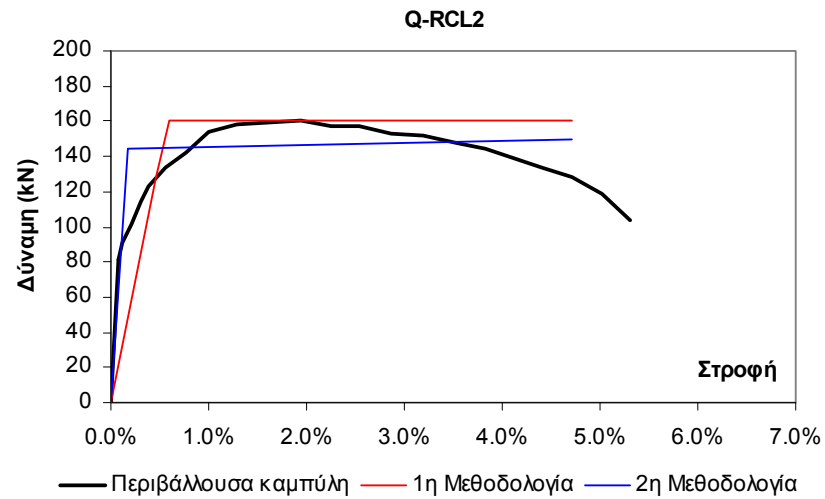
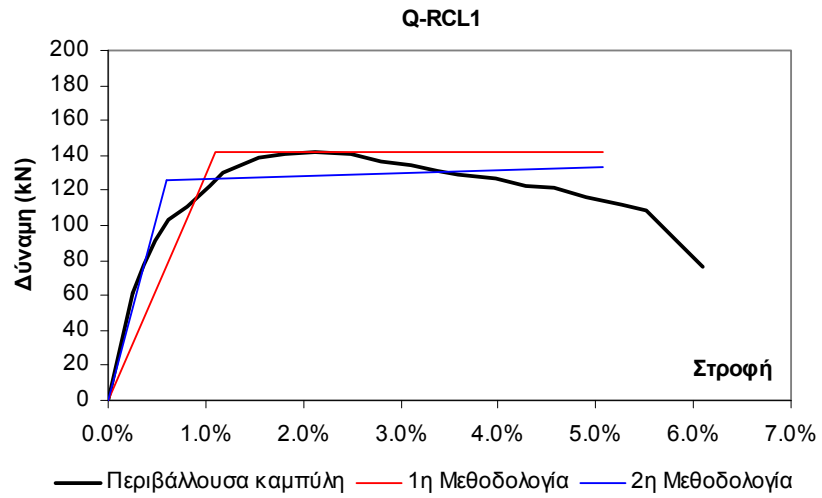
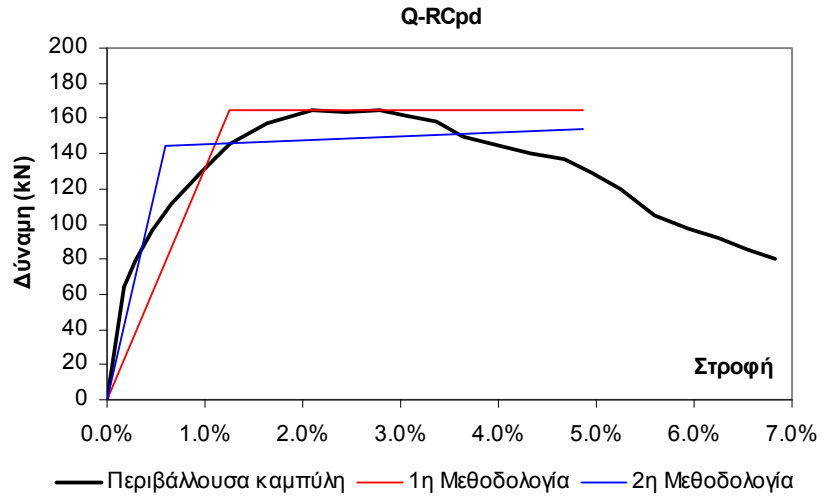


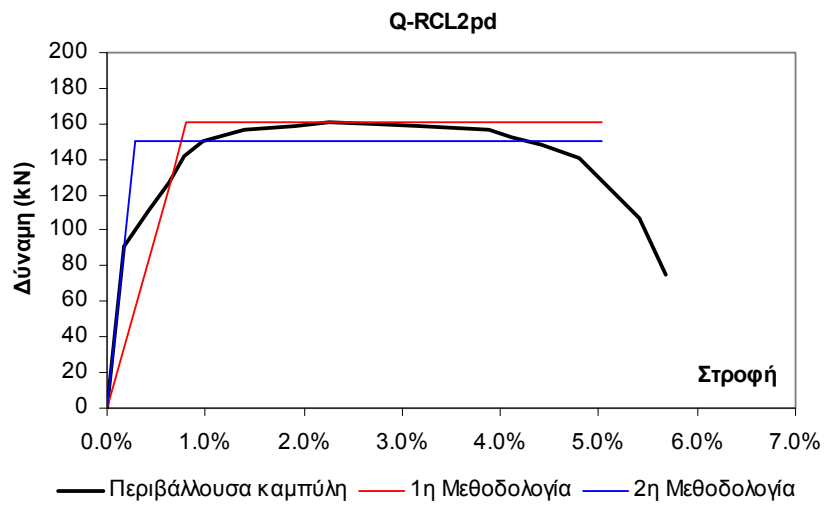
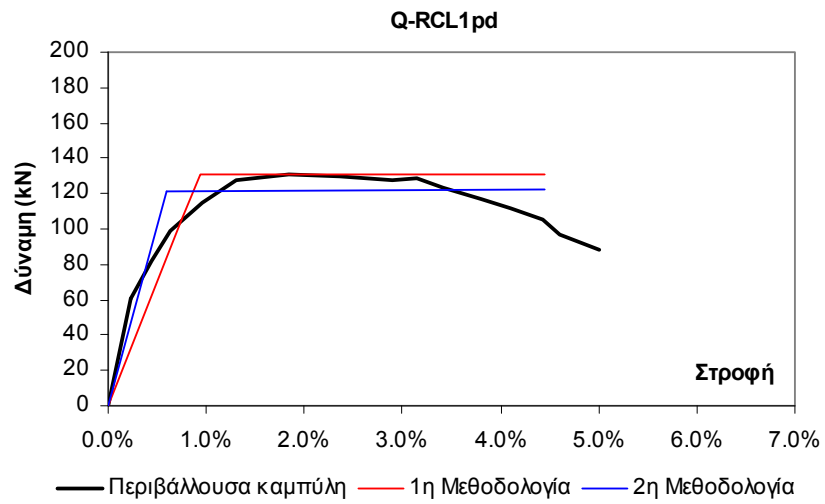
Εργασία των Bousias et al. (2007a):



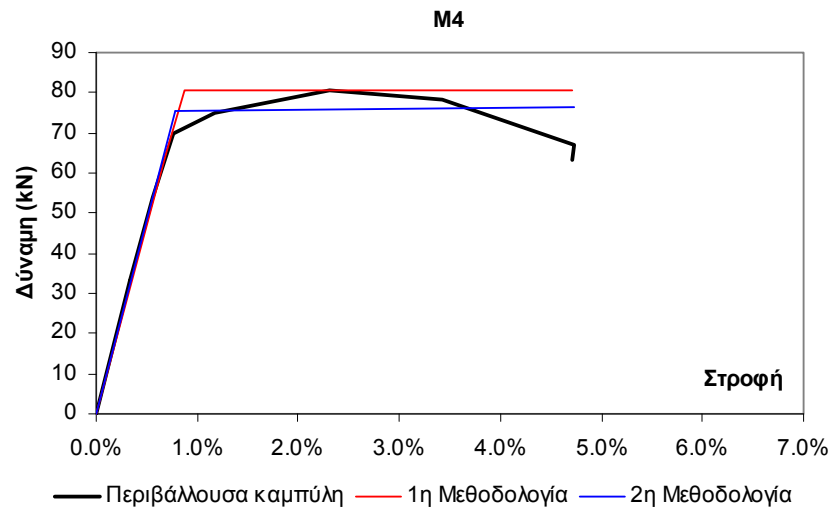
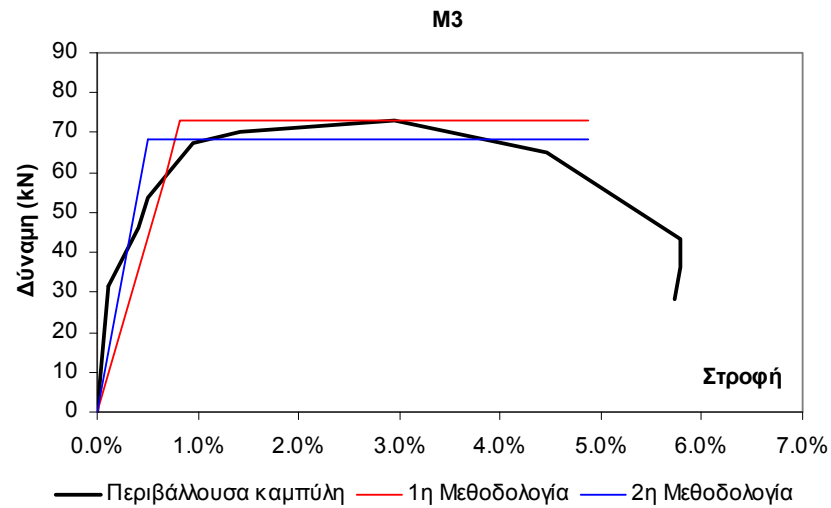
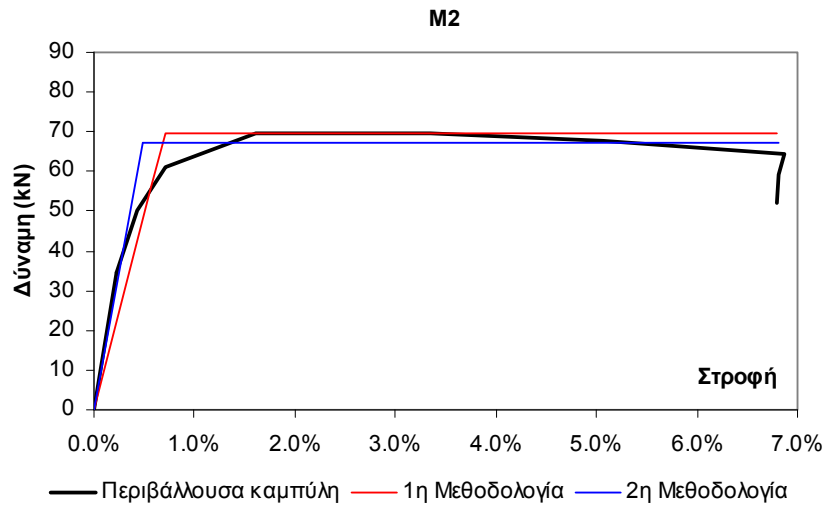


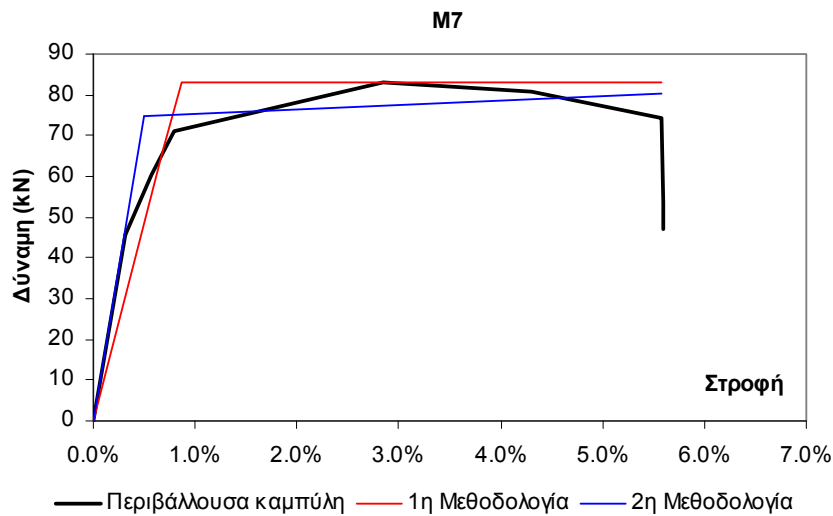
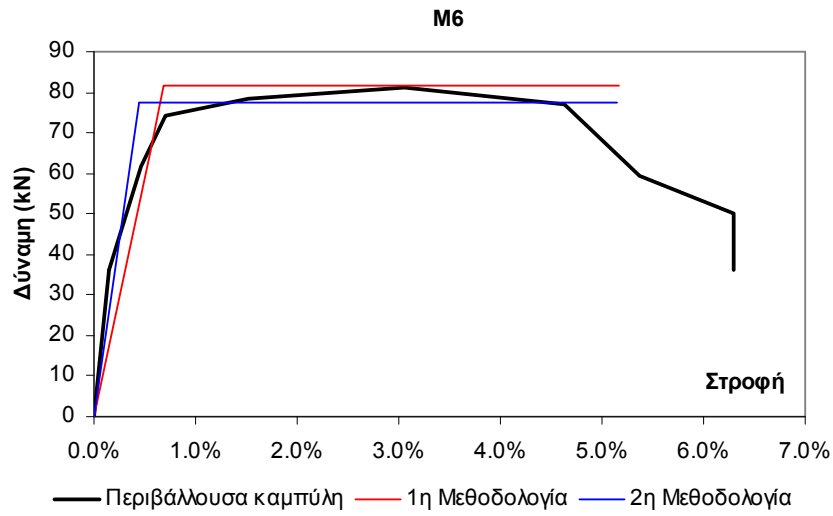
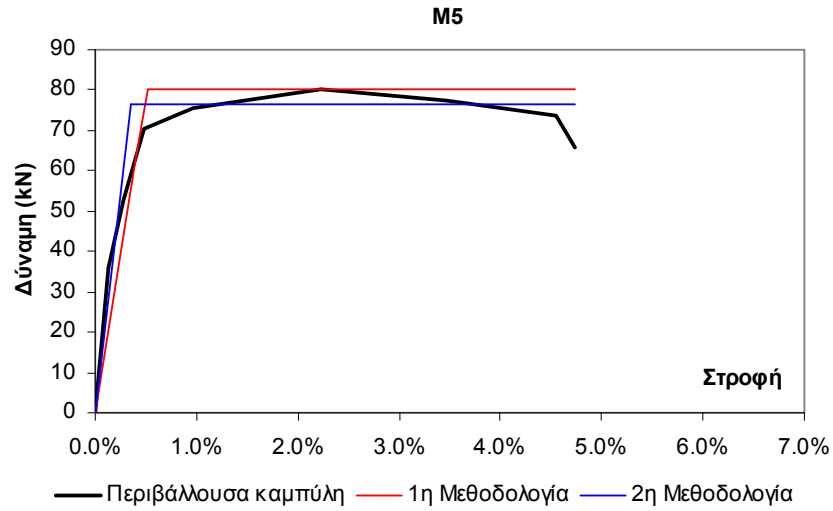
Εργασία των Bousias et al. (2007b):





Εργασία των Julio & Branco (2008):





## **Πακέτο Εργασίας 1.3 (Ανάπτυξη λογισμικού βάσει προτεινόμενου προσομοιώματος)**

### **1.3.1 Γενικά**

Για την υλοποίηση του αναλυτικού προσομοιώματος υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ, για συνθήκες τυχούσας ανακυκλιζόμενης μονοαξονικής φόρτισης, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Π.Ε. 1.1, στην παρούσα ενότητα εργασίας αναπτύσσεται νέο λογισμικό, με βάση την εξής πορεία υλοποίησης :

- α) Σχεδιασμός του γενικού προγραμματιστικού πλαισίου.
- β) Ανάπτυξη ανακυκλιζόμενου μονοαξονικού καταστατικού νόμου χάλυβα.
- γ) Ανάπτυξη ανακυκλιζόμενου μονοαξονικού καταστατικού νόμου σκυροδέματος.
- δ) Ανάπτυξη ανακυκλιζόμενου μονοαξονικού καταστατικού νόμου διεπιφάνειας, με αλληλεπίδραση των φαινομένων τριβής και δράσης βλήτρου.
- ε) Ανάπτυξη αλγορίθμου ανακυκλιζόμενης φόρτισης (καμπυλοτήτων) σε ενισχυμένη διατομή υποστυλώματος με μανδύα Ο/Σ, σύμφωνα με τους προαναφερθέντες καταστατικούς νόμους υλικών (β-δ).
- στ) Ανάπτυξη αλγορίθμου ανακυκλιζόμενης φόρτισης (μετακινήσεων) σε ενισχυμένη διατομή υποστυλώματος με μανδύα Ο/Σ, με βάση την απόκριση καμπυλοτήτων που αναπτύχθηκε στο (ε).

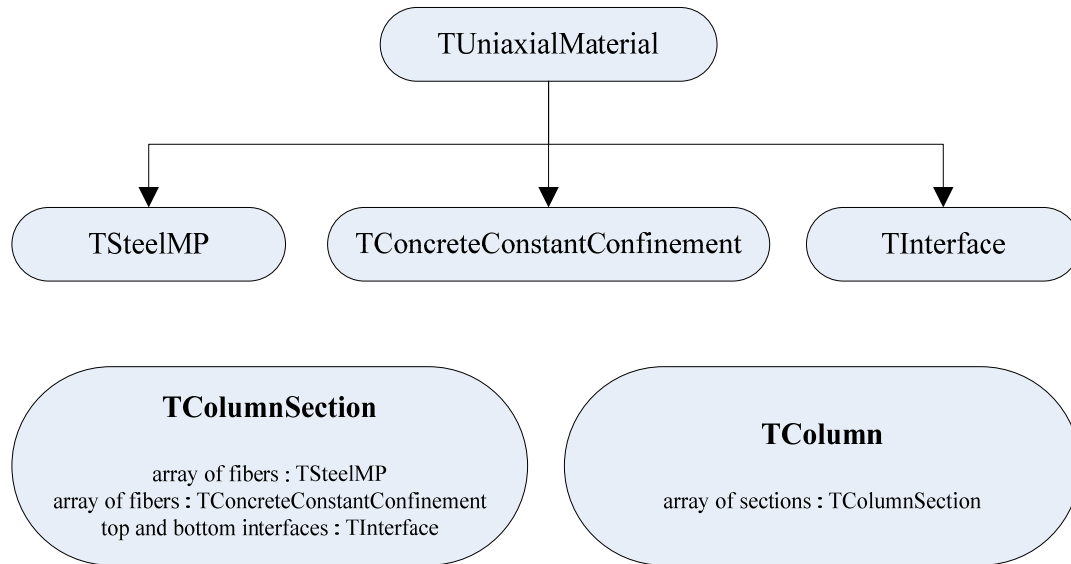
Στις επόμενες ενότητες θα γίνει αναλυτική αναφορά στα ανωτέρω βήματα υλοποίησης του αναλυτικού προσομοιώματος, με έμφαση στα πρωτότυπα στοιχεία και τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με τη βιβλιογραφία.

### **1.3.2 Γενικό προγραμματιστικό πλαίσιο**

Η ανάπτυξη των καταστατικών νόμων υλικού καθώς και του αλγορίθμου ανακυκλιζόμενης φόρτισης ενισχυμένων διατομών βασίστηκαν στις γενικές αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (object oriented programming), σύμφωνα με τη δομή του Σχήματος 1.3.1.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.1, αρχικά ορίζεται ένας γενικευμένος καταστατικός νόμος υλικού (TUniaxialMaterial), ως γονική κλάση (parent class), η οποία εμπεριέχει τα βασικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του υλικού (τάσεις, παραμορφώσεις), τη μέθοδο φόρτισης / αποφόρτισης με βάση τις παραμορφώσεις (strain loading/unloading method) και την αφηρημένη (abstract) μέθοδο υπολογισμού της απόκρισης, η οποία υλοποιείται στις θυγατρικές κλάσεις (child classes). Ως θυγατρικές κλάσεις ορίζονται οι τρεις καταστατικοί νόμοι (σκυροδέματος, χάλυβα, διεπιφάνειας), οι οποίες 'κληρονομούν' τα παραπάνω βασικά χαρακτηριστικά και υλοποιούν την εκάστοτε μέθοδο υπολογισμού, όπως περιγράφεται στις επόμενες ενότητες. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ανακυκλιζόμενης φόρτισης ενισχυμένης διατομής ως προς τις καμπυλότητες υλοποιείται ως ξεχωριστή κλάση, η οποία περιλαμβάνει τους παραπάνω τρεις καταστατικούς νόμους είτε με τη μορφή πινάκων αντικειμένων για κάθε ίνα (fiber) σκυροδέματος ή χάλυβα, είτε μεμονωμένων αντικειμένων για τις δύο διεπιφάνειες. Τέλος, ο αλγόριθμος ανακυκλιζόμενης φόρτισης του υποστυλώματος με βάση της μετακινήσεις, περιλαμβάνει πίνακα διατομών ως ξεχωριστά αντικείμενα, που αντιστοιχούν σε κάθε θέση ολοκλήρωσης.





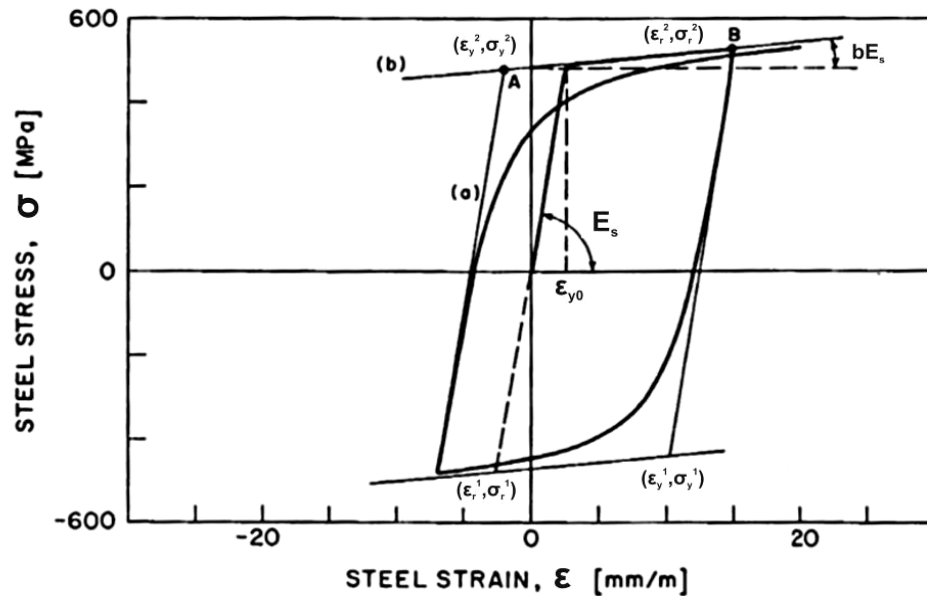
**Σχήμα 1.3.1** Γενική δομή προγραμματιστικού πλαισίου.

### 1.3.3 Μονοαξονικός καταστατικός νόμος χάλυβα (TSteelMP)

Ο καταστατικός νόμος χάλυβα που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του παρόντος έργου βασίζεται στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων των Menegotto-Pinto (1973), σε συνδυασμό με τους κανόνες ισότροπης κράτυνσης των Filirrou et al. (1983). Είναι κατάλληλος για την προσομοίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, ιδιαίτερα αυτών που υπόκεινται σε τυχούσα ανακυκλιζόμενη φόρτιση (π.χ. σεισμική). Η γενικευμένη μορφή της καμπύλης απόκρισης φαίνεται στο Σχήμα 1.3.2 και οι οκτώ παράμετροι του καταστατικού νόμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3.1. Το λεπτομερές διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού της κλάσης TSteelMP, περιγράφεται στο Σχήμα 1.3.3 και οι μεταβλητές που περιγράφουν την ιστορία φόρτισης του υλικού στον Πίνακα 1.3.2. Οι λογικοί τελεστές Yielded (πρώτη διαρροή) και Cyclic (ανακύκλιση) τίθενται ως ψευδείς στην αρχική αφόρτιστη κατάσταση.

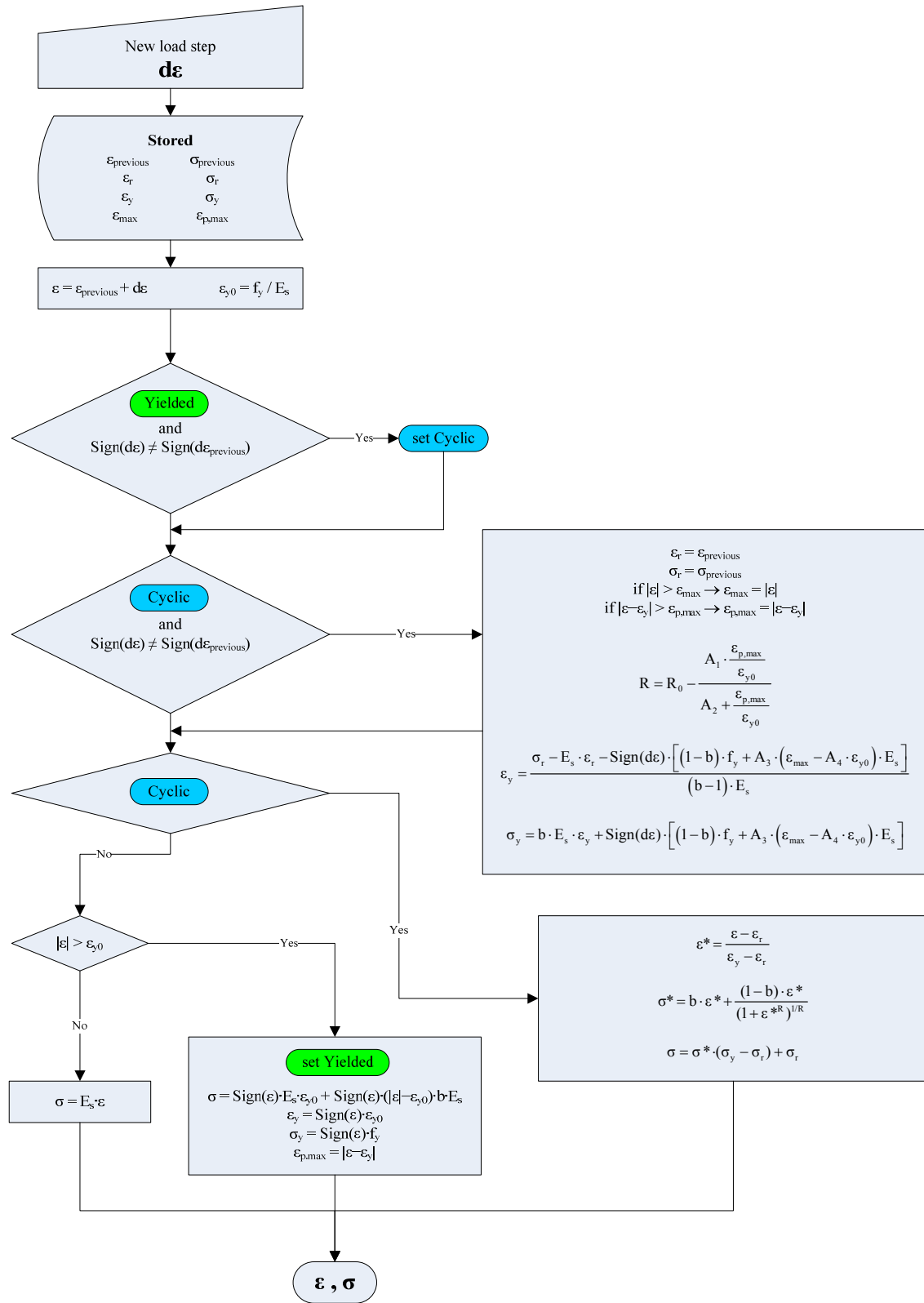
**Πίνακας 1.3.1** Παράμετροι καταστατικού νόμου χάλυβα.

Παράμετρος	Περιγραφή	Προεπιλεγμένη τιμή
$E_s$ (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας	200000
$f_y$ (MPa)	Αντοχή διαρροής	500
b	Παράμετρος κράτυνσης	0.005
$R_0$	Παράμετρος αρχικού σχήματος καμπύλης μετάβασης	20.0
$A_1$	Συντελεστής σχήματος καμπύλης μετάβασης	18.5
$A_2$	Συντελεστής σχήματος καμπύλης μετάβασης (0.05 ~ 0.15)	0.15
$A_3$	Συντελεστής ισότροπης κράτυνσης (0.010 ~ 0.025)	0
$A_4$	Συντελεστής ισότροπης κράτυνσης (2.0 ~ 7.0)	0



**Σχήμα 1.3.2** Γενικευμένη καμπύλη απόκρισης του καταστατικού νόμου σκυροδέματος.

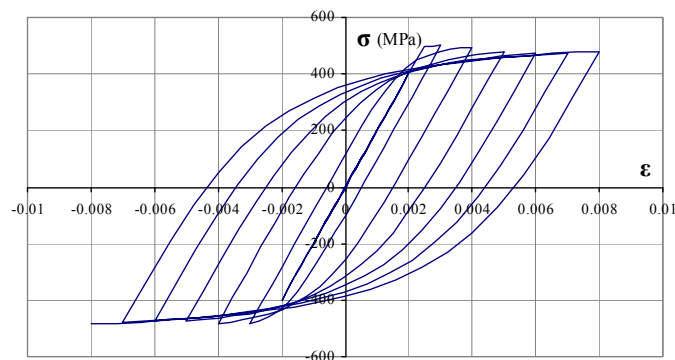
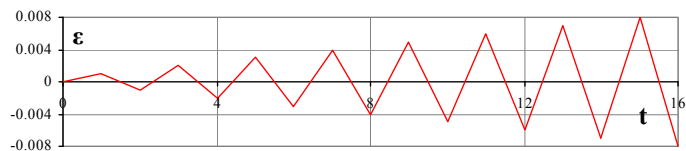
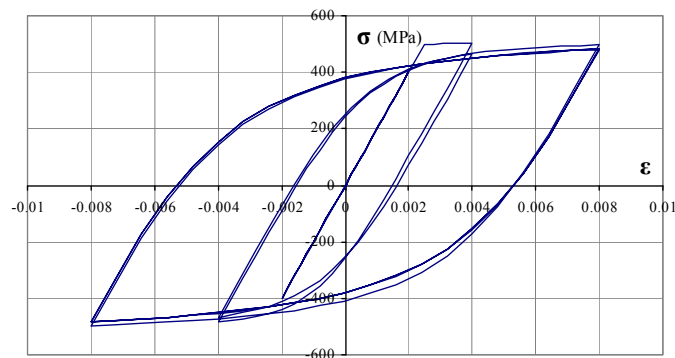
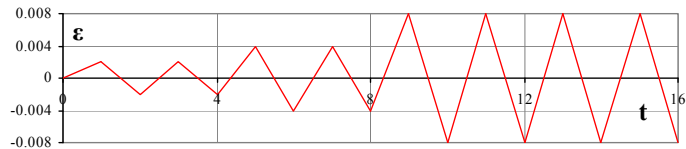
Στα Σχήματα 1.3.4 και 1.3.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα απόκρισης του παρόντος καταστατικού νόμου χάλυβα (με τις εξ ορισμού παραμέτρους (defaults) του Πίνακα 1.3.1) για διάφορες χρονοϊστορίες (συμμετρικές, μη συμμετρικές, τυχαίες). Παρατηρείται ότι η μορφή των καμπυλών απόκρισης είναι φυσιολογική χωρίς προβλήματα αριθμητικής φύσεως. Επίσης, για την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας του καταστατικού νόμου έγινε σύγκριση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Zeus-NL (Elnashai et al., 2010), με το οποίο υπήρξε ταύτιση αποτελεσμάτων. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι και στους τρεις καταστατικούς νόμους υλοποιήθηκε η δυνατότητα επαναφοράς σε πρότερη εντατική κατάσταση (save / restore), απαραίτητη για την υλοποίηση και επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος ισορροπίας της ενισχυμένης διατομής.



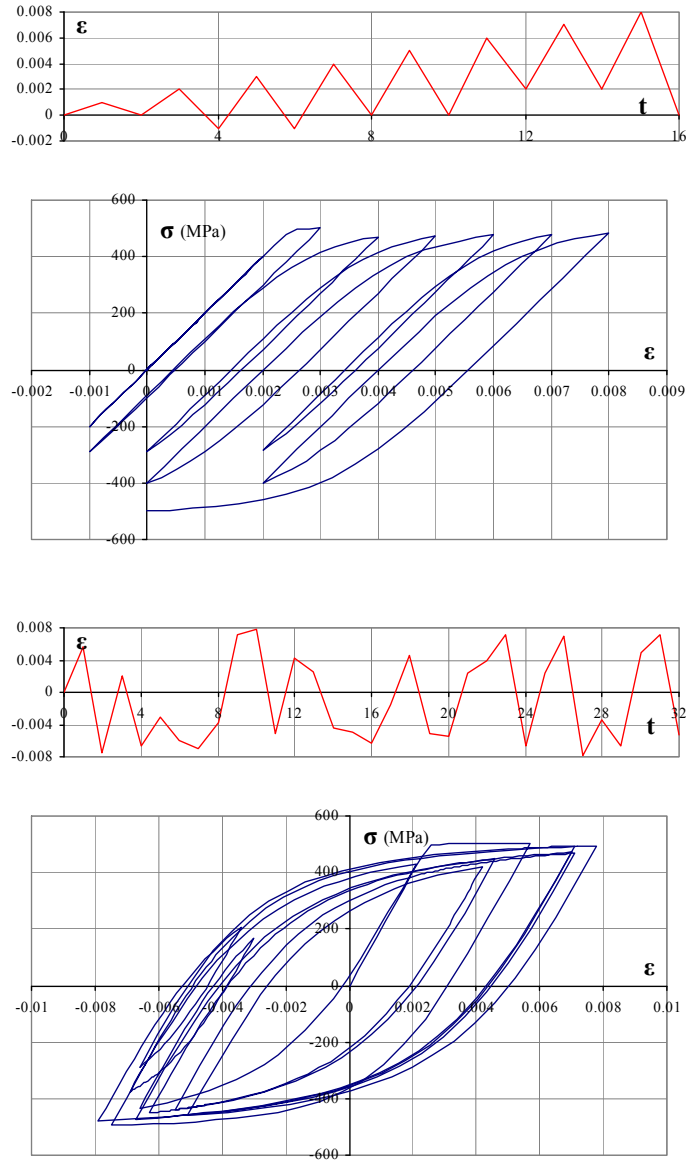
Σχήμα 1.3.3 Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού της κλάσης TSteelIMP.

**Πίνακας 1.3.2** Μεταβλητές που περιγράφουν την ιστορία φόρτισης του χάλυβα.

Μεταβλητή	Περιγραφή
$\epsilon_{previous} / \sigma_{previous}$	Παραμόρφωση / τάση στο προηγούμενο φορτιστικό βήμα
$\epsilon_r / \sigma_r$	Παραμόρφωση / τάση στην τελευταία αντιστροφή (φόρτιση / αποφόρτιση)
$\epsilon_y / \sigma_y$	Τρέχουσα παραμόρφωση / τάση διαρροής
$\epsilon_{max}$	Μέγιστη καταγεγραμμένη παραμόρφωση
$\epsilon_{p,max}$	Μέγιστη καταγεγραμμένη πλαστική παραμόρφωση



**Σχήμα 1.3.4** Διαγράμματα απόκρισης καταστατικού νόμου χάλυβα για συμμετρική φόρτιση.



**Σχήμα 1.3.5** Διαγράμματα απόκρισης καταστατικού νόμου χάλυβα για μη συμμετρική και τυχούσα φόρτιση.

### 1.3.4 Μονοαξονικός καταστατικός νόμος σκυροδέματος (*TConcreteConstantConfinement*)

Ο καταστατικός νόμος σκυροδέματος που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας βασίζεται στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων των Mander et al. (1988) και τους κανόνες ανακύκλισης των Martinez-Rueda & Elnashai (1997). Η περίσφιξη λόγω παρουσίας εγκάρσιων οπλισμών (συντελεστής αποτελεσματικότητας  $K$ ) θεωρείται αμετάβλητη κατά τη διάρκεια της φόρτισης και ακολουθεί τις σχέσεις που προτάθηκαν από τους Mander et al. (1988). Ο νόμος αυτός είναι κατάλληλος για την προσομοίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, ιδιαίτερα αυτών που υπόκεινται σε τυχούσα ανακυκλιζόμενη φόρτιση (π.χ. σεισμική). Η γενικευμένη μορφή της καμπύλης απόκρισης φαίνεται στο Σχήμα 1.3.6 και οι

τέσσερις παράμετροι του καταστατικού νόμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3.3. Ορίζονται επίσης οι εξής σταθερές που προκύπτουν από τις παραμέτρους υλικού:

$$f_{cc} = K \cdot f_c \quad (1.3.1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \cdot [1 + 5 \cdot (K - 1)] \quad (1.3.2)$$

$$E_c = 5000 \cdot \sqrt{f_c} \quad (1.3.3)$$

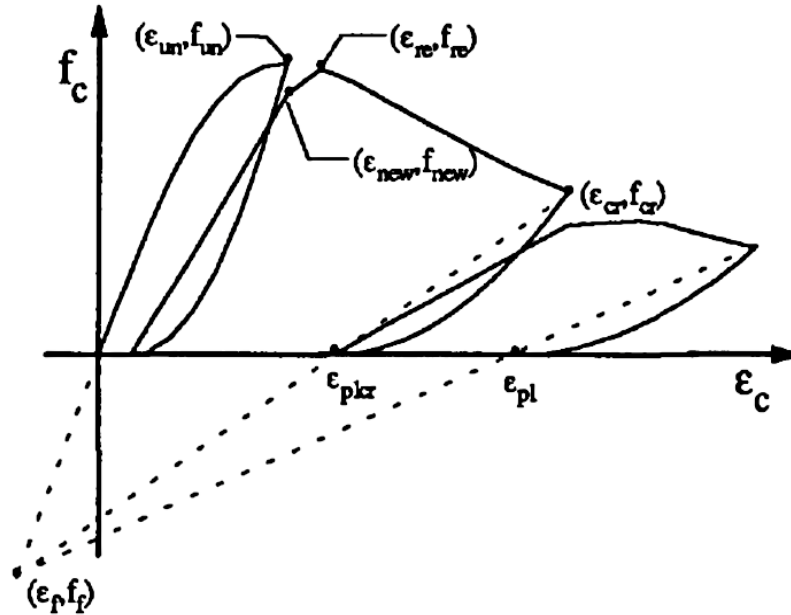
$$E_s = f_{cc} / \epsilon_{cc} \quad (1.3.4)$$

$$\epsilon_t = f_t / E_c \quad (1.3.5)$$

$$\epsilon_{35} = 0.35 \cdot f_{cc} / E_c \quad (1.3.6)$$

$$\epsilon_{cr} = 2.5 \cdot \epsilon_{cc} \quad (1.3.7)$$

$$r = E_c / (E_c - E_s) \quad (1.3.8)$$



Σχήμα 1.3.6 Γενικευμένη καμπύλη απόκρισης του καταστατικού νόμου σκυροδέματος.

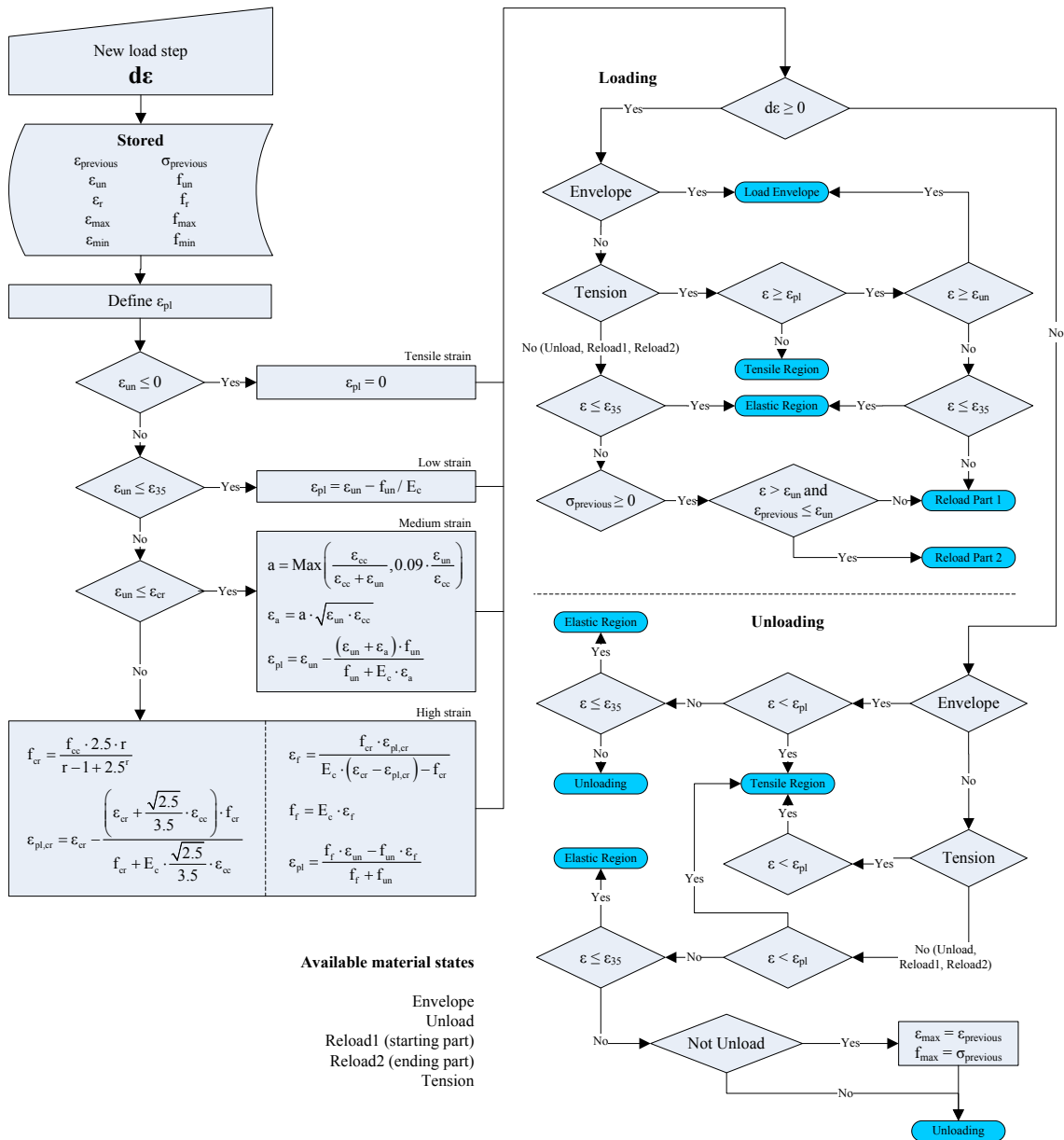
Πίνακας 1.3.3 Παράμετροι καταστατικού νόμου σκυροδέματος.

Παράμετρος	Περιγραφή	Προεπιλεγμένη τιμή
$f_c$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	20
$f_t$ (MPa)	Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό	2.2
$\epsilon_{co}$	Παραμόρφωση στη μέγιστη θλιπτική αντοχή	0.002
$K$	Συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιξης	1.0

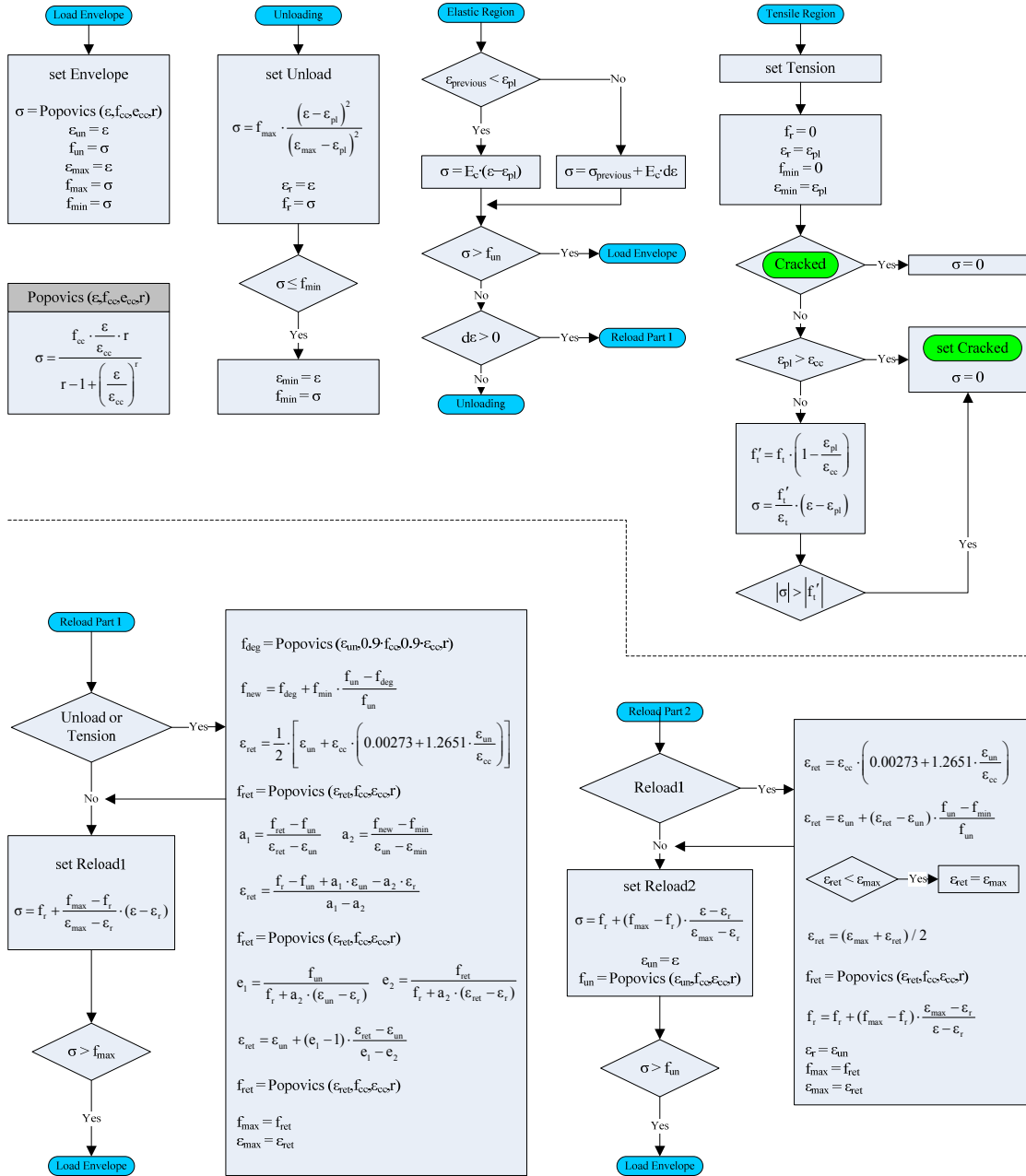
Το λεπτομερές διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού της κλάσης TConcreteConstantConfinement, περιγράφεται στο Σχήμα 1.3.7(α,β) και οι μεταβλητές που περιγράφουν την ιστορία φόρτισης του υλικού στον Πίνακα 1.3.4. Στις σχέσεις του διαγράμματος ροής, οι θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις θεωρούνται θετικές.

Πίνακας 1.3.4 Μεταβλητές που περιγράφουν την ιστορία φόρτισης του σκυροδέματος.

Μεταβλητή	Περιγραφή
$\epsilon_{previous} / \sigma_{previous}$	Παραμόρφωση / τάση στο προηγούμενο φορτιστικό βήμα
$\epsilon_{un} / f_{un}$	Παραμόρφωση / τάση περιβάλλουσας
$\epsilon_r / f_r$	Παραμόρφωση / τάση στην αρχή του κλάδου επαναφόρτισης
$\epsilon_{max} / f_{max}$	Παραμόρφωση / τάση στην αρχή του κλάδου αποφόρτισης
$\epsilon_{min} / f_{min}$	Ελάχιστη παραμόρφωση / τάση που αντιστοιχεί στην τρέχουσα $\epsilon_{un}$



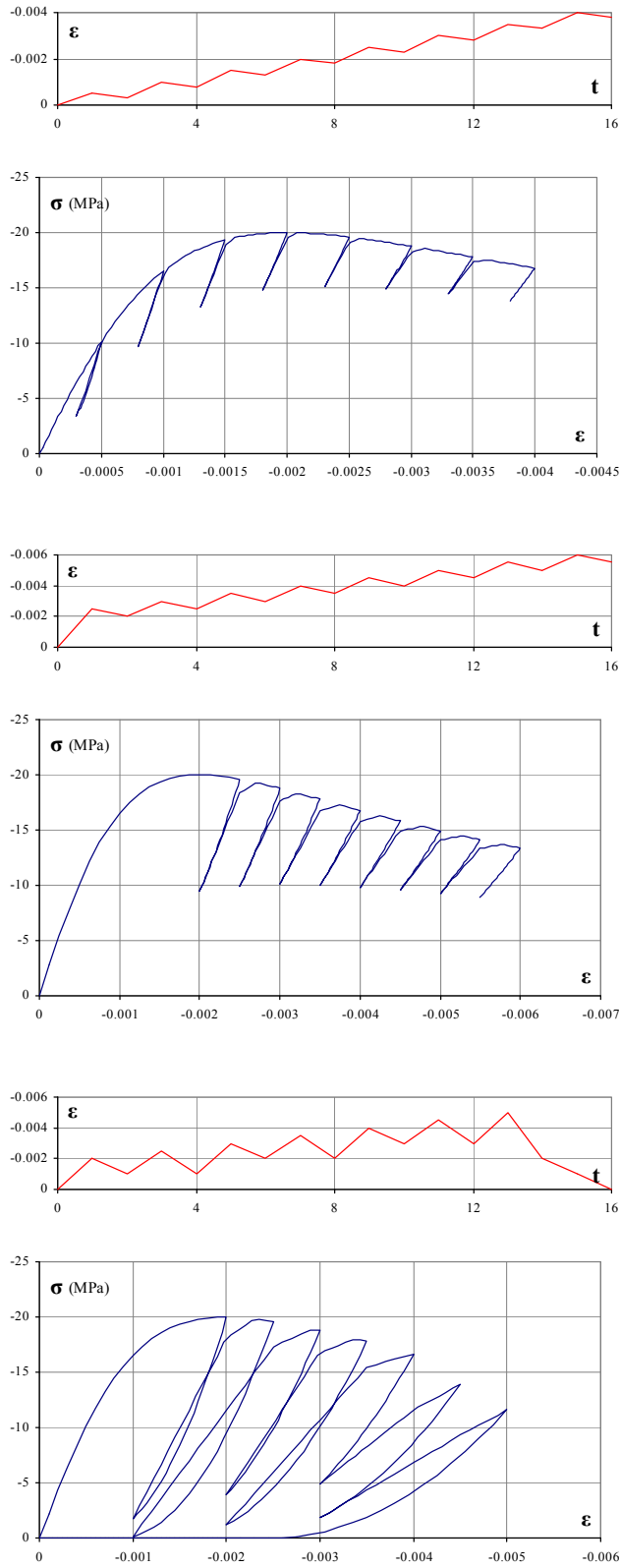
Σχήμα 1.3.7α Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού της κλάσης TConcreteConstantConfinement.



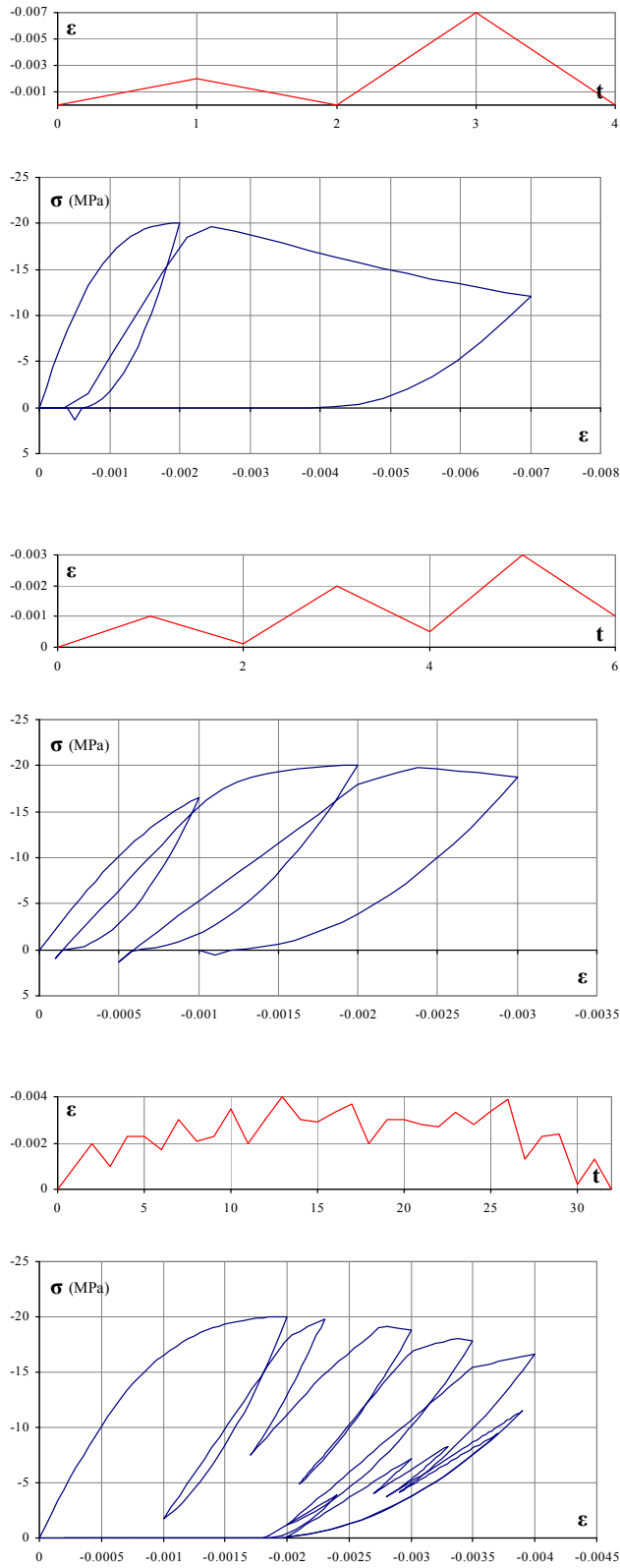
Σχήμα 1.3.7β Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού της κλάσης TConcreteConstantConfinement.

Στα Σχήματα 1.3.8 και 1.3.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα απόκρισης του παρόντος καταστατικού νόμου χάλυβα (με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους του Πίνακα 1.3.3) για διάφορες ιστορίες. Όπως και στον καταστατικό νόμο χάλυβα, δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα αριθμητικής φύσεως και υπήρξε ταύτιση αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Zeus-NL (Elnashai et al., 2010).





Σχήμα 1.3.8 Διαγράμματα απόκρισης καταστατικού νόμου σκυροδέματος υπό θλίψη.



Σχήμα 1.3.9 Διαγράμματα απόκρισης καταστατικού νόμου σκυροδέματος υπό θλίψη και εφελκυσμό.

### 1.3.5 Μονοαξονικός καταστατικός νόμος διεπιφάνειας (TInterface)

Ο τρίτος και τελευταίος καταστατικός νόμος ο οποίος απαιτείται για την τελική υλοποίηση του αναλυτικού προσομοιώματος υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ, είναι αυτός που διέπει τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η συμβολή του νόμου διεπιφάνειας είναι να προσδιορίζει την τέμνουσα ( $V$ ) που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια υπό τυχούσα ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή ολίσθησης ( $s$ ). Από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας προέκυψαν πολύ περιορισμένες αναφορές στο συγκεκριμένο πρόβλημα, με πλησιέστερη την εργασία των Vassilioroulou & Tassios (2003), στην οποία έχει γίνει ήδη αναφορά στην ενότητα 1.1. Στην εργασία αυτήν αντιμετωπίζεται για πρώτη φορά το θέμα της ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδεμάτων, ωστόσο ο καταστατικός νόμος που τελικά προτείνεται αναφέρεται μόνο στην ειδική περίπτωση *συμμετρικών κύκλων φόρτισης*. Κατά συνέπεια γίνεται προσπάθεια στην παρούσα έρευνα να επεκταθεί κατάλληλα ο καταστατικός νόμος των Vassilioroulou & Tassios (2003) ώστε να αντιμετωπίζει επαρκώς τη γενική περίπτωση της τυχούσας ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

Ο καταστατικός νόμος διεπιφάνειας χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση δύο διαφορετικών φαινομένων: τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος και τη δράση βλήτρου των οπλισμών που τοποθετούνται κάθετα στη διεπιφάνεια. Στον Πίνακα 1.3.5 περιγράφονται οι απαραίτητες παράμετροι που απαιτούνται πριν την έναρξη των υπολογισμών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις που διέπουν τα δύο φαινόμενα ξεχωριστά, και στο τέλος γίνονται οι απαιτούμενες παρεμβάσεις που αφορούν την αλληλεπίδραση μεταξύ τους

**Πίνακας 1.3.5** Παράμετροι καταστατικού νόμου διεπιφάνειας.

Παράμετρος	Περιγραφή	Προεπιλεγμένη τιμή
$E_s$ (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα	200000
$f_y$ (MPa)	Αντοχή διαρροής χάλυβα	500
$E_c$ (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος	29000
$f_c$ (MPa)	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	20
$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	Εμβαδόν διεπιφάνειας	1000
$k_b$	Αριθμός ράβδων οπλισμού (βλήτρων) μεταξύ ρωγμών (c)	2
$d_b$ (mm)	Διάμετρος ράβδων οπλισμού (βλήτρων)	16
$N$ (kN)	Αξονικό φορτίο κάθετο στη διεπιφάνεια (ενεργός περίσφιξη)	0

### 1.3.5.1 Περιβάλλουσες καταστατικών νόμων δράσης βλήτρου και τριβής

Βασικό χαρακτηριστικό κάθε ανακυκλιζόμενου καταστατικού νόμου είναι η περιβάλλουσα καμπύλη απόκρισης, η οποία αποτελεί τον 'σκελετό' πάνω στον οποίο στη συνέχεια αναπτύσσονται οι κανόνες ανακύκλισης. Για το φαινόμενο της δράσης βλήτρου, η περιβάλλουσα ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις (Vassilouroulou & Tassios, 2003) :

$$D(s) = 0.5 \cdot D_u \cdot \frac{s}{s_{el}} \quad , \quad \frac{D(s)}{D_u} \leq 0.5 \quad (1.3.9)$$

$$s = s_{el} + 1.76 \cdot s_{uD} \cdot \left[ \left( \frac{D(s)}{D_u} \right)^4 - 0.50 \cdot \left( \frac{D(s)}{D_u} \right)^3 \right] \quad , \quad \frac{D(s)}{D_u} > 0.5 \quad (1.3.10)$$

όπου :

$$D_u = 1.3 \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{f_y \cdot f_c} \quad (1.3.11)$$

$$s_{el} = 0.006 \cdot d_b \quad (1.3.12)$$

$$s_{uD} = 0.05 \cdot d_b \quad (1.3.13)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η περιβάλλουσα έχει δύο ξεχωριστούς κλάδους που περιγράφονται από τις εξισώσεις 1.3.9 και 1.3.10. Είναι προφανές ότι για την επίλυση της εξίσωσης 1.3.10 ως προς  $D(s)$  είναι απαραίτητη μια κατάλληλη αριθμητική μέθοδος εύρεσης ριζών (π.χ. Brent). Η τελική τιμή της τέμνουσας λόγω δράσης βλήτρου δίνεται από τη σχέση:

$$V_D = k_b \cdot D(s) \quad (1.3.14)$$

Για το φαινόμενο της τριβής, η περιβάλλουσα ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις (Vassilouroulou & Tassios, 2003) :

$$\tau(s) = 1.14 \cdot \tau_u(s) \cdot \left( \frac{s}{s_u} \right)^{1/3} \quad , \quad \frac{s}{s_u} \leq 0.5 \quad (1.3.15)$$

$$\tau(s) = \tau_u(s) \cdot \left( 0.81 + 0.19 \cdot \frac{s}{s_u} \right) \quad , \quad \frac{s}{s_u} > 0.5 \quad (1.3.16)$$

$$\tau(s) = \tau_u(s) \quad , \quad \frac{s}{s_u} > 1.0 \quad (1.3.17)$$

όπου :

$$s_u = 2 \text{ mm} \quad (1.3.18)$$

$$\tau_u(s) = 0.44 \cdot [f_c^2 \cdot \sigma_c(s)]^{1/3} \quad (1.3.19)$$

$$\sigma_c(s) = v \cdot f_c + \rho \cdot \sigma_{so}(s) \quad (1.3.20)$$

$$v = \frac{N}{A_c \cdot f_c} \quad (1.3.21)$$

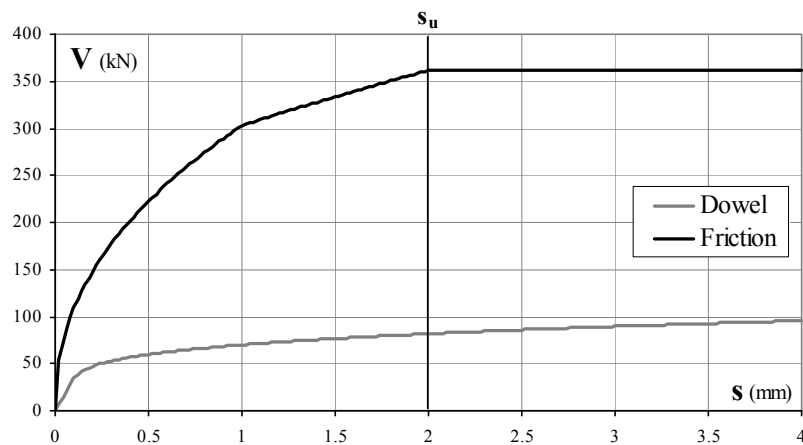
$$\rho = k_b \cdot \frac{\pi \cdot d_b^2}{4 \cdot A_c \cdot f_c} \quad (1.3.22)$$

$$\sigma_{so}(s) = \sqrt{\frac{w(s) \cdot E_s \cdot f_c}{2 \cdot d_b}} \quad (1.3.23)$$

$$w(s) = \begin{cases} 0.6 \cdot s^{2/3}, & s \leq s_u \\ 0.6 \cdot s_u^{2/3}, & s > s_u \end{cases} \quad (1.3.24)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η περιβάλλουσα έχει τρεις ξεχωριστούς κλάδους που περιγράφονται από τις εξισώσεις 1.3.14 – 1.3.16. Στο Σχήμα 1.3.10 φαίνονται οι τυπικές περιβάλλουσες καμπύλες των δύο καταστατικών νόμων (για τις προεπιλεγμένες τιμές του Πίνακα 1.3.5) χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Η τελική τιμή της τέμνουσας λόγω τριβής δίνεται από τη σχέση :

$$V_F = A_c \cdot \tau(s) \quad (1.3.25)$$



**Σχήμα 1.3.10** Περιβάλλουσες καταστατικών νόμων δράσης βλήτρου και τριβής χωρίς αλληλεπίδραση.

**1.3.5.2 Αλληλεπίδραση φαινομένων δράσης βλήτρου και τριβής**

Λόγω της ταυτόχρονης δράσης των φαινομένων τριβής και δράσης βλήτρου, αναπτύσσεται στους οπλισμούς αφενός η δύναμη βλήτρου (D) και αφετέρου η δύναμη εξόλκευσης των οπλισμών (Σχ. 1.3.11) :

$$\sigma_{so}(s) - \sigma_{SN} \tag{1.3.26}$$

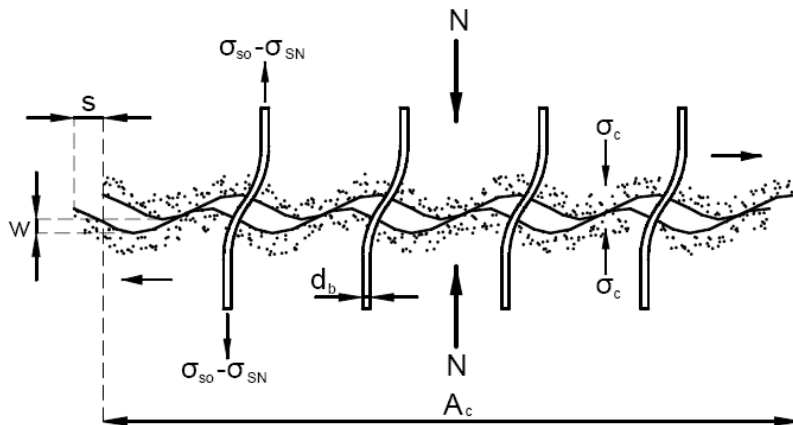
όπου :

$\sigma_{so}$  η τάση των οπλισμών που οφείλεται στη διεύρυνση της ρωγμής (w) λόγω ολίσθησης (s) και δίνεται από τη σχέση (1.3.23) και

$$\sigma_{SN} = \frac{v \cdot f_c}{\rho + \frac{E_c}{E_s}} \tag{1.3.27}$$

η τάση των οπλισμών που οφείλεται στο αξονικό φορτίο κάθετο στη διεπιφάνεια. Θεωρείται ότι η διαθέσιμη αντοχή του χάλυβα ( $f_y$ ) “αναλώνεται” και από τους δύο παραπάνω μηχανισμούς, σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης :

$$\left( \frac{\sigma_{so}(s) - \sigma_{SN}}{f_y} \right)^{1.5} + \left( \frac{D(s)}{D_u} \right)^{1.5} = 1 \tag{1.3.28}$$



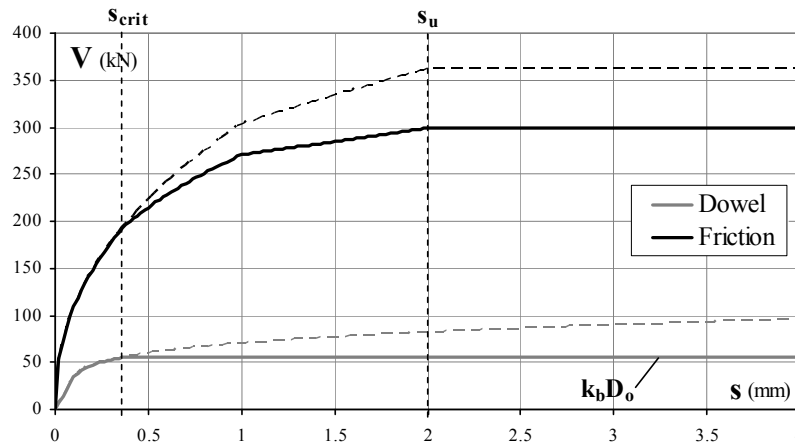
**Σχήμα 1.3.11** Δυνάμεις που αναπτύσσονται στους οπλισμούς λόγω τριβής και δράσης βλήτρου.

Λύνοντας την παραπάνω σχέση με κατάλληλη αριθμητική μέθοδο εύρεσης ριζών (π.χ. Brent) ως προς την τιμή της ολίσθησης (s), προκύπτει η κρίσιμη τιμή  $s_{crit}$  (π.χ. για τις προεπιλεγμένες τιμές του Πίνακα 1.3.5 προκύπτει :  $s_{crit} = 0.362$  mm), η οποία εισάγει τις συνθήκες αλληλεπίδρασης των δύο φαινομένων στη μορφή της εκάστοτε περιβάλλουσας ως εξής :

- Καταστατικός νόμος δράσης βλήτρου : Ορίζεται η τιμή  $D_o = D(s_{crit})$  από τη σχέση 1.3.9 ή 1.3.10 και τίθεται ως άνω όριο η τιμή  $D_o$  στην τεταγμένη της αντίστοιχης περιβάλλουσας. Συνεπώς, για τιμές ολίσθησης μεγαλύτερες από  $s_{crit}$  δεν επιτρέπεται αύξηση της τέμνουσας λόγω δράσης βλήτρου.
- Καταστατικός νόμος τριβής : Στη σχέση (1.3.24) το υπάρχον όριο  $s_u$  αντικαθίσταται με το όριο  $s_{crit}$  ως εξής :

$$w(s) = \begin{cases} 0.6 \cdot s^{2/3}, & s \leq s_{crit} \\ 0.6 \cdot s_{crit}^{2/3}, & s > s_{crit} \end{cases} \quad (1.3.29)$$

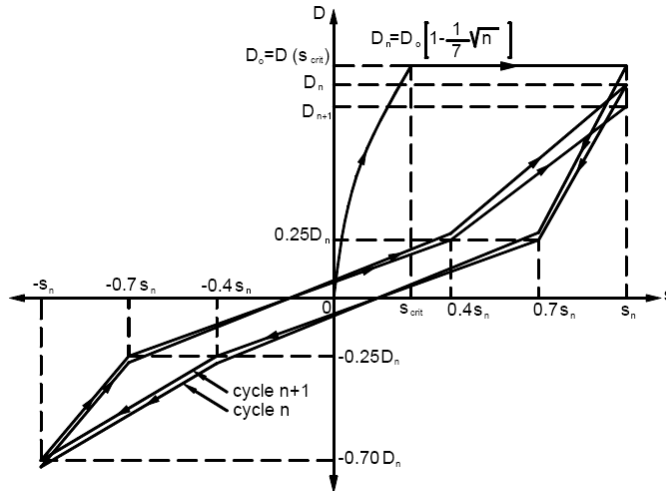
δηλαδή θεωρείται ότι η διεύρυνση της ρωγμής ( $w$ ) και κατά συνέπεια η τιμή της τάσης των οπλισμών που προκύπτει λόγω της διεύρυνσης αυτής ( $\sigma_{so}$ ) δεν μεταβάλλεται για τιμές ολίσθησης μεγαλύτερες από  $s_{crit}$ . Στο Σχήμα 1.3.12 φαίνονται οι τυπικές περιβάλλουσες καμπύλες των δύο καταστατικών νόμων λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Είναι εμφανές το άνω όριο  $k_b D_o$  στην τέμνουσα λόγω δράσης βλήτρου καθώς και η σημαντική πτώση της τέμνουσας λόγω τριβής σε σχέση με την απουσία αλληλεπίδρασης.



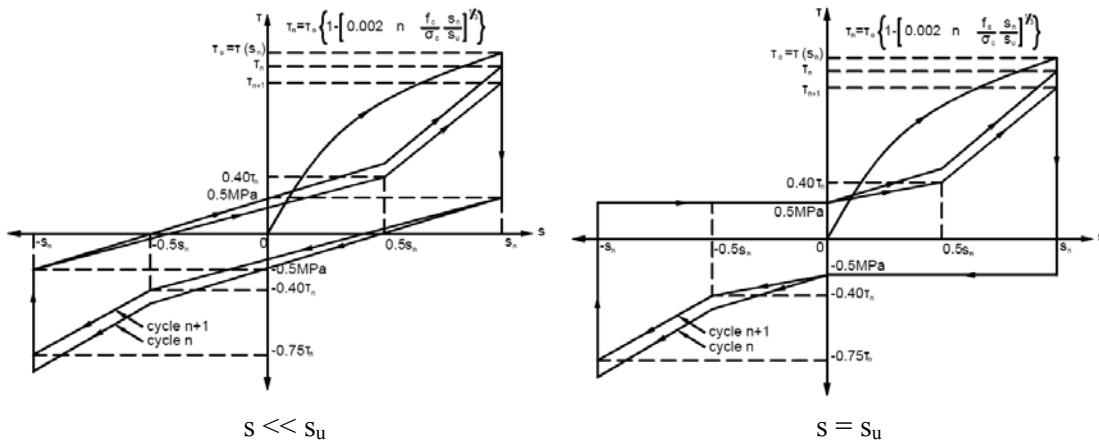
**Σχήμα 1.3.12** Περιβάλλουσες καταστατικών νόμων δράσης βλήτρου και τριβής με αλληλεπίδραση (με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η απόκριση χωρίς αλληλεπίδραση για λόγους σύγκρισης).

### 1.3.5.3 Κανόνες ανακύκλισης για τους καταστατικούς νόμους δράσης βλήτρου και τριβής

Στην εργασία των Vassilopoulos & Tassios (2003) παρουσιάζονται δύο καταστατικοί νόμοι που περιγράφουν την απόκριση της δράσης βλήτρου και της τριβής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, τα οποία στηρίζονται σε παλαιότερες προτάσεις των Vintzileou & Tassios (1987) και Tassios & Vintzileou (1987), αντίστοιχα. Η απευθείας χρήση των νόμων αυτών κρίνεται ανεπαρκής στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας γιατί καλύπτουν μόνο την ειδική περίπτωση συμμετρικών κύκλων φόρτισης (Σχ. 1.3.13 και 1.3.14). Για το λόγο αυτόν, γίνεται προσπάθεια επέκτασης των παραπάνω καταστατικών νόμων ώστε να καλύπτουν τη γενική περίπτωση της τυχοϋσας ανακυκλιζόμενης φόρτισης.



**Σχήμα 1.3.13** Νόμος δράσης βλήτρου υπό ανακυκλιζόμενη συμμετρική φόρτιση (Vassilopoulou & Tassios, 2003).



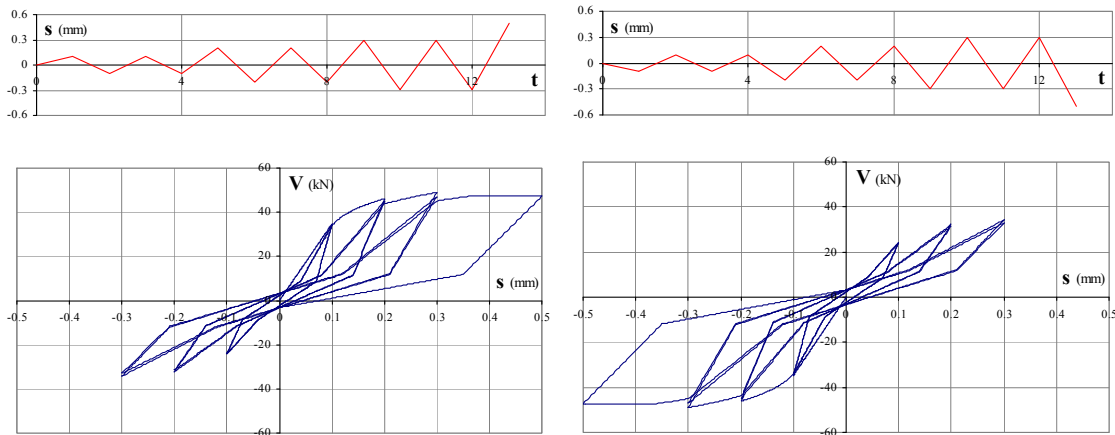
**Σχήμα 1.3.14** Νόμος τριβής υπό ανακυκλιζόμενη συμμετρική φόρτιση (Vassilopoulou & Tassios, 2003).

Ο καταστατικός νόμος **δράσης βλήτρου** που φαίνεται στο Σχήμα 1.3.13 επεκτείνεται για τυχούσα ανακυκλιζόμενη φόρτισης σύμφωνα με τους παρακάτω κανόνες :

- Λόγω της ασύμμετρης μορφής της απόκρισης για τη δράση βλήτρου (όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 1.3.13) θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι μια αρχική αρνητική φόρτιση (π.χ.  $0 \rightarrow -s_n$ ) θα δώσει αντισυμμετρική εικόνα από αυτή του Σχήματος 1.3.13. Για το λόγο αυτόν ορίζεται ένα καθολικό πρόσημο ( $\lambda$ ), το οποίο συνοδεύει συνεχώς την τιμή της ολίσθησης ( $s$ ) και της δράσης βλήτρου ( $D$ ), έτσι ώστε όλες οι εξισώσεις του προβλήματος να διατυπώνονται σύμφωνα με τη μορφή του Σχήματος 1.3.13 και ανεξάρτητα από την εκάστοτε αρχική κατεύθυνση φόρτισης. Ο ορισμός του προσήμου αυτού γίνεται όταν για πρώτη φορά η απόλυτη τιμή της ολίσθησης ( $s$ ) ξεπεράσει την τιμή  $s_{el}$  (Εξ. 1.3.12), η οποία ορίζει την “ελαστική συμπεριφορά” του φαινομένου ( $\lambda = +1$  για  $s > 0$ ,  $\lambda = -1$  για  $s < 0$ ). Με τον τρόπο αυτόν διασφαλίζεται η επιθυμητή αντισυμμετρική απόκριση στην περίπτωση φόρτισης ίδιας μορφής, αλλά αντίθετης φοράς (Σχ. 1.3.15).



- Για μονότονη φόρτιση κατά τη θετική φορά, εφαρμόζονται οι εξισώσεις τις περιβάλλουσας 1.3.9 και 1.3.10. Η αντίστοιχη περιβάλλουσα κατά την αρνητική φορά είναι μειωμένη κατά 30 % σε σχέση με αυτήν της θετικής φοράς. Επίσης, στις τιμές τις περιβάλλουσας εφαρμόζεται και ο καθολικός συντελεστής απομείωσης της αντοχής λόγω ανακύκλισης, όπως θα περιγραφεί παρακάτω.
- Στην περίπτωση  $|s| < s_{el}$  η απόκριση θεωρείται ελαστική, οπότε τυχόν αποφορτίσεις και επαναφορτίσεις στην εν λόγω περιοχή θεωρούνται ελαστικές και δεν προκύπτει βρόχος ανακύκλισης.



**Σχήμα 1.3.15** Αντισυμμετρική απόκριση για φόρτιση ίδιας μορφής και αντίθετης φοράς.

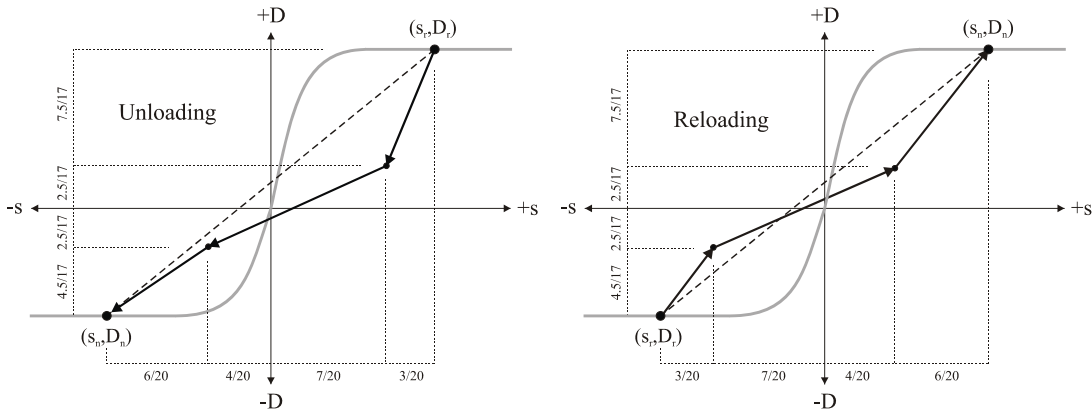
- Στην περίπτωση αποφόρτισης ή επαναφόρτισης (εκτός ελαστικής περιοχής) καταγράφονται οι τιμές ολίσθησης ( $s_r$ ) και δύναμης βλήτρου ( $D_r$ ) τη στιγμή της αποφόρτισης ή επαναφόρτισης (reversal). Επίσης, την ίδια στιγμή καταγράφεται και η πιθανή μέγιστη απόλυτη τιμή της ολίσθησης ( $s_{max}$ ) στη διάρκεια όλου του ιστορικού φόρτισης, μαζί με την αντιστοιχούσα τιμή της δύναμης βλήτρου ( $D_r$ ), αλλά χωρίς την πιθανή απομείωση 30 % ως εξής :

$$D_{cor} = |D_r|, s_r > 0 \text{ και } D_{cor} = |D_r| / 0.7, s_r \leq 0 \tag{1.3.30}$$

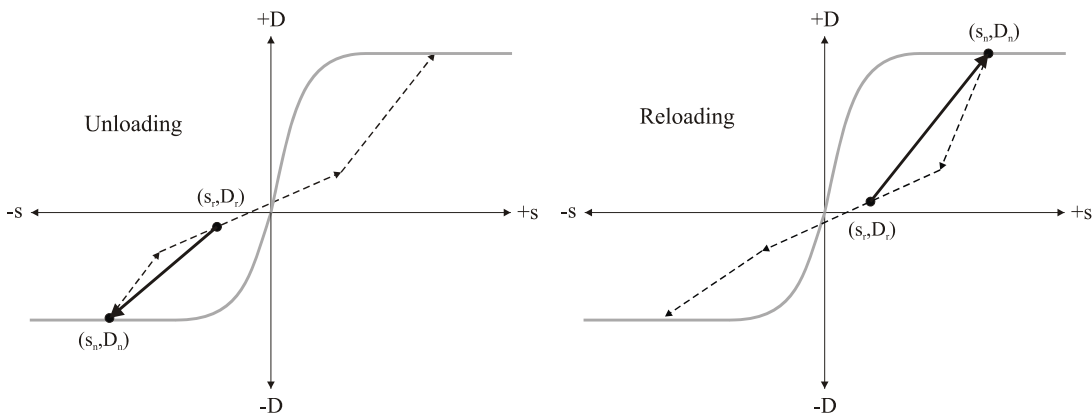
- Ορίζεται στη συνέχεια το παρακάτω εύρος τιμών μέσα στο οποίο θα σχεδιαστεί η τεθλασμένη καμπύλη αποφόρτισης / επαναφόρτισης ως εξής :

$$\begin{aligned} \text{Αποφόρτιση : } (s_r, D_r) \text{ έως } (s_n, D_n) &= (-s_{max}, -0.7 \cdot D_{cor}) \\ \text{Επαναφόρτιση : } (s_r, D_r) \text{ έως } (s_n, D_n) &= (s_{max}, D_{cor}) \end{aligned} \tag{1.3.31}$$

- Η τεθλασμένη γραμμή αποφόρτισης / επαναφόρτισης σχεδιάζεται σύμφωνα με το Σχήμα 1.3.16. Στην περίπτωση όπου οι τιμές ολίσθησης αφετηρίας ( $s_r$ ) και τερματισμού ( $s_n$ ) είναι ομόσημες, θεωρείται ότι η τεθλασμένη γραμμή εκφυλίζεται σε ευθεία (Σχ. 1.3.17).
- Αν σε οποιοδήποτε σημείο ξεπεραστεί η τιμή ολίσθησης τερματισμού ( $s_n$ ) κατά την ανακύκλιση, η μορφή της απόκρισης επιστρέφει στην καμπύλη περιβάλλουσας.



**Σχήμα 1.3.16** Μορφή απόκρισης κατά την αποφόρτιση / επαναφόρτιση καταστατικού νόμου δράσης βλήτρου για ετερόσημη ολίσθηση αφετηρίας και τερματισμού.



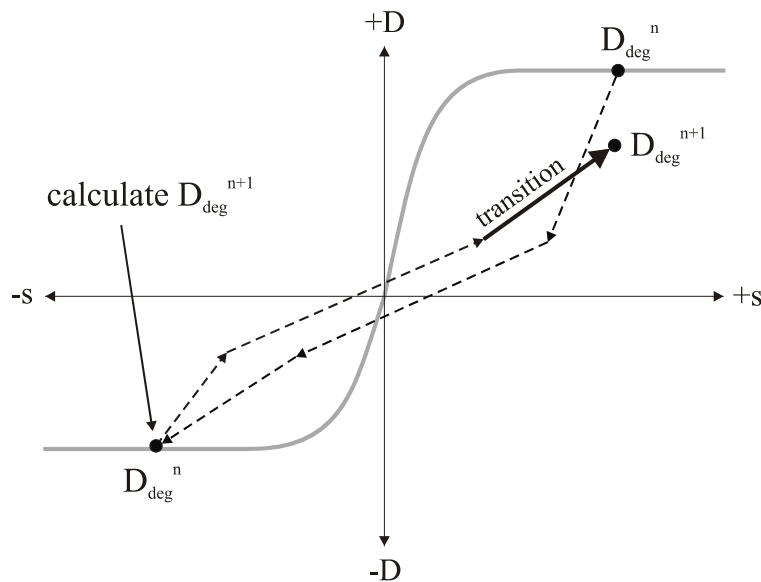
**Σχήμα 1.3.17** Μορφή απόκρισης κατά την αποφόρτιση / επαναφόρτιση καταστατικού νόμου δράσης βλήτρου για ομόσημη ολίσθηση αφετηρίας και τερματισμού.

- Τέλος, για την ολοκλήρωση του καταστατικού νόμου δράσης βλήτρου, ορίζεται ο καθολικός συντελεστής απομείωσης της αντοχής λόγω ανακύκλισης, ο οποίος επικαιροποιείται στην αρχή κάθε κύκλου επαναφόρτισης ( $s_r, D_r$  στα Σχήματα 1.3.16 και 1.3.17 δεξιά) ως εξής :

$$D_{deg} = 1 - \frac{1}{7} \cdot \sqrt{\frac{\sum s}{|s_{max}|} + 1} \quad (1.3.32)$$

όπου  $\Sigma s$  είναι η αθροιστική ολίσθηση που έχει καταγραφεί (cumulative slip) και  $s_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή ολίσθησης που έχει καταγραφεί.

Ο συντελεστής απομείωσης  $D_{deg}$  εφαρμόζεται στην τιμή της δύναμης  $D$  στο τέλος του τρέχοντος κύκλου ( $s_n, D_r$ ). Ο παραπάνω ορισμός είναι συμβατός με την αρχική διατύπωση του καταστατικού νόμου (Σχ. 1.3.13), όπου για τιμές  $s = 3 \cdot s_{max}, 7 \cdot s_{max}, 11 \cdot s_{max}$  κ.ο.κ. (σημεία επικαιροποίησης) δίνει αριθμό πλήρων κύκλων  $n = 1, 2, 3$  κ.ο.κ. στο σημείο επικαιροποίησης. Η μετάβαση (transition) μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών συντελεστή απομείωσης γίνεται με γραμμική παρεμβολή στον τελευταίο κλάδο της τεθλασμένης γραμμής απόκρισης, κατά την επαναφόρτιση (Σχ. 1.3.18).



**Σχήμα 1.3.18** Ορισμός συντελεστή απομείωσης της αντοχής λόγω ανακύκλισης.

Ο καταστατικός νόμος **τριβής** που φαίνεται στο Σχήμα 1.3.14 επεκτείνεται για τυχούσα ανακυκλιζόμενη φόρτισης σύμφωνα με τους παρακάτω κανόνες :

- Το καθολικό πρόσημο όπως ορίστηκε για τον καταστατικό νόμο δράσης βλήτρου επιδρά ομοίως και στις αντίστοιχες εξισώσεις του καταστατικού νόμου τριβής.
- Για την περιβάλλουσα του καταστατικού νόμου τριβής, εφαρμόζονται οι εξισώσεις 1.3.15 – 1.3.17 και το ποσοστό μείωσης κατά την αρνητική φορά είναι 25 %. Επίσης, στις τιμές τις περιβάλλουσας εφαρμόζεται ο αντίστοιχος καθολικός συντελεστής απομείωσης της αντοχής λόγω ανακύκλισης, όπως θα περιγραφεί παρακάτω.
- Στην περίπτωση  $|s| < s_{el}$  η απόκριση θεωρείται επίσης ελαστική, όπως και στον καταστατικό νόμο δράσης βλήτρου.
- Στην περίπτωση αποφόρτισης ή επαναφόρτισης καταγράφονται οι τιμές ολίσθησης ( $s_r$ ) και τριβής ( $\tau_r$ ) κατά τη στιγμή της αποφόρτισης / επαναφόρτισης. Επίσης, την ίδια στιγμή καταγράφεται και η πιθανή μέγιστη απόλυτη τιμή της ολίσθησης ( $s_{max}$ ) στη διάρκεια όλου

του ιστορικού φόρτισης (προφανώς είναι κοινή η τιμή στους δύο νόμους δράσης βλήτρου και τριβής), μαζί με την αντιστοιχούσα τιμή της δύναμης βλήτρου ( $\tau_r$ ), αλλά χωρίς την πιθανή απομείωση 25 % ως εξής :

$$\tau_{cor} = |\tau_r|, s_r > 0 \text{ και } \tau_{cor} = |\tau_r| / 0.75, s_r \leq 0 \quad (1.3.33)$$

- Ορίζεται στη συνέχεια το παρακάτω εύρος τιμών μέσα στο οποίο θα σχεδιαστεί η τεθλασμένη καμπύλη αποφόρτισης / επαναφόρτισης ως εξής :

$$\begin{aligned} \text{Αποφόρτιση : } (s_r, \tau_r) \text{ έως } (s_n, \tau_n) &= (-s_{max}, -0.75 \cdot \tau_{cor}) \\ \text{Επαναφόρτιση : } (s_r, \tau_r) \text{ έως } (s_n, \tau_n) &= (s_{max}, \tau_{cor}) \end{aligned} \quad (1.3.34)$$

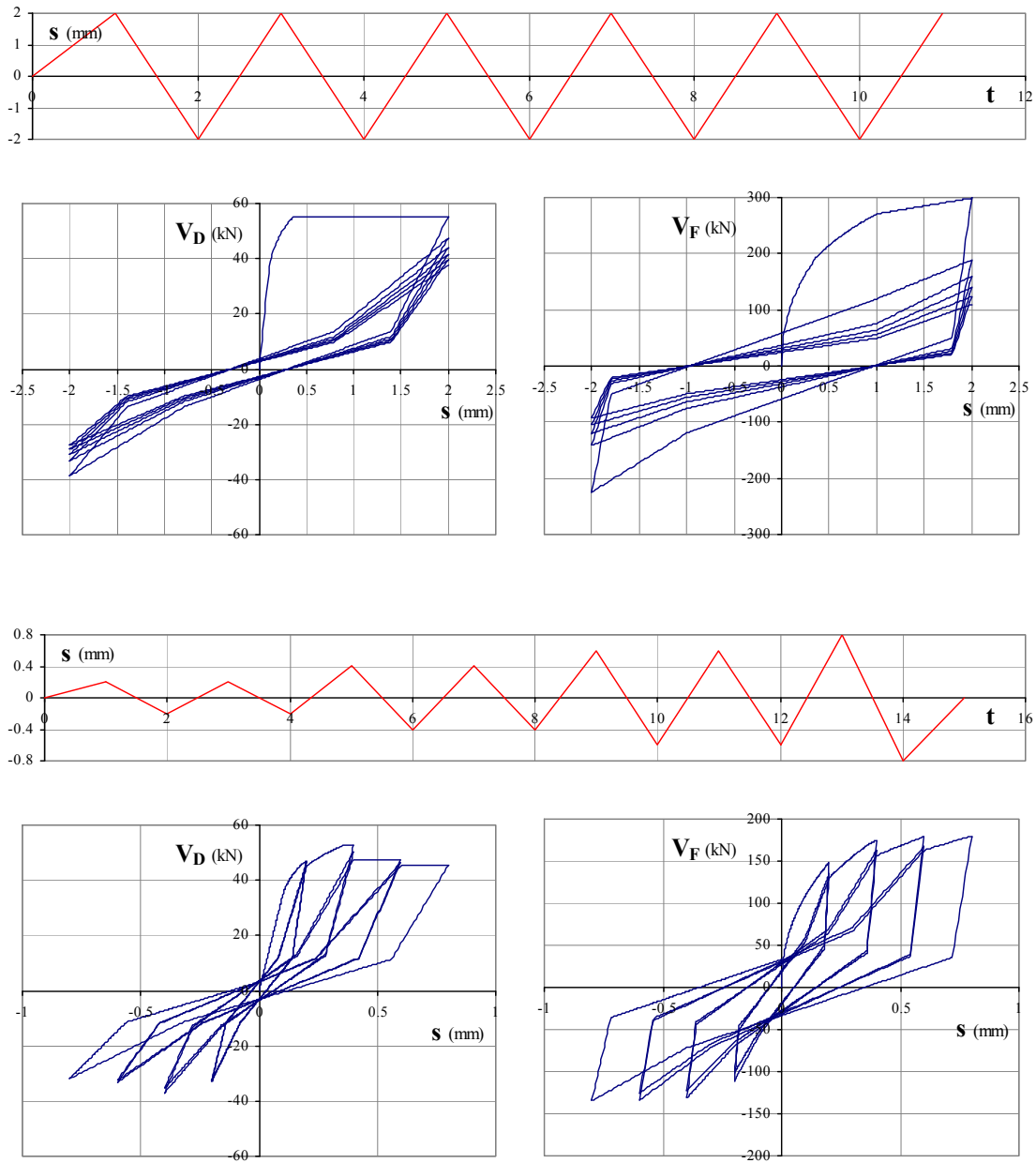
- Η τεθλασμένη γραμμή αποφόρτισης / επαναφόρτισης σχεδιάζεται με την ίδια λογική με τα Σχήματα 1.3.16 και 1.3.17, υιοθετώντας όμως τη μορφή του Σχήματος 1.3.14. Θεωρήθηκε ότι για τιμές  $s < s_u$  η μορφή της απόκρισης αντιστοιχεί στο αριστερό τμήμα του Σχήματος 1.3.14 και για  $s \geq s_u$  στο δεξί. Δύο μικρές βελτιώσεις που έγιναν σε σχέση με το εν λόγω Σχήμα είναι (α) η εξάρτηση των σταθερών τιμών τριβής 0.5 και -0.5 MPa από το συντελεστή απομείωσης της αντοχής κατά την ανακύκλιση (εξ. 1.3.35, 1.3.36) και (β) η επιβολή μικρής κλίσης στην αρχή του κλάδου αποφόρτισης / επαναφόρτισης (μετάβαση στη θέση  $0.9 \cdot s_n$  αντί της αρχικής  $1.0 \cdot s_n$ ) για βελτίωση της αριθμητικής σταθερότητας, κατά την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος ισορροπίας της ενισχυμένης διατομής.
- Αν σε οποιοδήποτε σημείο ξεπεραστεί η τιμή ολίσθησης τερματισμού ( $s_n$ ) κατά την ανακύκλιση, η μορφή της απόκρισης επιστρέφει στην καμπύλη περιβάλλουσας.
- Ο καθολικός συντελεστής απομείωσης της αντοχής λόγω ανακύκλισης, στην περίπτωση του καταστατικού νόμου τριβής, ο οποίος υπολογίζεται και εφαρμόζεται στις ίδιες θέσεις κατ' αντιστοιχία με τον καταστατικό νόμο δράσης βλήτρου, ορίζεται βάσει της αντίστοιχης σχέσης του ΚΑΝΕΠΕ ως εξής:

$$\tau_{deg} = 1 - 0.05 \cdot \sqrt{\frac{\sum s}{|s_{max}|} + 1} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\sigma_c}} \cdot \left( \frac{|s_{max}|}{s_u} \right)^{1/3} \quad (1.3.35)$$

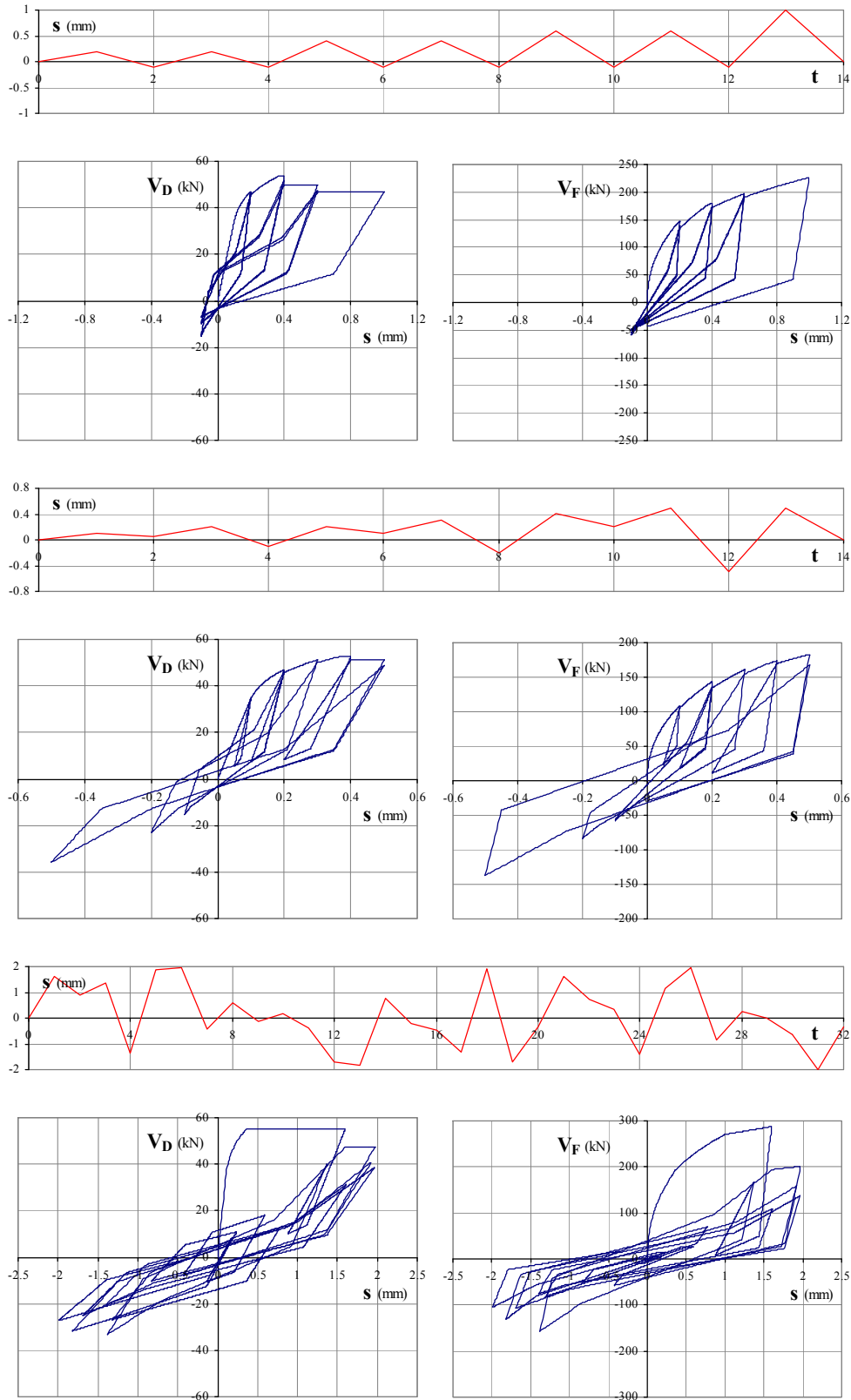
Τελικά, η απόκριση του συνδυασμένου καταστατικού νόμου διεπιφάνειας προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τιμών των καταστατικών νόμων δράσης βλήτρου και τριβής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V = V_D + V_F = \lambda \cdot k_b \cdot D(s) \cdot D_{deg} + \lambda \cdot A_c \cdot T(s) \cdot T_{deg} \quad (1.3.36)$$

Στα Σχήματα 1.3.19 και 1.3.20 παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα απόκρισης του παρόντος καταστατικού νόμου διεπιφάνειας (ξεχωριστά για δράση βλήτρου και τριβή με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους του Πίνακα 1.3.5) για διάφορες χρονοϊστορίες.



**Σχήμα 1.3.19** Διαγράμματα απόκρισης καταστατικού νόμου διεπιφάνειας για συμμετρική φόρτιση.



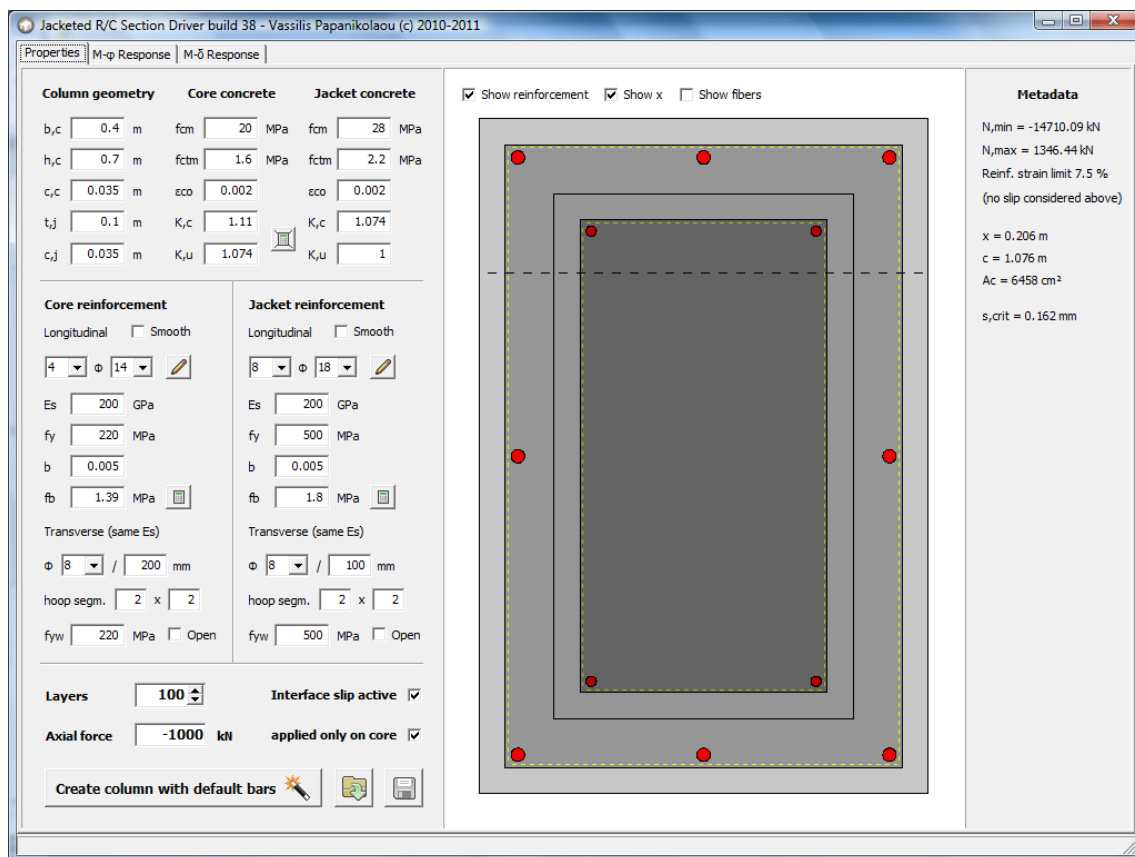
**Σχήμα 1.3.20** Διαγράμματα απόκρισης καταστατικού νόμου διεπιφάνειας για μη συμμετρική και τυχούσα φόρτιση.

### 1.3.6 Αναλυτικό προσομοίωμα στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ

#### 1.3.6.1 Γενικά

Λεπτομερής περιγραφή του αναλυτικού προσομοιώματος στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ παρουσιάστηκε στο Πακέτο Εργασίας 1.1 - Ενότητα 1.1.2. Η ανάπτυξη του αλγορίθμου ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε όρους καμπυλοτήτων σε ορθογωνική ενισχυμένη διατομή υποστυλώματος με μανδύα Ο/Σ, περιγράφεται στην παρούσα ενότητα.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου ανακυκλιζόμενης φόρτισης, αναπτύχθηκε πρωτότυπο λογισμικό το οποίο περιλαμβάνει φόρμα εισαγωγής δεδομένων (με δυνατότητα αποθήκευσης) και κατάλληλο γραφικό περιβάλλον για λόγους εποπτείας δεδομένων και αποτελεσμάτων. Η φόρμα εισαγωγής δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 1.3.21:



Σχήμα 1.3.21 Φόρμα εισαγωγής δεδομένων για την περιγραφή της ενισχυμένης διατομής.

#### 1.3.6.2 Δεδομένα του προβλήματος

Στην παραπάνω φόρμα εισάγονται τα εξής δεδομένα :

α) Γεωμετρία ενισχυμένης διατομής :

- $b_c$  πλάτος διατομής πυρήνα (m)
- $h_c$  ύψος διατομής πυρήνα (m)

$c_c$	επικάλυψη οπλισμών πυρήνα (m)
$t_j$	πάχος μανδύα (m)
$c_j$	επικάλυψη οπλισμών μανδύα (m)

β) Ιδιότητες σκυροδέματος για πυρήνα και μανδύα :

$f_{cm}$	μέση θλιπτική αντοχή (MPa)
$f_{ctm}$	μέση εφελκυστική αντοχή (MPa)
$\epsilon_{co}$	παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη θλιπτική αντοχή
$K_c$	συντελεστής αποτελεσματικότητας περίσφιξης για την περισφιγμένη ζώνη
$K_u$	συντελεστής αποτελεσματικότητας περίσφιξης για την απερίσφικτη ζώνη

Οι συντελεστές περίσφιξης υπολογίζονται αυτόματα βάσει γεωμετρίας και οπλισμών, σύμφωνα με το φαινομενολογικό μοντέλο περίσφιξης του Karros (1991).

γ) Ιδιότητες οπλισμών, ξεχωριστά για πυρήνα και μανδύα :

Αριθμός και διάμετρος διαμήκων ράβδων

$E_s$	μέτρο ελαστικότητας (GPa)
$f_y$	αντοχή διαρροής (MPa)
$b$	συντελεστής κράτυσης
$f_b$	τάση συνάφειας (MPa), υπολογίζεται αυτόματα από τον MC90 (CEB, 1993)

Επιλογή λείων διαμήκων ράβδων (επηρεάζει τον υπολογισμό του  $f_b$  )  
 Δυνατότητα ακριβούς τοποθέτησης και διαφορετικών διαμέτρων διαμήκων ράβδων  
 Διάμετρος, διάταξη και απόσταση μεταξύ εγκάρσιων οπλισμών

$f_y$  αντοχή διαρροής (MPa), θεωρείται ίδιο  $E_s$  με αυτό των διαμήκων ράβδων

Επιλογή ανοικτού συνδετήρα (επηρεάζει τον υπολογισμό των συντελεστών περίσφιξης).

Οι υπόλοιπες παράμετροι του καταστατικού νόμου Menegotto-Pinto λαμβάνονται από τις προεπιλεγμένες τιμές του Πίνακα 1.3.1.

δ) Εξωτερικό αξονικό φορτίο  $N_{ext}$  (kN), με επιλογή εφαρμογής σε ολόκληρη τη διατομή ή μόνο στον πυρήνα.

ε) Ενεργοποίηση διεπιφανειών ή θεώρηση μονολιθικής συμπεριφοράς.

στ) Αριθμός οριζόντιων λωρίδων διακριτοποίησης (layers).

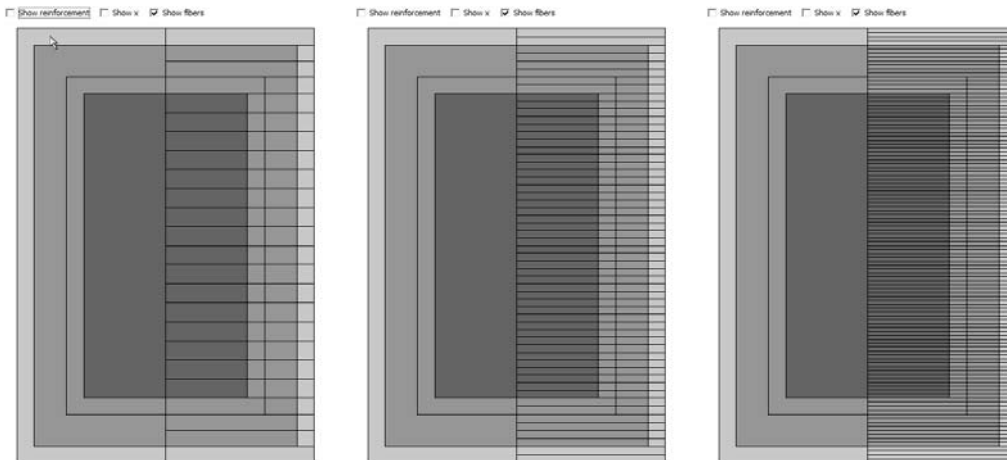


### 1.3.6.3 Βασικοί υπολογισμοί διατομής

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων και την εμφάνιση της εικόνας της ορθογωνικής διατομής, υλοποιούνται οι παρακάτω υπολογιστικές διαδικασίες :

#### α) Διακριτοποίηση της διατομής :

Η επιφάνεια του σκυροδέματος της διατομής διακριτοποιείται σε κατάλληλο αριθμό ινών (fibers), ώστε να προκύψει (κατά προσέγγιση) ο ζητούμενος αριθμός οριζόντιων λωρίδων διακριτοποίησης (layers). Οι παραπάνω δύο έννοιες δεν είναι ταυτόσημες λόγω των διαφορετικών υλικών σκυροδέματος ανά λωρίδα, με συνέπεια η κάθε λωρίδα να χωρίζεται σε περισσότερες της μίας ίνας. Στο Σχήμα 1.3.22 φαίνονται τρία παραδείγματα αραιής, μεσαίας και πυκνής διακριτοποίησης για τη διατομή του Σχήματος 1.3.21 (24, 56 και 110 λωρίδες αντίστοιχα) με αντίστοιχο αριθμό ινών ίσο με 80, 192 και 376. Σημειώνεται, ότι η παραπάνω διακριτοποίηση σε ίνες σκυροδέματος, αφορά τη μισή διατομή, προφανώς λόγω απλής συμμετρίας (το αποτέλεσμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης διπλασιάζεται).



**Σχήμα 1.3.22** Διακριτοποίηση διατομής σε ίνες σκυροδέματος (fibers). Αραιή (80), μέση (192) και πυκνή (376) διακριτοποίηση.

Στη συνέχεια, σε κάθε ίνα σκυροδέματος, με γνωστές συντεταγμένες  $(x_c, y_c)$  και διαστάσεις  $(l_x, l_y)$  αποδίδεται ένα αντικείμενο TConcreteConstantConfinement (βλ. ενότητα 1.3.4), έτσι ώστε η κάθε ίνα να είναι αυτόνομη οντότητα ως προς την εντατική της κατάσταση ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) και – κυρίως – το ιστορικό φόρτισης. Σε αυστηρά προγραμματιστικούς όρους, η ίνα σκυροδέματος (TConcreteFiber) υλοποιείται ως απόγονος της κλάσης TConcreteConstantConfinement (κληρονομεί όλα τα χαρακτηριστικά του καταστατικού νόμου σκυροδέματος), με πρόσθετο χαρακτηριστικό την παραπάνω γεωμετρία. Τελικά, το σύνολο των ινών σκυροδέματος καταχωρείται σε ένα δυναμικό πίνακα.

Οι οπλισμοί της διατομής αποτελούν ένα διαφορετικό σύνολο ινών (πίνακας με αντικείμενα TSteelFiber) με γνωστές συντεταγμένες  $(x_c, y_c)$  και διάμετρο  $d$ , οι οποίες ομοίως αποτελούν απογόνους του καταστατικού νόμου TSteelMP (βλ. ενότητα 1.3.3). Τέλος δημιουργείται ένα τρίτο σύνολο ‘αρνητικών’ ινών με ταυτόσημη γεωμετρία με τους παραπάνω οπλισμούς  $(x_c, y_c, d)$ , αλλά με τις ιδιότητες του περιβάλλοντος σκυροδέματος, η συνεισφορά

των οποίων είναι αφαιρετική κατά τη διαδικασία αριθμητικής ολοκλήρωσης των τάσεων της διατομής, έτσι ώστε να αγνοείται η επιφάνεια σκυροδέματος που καταλαμβάνεται από τους οπλισμούς και να μην προσμετράται εις διπλούν (Fafitis, 2001).

### β) Φόρτιση διατομής και υπολογισμός εσωτερικών φορτίων διατομής

Για τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης της διατομής, είναι απαραίτητος αρχικά ο προσδιορισμός του προφίλ των παραμορφώσεων της διατομής (ισχύει η επιπεδότητα διατομών κατά Bernoulli). Για τον πλήρη προσδιορισμό του προφίλ των παραμορφώσεων της διατομής, συμπεριλαμβανομένης και της δράσης των διεπιφανειών, χρειάζονται αποκλειστικά τέσσερις μεταβλητές (άγνωστοι του προβλήματος) :

$\varphi$	Η καμπυλότητα της διατομής
$\varepsilon_0$	Η παραμόρφωση στο κέντρο βάρους της διατομής
$\varepsilon_A$	Η ασυνέχεια (άλμα) των παραμορφώσεων λόγω της κάτω διεπιφάνειας
$\varepsilon_B$	Η ασυνέχεια (άλμα) των παραμορφώσεων λόγω της άνω διεπιφάνειας

Έτσι, για κάθε ίνα σκυροδέματος ή οπλισμού, ανάλογα με τη θέση της στη διατομή (η αρχή των αξόνων θεωρείται το κέντρο βάρους της διατομής), η παραμόρφωσή της είναι :

$$\text{Για } y_c < -h_c / 2 \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \varphi \cdot y_c - \varepsilon_0 - \varepsilon_A \quad (1.3.37)$$

$$\text{Για } -h_c / 2 < y_c < h_c / 2 \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \varphi \cdot y_c - \varepsilon_0 \quad (1.3.38)$$

$$\text{Για } -y_c > h_c / 2 \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \varphi \cdot y_c - \varepsilon_0 - \varepsilon_B \quad (1.3.49)$$

η παραπάνω διατύπωση αφορά τη συνολική παραμόρφωση της κάθε ίνας, αλλά οι σχέσεις 1.3.37-39 μπορούν να διατυπωθούν και σε μικροαυξητική μορφή, η οποία είναι συμβατή με τη λογική της 'βήμα-προς-βήμα' φόρτισης της διατομής. Έτσι, για κάθε ίνα σκυροδέματος ή οπλισμού, και για τη μικρο-μεταβολή των τεσσάρων φορτιστικών παραμέτρων, λαμβάνεται η νέα τιμή της τάσης ( $\sigma$ ), από τον αντίστοιχο καταστατικό νόμο :

$$(d\varphi, d\varepsilon_0, d\varepsilon_A, d\varepsilon_B) \rightarrow \text{σχέσεις 1.3.37-39} \rightarrow d\varepsilon \rightarrow \text{καταστατικός νόμος} \rightarrow \text{Νέα } \sigma \quad (1.3.40)$$

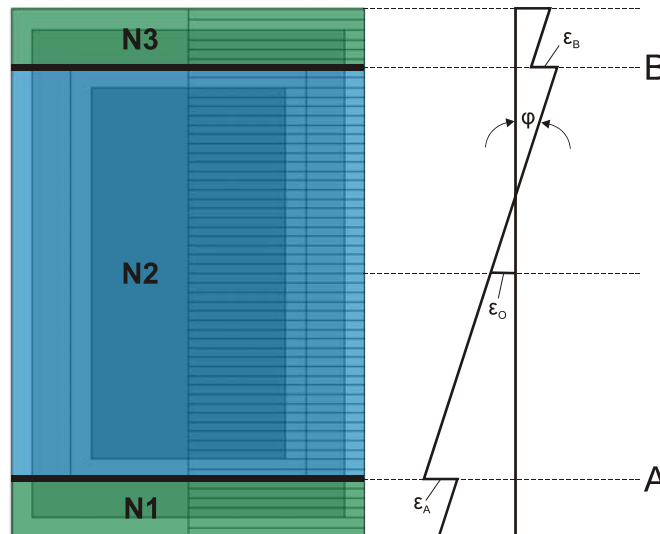
οπότε με γνωστές πλέον τις νέες τάσεις όλων των ινών της διατομής, γίνεται η αριθμητική τους ολοκλήρωση, για τον υπολογισμό της εσωτερικής συνολικής αξονικής δύναμης ( $N_{int}$ ) και ροπής ( $M_{int}$ ) της διατομής, ως εξής :

$$N_{int} = 2 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_c} \ell_{x,i} \cdot \ell_{y,i} \cdot \sigma_{c,i} + \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot \sigma_{s,i} - \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot \sigma_{c,i} \right) \quad (1.3.41)$$

$$M_{int} = 2 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_c} \ell_{x,i} \cdot \ell_{y,i} \cdot \sigma_{c,i} \cdot y_{c,i} + \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot \sigma_{s,i} \cdot y_{s,i} - \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot \sigma_{c,i} \cdot y_{s,i} \right) \quad (1.3.42)$$

όπου  $N_c$  και  $N_s$  το πλήθος των ινών σκυροδέματος και χάλυβα αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως, κατά τον υπολογισμό της συνολικής αξονικής δύναμης ( $N_{int}$ ) της διατομής, γίνεται με όμοιο τρόπο και ο υπολογισμός των επιμέρους αξονικών δυνάμεων των τριών ζωνών στις οποίες χωρίζουν τη διατομή οι δύο διεπιφάνειες ( $N_{1,int}$ ,  $N_{2,int}$ ,  $N_{3,int}$ ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.23. Ισχύει προφανώς  $N = N_{1,int} + N_{2,int} + N_{3,int}$  και οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την ισορροπία των διεπιφανειών.



**Σχήμα 1.3.23** Ζώνες μεταξύ διεπιφανειών A και B, για τις οποίες υπολογίζεται αξονική δύναμη.

#### γ) Απόκριση διεπιφανειών

Εκτός από το σύνολο των ινών σκυροδέματος και οπλισμών, η διατομή περιλαμβάνει και δύο αντικείμενα τύπου TInterface (βλ. ενότητα 1.3.5), όμοιων παραμέτρων, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δύο διεπιφανειών, μεταξύ νέου και παλαιού σκυροδέματος. Επιπλέον, υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης ( $x$ ) από τις αναλυτικές εκφράσεις που έχουν εξαχθεί από την Θερμού (2007) βάσει της πραγματικής ενισχυμένης διατομής (παρουσιάζονται στο Π.Ε. 3, στην ενότητα 3.1.3) και η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ ρωγμών ( $c$ ) (Εξ. 1.1.15) και η αντίστοιχη ρηγματωμένη καθ' ύψος επιφάνεια  $A_c = (b_c + 2 \cdot t_j) \cdot c$ . Τα μετα-δεδομένα αυτά, απαραίτητα για τον ορισμό των διεπιφανειών, εμφανίζονται δεξιά στη φόρμα του Σχήματος 1.3.21.

Κατά τη φόρτιση της διατομής με την τετράδα των αγνώστων μεγεθών ( $d\phi$ ,  $d\varepsilon_0$ ,  $d\varepsilon_A$ ,  $d\varepsilon_B$ ) (εξ. 1.3.41), προκαλείται μεταβολή στην απόκριση των δύο διεπιφανειών (μεταβολή της τέμνουσας), σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$d\varepsilon_A \rightarrow ds_A = c \cdot d\varepsilon_A \rightarrow \text{καταστατικός νόμος διεπιφάνειας} \rightarrow \text{Νέα } V_A \quad (1.3.43)$$

$$d\varepsilon_B \rightarrow ds_B = c \cdot d\varepsilon_B \rightarrow \text{καταστατικός νόμος διεπιφάνειας} \rightarrow \text{Νέα } V_B \quad (1.3.44)$$

**δ) Ισορροπία διατομής**

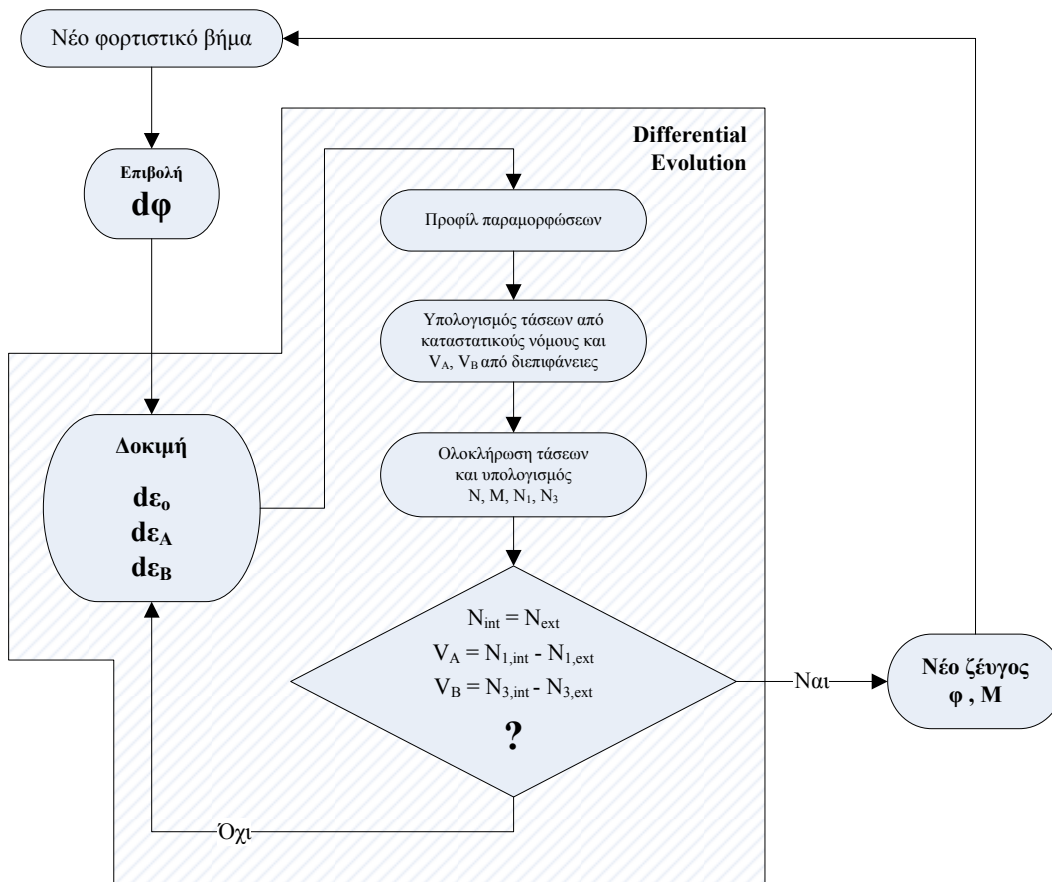
Σε κάθε φορτιστικό βήμα ( $d\phi$ ,  $d\epsilon_o$ ,  $d\epsilon_A$ ,  $d\epsilon_B$ ), για να επιτευχθεί η αναμενόμενη ισορροπία της διατομής θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες

- i) Ισορροπία συνολικής αξονικής δύναμης  $N_{int} = N_{ext}$
- ii) Ισορροπία κάτω διεπιφάνειας  $V_A = N_{1,int} - N_{1,ext}$
- iii) Ισορροπία άνω διεπιφάνειας  $V_B = N_{3,int} - N_{3,ext}$

όπου  $N_{1,ext}$  και  $N_{3,ext}$  οι εξωτερικές αξονικές δυνάμεις των αντίστοιχων ζωνών όπως περιγράφονται στο Σχήμα 1.3.23. Σε περίπτωση όπου η συνολική εξωτερική αξονική δύναμη επιβάλλεται μόνο στον πυρήνα, οι παραπάνω δυνάμεις είναι μηδενικές.

**1.3.6.4 Επίλυση του μη-γραμμικού προβλήματος**

Οι επιμέρους αριθμητικές διεργασίες που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα συνοψίζονται στο Σχήμα 1.3.24, στο οποίο παρουσιάζεται το μη-γραμμικό πρόβλημα για την επίτευξη της ισορροπίας της διατομής.



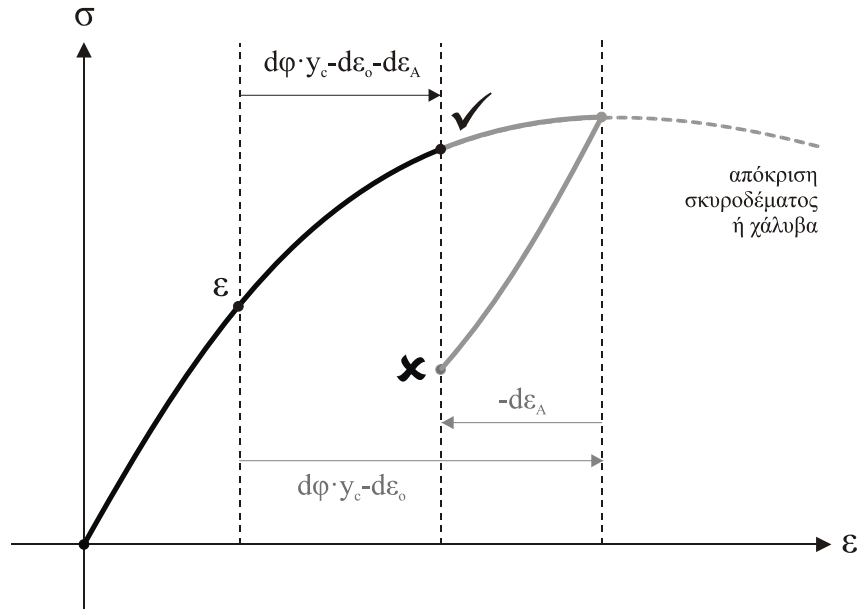
**Σχήμα 1.3.24** Περιγραφή του μη-γραμμικού προβλήματος ισορροπίας της διατομής.

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.3.24, στην απαραμόρφωτη διατομή επιβάλλεται ένα φορτιστικό βήμα σε όρους καμπυλότητας  $\Delta\varphi$ , με στόχο την καταγραφή της αντίστοιχης αναπτυσσόμενης εσωτερικής ροπής ( $M$ ), για δεδομένο και σταθερό εξωτερικό αξονικό φορτίο ( $N$ ). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σύμφωνα με το επιθυμητό ιστορικό φόρτισης καμπυλοτήτων της διατομής, ώστε να προκύψει τελικώς το γνωστό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων. Σε κάθε φορτιστικό βήμα  $\Delta\varphi$  (δεδομένο), για να προκύψει η ζητούμενη ισορροπία του αξονικού φορτίου ( $N$ ) αλλά και των δύο διεπιφανειών ( $A$  και  $B$ ), πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή των λοιπών αγνώστων που καθορίζουν πλήρως το προφίλ των παραμορφώσεων ( $d\epsilon_o$ ,  $d\epsilon_A$ ,  $d\epsilon_B$ ) και κατά συνέπεια το μέγεθος των εσωτερικών δυνάμεων της διατομής. Το εν λόγω πρόβλημα είναι συνεπώς μη-γραμμικό, με τρεις αγνώστους.

Οι συνήθεις αριθμητικές διαδικασίες αντιμετώπισης παρόμοιων προβλημάτων ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: με χρήση παραγώγων ή χωρίς αυτές (derivative-free methods), με συνηθέστερη τη δεύτερη κατηγορία. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απουσία κλειστών αριθμητικών λύσεων για την περιγραφή του μη γραμμικού προβλήματος, με συνέπεια τη δυσκολία στην αριθμητική διατύπωση των παραγώγων μεγεθών (Yen, 1991). Στη δεύτερη κατηγορία, συνήθως εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι εύρεσης ριζών μιας παραμέτρου, χωρίς χρήση παραγώγων όπως Regula-Falsi (Yau et al., 1993) ή Brent (Charalampakis & Koumoussis, 2008), με χρήση ένθετων βρόχων (nested loops) για περισσότερους του ενός αγνώστους (με συνηθέστερο παράδειγμα τη διαξονική κάμψη διατομών).

Στην προκειμένη περίπτωση, το μη-γραμμικό πρόβλημα τριών αγνώστων θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί από τρεις ένθετους βρόχους, με έναν επιλυτή ριζών για κάθε άγνωστο. Με άλλα λόγια, ο εσώτερος βρόχος επιτυγχάνει την ισορροπία της διατομής με επίλυση ως προς  $d\epsilon_o$ , και οι δύο εξωτερικοί βρόχοι, την ισορροπία με επίλυση ως προς  $d\epsilon_A$  και  $d\epsilon_B$ . Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε λαθεμένα αποτελέσματα, λόγω της ανακυκλιζόμενης φύσεως των καταστατικών νόμων. Στο Σχήμα 1.3.25 φαίνεται η απόκριση μιας τυχαίας ίνας σκυροδέματος (ή οπλισμού) του μανδύα, για δύο διαφορετικές διαδρομές φόρτισης: στην πρώτη περίπτωση (γκρι γραμμή), η ίνα αρχικά φορτίζεται με  $d\epsilon_o$  (εσώτερος βρόχος) και στη συνέχεια γίνεται η διόρθωση λόγω  $d\epsilon_A$  από τον εξωτερικό βρόχο. Στη δεύτερη περίπτωση (μαύρη γραμμή), η ίνα φορτίζεται απευθείας με τη συνδυασμένη δράση  $d\epsilon_o - d\epsilon_A$ , χωρίς την παρουσία ένθετων βρόχων. Είναι προφανές, ότι το ορθό αποτέλεσμα προκύπτει στη δεύτερη περίπτωση, επειδή στην πρώτη η ίνα αποφορτίζεται κατά τη διόρθωση για  $d\epsilon_A$ . Με άλλα λόγια, η εντατική κατάσταση δεν εξαρτάται μόνο από την τελική τιμή της παραμόρφωσης, αλλά **και από το ιστορικό φόρτισης**. Κάτι τέτοιο δε θα συνέβαινε σε ένα μονότονο καταστατικό νόμο (μονοσήμαντη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων).

Κατά συνέπεια, η επίλυση του παρόντος προβλήματος με τη χρήση των κλασικών μεθόδων εύρεσης ριζών, λόγω της παρουσίας της ανακύκλισης, οδηγεί αποδεδειγμένα σε λανθασμένα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτόν, θα πρέπει να επιλεγεί μια κατάλληλη αριθμητική μέθοδος η οποία να δοκιμάζει **ταυτόχρονα** τριάδες μεγεθών ( $d\epsilon_o$ ,  $d\epsilon_A$ ,  $d\epsilon_B$ ), μέχρι την επίτευξη της ισορροπίας της διατομής (αξονικού φορτίου και διεπιφανειών, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η φύση του εν λόγω προβλήματος προσφέρεται για την εφαρμογή ενός εξελικτικού αλγορίθμου (evolutionary algorithm - EA).



**Σχήμα 1.3.25** Εντατική κατάσταση τυχαίας ίνας για σταδιακή και απευθείας φόρτιση.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια μεγάλη οικογένεια στοχαστικών αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία χαρακτηρίζονται από σημαντικό αριθμό αγνώστων και μη διαφορίσιμα / ασυνεχή πεδία λύσεων. Η επίλυση ξεκινάει με έναν τυχαίο πληθυσμό διανυσμάτων πιθανών λύσεων (εντός ενός προκαθορισμένου χώρου λύσεων), ο οποίος με κατάλληλους κανόνες και διεργασίες (οι οποίες έχουν αναφορά στη φύση), εξελίσσεται και μεταλλάσσεται, προσεγγίζοντας την επιθυμητή λύση σύμφωνα με μία συνάρτηση κόστους (objective function). Υπάρχουν πολλές κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων, με συνηθέστερους τους γενετικούς αλγορίθμους (genetic algorithms - GA), σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization - PSO) και διαφορικής εξέλιξης (differential evolution - DE). Στην προκειμένη περίπτωση θα προτιμηθεί ο αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης, λόγω της απλότητάς του στη διατύπωση και της αποδεδειγμένης του αποτελεσματικότητας (Storn & Price, 1997).

Στο Σχήμα 1.3.26 φαίνεται η βασική δομή του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης. Η αριθμητική διαδικασία χωρίζεται στη φάση της εκκίνησης ή 'αρχικοποίησης' (initialization), μετάλλαξης (mutation), διασταύρωσης (crossover) και επιλογής (selection), για κάθε γενεά πληθυσμού λύσεων (generation). Βασικές παράμετροι για την εφαρμογή του είναι το μέγεθος του διανύσματος  $D$  (αριθμός παραμέτρων προβλήματος), ο πληθυσμός των διανυσμάτων  $NP$ , οι σταθερές μετάλλαξης και διασταύρωσης  $F$  και  $CR$ , η επιθυμητή ακρίβεια της λύσης  $TOL$ , το εύρος του χώρου των πιθανών λύσεων και η συνάρτηση κόστους  $f$ .

$$D = 3, \text{ διάνυσμα } [d\epsilon_0, d\epsilon_A, d\epsilon_B]^T$$

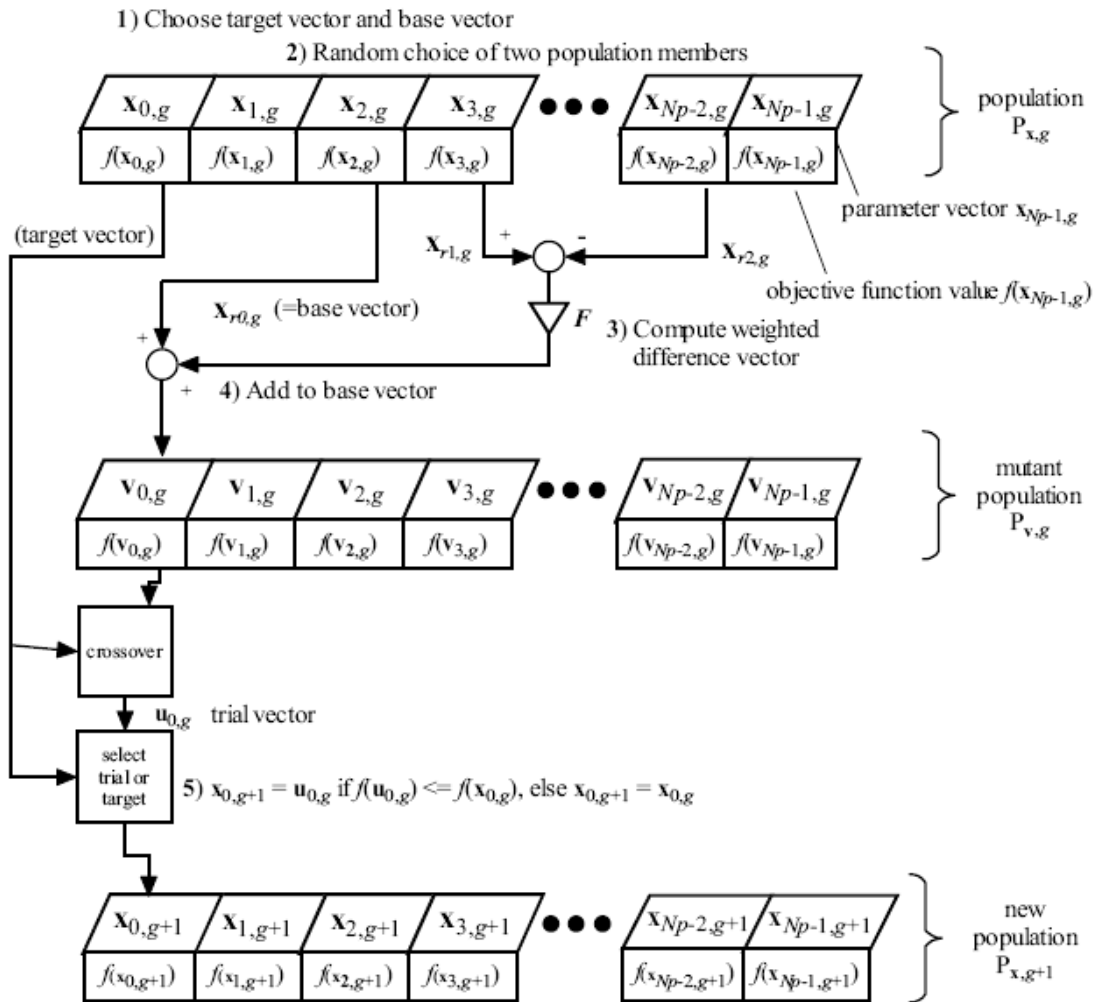
$$NP = 30$$

$$F = 0.5$$

$$CR = 0.9$$

$$TOL = 10^{-4} \cdot \text{αντοχή σε κεντρική θλίψη (kN)}$$

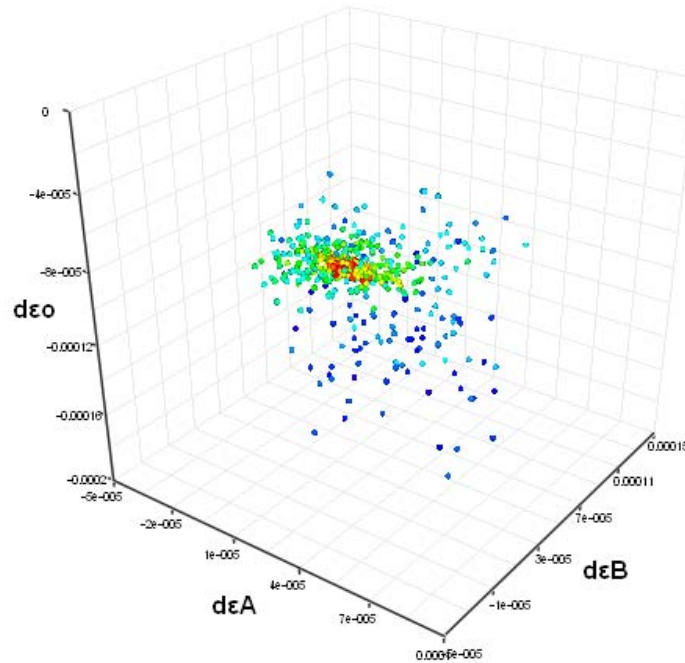
$$f = \sqrt{(N_{int} - N_{ext}) + (N_{1,int} - N_{1,ext}) + (N_{3,int} - N_{3,ext})} \tag{1.3.45}$$



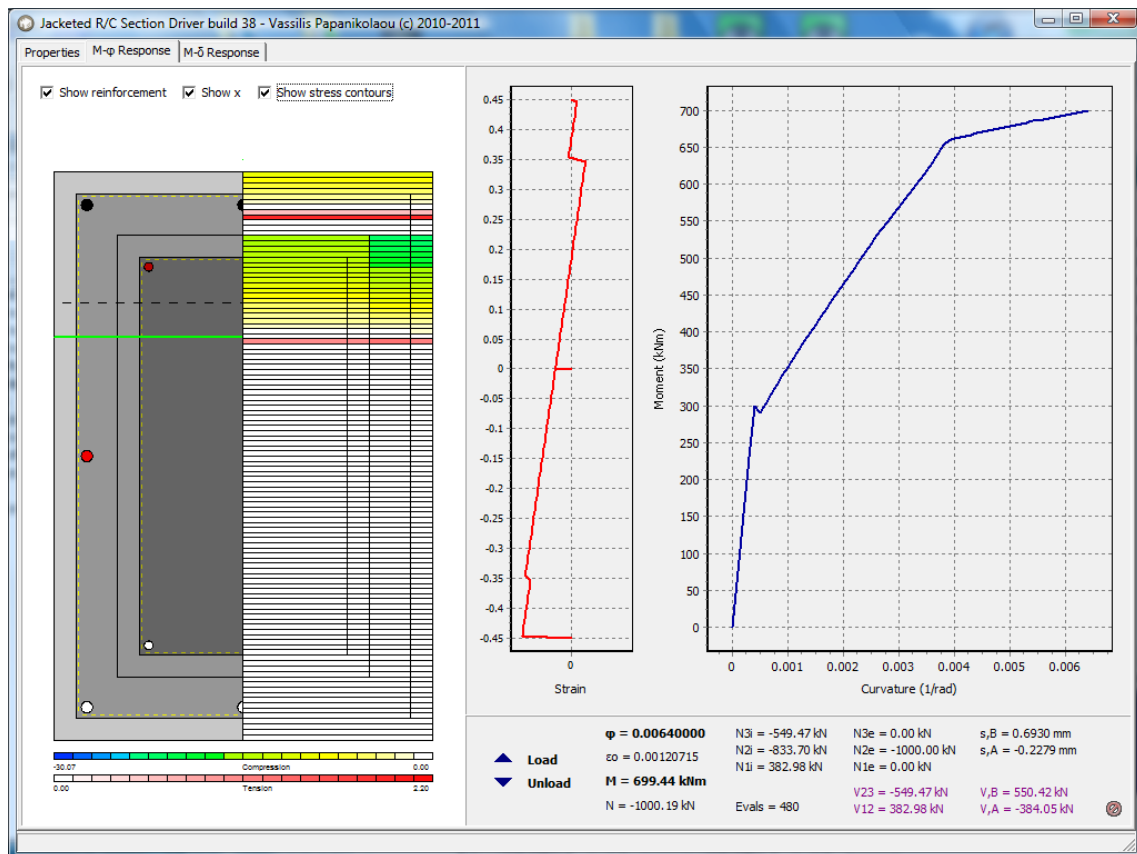
Σχήμα 1.3.25 Δομή αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης (Storn & Price, 1997).

Ο παραπάνω αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης, μετά από έναν τυχαίο αριθμό επιλύσεων της συνάρτησης κόστους (objective function evaluations), δίνει ως αποτέλεσμα το βέλτιστο διάνυσμα, ώστε να ισχύει  $f < TOL$ . Στο Σχήμα 1.3.27 φαίνονται σε τρισδιάστατο διάγραμμα τα διανύσματα  $[de_o, de_A, de_B]^T$  που αντιστοιχούν στις παραπάνω επιλύσεις για ένα φορτιστικό βήμα  $\Delta\phi$ . Ο χρωματισμός των σημείων (μπλε έως κόκκινο) αποτυπώνει την εξελικτική πορεία του αλγορίθμου, όπου είναι εμφανής η συνεχής βελτιστοποίηση της λύσης μέχρι την επίτευξη της τελικής σύγκλισης.

Στο Σχήμα 1.3.26 φαίνεται η φόρμα του προγράμματος στο οποίο επιβάλλεται το ιστορικό φόρτισης (είτε 'δια χειρός' είτε με αρχείο) και σχεδιάζεται το τρέχον προφίλ παραμορφώσεων της διατομής, η κατανομή των τάσεων στις ίνες σκυροδέματος με χρωματικό κώδικα, το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων και τέλος δίνονται όλα τα απαραίτητα αριθμητικά δεδομένα για το τρέχον φορτιστικό βήμα για λόγους εποπτείας. Στα σχήματα 1.3.28 και 1.3.29 φαίνονται ενδεικτικά διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων για μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα, με ή χωρίς θεώρηση ολίσθησης, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του εν λόγω λογισμικού. Διαπιστώνεται η σταθερότητα της επίλυσης σε όλες τις περιπτώσεις.

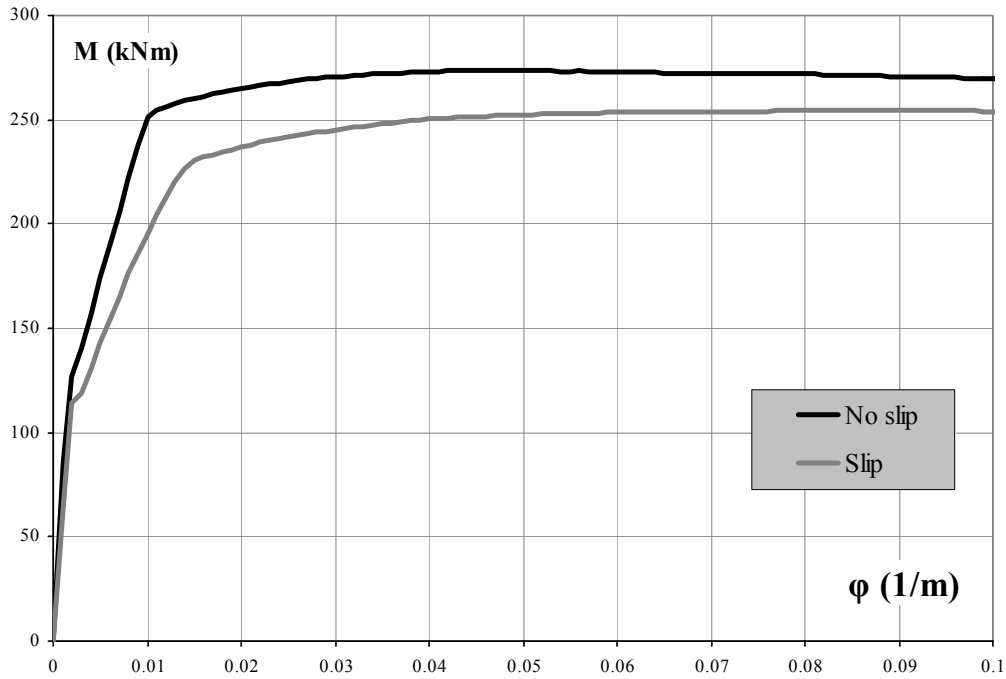


Σχήμα 1.3.26 Διανύσματα λύσεων κατά την εξελικτική πορεία του αλγορίθμου επίλυσης.

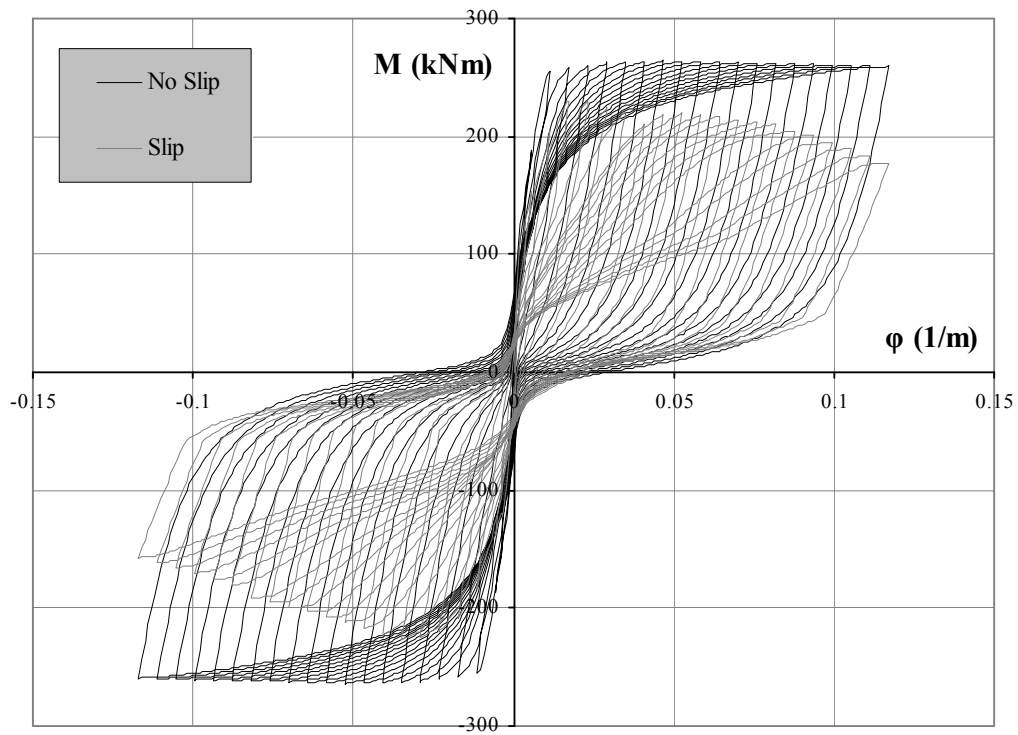


Σχήμα 1.3.27 Φόρμα επιβολής φόρτισης και αριθμητικών αποτελεσμάτων του προγράμματος.





Σχήμα 1.3.28 Τυπική σύγκριση μεταξύ μονολιθικής και μη συμπεριφοράς για μονότονη φόρτιση.



Σχήμα 1.3.29 Τυπική σύγκριση μεταξύ μονολιθικής και μη συμπεριφοράς για ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

### 1.3.7 Έλεγχος αξιοπιστίας προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε για επτά από τα δοκίμια που περιλαμβάνονται στην πειραματική βάση (§1.2.3). Τα δοκίμια τα οποία επελέγησαν ήταν το SS1 (Rodriguez & Park 1994), τα D, R, W (Vandoros & Dritsos 2006a, 2006b, 2008), το Q-RCD (Bousias et al. 2007a), το R-RCL4 (Bousias et al. 2006) και το M6 (Júlio et al. 2005).

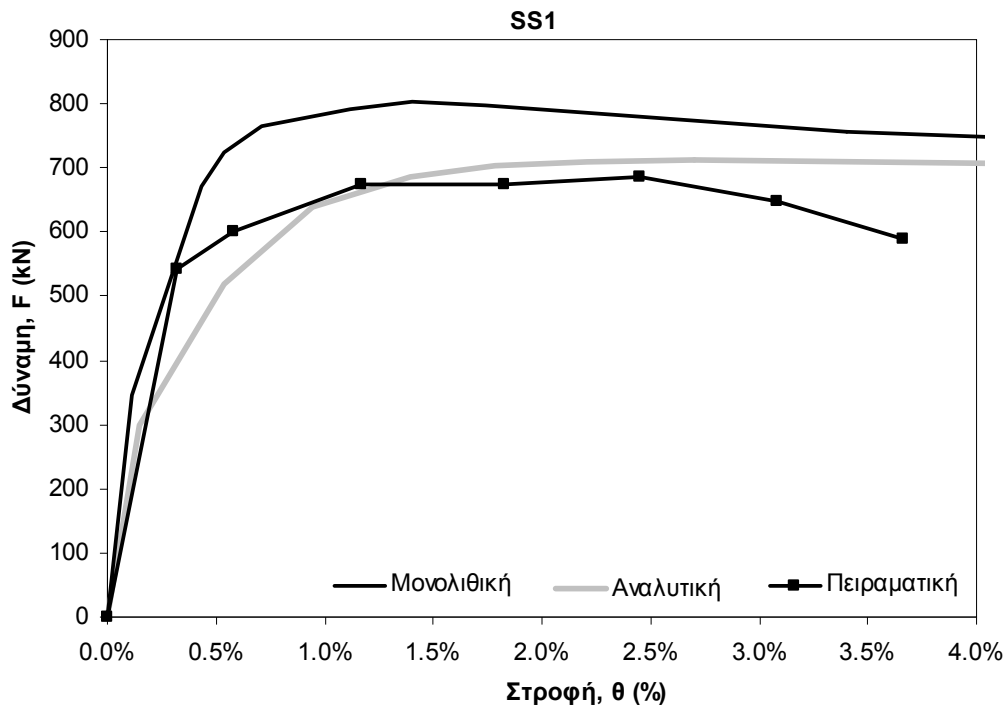
Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των καμπυλών απόκρισης υπό τη μορφή διαγραμμάτων  $M - \varphi$ , τόσο για την περίπτωση της μονολιθικής διατομής όσο και για την περίπτωση της σύνθετης διατομής με ολίσθηση στην άνω και κάτω διεπιφάνεια. Στη συνέχεια οι μονότονες καμπύλες  $M - \varphi$  μετετράπησαν σε καμπύλες  $F - \theta$  μέσω της Αρχής των Δυνατών Έργων, οι οποίες στη συνέχεια και συγκρίθηκαν με τις πειραματικές περιβάλλουσες. Οι συγκρινόμενες καμπύλες για το κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.3.30 ως 1.3.36.

Μερικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν με βάση τις εξαγόμενες καμπύλες κατόπιν συγκρίσεώς τους με τις πειραματικές είναι ότι:

- 1) Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει καλή σύγκλιση της αναλυτικής καμπύλης με την αντίστοιχη πειραματική. Αυτό συμβαίνει στα δοκίμια SS1 (Σχήμα 1.3.30), R (Σχήμα 1.3.32), W (Σχήμα 1.3.33) και Q-RCD (Σχήμα 1.3.34).
- 2) Στην περίπτωση του δοκιμίου M6 (Σχήμα 1.3.33) η αναλυτική καμπύλη αντιστοιχεί στο κάτω όριο της πιθανής απόκρισης της σύνθετης διατομής, χωρίς όμως να διαφέρει ουσιωδώς από την πειραματική καμπύλη. Επομένως, στην περίπτωση αυτή το αναλυτικό προσομοίωμα οδηγεί σε συντηρητική λύση.
- 3) Η αναλυτική με τη μονολιθική καμπύλη δεν έχουν σχεδόν καμιά διαφορά στην περίπτωση του δοκιμίου R-RCL4. Η πειραματική καμπύλη είναι ελαφρώς χαμηλότερα για στροφές μέχρι και 2%. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ματίσεων και στην ολίσθηση που λαμβάνει χώρα στην περιοχή αυτή και η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη από το αναλυτικό προσομοίωμα.
- 4) Στην περίπτωση του δοκιμίου D (Σχήμα 1.3.31) η πειραματική καμπύλη είναι επίσης χαμηλότερα από την αναλυτική. Η ύπαρξη βλήτρων ως μέσο σύνδεσης μεταξύ υφιστάμενου και νέου στοιχείου θα έπρεπε να οδηγήσει σε μια απόκριση πιο κοντά στη μονολιθική, γεγονός που δεν επαληθεύεται από την πραγματική απόκριση του δοκιμίου.

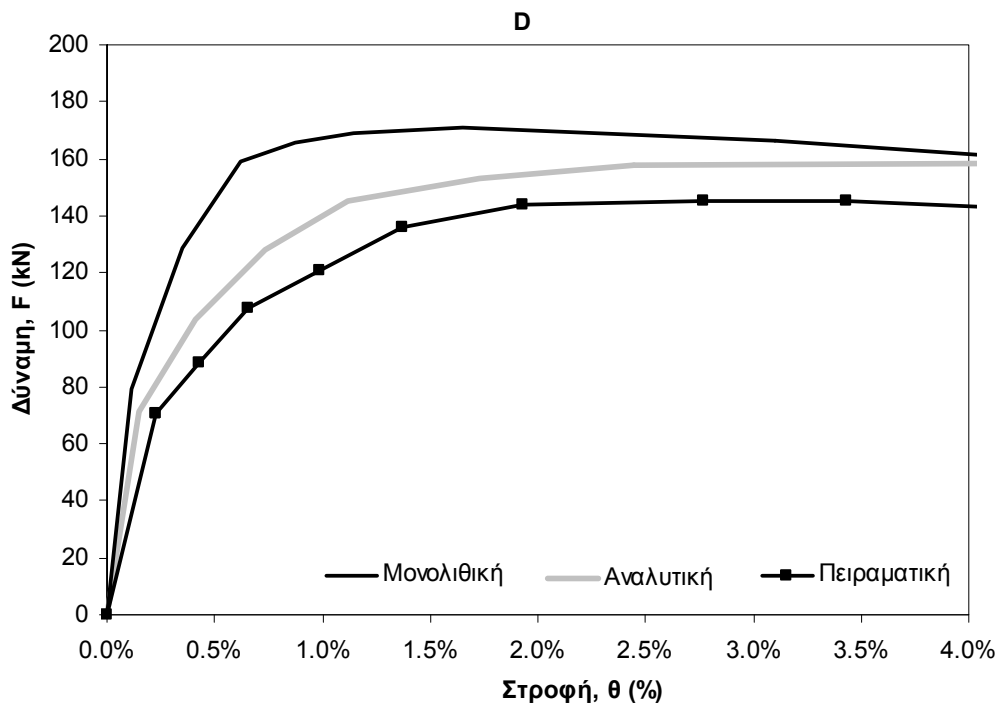
Από τα παραπάνω, και υπό το πρίσμα της πολυπλοκότητας των προσομοιούμενων μηχανισμών, είναι σαφές ότι το αναλυτικό προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και παρέχοντας αποτελέσματα που βρίσκονται συστηματικά προς την πλευρά της ασφάλειας, για να περιγράψει την καμπτική απόκριση σύνθετων διατομών Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.

- Δοκίμιο Rodriguez & Park (1994)

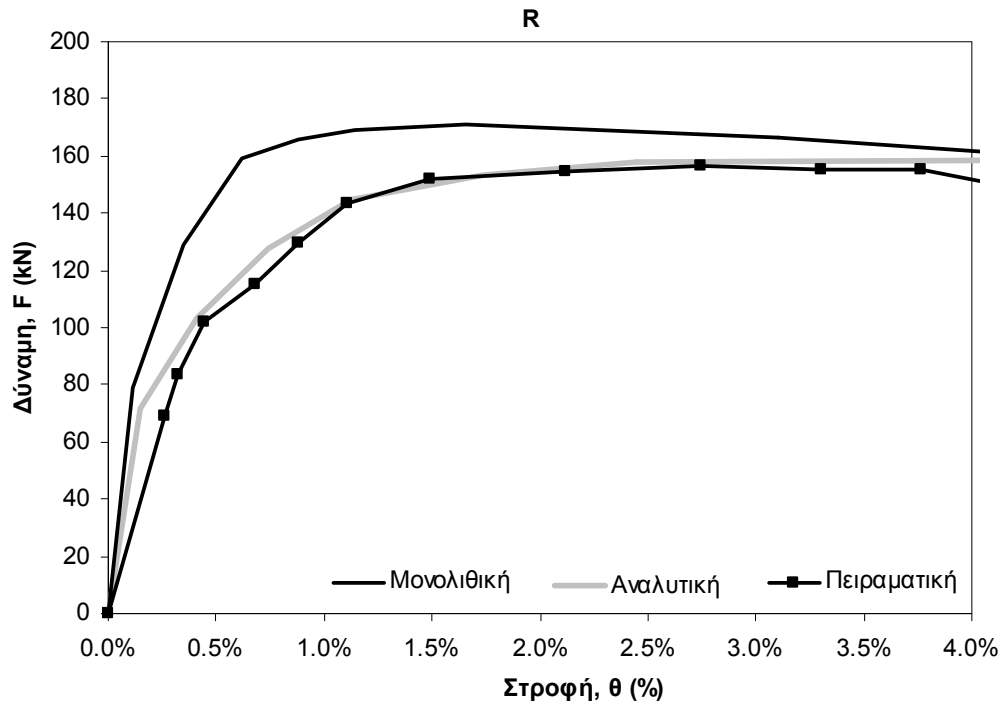


**Σχήμα 1.3.30** Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το SS1.

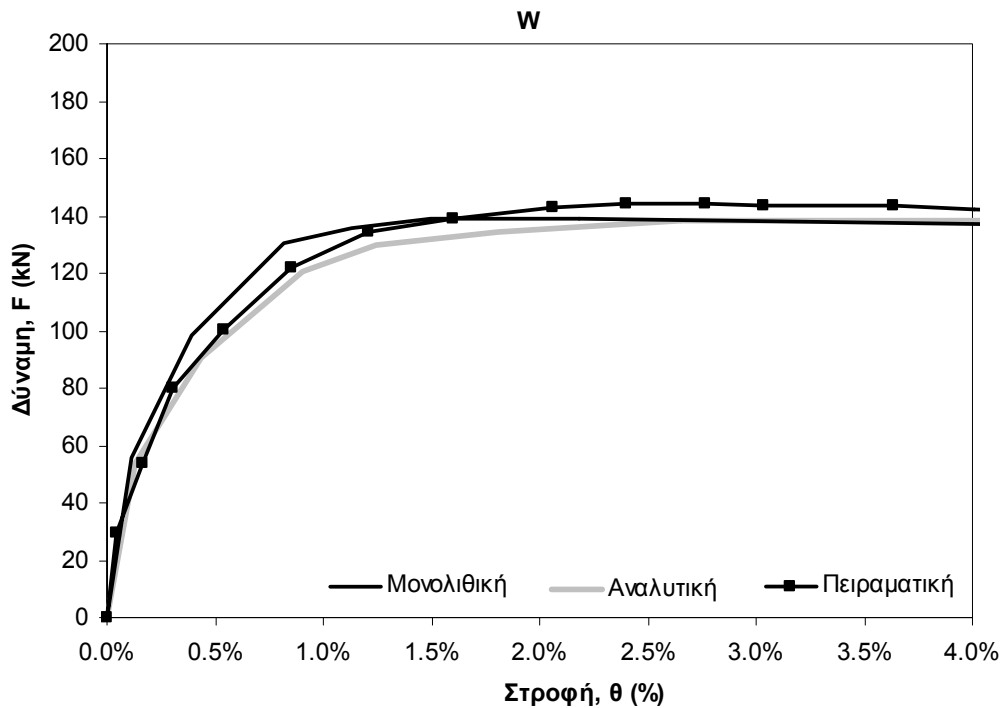
- Δοκίμια Vadoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008)



**Σχήμα 1.3.31** Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το D.

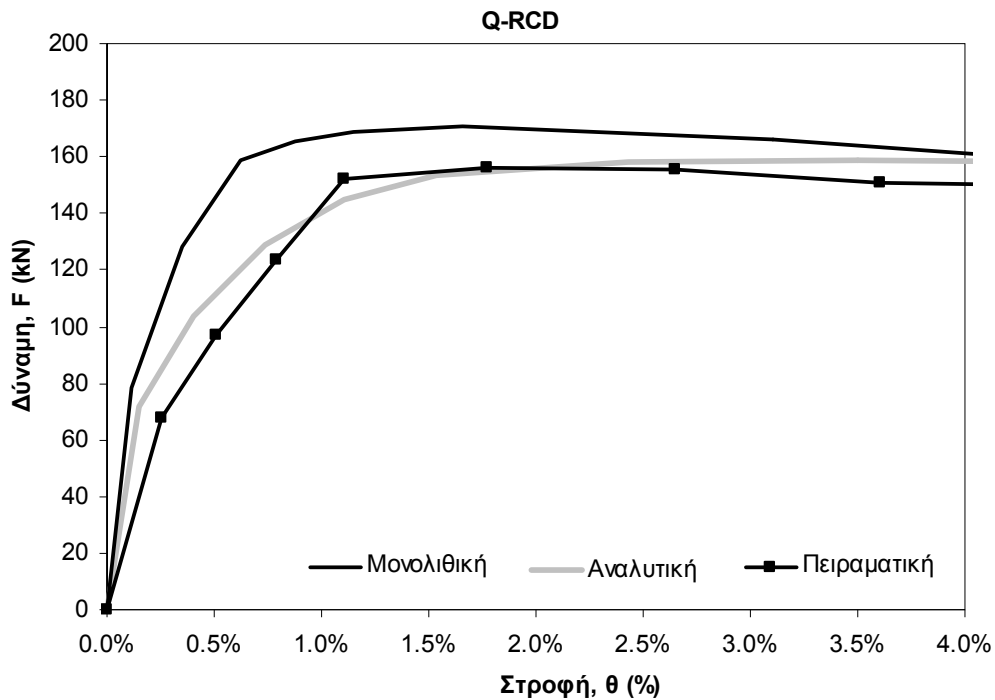


Σχήμα 1.3.32 Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το R.



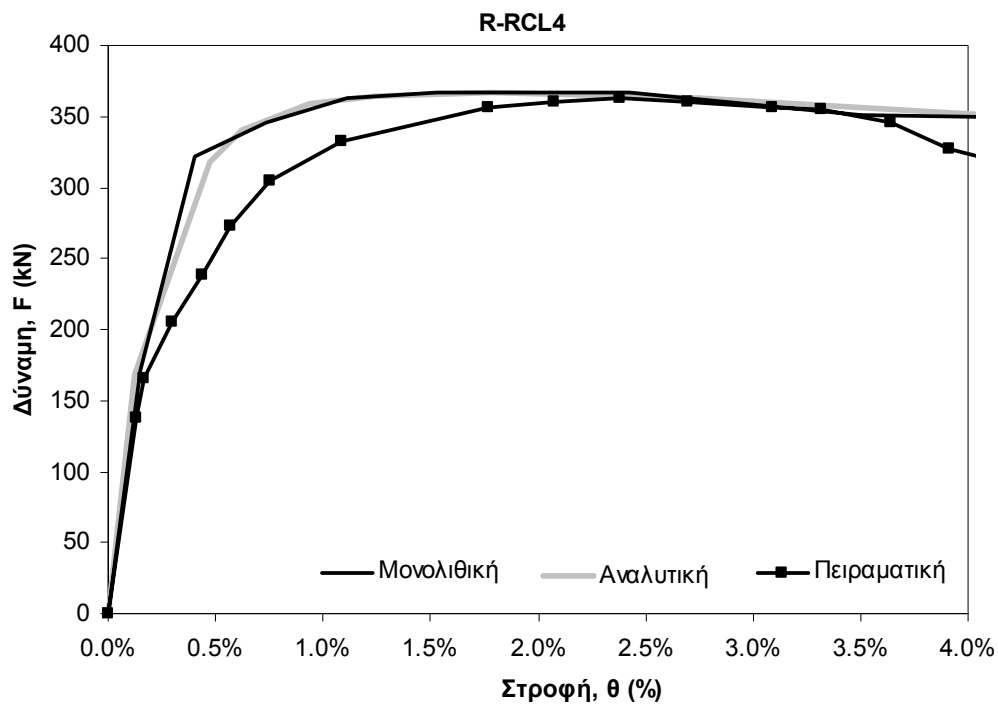
Σχήμα 1.3.33 Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το W.

- Δοκίμιο Bousias et al. (2007a)



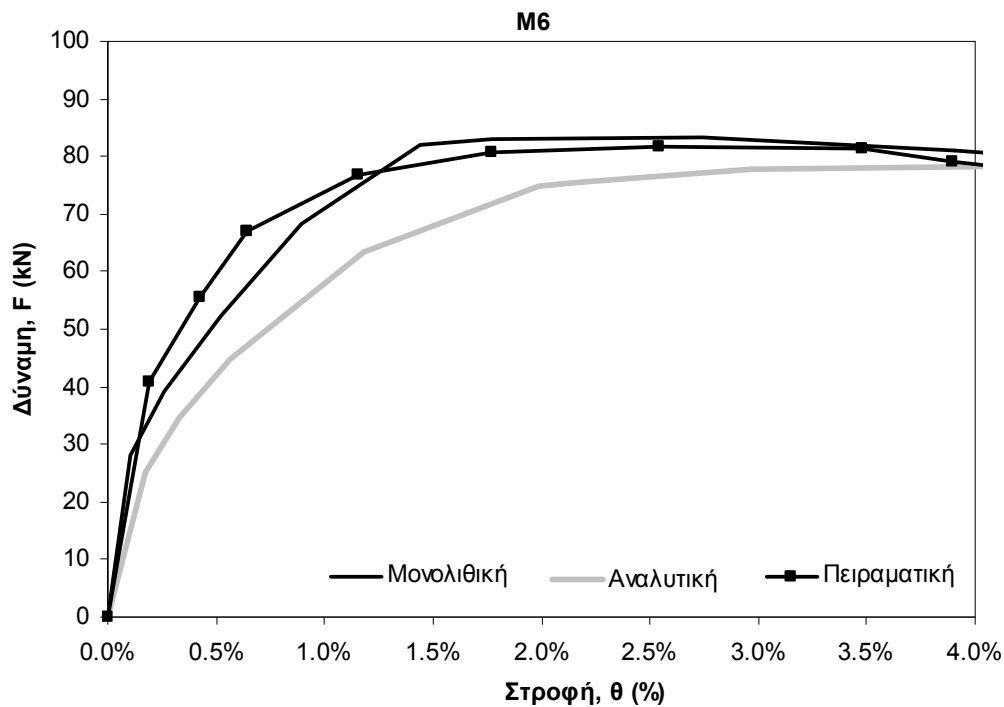
Σχήμα 1.3.34 Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το Q-RCD.

- Δοκίμιο Bousias et al. (2006)



Σχήμα 1.3.35 Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το R-RCL4.

- Δοκίμιο Júlio et al. (2005)

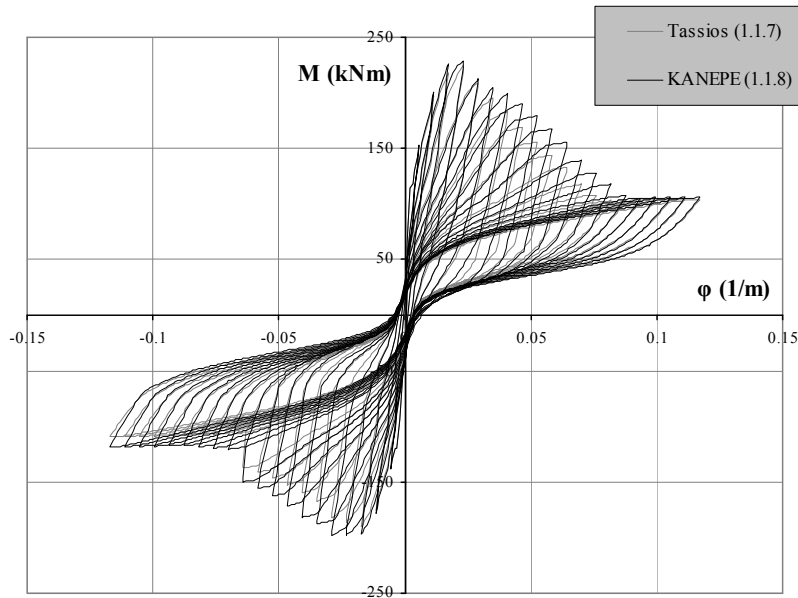


**Σχήμα 1.3.36** Σύγκριση μονολιθικής, αναλυτικής και πειραματικής απόκρισης για το M6.

### 1.3.8 Διερεύνηση παραμέτρων απομείωσης αντοχής λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Στην παράγραφο αυτή διερευνήθηκε το καταπόσον οι συντελεστές απομείωσης της απόκρισης της διεπιφάνειας λόγω ανακύκλισης, που περιγράφονται από τις σχέσεις 1.3.32 (Vassilopoulou & Tassios, 2003) και 1.3.35 (ΚΑΝΕΠΕ) οδηγούν σε αριθμητικά αποτελέσματα που πλησιάζουν ικανοποιητικά τα αντίστοιχα πειραματικά.

Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η σχέση 1.3.35 (αντίστοιχη της 1.1.8), η οποία περιγράφει την απομείωση της αντοχής σε τριβή της διεπιφάνειας λόγω ανακύκλισης, προερχόμενη από τις διατάξεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011) δεν διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη (1.1.7) των Vassilopoulou & Tassios (2003), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.37. Συγκεκριμένα, η σχέση του ΚΑΝΕΠΕ προβλέπει ελαφρώς μικρότερη απομείωση αντοχής λόγω ανακύκλισης.



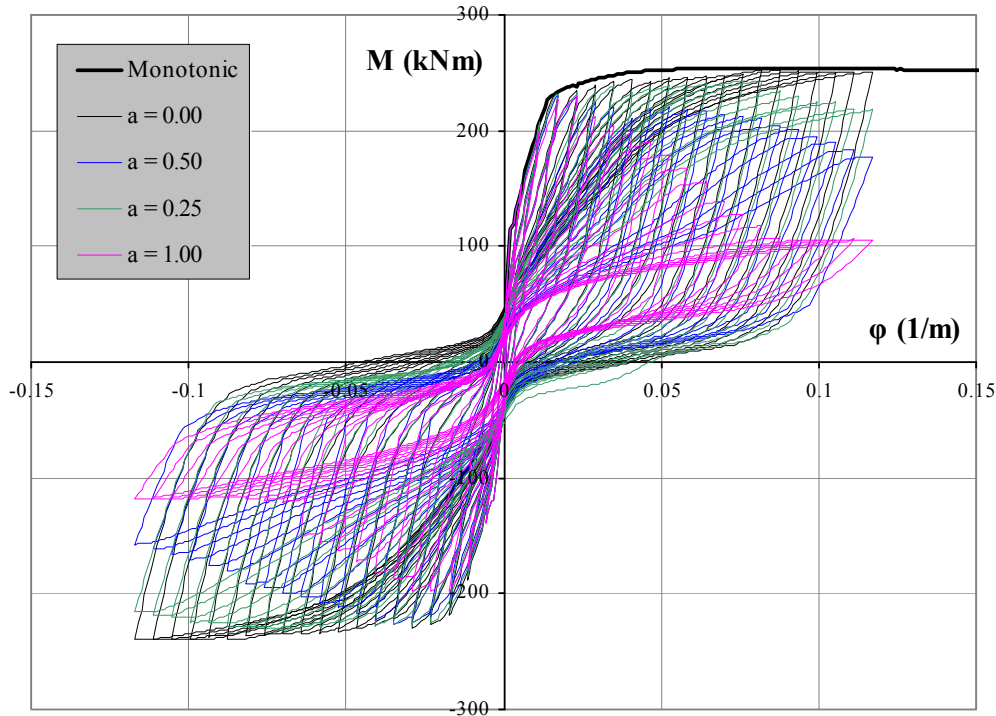
**Σχήμα 1.3.37** Σύγκριση της απόκρισης του προσομοιώματος D, μεταξύ των σχέσεων 1.1.8 (KANEPE 2011) και 1.1.7 (Vassilopoulou & Tassios, 2003).

Στη συνέχεια, και με στόχο τη βελτίωση του προσομοιώματος, έγινε παραμετρική διερεύνηση του βαθμού απομείωσης της αντοχής των αναλυτικών προσομοιωμάτων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με εισαγωγή ενός διορθωτικού συντελεστή ( $a$ ) στις σχέσεις 1.3.32 και 1.3.35 ως εξής :

$$D_{\text{deg}} = 1 - a \cdot \frac{1}{7} \cdot \sqrt{\frac{\sum s}{|s_{\text{max}}|} + 1} \quad (1.3.46)$$

$$\tau_{\text{deg}} = 1 - a \cdot 0.05 \cdot \sqrt{\frac{\sum s}{|s_{\text{max}}|} + 1} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\sigma_c}} \cdot \left( \frac{|s_{\text{max}}|}{s_u} \right)^{1/3} \quad (1.3.47)$$

ο οποίος μπορεί να λάβει τιμές από  $a = 0.00$  (μηδενική απομείωση αντοχής στη διεπιφάνεια) έως  $a = 1.00$  (απομείωση που προβλέπουν οι αρχικές εκφράσεις 1.3.32 και 1.3.35). Στο σχήμα 1.3.38 φαίνεται η επιρροή του διορθωτικού αυτού συντελεστή στην απόκριση του προσομοιώματος D υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στο σχήμα παρατηρείται ότι οι συντελεστές απομείωσης της αντοχής της διεπιφάνειας που επιλέγονται για την ανάλυση, επηρεάζουν έντονα την τελική απόκριση της διατομής. Είναι επίσης φανερό ότι οι αρχικές διατυπώσεις 1.3.32 και 1.3.35 (για  $a = 1$ ) οδηγούν σε πολύ έντονη απομείωση της αντοχής της διατομής που εκτιμάται ότι δεν συνάδει με την αντίστοιχη πειραματική εικόνα.



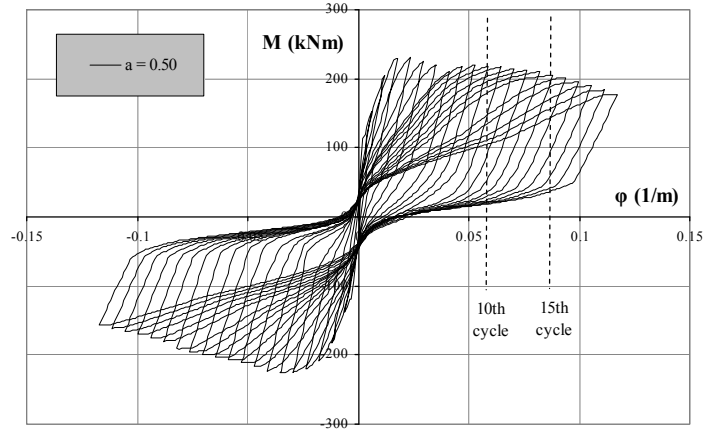
**Σχήμα 1.3.38** Απόκριση του προσομοιώματος D σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση για διάφορες τιμές του διορθωτικού συντελεστή  $a$ .

Για το λόγο αυτόν, έγινε προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, ακολουθώντας την εξής έμμεση διαδικασία:

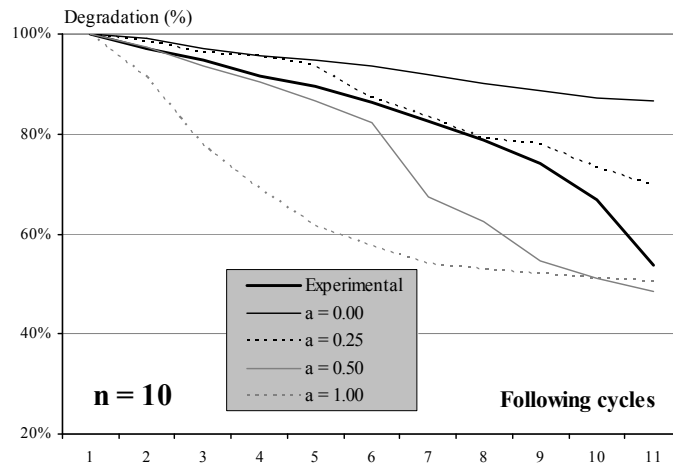
Ορίστηκαν δύο θέσεις ελέγχου, συγκεκριμένα ο 10<sup>ος</sup> και ο 15<sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης (Σχ. 1.3.39), για τους οποίους καταγράφηκαν οι απομειώσεις των αντοχών των κύκλων που έπονται και υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα ποσοστά απομείωσης, τόσο για τα αναλυτικά, όσο και για τα πειραματικά αποτελέσματα. Στα σχήματα 1.3.40 και 1.3.41 παρουσιάζονται τα διαγράμματα απομείωσης της αντοχής της διατομής κατά την ανακύκλιση για τα δύο προαναφερθέντα σημεία ελέγχου, αντίστοιχα, και για διάφορες τιμές του διορθωτικού συντελεστή  $a$ .

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω πειραματικής διερεύνησης για το δοκίμιο D, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι οι αρχικοί συντελεστές απομείωσης που προτείνονται στις σχέσεις 1.3.32 και 1.3.35 ( $a = 1$ ) υπερεκτιμούν το βαθμό απομείωσης της αντοχής της διεπιφάνειας λόγω ανακύκλισης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, μια ρεαλιστικότερη τιμή του διορθωτικού συντελεστή  $a$  μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 0.3 και 0.5, δηλαδή από το 1/3 έως 1/2 της απομείωσης που έχει αρχικά προταθεί.

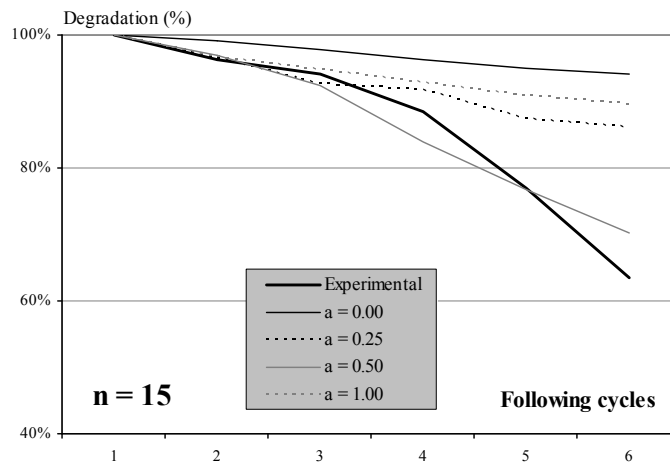




Σχήμα 1.3.39 Σημεία ελέγχου όπου καταγράφηκε η απομείωση της αντοχής των επόμενων κύκλων.



Σχήμα 1.3.40 Διαγράμματα απομείωσης της αντοχής στη θέση ελέγχου του 10<sup>ου</sup> κύκλου.



Σχήμα 1.3.41 Διαγράμματα απομείωσης της αντοχής στη θέση ελέγχου του 15<sup>ου</sup> κύκλου.

### 1.3.9 Βιβλιογραφία Π.Ε. 1.3

- CEB (1993) "CEB/FIP Model Code 1990", Bulletin d' Information CEB, 213/214, Lausanne.
- Charalampakis, A.E. and Koumousis, V.K. (2008) "Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load", *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, No. 11, pp. 923-936.
- Elnashai, A.S., Papanikolaou, V.K., and Lee, D.H. (2010) "Zeus-NL – A program for inelastic dynamic analysis of structures", Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Fafitis, A. (2001) "Interaction surfaces of reinforced concrete sections in biaxial bending", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 7, pp. 840-846.
- Filippou, F.C., Popov, E.P. and Bertero, V.V. (1983) "Effects of bond deterioration on hysteretic behaviour of reinforced concrete joints", Report No. UCB/EERC-83/19, University of California, Berkeley.
- Kappos, A.J. (1991) "Analytical prediction of the collapse earthquake for R/C buildings : Suggested methodology", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, No. 2, pp. 167-176.
- Mander J.B., Priestley M.J.N. and Park R. (1988) "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- Martinez-Rueda J.E. and Elnashai A.S. (1997) "Confined concrete model under cyclic load", *Materials and Structures*, Vol. 30, No. 197, pp. 139-147.
- Menegotto, M. and Pinto, P.E (1973) "Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and nonelastic behaviour of elements under combined normal force and bending", *Proc. IABSE Symposium*, Lisbon, Portugal, 1973.
- Storn, R. and Price, K. (1997) "Differential Evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, No. 4, 341-359.
- Tassios, T.P. and Vintzileou, E. (1987) "Concrete to concrete friction", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 832-849.
- Thermou, G. E., Pantazopoulou, S. J., and Elnashai, A. S. (2004). "Analytical modeling of interface behavior in reinforced concrete jacketed members." *Proc., 2004 Structures Congress (ASCE) "Building on the past, securing the future"*, Nashville, Tennessee, Paper No. 349.
- Thermou, G. E., Pantazopoulou, S. J., and Elnashai, A.S. (2007) "Flexural behavior of brittle RC members rehabilitated with concrete jacketing" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 133(10), 1373-1384.
- Vassilopoulou, I. and Tassios, P. (2003) "Shear transfer capacity along a RC crack under cyclic sliding", *Proc. fib Symposium*, TCG (Technical Chamber of Greece), Athens, Greece, Paper No. 271.
- Vintzileou, E. and Tassios, T.P. (1987) "Behaviour of dowels under cyclic deformations", *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 1, pp. 18-30.
- Yau, C.Y., Chan, S.L, and So, A.K.W. (1993) "Biaxial bending design of arbitrarily shaped reinforced concrete column", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 3, pp. 269-278.
- Yen, J.Y.R. (1991) "Quasi-Newton method for reinforced concrete column analysis and design", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 657-666.
- Θερμού, Γ.Ε. (2007). "Μοντέλα και φάσματα σχεδιασμού και αποτίμησης επισκευασμένων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα." *Διδακτορική διατριβή*, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- ΚΑΝΕΠΕ (2011). "Κανονισμός Επεμβάσεων." Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Τελικό Κείμενο, Σεπτέμβριος 2011.

## ΦΑΣΗ 2: Ανάπτυξη υπολογιστικού προσομοιώματος με πεπερασμένα στοιχεία στο χώρο (3D Finite Element Analysis) υποστυλωμάτων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ

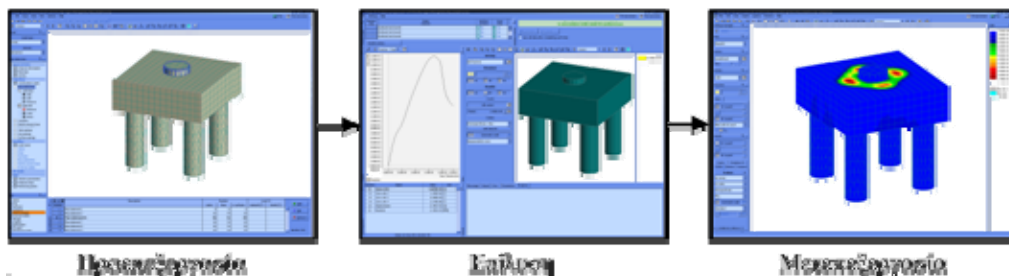
### Πακέτο Εργασίας 2.1 (Ανάπτυξη υπολογιστικού προσομοιώματος πεπερ. στοιχείων)

#### 2.1.1 Γενικά

Το αναλυτικό προσομοίωμα ενισχυμένου στοιχείου Ο/Σ με μανδύα, το οποίο αναπτύχθηκε στα Π.Ε. 1.1 και 1.3, θα προσομοιωθεί στην παρούσα ενότητα με τη χρήση της ακριβέστερης μεθόδου των μη-γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο (nonlinear 3D finite element analysis). Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση θα δώσει τη δυνατότητα αφενός σύγκρισης με το αναλυτικό προσομοίωμα και αφετέρου λεπτομερέστερης ανάλυσης και παρακολούθησης των φαινομένων στη διεπιφάνεια, ενώ θα γίνει προσπάθεια να προσομοιωθούν και σημαντικά φαινόμενα όπως η απόσχιση του μανδύα, τα οποία δεν είναι εφικτό να συμπεριληφθούν στο αναλυτικό προσομοίωμα. Παρόμοια αναλυτική διερεύνηση για το συγκεκριμένο τύπο δομικού στοιχείου έχει γίνει πρόσφατα στις εργασίες των Lampropoulos & Dritsos (2011a, 2011b). Συγκεκριμένα, η προσομοίωση των υποστυλωμάτων θα γίνει με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία για παλαιό και νέο σκυρόδεμα, γραμμικά εμφυτευμένα στοιχεία για τους οπλισμούς (με ενδεχόμενη συνεκτίμηση του φαινομένου της διαμήκουσ ολίσθησής τους) και κατάλληλες συνοριακές συνθήκες επαφής-τριβής (interface elements) για την προσομοίωση της συνεργασίας παλαιού και νέου σκυροδέματος. Η φόρτιση θα έχει τη μορφή καταναγκασμένης μετακίνησης κατά τη μία διεύθυνση, αρχικά μονότονη και στη συνέχεια ανακυκλιζόμενη.

#### 2.1.2 Λογισμικό και μεθοδολογία προσομοίωσης

Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ATENA 3D v4.2.7 (Červenka et al., 2011), το οποίο είναι ειδικά προσαρμοσμένο στην προσομοίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα στο χώρο. Διαθέτει κατάλληλους καταστατικούς νόμους για την προσομοίωση του σκυροδέματος και των οπλισμών και μπορεί να συμπεριλάβει φαινόμενα όπως η ολίσθηση των οπλισμών και η συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος. Διαθέτει επίσης αξιόπιστους αλγόριθμους επίλυσης του μη-γραμμικού προβλήματος και επαρκείς δυνατότητες προβολής και μετεπεξεργασίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων (Σχ. 2.1.1).

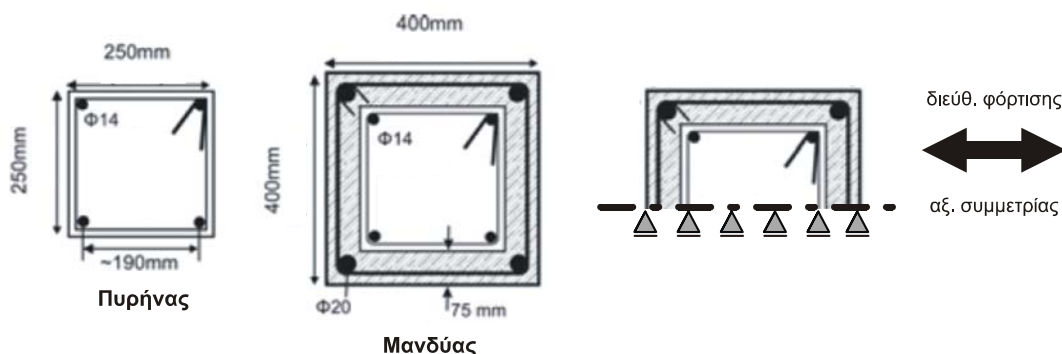


**Σχήμα 2.1.1** Το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος ATENA για ανάλυση σε τρεις διαστάσεις.

Για την προσομοίωση των κατακόρυφων στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ χρησιμοποιήθηκαν οκτάκομβα ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία για το σκυροδέμα (solid elements) και δίκκομβα γραμμικά στοιχεία ράβδου (truss elements) για τους οπλισμούς, τα οποία είναι εμφυτευμένα (embedded) στα στερεά στοιχεία σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό, η τοπολογία των οπλισμών είναι ανεξάρτητη από αυτήν των στοιχείων σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανένας περιορισμός όσον αφορά τη μορφή του αντίστοιχου καννάβου διακριτοποίησης. Για το σκυροδέμα χρησιμοποιήθηκε ένας σύνθετος καταστατικός νόμος θραύσης-πλαστικότητας ενώ για τους οπλισμούς ένας μονοαξονικός ανακυκλιζόμενος νόμος Menegotto-Pinto (βλ. Π.Ε. 1.3). Λόγω συμμετρίας, προσομοιώθηκε το  $\frac{1}{2}$  του πραγματικού ενισχυμένου υποστυλώματος, τοποθετώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες και η φόρτιση είχε τη μορφή συνδυασμού κατακόρυφης αξονικής δύναμης και οριζόντιας καταναγκασμένης μετακίνησης. Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας προσομοίωσης περιγράφονται στις παρακάτω υπό-ενότητες με πιλότο ένα πραγματικό πειραματικό δοκίμιο υποστυλώματος Ο/Σ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ (Q-RC, Bousias et al., 2007), ωστόσο είναι εφαρμόσιμες εν γένει, στην εν λόγω κατηγορία δομικών στοιχείων.

### 2.1.2.1 Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες

Για την προσομοίωση της γεωμετρίας του ενισχυμένου στοιχείου γίνεται εκμετάλλευση της διπλής συμμετρίας της διατομής, η οποία σε συνδυασμό με τη δεδομένη διεύθυνση φόρτισης (μονοαξονική) δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης του μισού δομικού στοιχείου, με επιβολή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, ήτοι τη δέσμευση των μετακινήσεων κάθετα στον άξονα συμμετρίας. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος, ή, ισοδύναμα, δίνεται η δυνατότητα περαιτέρω πύκνωσης του καννάβου διακριτοποίησης με ισοδύναμο υπολογιστικό κόστος. Στο Σχήμα 2.1.2 φαίνονται οι διαστάσεις της ενισχυμένης διατομής, ο θεωρούμενος άξονας συμμετρίας και οι επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες.



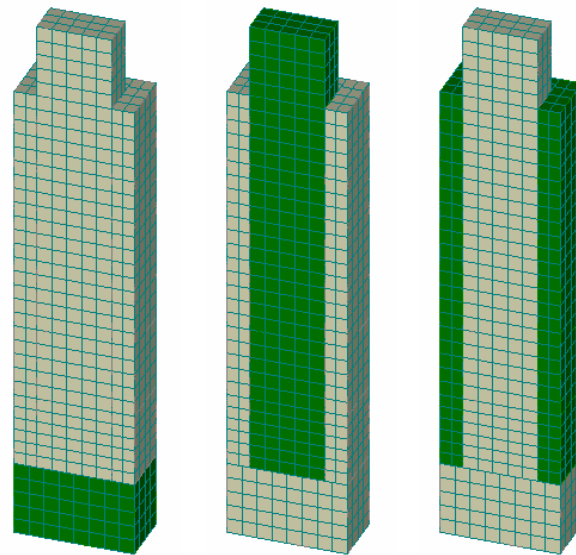
Σχήμα 2.1.2 Γεωμετρία διατομής και συνοριακές συνθήκες

Στη συνέχεια, και με βάση την πραγματική πειραματική διάταξη, προσομοιώνεται ο πυρήνας, ύψους 1.60 m, από τη στάθμη πάκτωσης έως το σημείο επιβολής του οριζόντιου φορτίου και ο περιβάλλον μανδύας με ύψος 1.35 m από τη στάθμη πάκτωσης (διακόπτεται 25 cm πριν το σημείο φόρτισης). Η προσομοίωση της πάκτωσης δε γίνεται απευθείας με δεσμεύσεις ελευθεριών κίνησης στην εν λόγω στάθμη, αλλά με ένα άκαμπτο στοιχείο ύψους 0.25 m, το οποίο δεσμεύεται στις 4 γωνίες της βάσης του. Αυτό γίνεται, στο πλαίσιο των δυνατοτήτων του παρόντος λογισμικού, για λόγους ευκολίας στην καταγραφή της συνολικής

κατακόρυφης και οριζόντιας αντίδρασης του στοιχείου, αλλά και για την προσομοίωση της πιθανής ολίσθησης των κατακόρυφων οπλισμών που λαμβάνει μερικώς χώρα και εντός της βάσης πάκτωσης. Στο Σχήμα 2.1.3 φαίνεται η προσομοίωση του υποστυλώματος για κάθε τμήμα και οι επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες. Η τυπική διάσταση του πεπερασμένου στοιχείου σκυροδέματος καθορίστηκε στα 5 cm, ώστε το υπολογιστικό κόστος να κινηθεί σε λογικά πλαίσια χωρίς έκπτωση στην ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων ή στη σταθερότητα της επίλυσης.



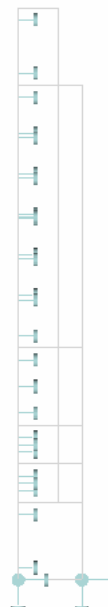
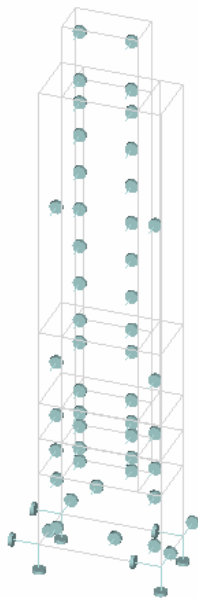
Πειραματική διάταξη



Βάση πάκτωσης

Πυρήνας

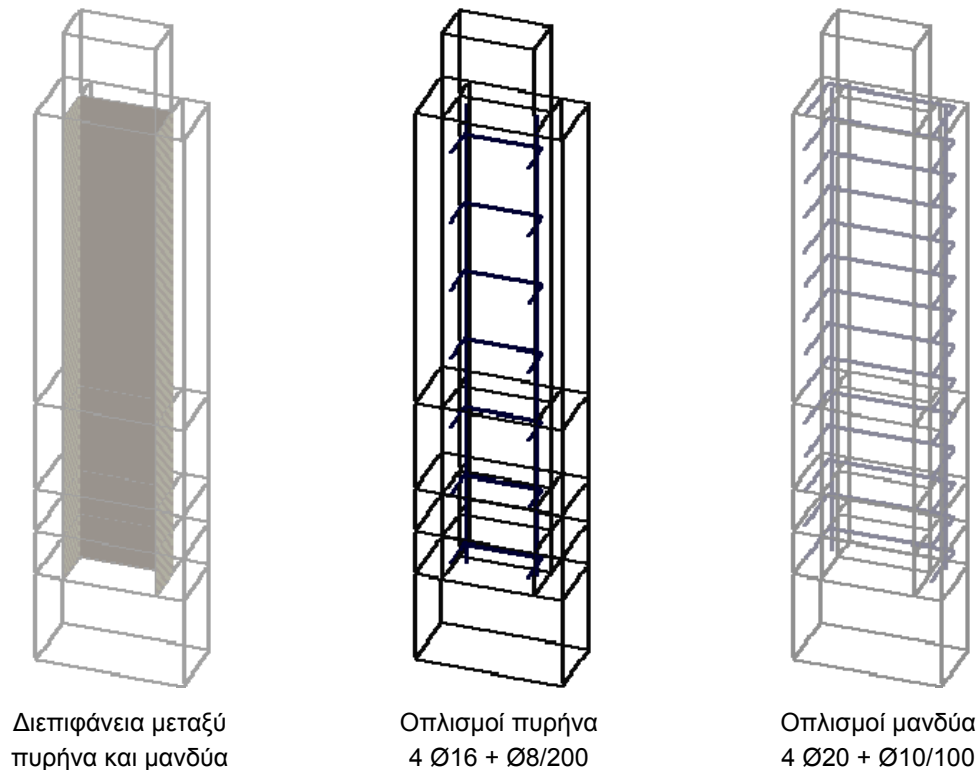
Μανδύας



Συνοριακές συνθήκες (δεσμεύσεις ελευθεριών κίνησης)

**Σχήμα 2.1.3** Πειραματική διάταξη (Bousias et al., 2007), γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.

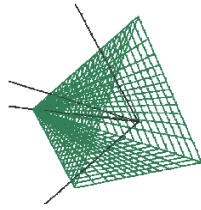
Κατά την προσομοίωση του ενισχυμένου στοιχείου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, μεταξύ των συνορευόντων επιφανειών πυρήνα και μανδύα παρεμβλήθηκαν επιφανειακά στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements), με τα οποία δύναται να προσομοιωθούν οι συνθήκες επαφής των δύο υλικών στην ορθή και στην εγκάρσια διεύθυνση, όπως θα περιγραφεί λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα. Τέλος, η προσομοίωση των κατακόρυφων και εγκάρσιων οπλισμών έγινε με γραμμικά ραβδωτά στοιχεία κατά μήκος της αξονικής γραμμής κάθε ράβδου, εμφυτευμένα στα στερεά στοιχεία σκυροδέματος (μη-κοινή τοπολογία κόμβων στοιχείων σκυροδέματος και οπλισμών). Στο σχήμα 2.1.4 φαίνεται η θέση των διεπιφανειών και των οπλισμών στο υπολογιστικό προσομοίωμα.



**Σχήμα 2.1.4** Προσομοίωση διεπιφανειών και οπλισμών

### 2.1.2.2 Καταστατικοί νόμοι

Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε ένας σύνθετος καταστατικός νόμος σκυροδέματος (Červenka et al., 1998), ο οποίος βασίζεται σε συνδυασμό των θεωριών θραύσης και πλαστικότητας, για εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο εφελκυσμός προσομοιώνεται με ένα μοντέλο κατανεμημένης ρηγμάτωσης με βάση το κριτήριο αστοχίας του Rankine και η θλίψη με έναν καταστατικό νόμο πλαστικότητας με βάση το κριτήριο αστοχίας των Menétrey & Willam (1995) και ένα μη-συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής τύπου Drucker-Prager. Λόγω της θεώρησης ζώνης ρηγμάτωσης (crack band) που περιλαμβάνει ο παραπάνω καταστατικός νόμος, απαλύνεται δραστικά η ευαισθησία της λύσης σε σχέση με την πυκνότητα του καννάβου διακριτοποίησης. Οι εξισώσεις και οι παράμετροι του σύνθετου καταστατικού νόμου σκυροδέματος παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 2.1.5.



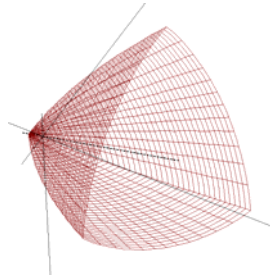
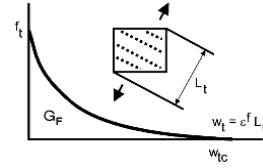
Κριτήριο αστοχίας Rankine

$$F(\rho, \xi, \theta) = \sqrt{2}\rho \cos \theta + \xi - \sqrt{3}f_t = 0$$

Παράμετροι μοντέλου θραύσης

$E_{cm}$  Μέτρο ελαστικότητας (MPa)  
 $f_{ctm}$  Εφελκυστική αντοχή (MPa)  
 $G_f$  Ενέργεια θραύσης (MN/m)

Συνάρτηση χαλάρωσης



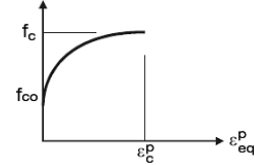
Κριτήριο αστοχίας Menétrey-Willam

$$F(\rho, \xi, \theta) = \left( \sqrt{1.5} \frac{\rho}{f_c} \right)^2 + m \left( \frac{\rho}{\sqrt{6}f_c} r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3}f_c} \right) - c = 0$$

$$m = 3 \frac{f_c^2 - (\alpha \cdot f_t)^2}{f_c \cdot \alpha \cdot f_t} \cdot \frac{e}{e+1}$$

$$r(\theta, e) = \frac{4(1-e^2)\cos^2\theta + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos\theta + (2e-1)[4(1-e^2)\cos^2\theta + 5e^2 - 4e]^{1/2}}$$

Συνάρτηση κράτησης



$$f_c = f_c(\epsilon_{eq}^p) \quad d\epsilon_{eq}^p = \min(d\epsilon_{ij}^p)$$

Συνάρτηση πλαστικής ροής

$$g = \beta \frac{I_1}{\sqrt{3}} + \sqrt{2J_2} = \beta \cdot \xi + \rho$$

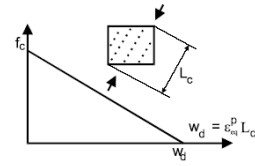
Μη-συντηρημένος νόμος πλαστικής ροής

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \frac{\partial g(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}$$

Παράμετροι νόμου πλαστικότητας

$E_{cm}$  Μέτρο ελαστικότητας (MPa)  
 $\nu$  Λόγος Poisson  
 $f_{cm}$  Θλιπτική αντοχή (MPa)  
 $f_{ctm}$  Εφελκυστική αντοχή (MPa)  
 $\epsilon_c^p$  Πλαστική παραμόρφωση στη μέγιστη αντοχή  $f_c$   
 $w_d$  Μέγιστη μετακίνηση εξασθένησης (m) = -0.0005 m  
 $e$  Εκκεντρότητα κριτηρίου αστοχίας = 0.52  
 $\beta$  Παράμετρος πλαστικής διόγκωσης = 0.00

Συνάρτηση χαλάρωσης



$$c = \left( \frac{f_c(\epsilon_{eq}^p)}{f_c} \right)^2$$

**Σχήμα 2.1.5** Εξισώσεις και παράμετροι του καταστατικού νόμου σκυροδέματος

Οι τιμές των παραμέτρων του καταστατικού νόμου σκυροδέματος για τον πυρήνα και το μανδύα υπολογίστηκαν με γνώμονα τη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που αναφέρεται στα πειραματικά δεδομένα και με βάση τις προτεινόμενες σχέσεις του EN1992 και MC90 (CEB, 1993). Για τους οπλισμούς εφαρμόστηκε ένας μονοαξονικός ανακυκλιζόμενος νόμος τύπου Menegotto-Pinto, οι παράμετροι του οποίου ομοίως ορίστηκαν σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα. Στον Πίνακα 2.1.1 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα οι τιμές των παραμέτρων των καταστατικών νόμων σκυροδέματος και χάλυβα.

**Πίνακας 2.1.1** Παράμετροι καταστατικού νόμου σκυροδέματος και χάλυβα

Σκυροδέμα	Πυρήνας	Μανδύας	
$f_{cm}$	26.3	55.3	MPa
$E_{cm}$	29404	36749	MPa
$f_{ctm}$	2.08	3.92	MPa
$\epsilon_{c1}$	$-1.93 \cdot 10^{-3}$	$-2.43 \cdot 10^{-3}$	
$\epsilon_c^p$	$-1.03 \cdot 10^{-3}$	$-9.24 \cdot 10^{-4}$	
$G_f$	$5.903 \cdot 10^{-5}$	$9.932 \cdot 10^{-5}$	MN/m

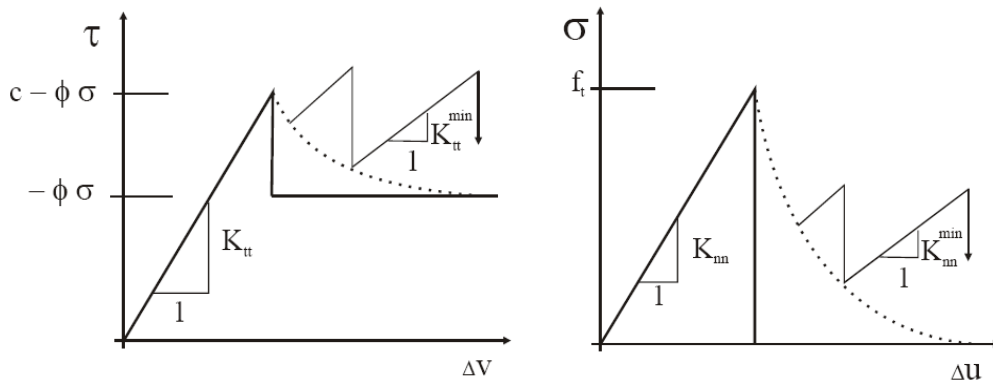
Οπλισμοί	Πυρήνας	Μανδύας	
$f_y$	313	487	MPa
$f_{yw}$	425	599	MPa
$E_s$	200	200	GPa

Όσον αφορά την άκαμπτη βάση πάκτωσης, αυτή προσομοιώθηκε με ελαστικό ισότροπο υλικό με μέτρο ελαστικότητας 1000 GPa, και μηδενικό λόγο Poisson, ώστε να μεταφέρει πρακτικά αυτούσια την εντατική κατάσταση του υπερκείμενου δομικού στοιχείου στις τέσσερις σημειακές πακτώσεις στις γωνίες της βάσης του (βλ. Σχ. 2.1.3), για λόγους απλούστερης καταγραφής των συνολικών κατακόρυφων και οριζόντιων αντιδράσεων.

Ο καταστατικός νόμος για τη διεπιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα (παλαιού και νέου σκυροδέματος) στηρίζεται στο κριτήριο Mohr-Coulomb με δυνατότητα απόσχισης σε εφελκυσμό (tension cutoff) βάσει της παρακάτω μητρικής σχέσης :

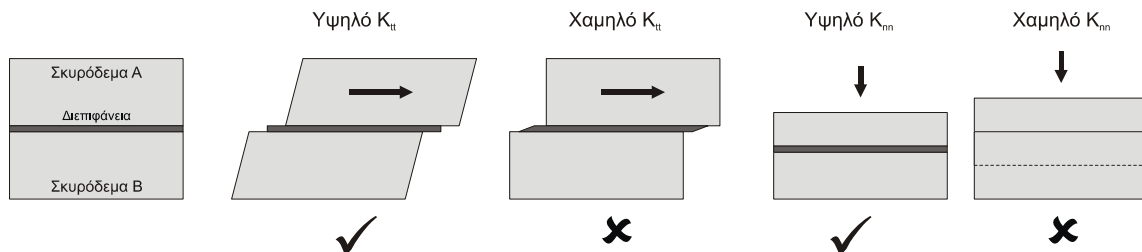
$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tt} & 0 & 0 \\ 0 & K_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta u \end{Bmatrix} \tag{2.1.1}$$

όπου  $K_{tt}$  και  $K_{nn}$  οι δυσκαμψίες κατά την εγκάρσια και ορθή διεύθυνση αντίστοιχα (παράλληλη και κάθετη στη διεπιφάνεια). Επίσης, ορίζονται οι τιμές της συνάφειας ( $c$ ), τριβής ( $\phi$ ) και αντοχής σε απόσχιση ( $f_t$ ) του καταστατικού νόμου, ώστε η συμπεριφορά στις παραπάνω δύο διευθύνσεις να ακολουθεί τα διαγράμματα τάσεων-μετακινήσεων του Σχήματος 2.1.6.



**Σχήμα 2.1.6** Συμπεριφορά διεπιφάνειας στην εγκάρσια (αριστερά) και ορθή διεύθυνση (δεξιά)

Οι δυσκαμψίες  $K_{tt}$  και  $K_{nn}$  εισάγονται στο προσομοίωμα με εν γένει υψηλές τιμές (το ιδανικό θα ήταν να είναι άπειρες), ώστε η διεπιφάνεια, ως ιδεατό επιφανειακό στοιχείο σύνδεσης όγκων σκυροδέματος σε επαφή, να είναι άκαμπτη σε σχέση με τους συνδεόμενους αυτούς όγκους (π.χ. 1000 φορές υψηλότερη). Έχει παρατηρηθεί ωστόσο, ότι υπερβολικά υψηλές τιμές δυσκαμψιών είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε αριθμητικές αστάθειες, ενώ μικρές τιμές δεν είναι σε θέση να αναπαραστήσουν επαρκώς το φυσικό φαινόμενο (Σχ. 2.1.7).



**Σχήμα 2.1.7** Απαιτήση υψηλών εγκάρσιων και ορθών δυσκαμψιών στα στοιχεία διεπιφάνειας

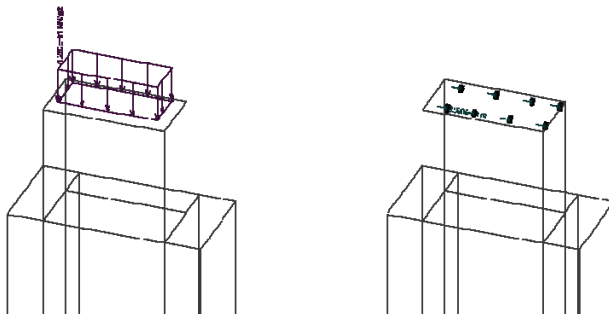


Εκτός από τις τιμές δυσκαμψιών  $K_{tt}$  και  $K_{nn}$ , οι οποίες, μετά από διερευνητικές δοκιμές ευαισθησίας, εισήχθησαν στο προσομοίωμα ίσες με  $2 \cdot 10^7 \text{ MN/m}^3$ , απαιτούνται και δύο αντίστοιχες τιμές ελάχιστων δυσκαμψιών  $K_{tt,min}$  και  $K_{nn,min}$ , ώστε το καθολικό μητρώο δυσκαμψίας να είναι πάντοτε θετικά ορισμένο. Θεωρητικά, μετά την αστοχία της διεπιφάνειας (είτε σε εφελκυσμό, είτε σε διάτμηση), η αντίστοιχη δυσκαμψία της πρέπει μηδενίζεται, κάτι τέτοιο όμως θα δημιουργούσε απροσδιοριστία του καθολικού μητρώου δυσκαμψίας. Για το λόγο αυτό οι παραπάνω ελάχιστες τιμές, μετά από διερευνητικές δοκιμές ευαισθησίας, ορίζονται ως το 1 ‰ των δυσκαμψιών της διεπιφάνειας, ήτοι  $2 \cdot 10^4 \text{ MN/m}^3$ .

Οι δύο ακραίες καταστάσεις (άνω και κάτω όριο) που αφορούν τη συνεργασία μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος, είναι : η θεώρηση πλήρους συνεργασίας (μονολιθικότητα), η οποία μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας υψηλές τιμές συνάφειας ( $c$ ) και αντοχής σε απόσχιση ( $f_t$ ) στη διεπιφάνεια και η θεώρηση μηδενικής συνεργασίας (ελεύθερη ολίσθηση), θέτοντας μηδενικές τιμές σε συνάφεια, αντοχή σε απόσχιση και συντελεστή τριβής ( $\varphi$ ). Ενδιάμεσες τριάδες παραμέτρων ( $c$ ,  $\varphi$ ,  $f_t$ ), με κατάλληλη βαθμονόμηση μπορούν να προσομοιώσουν τις πραγματικές συνθήκες συνεργασίας μεταξύ πυρήνα και μανδύα. Υπάρχει επιπλέον και η δυνατότητα μεταβολής των παραπάνω χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας ανάλογα με τη μετακίνηση ( $\Delta v$  ή  $\Delta u$ ).

### 2.1.2.3 Φόρτιση

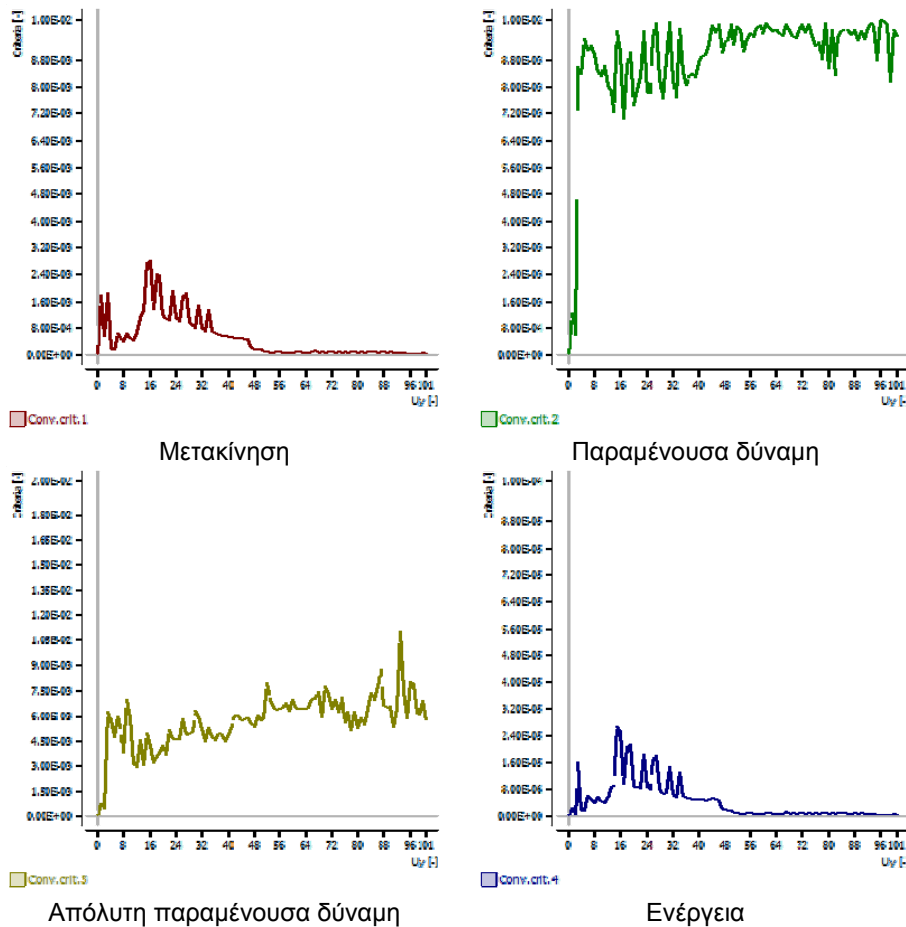
Σύμφωνα με την πειραματική διάταξη, η φόρτιση του ενισχυμένου υποστυλώματος γίνεται σε δύο φάσεις : αρχικά επιβάλλεται κατακόρυφο αξονικό φορτίο 800 kN μέσω υδραυλικού εμβόλου, το οποίο διατηρείται σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, και στη συνέχεια οριζόντιο φορτίο ελεγχόμενο από τις μετακινήσεις (displacement controlled) με το οποίο επιβάλλεται μονότονη ή ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση. Στο προσομοίωμα, κατ' αναλογία, το αξονικό φορτίο επιβάλλεται στην κεφαλή του πυρήνα (σε ύψος 1.60 m από τη στάθμη πάκτωσης) στο πρώτο βήμα φόρτισης με μορφή δύναμης (force) και μέγεθος  $12.8 \text{ MN/m}^2$  και στη συνέχεια στην ίδια θέση επιβάλλονται διαδοχικά βήματα οριζόντιας καταναγκασμένης μετακίνησης (prescribed displacement), μεγέθους  $8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  έκαστο, το οποίο αντιστοιχεί σε σχετική μετατόπιση (drift) ίση με 0.5 ‰. Στο σχήμα 2.1.8 παρουσιάζονται οι δύο φορτιστικές καταστάσεις του στοιχείου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το τμήμα του πυρήνα που εξέχει του μανδύα (ύψους 25 cm) θεωρήθηκε ότι αποτελείται από ισοδύναμο ελαστικό υλικό, του αυτού μέτρου ελαστικότητας πυρήνα ( $E_c = 29404 \text{ MPa}$ ), έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή τοπική αριθμητική αστοχία στην περιοχή εφαρμογής του συγκεντρωμένου αξονικού και σεισμικού φορτίου, γεγονός που προφανώς θα οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα.



**Σχήμα 2.1.8** Φορτιστικές καταστάσεις : κεντρική θλίψη (αριστερά) και σεισμική φόρτιση (δεξιά)

**2.1.2.4 Διαδικασία επίλυσης**

Για την επίλυση του μη-γραμμικού προβλήματος, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος επίλυσης Newton-Raphson (+Line Searches), ο οποίος σε συνδυασμό με τη μορφή της επιβαλλόμενης φόρτισης (καταναγκασμένες μετακινήσεις), μπορεί να αποτυπώσει την απόκριση του δομικού στοιχείου ακόμα και μετά το σημείο επίτευξης της μέγιστης αντοχής (φθίνων κλάδος). Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκε και η δυνατότητα γεωμετρικής μη-γραμμικότητας (φαινόμενα 2ας τάξεως), που πιθανώς συνεισφέρει σε περιοχές μεγάλων μετακινήσεων. Ορίστηκαν επίσης τα κατάλληλα σημεία καταγραφής των αποτελεσμάτων, όπως η οριζόντια μετακίνηση κεφαλής και οι κατακόρυφες/οριζόντιες αντιδράσεις στα 4 σημεία πάκτωσης της άκαμπτης βάσης του προσομοιώματος, ώστε να προκύψει η επιθυμητή καμπύλη αντίστασης του στοιχείου, για λόγους σύγκρισης με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Η επίλυση του προσομοιώματος για μονότονη φόρτιση (τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα) έδειξε άριστη αριθμητική σταθερότητα της λύσης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα τιμών κριτηρίων σύγκλισης ανά φορτιστικό βήμα του Σχήματος 2.1.9 (άνω αποδεκτό όριο είναι η μέγιστη τιμή του κατακόρυφου άξονα). Στο γεγονός αυτό εκτιμάται ότι συνέβαλε αποφασιστικά η στατική ευστάθεια του προσομοιώματος (εκμετάλλευση συμμετρίας, κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, τμήματα με ελαστική απόκριση) και η ορθή βαθμονόμηση των υλικών σκυροδέματος, χάλυβα και - ιδιαίτερα - της διεπιφάνειας.



**Σχήμα 2.1.9** Τιμές κριτηρίων σύγκλισης κατά την πορεία επίλυσης του μη-γραμμικού προβλήματος

## **Πακέτο Εργασίας 2.2 (Προσομοίωση πειραματικών δοκιμών και συγκρίσεις)**

### **2.2.1 Γενικά**

Στο παρόν πακέτο εργασίας παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ενισχυμένων στοιχείων Ο/Σ με μανδύες Ο/Σ, με τη μέθοδο των μη-γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο, σύμφωνα με τη γενική μεθοδολογία προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο Π.Ε. 2.1.

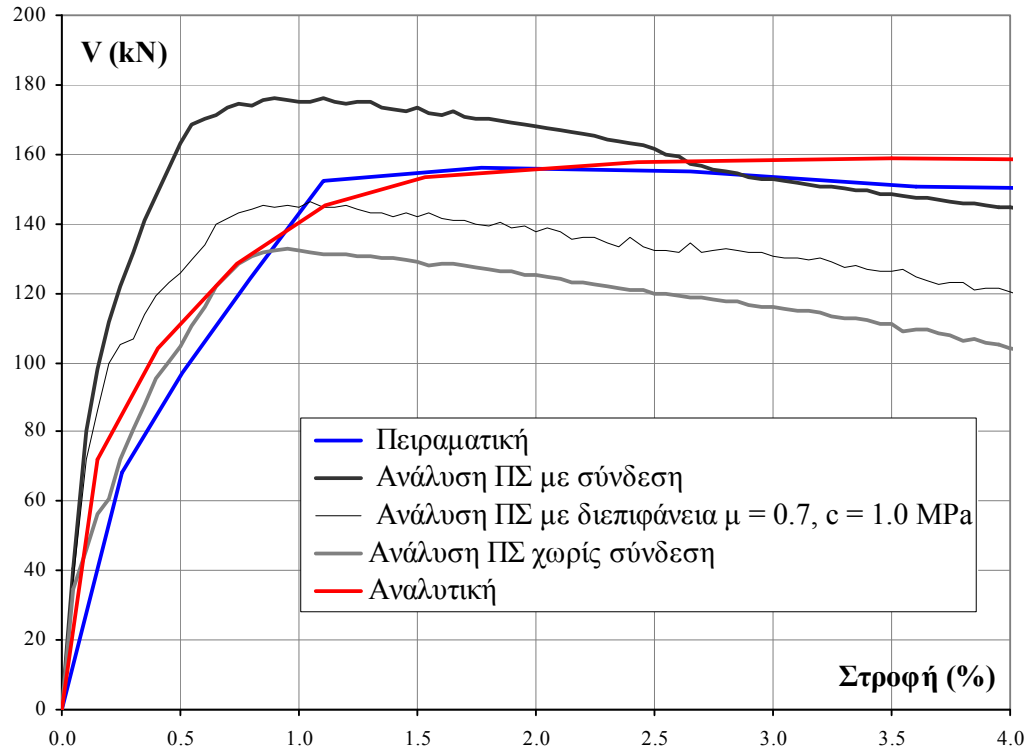
### **2.2.2 Πιλοτικό προσομοίωμα δοκιμίου Q-RC (Bousias et al., 2007b)**

Το προσομοίωμα του δοκιμίου Q-RC (Bousias et al. 2007b), το οποίο περιγράφηκε λεπτομερώς στο Π.Ε. 2.1, επιλύθηκε για μονότονη φόρτιση έως σχετική μετατόπιση κορυφής 5% (100 φορτιστικά βήματα, 0.5 % έκαστο). Οι συνθήκες διεπιφάνειας που εξετάστηκαν ήταν οι δύο ακραίες καταστάσεις της πλήρους (μονολιθικής) και μηδενικής συνεργασίας μεταξύ πυρήνα και μανδύα (άνω και κάτω όριο αντίστοιχα) καθώς και η πραγματική κατάσταση, με υιοθετούμενες παραμέτρους (CEB 1983, Lampropoulos & Dritsos 2011b) :

- συντελεστής τριβής (friction)  $\mu = 0.7$
- συνάφεια (adhesion)  $c = 1.0 \text{ MPa}$
- αντοχή σε απόσχιση  $f_t = 0$

οι οποίες αντιστοιχούν σε συνθήκες διεπιφάνειας χωρίς διαδικασία εκτράχυνσης ή τοποθέτησης πρόσθετων βλήτρων (no treatment, δοκίμιο Q-RC).

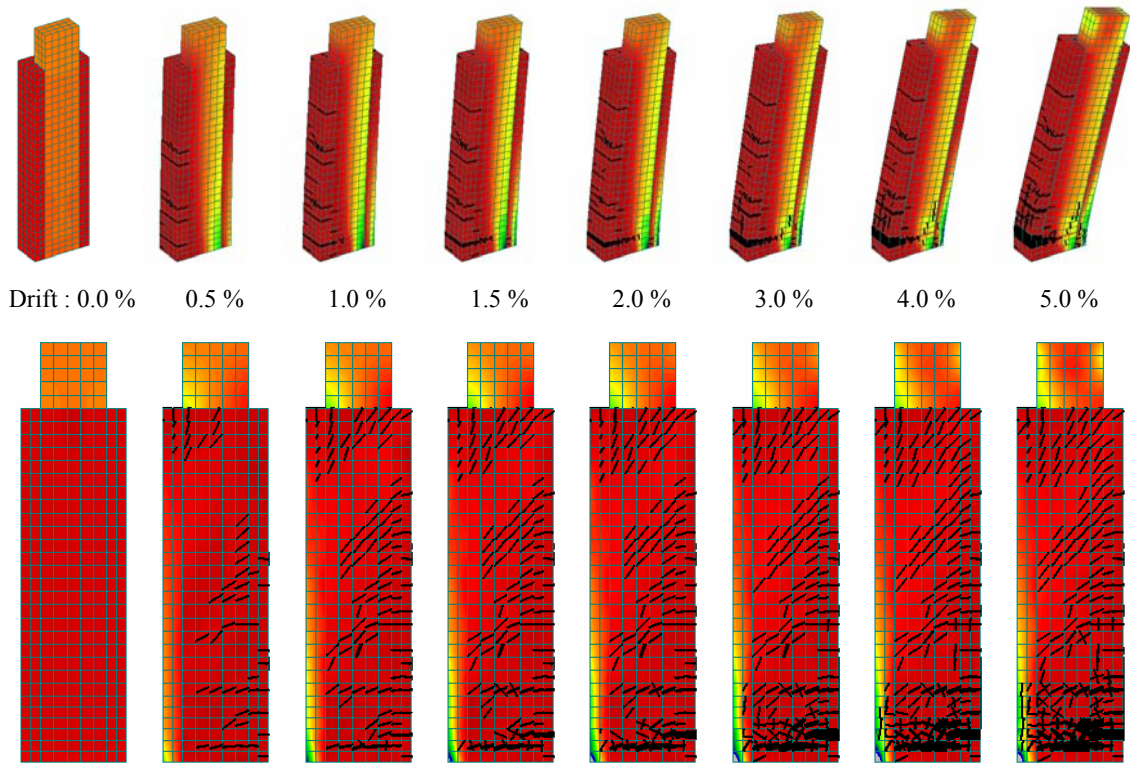
Στόχος ήταν η σύγκριση των διαφόρων καμπυλών απόκρισης με την περιβάλλουσα της πειραματικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Στο Σχήμα 2.2.1 φαίνεται το συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών αντίστασης μεταξύ αναλυτικού προσομοιώματος (βλ. Π.Ε. 1), υπολογιστικού προσομοιώματος («Ανάλυση ΠΣ») με τις τρεις ανωτέρω παραδοχές, και πειραματικού δοκιμίου (περιβάλλουσα κύκλων φόρτισης). Στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες ανάλυσης ΠΣ που εκπροσωπούν το άνω και κάτω όριο συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, περιβάλλουν ικανοποιητικά την πραγματική πειραματική απόκριση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ιδιαίτερα μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου στοιχείου. Παρατηρείται επίσης ότι για μικρές οριζόντιες μετακινήσεις (όπου η συμπεριφορά του δοκιμίου δεν αποκλίνει σημαντικά από την ελαστική) η πειραματική καμπύλη προσεγγίζεται καλύτερα από την ανάλυση με θεώρηση ελεύθερης ολίσθησης, ενώ, σε μεγαλύτερες μετακινήσεις, από τη θεώρηση της μονολιθικής συμπεριφοράς. Όσον αφορά την ανάλυση ΠΣ με τις πραγματικές συνθήκες τριβής και συνάφειας στη διεπιφάνεια, αυτή βρίσκεται στο ενδιάμεσο μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων καταστάσεων και προσεγγίζει ικανοποιητικά την περιβάλλουσα της πειραματικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Όλες οι αναλυτικές προβλέψεις υπερεκτιμούν την αρχική δυσκαμψία του πειραματικού δοκιμίου.



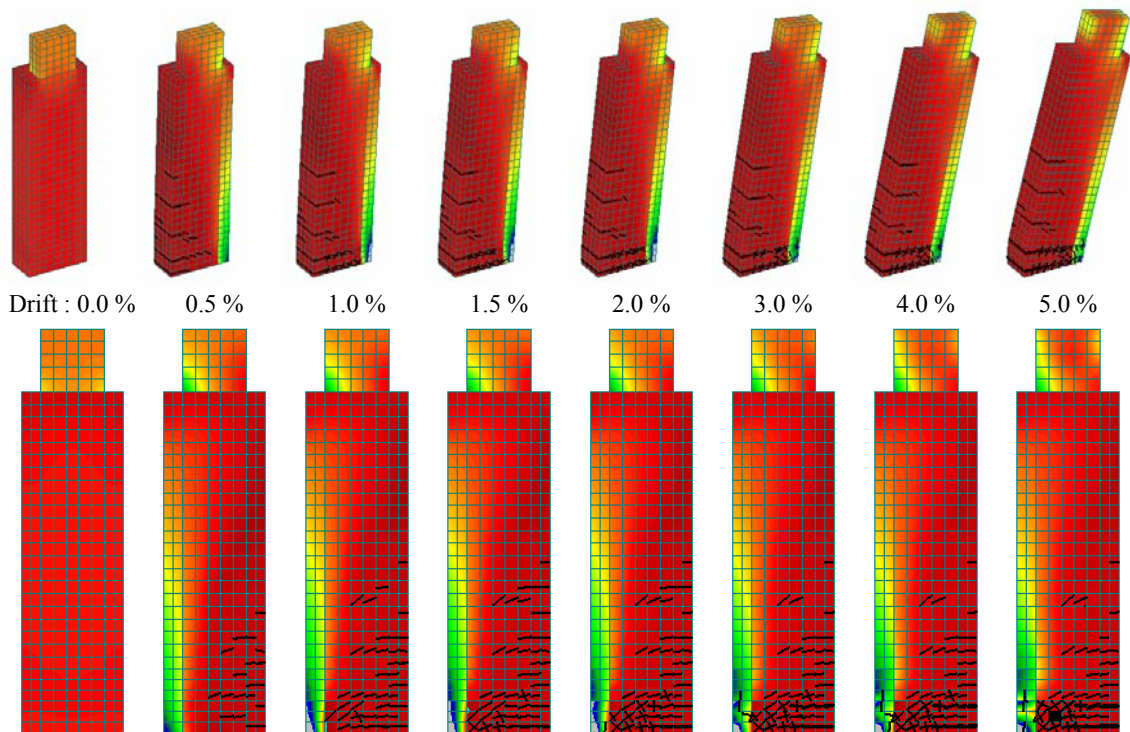
**Σχήμα 2.2.1** Σύγκριση καμπυλών αντίστασης μεταξύ αναλυτικού, υπολογιστικού προσομοιώματος και πειραματικού δοκιμίου

Εφόσον η πειραματικώς εκτιμώμενη αρχική δυσκαμψία του δοκιμίου οφείλεται σε χαρακτηριστικά της πραγματικής συμπεριφοράς του και όχι σε τυχόν αδυναμίες της πειραματικής διαδικασίας, θα ήταν σκόπιμη η περαιτέρω βελτίωση της εικόνας απόκρισης των αναλυτικών προσομοιωμάτων, ιδιαίτερα όσον αφορά την παρατηρούμενη μειωμένη αρχική δυσκαμψία του πειραματικού δοκιμίου. Στην κατεύθυνση αυτή θα ήταν σκόπιμο να συμπεριληφθεί το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης κατά τη σκυροδέτηση του μανδύα (Lampropoulos & Dritsos, 2011a) και ενδεχομένως η πιθανή ολίσθηση των διαμήκων ράβδων (ιδιαίτερα του πυρήνα, οι οποίες καταπονούνται εντονότερα) που πάντως δεν επηρεάζει την αρχική κλίση του διαγράμματος.

Στα Σχήματα 2.2.2 και 2.2.3 φαίνονται οι εικόνες παραμόρφωσης των δύο προσομοιωμάτων που αντιστοιχούν στις ακραίες καταστάσεις μονολιθικής σύνδεσης και ελεύθερης ολίσθησης (εμφανίζεται η όψη της επιφάνειας συμμετρίας), για προοδευτική αύξηση της οριζόντιας σχετικής μετακίνησης (drift). Στις παραπάνω εικόνες περιλαμβάνονται με μαύρο χρώμα οι αντίστοιχες ρηγματώσεις (εύρους  $> 10^{-4}$  m) και οι κατακόρυφες τάσεις ( $\sigma_{zz}$ ) σε χρωματική κλίμακα. Τέλος, συμπεριλήφθησαν και οι εξωτερικές όψεις του πυρήνα, όπως είναι ορατές στην αντίστοιχη πειραματική δοκιμή.



**Σχήμα 2.2.2** Πορεία παραμόρφωσης και ρηγμάτωσης του στοιχείου με μηδενική συνεργασία πυρήνα-μανδύα (ελεύθερη ολίσθηση)



**Σχήμα 2.2.3** Πορεία παραμόρφωσης και ρηγμάτωσης του στοιχείου με πλήρη συνεργασία πυρήνα-μανδύα (μονολιθική συμπεριφορά)

Στα Σχήματα 2.2.2 και 2.2.3 διαπιστώνεται η ορθότητα στην προσομοίωση των συνθηκών που διέπουν τις διεπιφάνειες και στις δύο περιπτώσεις: στην περίπτωση απουσίας συνεργασίας πυρήνα και μανδύα είναι εμφανής μια διπλή θλιβόμενη ζώνη, ξεχωριστά σε πυρήνα και μανδύα, καθώς και η ελεύθερη ολίσθηση μεταξύ παλαιού και νέου στοιχείου, ιδιαίτερα στην περιοχή της κεφαλής του πυρήνα. Στην περίπτωση πλήρους συνεργασίας, το ενισχυμένο δομικό στοιχείο συμπεριφέρεται αμιγώς μονολιθικά, γεγονός που εκδηλώνεται με ενιαία θλιβόμενη ζώνη και απουσία ολίσθησης μεταξύ πυρήνα και μανδύα.

Όσον αφορά τη ρηγματώση του στοιχείου για αυξανόμενες οριζόντιες μετακινήσεις, αυτή παρατηρείται ότι είναι συγκεντρωμένη στη βάση του υποστυλώματος (πλαστική άρθρωση), με το φαινόμενο να είναι εντονότερο στην περίπτωση ελεύθερης ολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή, η ρηγματώση εκτείνεται σε μεγαλύτερο ύψος και με μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ ρωγμών καθ' ύψος του στοιχείου. Από τις παραπάνω εικόνες εκτιμάται ότι οι αποστάσεις μεταξύ κυρίων ρωγμών κυμαίνονται μεταξύ 20 και 35 cm, ενώ το υπολογιστικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στα Π.Ε. 1.1-1.3, για τα ίδια γεωμετρικά στοιχεία και υλικά, προβλέπει απόσταση  $c = 32.5$  cm. Τέλος, η περιγραφή των βλαβών του στοιχείου μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής αναφέρει σοβαρή αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στη βάση, γεγονός που επιβεβαιώνει η μορφή αστοχίας που αναφέρθηκε προηγουμένως.

### **2.2.3 Βιβλιογραφία Π.Ε. 2.1 & 2.2**

- Bousias, S.N., Biskinis D., Fardis, M.N. and Spathis, A. (2007) "Strength, Stiffness, and Cyclic Deformation Capacity of Concrete Jacketed Members", ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 5, pp. 521-531.
- CEB (1983) "CEB Bulletin no. 162: assessment of concrete structures and design procedures for upgrading (redesign) ", Paris.
- CEB (1993) "CEB/FIP Model Code 1990", Bulletin d' Information CEB, 213/214, Lausanne.
- CEN (2004) "Eurocode 2 - Design of Concrete Structures", European Committee for Standardization.
- Cervenka, J., Cervenka, V. and Eligehausen, R. (1998) "Fracture-plastic material model for concrete. Application to analysis of powder actuated anchors", Proceedings FraMCoS 3, Gifu, Japan, Aedification Publishers, Freiburg, Germany, Vol. 2, pp. 1107-1116.
- Červenka, V., Jendele, L. and Červenka, J. (2011) "ATENA Program Documentation. Part 1 : Theory", Červenka Consulting, Prague, Czech Rep.
- Lampropoulos, A.P. and Dritsos, S.E. (2011a) "Concrete shrinkage effect on the behavior of RC columns under monotonic and cyclic loading", Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 4, pp. 1596–1602.
- Lampropoulos, A.P. and Dritsos, S.E. (2011b) "Modeling of RC columns strengthened with RC jackets", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, in press, DOI: 10.1002/eqe.1109.
- Menétrey, P. and Willam K.J. (1995) "Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization", ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 3, pp. 311-318.

### ΦΑΣΗ 3: Παραμετρική διερεύνηση με στόχο την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων παραμορφωσιμότητας, αντοχής και συντελεστών μονολιθικότητας

#### Πακέτο Εργασίας 3.1 (Αναλυτικές εκφράσεις για τον καθορισμό δεικτών απόκρισης)

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Οι μανδύες Ο/Σ είναι μια αρκετά διαδεδομένη τεχνική ενίσχυσης υφιστάμενων στοιχείων Ο/Σ σε όλο τον κόσμο και ιδιαίτερα στη Νότια Ευρώπη. Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός πειραματικών μελετών (44 δοκίμια έχουν καταγραφεί στην πειραματική βάση του Π.Ε. 1.2, Παραδοτέο 1), ο αριθμός μελετών που ασχολούνται με την εξαγωγή αναλυτικών προσομοιωμάτων είναι πολύ περιορισμένος (Therμου et al. 2007, Tsioulou & Dritsos 2011). Σε επίπεδο κανονισμών το θέμα της διαστασιολόγησης στοιχείων Ο/Σ, τα οποία ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ, αντιμετωπίζεται με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών μονολιθικότητας, οι οποίοι τροποποιούν τους δείκτες απόκρισης αντίστοιχων μονολιθικών διατομών.

Στόχος αυτής της ενότητας είναι να συγκεντρώσει τις αναλυτικές εκφράσεις που προτείνονται για τον καθορισμό διαφόρων δεικτών απόκρισης (αντοχής και παραμορφωσιμότητας) στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ 2011), που έχει πλέον τεθεί σε ισχύ (Ιαν. 2012), αφού προηγουμένως εναρμονίστηκε με τον Ευρωκώδικα 8–Μέρος 3 (2005). Επιπλέον, διερευνάται κατά πόσον αναλυτικές εκφράσεις από τη βιβλιογραφία, οι οποίες έχουν εξαχθεί για στοιχεία Ο/Σ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό δεικτών απόκρισης υφιστάμενων στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ. Η πειραματική βάση που συγκροτήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας (Π.Ε. 1.2, Παραδοτέο 1) μετά την επεξεργασία για τον καθορισμό των διαφόρων δεικτών απόκρισης χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση των εκφράσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία που παρουσιάστηκαν στην πρόσφατη έρευνα της Θερμού (2007).

##### 3.1.2 Δείκτες απόκρισης

Οι δείκτες απόκρισης που επιλέγονται να διερευνηθούν αναφέρονται σε όρους παραμορφωσιμότητας και αντοχής. Παρουσιάζονται εκφράσεις που αφορούν στη στροφή διαρροής, στη στροφή στο μέγιστο, καθώς και στην τέμνουσα αστοχίας.

###### (α) Δείκτες παραμορφωσιμότητας

Η συνολική στροφή διαρροής και στροφή στο μέγιστο αποτελείται από επιμέρους συνιστώσες: τη στροφή λόγω καμπτικής παραμόρφωσης ( $\theta_y^{\text{flex}}$ ,  $\theta_u^{\text{flex}}$ ), τη στροφή λόγω διατμητικής παραμόρφωσης ( $\theta_y^{\text{shear}}$ ,  $\theta_u^{\text{shear}}$ ) και τη στροφή λόγω ολίσθησης των οπλισμών ( $\theta_y^{\text{slip}}$ ,  $\theta_u^{\text{slip}}$ ):

$$\theta_y = \theta_y^{\text{flex}} + \theta_y^{\text{shear}} + \theta_y^{\text{slip}} \quad (3.1.1\alpha)$$

$$\theta_u = \theta_u^{\text{flex}} + \theta_u^{\text{shear}} + \theta_u^{\text{slip}} \quad (3.1.1\beta)$$



**Πίνακας 3.1.1:** Εκφράσεις για τη στροφή διαρροής και τη στροφή στο μέγιστο σύμφωνα με ΚΑΝΕΠΕ (2011) και Ευρωκώδικα 8–Μέρος 3 (2005).

	<p>- Απλοποιημένη έκφραση για στροφή διαρροής:</p> $\theta_{y,\text{simp}}^{\text{ΚΑΝΕΠΕ}} = \frac{1}{3} \varphi_y L_v; \theta_y^{\text{slip}} = \frac{\varphi_y L_b}{2} \text{ όπου } \varphi_y = \frac{1.77 \varepsilon_y}{h_c};$ $L_b = \frac{d_b}{4} \frac{f_y}{f_{by}}; f_{by} = 2.25 \cdot f_{\text{ctk},0.05} \text{ (EC8-Μέρος 1 2004)}$ $\theta_{y,\text{simp,tot}}^{\text{ΚΑΝΕΠΕ}} = \theta_{y,\text{simp}}^{\text{ΚΑΝΕΠΕ}} + \theta_y^{\text{slip}}$
ΚΑΝΕΠΕ (2011)	<p>- Ημι-εμπειρικές εκφράσεις για στροφή διαρροής και αστοχίας:</p> $\theta_y^{\text{ΚΑΝΕΠΕ}} = \varphi_y \frac{L_v + \alpha_v}{3} + 0.0014 \left( 1 + 1.5 \cdot \frac{h}{L_v} \right) + \varphi_y \frac{d_b f_y}{8 \sqrt{f_c}}$ $\theta_u^{\text{ΚΑΝΕΠΕ}} = 0.016 (0.3^v) \left[ \frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left( \frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left( \alpha_{\text{psx}} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d})$
Ευρωκώδικας 8 (2005)	<p>- Ημι-εμπειρικές εκφράσεις για στροφή διαρροής και αστοχίας*:</p> $\theta_y^{\text{EC8}} = \varphi_y \frac{L_v + \alpha_v}{3} + 0.0013 \left( 1 + 1.5 \cdot \frac{h}{L_v} \right) + 0.13 \varphi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$ $\theta_u^{\text{EC8}} = 0.016 (0.3^v) \left[ \frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left( \frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left( \alpha_{\text{psx}} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d})$
	<p>* Οι εκφράσεις είναι ίδιες με αυτές του ΚΑΝΕΠΕ (2011) με μια μικρή διαφοροποίηση ως προς το συντελεστή "0.0014"</p>

**Συμβολισμοί:**  $\varphi_y$ : καμπυλότητα διαρροής,  $L_v$ : μήκος διατμητικού ανοίγματος,  $L_b$ : βασικό μήκος αγκύρωσης,  $\varepsilon_y$ : παραμόρφωση διαρροής εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού,  $d_b$ : διάμετρος διαμήκους οπλισμού,  $f_y$ : αντοχή διαρροής χάλυβα,  $f_{by}$ : τάση συνάφειας στη διαρροή,  $f_{\text{ctk},0.05}$ : εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος,  $\alpha_v$ : συντελεστής που ισούται με 1 εάν η τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή και με 0 αν είναι μεγαλύτερη,  $h$ : το ύψος της διατομής του στοιχείου,  $f_c$ : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $v$ : το ανηγμένο αξονικό φορτίο,  $\omega$ ,  $\omega'$ : μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού (ο ενδιάμεσος διαμήκης οπλισμός μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος θεωρείται ως εφελκόμενος),  $\rho_s$ : το γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη δ/νση της φόρτισης,  $\rho_s$ : το γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη δ/νση της φόρτισης,  $f_{yw}$ : αντοχή διαρροής εγκάρσιου οπλισμού.

Η συνεισφορά των στροφών λόγω διατμητικής παραμόρφωσης δεν θεωρείται σημαντική δεδομένου ότι εδώ εξετάζονται κυρίως καμπτόμενα στοιχεία.

Στον Πίνακα 3.1.1 παρουσιάζονται οι εκφράσεις για τη στροφή διαρροής και τη στροφή στο μέγιστο σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011) και του Ευρωκώδικα 8–Μέρος 3 (2005). Οι ημι-εμπειρικές εκφράσεις και των δυο κανονισμών ταυτίζονται με μια μικρή διαφοροποίηση στον συντελεστή που πολλαπλασιάζει τον όρο της στροφής λόγω διατμητικής παραμόρφωσης (στον ΚΑΝΕΠΕ (2011) είναι 0.0014, ενώ στον EC8–Μέρος 3 (2004) είναι 0.0013). Επιπλέον, στο κείμενο του ΚΑΝΕΠΕ (2011) συνηθίζεται μια απλοποιημένη έκφραση για τον προσδιορισμό της στροφής καμπυλότητας,  $\varphi_y$  (Πίνακας 3.1.1). Κάνοντας χρήση του μοντέλου του προβόλου εξάγεται η απλοποιημένη έκφραση για τη στροφή διαρροής,  $\theta_{y,\text{simp,tot}}^{\text{ΚΑΝΕΠΕ}}$ , η οποία λαμβάνει υπόψη τη στροφή διαρροής λόγω



καμπτικής παραμόρφωσης του στοιχείου,  $\theta_{y,simp}^{KANEPPE}$ , καθώς και την στροφή λόγω ολίσθησης των οπλισμών,  $\theta_y^{slip}$  (βλ. Πίνακα 3.1.1 – “Απλοποιημένη έκφραση για στροφή διαρροής”).

Οι εκφράσεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011) και του Ευρωκώδικα 8-Μέρος 3 (2005) (Πίνακας 3.1.1) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ κάνοντας χρήση κατάλληλων συντελεστών μονολιθικότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1.2, εφόσον ισχύουν οι ακόλουθες απλουστευτικές υποθέσεις:

- 1) υπάρχει πλήρης σύνδεση μεταξύ μανδύα και υφιστάμενου στοιχείου, ώστε το στοιχείο να συμπεριφέρεται μονολιθικά,
- 2) το αξονικό φορτίο ασκείται στην ενισχυμένη διατομή,
- 3) οι ιδιότητες του σκυροδέματος του μανδύα εφαρμόζονται σε όλη τη διατομή.

Οι προτεινόμενοι συντελεστές μονολιθικότητας σχετίζονται με τον προσδιορισμό της τέμνουσας αστοχίας ( $K_V$ ), της ροπής διαρροής του στοιχείου ( $K_{My}$ ), της δυσκαμψίας ( $K_k$ ), και των στροφών διαρροής ( $K_{\theta y}$ ) και μέγιστης στροφής ( $K_{\theta u}$ ).

**Πίνακας 3.1.2:** Προτεινόμενες τιμές συντελεστών μονολιθικότητας σύμφωνα με ΚΑΝΕΠΕ (2011) και EC8-Μέρος 3 (2005)

$K_i$	$K_V$	$K_{My}$	$K_k$	$K_{\theta y}$	$K_{\theta u}$
EC8-Μέρος 3 (2005)	0.90	1.00	-	1.05* ή 1.20**	1.00
ΚΑΝΕΠΕ (2011)	0.90 <sup>#</sup>	-	0.80 <sup>#</sup>	1.25 <sup>#</sup>	0.80 <sup>#</sup>

\*Εκτράχυνση, \*\*Υπόλοιπα μέτρα ή καθόλου μέτρα, <sup>#</sup> Εκτράχυνση και μέσα σύνδεσης

Οι εκφράσεις που επιλέχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι αυτές των Priestley et al. (1996, 2007). Η επιλογή έγινε τόσο με κριτήριο την απλότητα των εκφράσεων, όσο και την αξιοπιστία τους στην περίπτωση πρισματικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, παρουσιάζεται το μηχανικό μοντέλο προβόλου (*fib* Bulletin 24, 2003). Η παρουσίαση των εκφράσεων γίνεται στον Πίνακα 3.1.3.

### (β) Δείκτες αντοχής

Η διατμητική αντοχή,  $V_R$ , ενός δομικού στοιχείου σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ (2011) και τον EC8-Μέρος 3 (2005) υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης:

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \frac{h-x}{2L_s} \min(N; 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(5, \mu_0^{pl})) \cdot \quad (3.1.2\alpha)$$

$$\cdot \left[ 0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) (1 - 0.16 \min(5; \alpha_s)) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right]$$

$$V_w = \rho_w b_w z f_{yw} \quad (3.1.2\beta)$$

όπου  $\gamma_{el}$  είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη αν πρόκειται για πρωτεύοντα (=1.15) ή δευτερεύοντα δομικά στοιχεία,  $h$  είναι το ύψος της διατομής,  $x$  είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης,  $N$  το αξονικό φορτίο (θετικό για θλίψη, μηδενικό για εφελκυσμό),  $A_c$  το εμβαδόν της διατομής σκυροδέματος,  $f_c$  η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος,  $\rho_{tot}$  το συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού,  $\alpha_s$  ο λόγος διάτμησης ( $L_v/h$ , όπου  $L_v$  το άνοιγμα διάτμησης),  $V_w$  η

συμβολή του εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή,  $\rho_w$  το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού,  $z$  ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων, και  $f_{yw}$  η αντοχή διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού. Ο όρος  $\mu_{\theta}^{pl}(=\mu_{\theta}-1)$  εκφράζει το πλαστικό τμήμα του δείκτη πλαστιμότητας στροφών και χρησιμοποιείται στην έκφραση της διατμητικής αντοχής προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μείωση της διατμητικής αντοχής του στοιχείου λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης (η μείωση είναι ανάλογη προς το μέγεθος του πλαστικού τμήματος της γωνίας στροφής χορδής στη διατομή της μέγιστης ροπής).

Σημειώνεται ότι στην έκφραση όπως αναγράφεται στο Κεφάλαιο 7, Παράρτημα 7Γ του ΚΑΝΕΠΕ (2011) δεν υπάρχει ο όρος  $\gamma_{el}$ .

**Πίνακας 3.1.3:** Εκφράσεις από τη βιβλιογραφία για τους δείκτες παραμορφωσιμότητας στη διαρροή και στο μέγιστο

Αναφορά	Δείκτες παραμορφωσιμότητας στη διαρροή και στο μέγιστο
Priestley, Seible & Calvi (1996)	- Απλοποιημένη έκφραση για στροφή διαρροής: $\theta_y^{PSC(1996)} = \frac{1}{3} \varphi_y L_V; \varphi_y = \frac{2.14 \varepsilon_y}{h} \pm 10\%$
	- Στροφή διαρροής: $\theta_y^{PCK(2007)} = \frac{\varphi_y (L_V + L_{SP})}{3L_V}; L_{SP} = 0.022 f_y d_b; \varphi_y = \frac{2.14 \varepsilon_y}{h} \pm 10\%$
Priestley, Calvi & Kowalsky (2007)	- Στροφή αστοχίας: $\theta_u^{PCK(2007)} = \theta_y^{PCK(2007)} + (\varphi_u - \varphi_y) L_p; L_p = k L_V + L_{SP} \geq 2L_{SP};$ $k = 0.2 \left( \frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \leq 0.08$
	- Απλοποιημένη έκφραση για στροφή διαρροής: $\theta_y^{flex} = \frac{\varphi_y L_V}{3}; \theta_y^{slip} = \frac{\varepsilon_y L_{b,y}}{2} \cdot \frac{1}{z} \text{ όπου } \varphi_y = \frac{2.14 \varepsilon_y}{h_c}; L_{b,y} = \frac{d_b f_y}{4 f_{by}};$ $f_{by} = 2.25 \cdot f_{ctk,0.05} \text{ (EC8-Μέρος I 2004)}$ $\theta_{y,tot}^{mech} = \theta_y^{flex} + \theta_y^{slip}$
Μηχανικό μοντέλου προβόλου (fib Bulletin 24 2003)	- Αναλυτική έκφραση για στροφή αστοχίας: $\theta_p^{flex} = (\varphi_u - \varphi_y)_p; \theta_p^{slip} = (\varphi_u - \varphi_y) \frac{(f_u - f_y)}{f_u} L_b; L_{b,u} = \frac{d_b f_u}{4 f_{bu}}; f_{bu} = 0.80 f_{by}$ $\theta_{u,tot}^{mech} = \theta_y^{flex} + \theta_p^{flex} + \theta_y^{slip} + \theta_p^{slip}$

Συμβολισμοί:  $\varphi_y$ : καμπυλότητα διαρροής,  $L_V$ : μήκος διατμητικού ανοίγματος,  $L_{SP}$ : το μήκος διείσδυσης εφελκυστικών παραμορφώσεων,  $L_b$ : βασικό μήκος αγκύρωσης,  $\varepsilon_y$ : παραμόρφωση διαρροής εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού,  $d_b$ : διάμετρος διαμήκους οπλισμού,  $f_y$ : αντοχή διαρροής χάλυβα,  $f_u$ : μέγιστη αντοχή χάλυβα,  $f_{by}$ : τάση συνάφειας στη διαρροή

**3.1.3 Αναλυτικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

**(α) Αναλυτικές εκφράσεις βάσει της πραγματικής διατομής για τον προσδιορισμό του ύψους της θλιβόμενης ζώνης και της ροπής αντοχής στη διαρροή**

Η ενισχυμένη διατομή αντιμετωπίστηκε ως μονολιθική, θεωρώντας, ότι υπάρχει πλήρης πρόσφυση στη διεπιφάνεια μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος (Σχήμα 3.1.1).

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της ενισχυμένης με μανδύα Ο/Σ. διατομής,  $c_{y,J}$ , δίνεται από τη σχέση (Θερμού 2007):

$$A_I c_{y,J}^2 + A_{II} c_{y,J} + A_{III} = 0; \quad c_{y,J} = \xi_{y,J} h_J \tag{3.1.3}$$

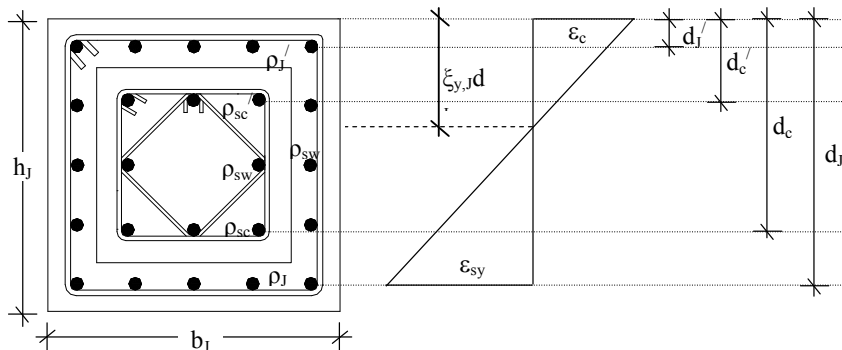
Οι παράμετροι  $A_I$ ,  $A_{II}$  και  $A_{III}$  καθορίζονται από τις σχέσεις:

$$A_I = -\frac{0.5}{\eta_c h_J} \tag{3.1.4\alpha}$$

$$A_{II} = -\rho'_{sc} - \rho_{sc} - \rho_{swc}(\delta_c - \delta'_c) - \rho'_J - \rho_J - \rho_{wJ}(\delta_J - \delta'_J) \tag{3.1.4\beta}$$

$$A_{III} = \rho'_{sc} d'_c + \rho_{sc} d_c + 0.5 \rho_{swc} (d'_c + d_c)(\delta_c - \delta'_c) + \rho'_J d'_J + \rho_J d_J + 0.5 \rho_{wJ} (d'_J + d_J)(\delta_J - \delta'_J) \tag{3.1.4\gamma}$$

όπου σύμφωνα με το Σχήμα 3.1.1,  $b_J$  και  $h_J$  είναι το πλάτος και το ύψος της διατομής μετά την τοποθέτηση του μανδύα, αντίστοιχα και  $\eta_c (= E_s/E_c)$  είναι ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας χάλυβα και σκυροδέματος. Για να μπορούν να απλοποιηθούν σημαντικά οι υπολογισμοί, τα ποσοστά των οπλισμών του πυρήνα (παλαιό στοιχείο) και του μανδύα ορίζονται ως εξής:  $\rho'_{sc} = A'_c / (b_J h_J)$ ,  $\rho_{sc} = A_c / (b_J h_J)$ ,  $\rho'_J = A'_J / (b_J h_J)$ ,  $\rho_J = A_J / (b_J h_J)$ ,  $\rho_{swc} = A_{wc} / [b_J (d_c - d'_c)]$ ,  $\rho_{wJ} = A_{wJ} / [b_J (d_J - d'_J)]$ . Επίσης, οι ανηγμένες αποστάσεις  $\delta$  ορίζονται ως εξής:  $\delta'_c = d'_c / h_J$ ,  $\delta_c = d_c / h_J$ ,  $\delta'_J = d'_J / h_J$ ,  $\delta_J = d_J / h_J$ .



**Σχήμα 3.1.1** Επεξήγηση συμβόλων ενισχυμένης διατομής.

Οι Εξισώσεις (3.1.3β) και (3.1.3γ) εφαρμόζονται στην περίπτωση όπου δεν ασκείται αξονικό φορτίο στην ενισχυμένη διατομή. Η διατομή βρίσκεται στο στάδιο της διαρροής είτε όταν διαρρέει ο εφελκόμενος οπλισμός είτε όταν η θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέ-

ματος φτάσει μια τιμή περίπου  $\varepsilon_c = 1.8f'_c/E_c$ . Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι  $A_{II}$  και  $A_{III}$  μεταβάλλονται, ως εξής:

$$\text{Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα: } A'_{II} = A_{II} - \frac{v f'_c}{\eta_c \varepsilon_{sy} E_c}, A'_{III} = A_{III} + \frac{v f'_c d_J}{\eta_c \varepsilon_{sy} E_c} \quad (3.1.5\alpha)$$

$$\text{Διαρροή λόγω θλιπτικής παραμόρφωσης: } A'_{II} = A_{II} + \frac{0.55v}{\eta_c}, A'_{III} = A_{III} \quad (3.1.5\beta)$$

όπου  $v = N/(f_c b_J h_J)$  είναι το ανηγμένο θλιπτικό αξονικό φορτίο που ασκείται στη διατομή.

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις εξαγεται η ροπή διαρροής ως συνάρτηση του ανηγμένου ύψους της θλιβόμενης ζώνης,  $\xi_{y,J}$ :

$$\frac{M_{y,J}}{E_c \xi_{y,J} b_J h_J^3} = M'_{y,C} + M'_{y,c} + M'_{y,J} \quad (3.1.6\alpha)$$

$$M'_{y,C} = 0.25\xi_{y,J}^2(1 - 0.8\xi_{y,J}) \quad (3.1.6\beta)$$

$$M'_{y,c} = \eta_c \rho'_{sc} (\delta'_c - \xi_{y,J}) (\delta'_c - 0.5) + \eta_c \rho_{sc} (\delta_c - \xi_{y,J}) (\delta_c - 0.5) + 0.5\eta_c \rho_{swc} (\delta_c + \delta'_c - 2\xi_{y,J}) (\delta_c - \delta'_c) [\xi_{y,J} - 0.5(1 + \delta'_c - \delta_c)] \quad (3.1.6\gamma)$$

$$M'_{y,J} = \eta_c \rho'_J (\delta'_J - \xi_{y,J}) (\delta'_J - 0.5) + \eta_c \rho_J (\delta_J - \xi_{y,J}) (\delta_J - 0.5) + 0.5\eta_c \rho_{wJ} (\delta_J + \delta'_J - 2\xi_{y,J}) (\delta_J - \delta'_J) [\xi_{y,J} - 0.5(1 + \delta'_J - \delta_J)] \quad (3.1.6\delta)$$

**(β) Αναλυτικές εκφράσεις βάσει της πραγματικής διατομής για τον προσδιορισμό του ύψους της θλιβόμενης ζώνης και της ροπής αντοχής στη θραύση**

Ύψος θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία

Το ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη θραύση,  $\xi_{u,J}$ , υπολογίζεται με παρεμβολή για δεδομένη τιμή αξονικού φορτίου,  $N$ , από την ακόλουθη ομάδα εξισώσεων:

$$\text{Εάν } N_{u,\min} < N < N_{u,\text{bal}}, \quad \xi_{u,J} = \delta'_J + (\xi_{u,\text{bal}} - \xi_{u,\min}) \frac{(N - N_{u,\min})}{(N_{u,\text{bal}} - N_{u,\min})} \quad (3.1.7\alpha)$$

$$\text{Εάν } N_{u,\text{bal}} < N < N_{u,\max}, \quad \xi_{u,J} = \xi_{u,\text{bal}} + (\xi_{u,\max} - \xi_{u,\text{bal}}) \frac{(N - N_{u,\text{bal}})}{(N_{u,\max} - N_{u,\text{bal}})} \quad (3.1.7\beta)$$

Οι τιμές των  $N_{u,\min}$ ,  $N_{u,\text{bal}}$ ,  $N_{u,\max}$  αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικές τιμές του ύψους της θλιβόμενης ζώνης,  $c_{u,J}$ , για  $\varepsilon_{cu} = 0.005$  και δίνονται από τις ακόλουθες ομάδες εξισώσεων:

$$(i) c_{u,J} = d'_J, \Rightarrow \xi_{u,J} = \delta'_J, \frac{N_{u,\min}}{b_J h_J f'_c} = -0.8\delta'_J + N'_{cu,\min} + N'_{Ju,\min} + N' \quad (3.1.8\alpha)$$

$$N'_{cu,\min} = \frac{N_{cu,\min}}{b_J h_J f'_c} = \frac{f_{y,c}}{f'_c} [\rho'_{sc} (1 + 3.3E_{1c} (\delta'_{cc} - 1.3)) + \rho_{sc} (1 + 3.3E_{1c} (\delta_{cc} - 1.3))] + \frac{f_{y,c}}{f'_c} \rho_{swc} (\delta_c - \delta'_c) [1 + 1.67E_{1c} (\delta_{cc} + \delta'_{cc} - 2.6)] \quad (3.1.8\beta)$$

$$N'_{Ju,\min} = \frac{N_{Ju,\min}}{b_J h_J f'_c} = \frac{f_{y,J}}{f'_c} [\rho_J (1 + 2E_{1J} (\delta_{JJ} - 1.5))] + \frac{f_{y,J}}{f'_c} \rho_{wJ} (\delta_J - \delta'_J) [1 + E_{1J} (\delta_{JJ} - 2)] \quad (3.1.8\gamma)$$

$$(ii) c_{u,J} = 0.67d_J, \Rightarrow \xi_{u,J} = 0.67\delta_J, \frac{N_{u,bal}}{b_J h_J f'_c} = -0.54\delta_J + N'_{cu,bal} + N'_{Ju,ba} + N' \quad (3.1.9\alpha)$$

$$N'_{cu,bal} = \frac{N'_{cu,bal}}{b_J h_J f'_c} = \frac{f_{y,c}}{f'_c} [-\rho'_{sc} [1 + 2.3E_{1c} (1 - 2\delta'_c)] + 3.3\rho_{sc} (1.5\delta_c - 1)] - \frac{f_{y,c}}{f'_c} \rho_{swc} (1.34\delta_J - \delta_c - \delta'_c) [1 + 2.5E_{1c} (\delta_c - \delta'_c)] \quad (3.1.9\beta)$$

$$N'_{Ju,bal} = \frac{N'_{Ju,bal}}{b_J h_J f'_c} = \frac{f_{y,J}}{f'_c} [-\rho'_J [1 + E_{1J} (1 - 3\delta'_J)] + \rho_J] - \frac{f_{y,J}}{f'_c} \rho_{wJ} (0.33\delta_J - 0.5\delta'_J) [1 + 1.5E_{1J} (\delta'_J - 1)] \quad (3.1.9\gamma)$$

$$(iii) c_{u,J} = d_J, \Rightarrow \xi_{u,J} = \delta_J, \frac{N_{u,\max}}{b_J h_J f'_c} = -0.8\delta_J + N'_{cu,\max} + N'_{Ju,\max} + N' \quad (3.1.10\alpha)$$

$$N'_{cu,\max} = \frac{N_{cu,\max}}{b_J h_J f'_c} = -\frac{f_{y,c}}{f'_c} [\rho'_{sc} [1 + 2.3E_{1c} (1 - 1.5\delta'_c)] + 3.3\rho_{sc} (1 - \delta_c)] - \frac{f_{y,c}}{f'_c} \rho_{swc} (\delta_c - \delta'_c) [1 + 1.17E_{1c} (1 - 1.5\delta'_c) - 0.5\delta_c] \quad (3.1.10\beta)$$

$$N'_{Ju,\max} = \frac{N_{Ju,\max}}{b_J h_J f'_c} = \frac{f_{y,J}}{f'_c} \rho'_J [1 + E_{1J} (1 - 2\delta'_J)] - \frac{f_{y,J}}{f'_c} \rho_{wJ} (\delta_J - \delta'_J) (1 - E_{1J} \delta'_J) \quad (3.1.10\gamma)$$

όπου  $\delta_{cc}=d_c/d'_J$ ,  $\delta_{cc}'=d_c'/d'_J$ ,  $\delta_{JJ}=d_J/d'_J$  και  $N'(=N/(f_c'b_Jh_J))$ .  $E_{1c}$ ,  $E_{1J}$  είναι τα μέτρα ελαστικότητας του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού του πυρήνα και του μανδύα, αντίστοιχα, του μετελαστικού κλάδου ( $E_{1c}=(f_{su,c}-f_{sy,c})/(\epsilon_{su,c}-\epsilon_{sy,c})$ ,  $E_{1J}=(f_{su,J}-f_{sy,J})/(\epsilon_{su,J}-\epsilon_{sy,J})$ ).

### Ροπή αντοχής στην αστοχία

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής,  $M_{u,J}$ , για δεδομένη τιμή αξονικού φορτίου,  $N$ :

$$\text{Εάν } N_{u,\min} < N < N_{u,\text{bal}}, M_{u,J} = M_{u,\min} + (M_{u,\text{bal}} - M_{u,\min}) \frac{(N - N_{u,\min})}{(N_{u,\text{bal}} - N_{u,\min})} \quad (3.1.11\alpha)$$

$$\text{Εάν } N_{u,\text{bal}} < N < N_{u,\max}, M_{u,J} = M_{u,\text{bal}} + (M_{u,\max} - M_{u,\text{bal}}) \frac{(N - N_{u,\text{bal}})}{(N_{u,\max} - N_{u,\text{bal}})} \quad (3.1.11\beta)$$

Οι τιμές των  $M_{u,\min}$ ,  $M_{u,\text{bal}}$ ,  $M_{u,\max}$  αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικές τιμές του ύψους της θλιβόμενης ζώνης,  $c_{u,J}$ , για  $\epsilon_{cu}=0.005$  και δίνονται από τις ακόλουθες ομάδες εξισώσεων:

$$(i) c_{u,J} = d'_J \Rightarrow \xi_{u,J} = \delta'_J, \quad \frac{M_{u,\min}}{b_J h_J^2 f_{y,c}} = M'_{Cu,\min} + M'_{cu,\min} + M'_{Ju,\min} \quad (3.1.12\alpha)$$

$$M'_{Cu,\min} = 0.8 \frac{f'_c}{f_{y,c}} \delta'_J (0.5 - 0.4\delta'_J) \quad (3.1.12\beta)$$

$$M'_{cu,\min} = \rho'_{sc} [1 + 3.3E_{1c} (\delta'_{cc} - 1.3)] (\delta'_c - 0.5) + 0.5\rho_{swc} (\delta_c - \delta'_c) [1 + 1.67E_{1c} (\delta_{cc} + \delta'_{cc} - 2.6)] (\delta_c + \delta'_c - 1) \quad (3.1.12\gamma)$$

$$M'_{Ju,\min} = \rho_J \frac{f_{y,J}}{f_{y,c}} [1 + 2E_{1J} (\delta_{JJ} - 1.5)] (\delta_J - 0.5) + 0.5\rho_{wJ} \frac{f_{y,J}}{f_{y,c}} [1 + E_{1J} (\delta_{JJ} - 2)] (\delta_J - \delta'_J) (\delta_J + \delta'_J - 1) \quad (3.1.12\delta)$$

$$(ii) c_{u,J} = 0.67d_J \Rightarrow \xi_{u,J} = 0.67\delta_J, \quad \frac{M_{u,\text{bal}}}{b_J h_J^2 f_{y,c}} = M'_{Cu,\text{bal}} + M'_{cu,\text{bal}} + M'_{Ju,\text{bal}} \quad (3.1.13\alpha)$$

$$M'_{Cu,\text{bal}} = 0.54 \frac{f'_c}{f_{y,c}} \delta'_J (0.5 - 0.27\delta'_J) \quad (3.1.13\beta)$$

$$M'_{cu,\text{bal}} = \rho'_{sc} [1 + 2.3E_{1c} (2\delta'_c - 1)] (\delta'_c - 0.5) + 3.3\rho_{sc} (1.5\delta_c - 1) (\delta_c - 0.5) + 0.5\rho_{swc} (1.34\delta_J - \delta_c - \delta'_c) [1 + 2.5E_{1c} (\delta_c - \delta'_c)] (1 - 1.34\delta_J - \delta'_c + \delta_c) \quad (3.1.13\gamma)$$

$$M'_{Ju,bal} = \rho'_J \frac{f'_{y,J}}{f'_{y,c}} [1 + E_{\tau,J} (3\delta'_J - 1)] (\delta'_J - 0.5) + \rho_J \frac{f'_{y,J}}{f'_{y,c}} (\delta_J - 0.5) \quad (3.1.13\delta)$$

$$0.2\rho_{wJ} \frac{f'_{y,J}}{f'_{y,c}} [1 + E_{\tau,J} (\delta'_J - 1)] (\delta_J - 1.5\delta'_J) (1 - 0.34\delta_J - \delta'_J)$$

$$(ii) c_{u,J} = d_J, \Rightarrow \xi_{u,J} = \delta_J, \frac{M_{u,max}}{b_J h_J^2 f'_{y,c}} = M'_{Cu,max} + M'_{cu,max} + M'_{Ju,max} \quad (3.1.14\alpha)$$

$$M'_{Cu,max} = 0.8 \frac{f'_c}{f'_{y,c}} \delta_J (0.5 - 0.4\delta_J) \quad (3.1.14\beta)$$

$$M'_{cu,max} = \rho'_{sc} [1 + 2.3E_{\tau,c} (1.5\delta'_c - 1)] (\delta'_c - 0.5) + 3.3\rho_{sc} (\delta_c - 1) (\delta_c - 0.5) \quad (3.1.14\gamma)$$

$$0.5\rho_{swc} (\delta_c - \delta'_c) [1 + 1.17E_{\tau,c} (1 - 1.5\delta'_c) - 0.5\delta_c] (\delta_c + \delta'_c - 1)$$

$$M'_{Ju,max} = \rho_J \frac{f'_{y,J}}{f'_{y,c}} [1 + E_{\tau,J} (2\delta_J - 1)] (\delta'_J - 0.5) + \quad (3.1.14\delta)$$

$$0.5\rho_{wJ} \frac{f'_{y,J}}{f'_{y,c}} (1 - E_{\tau,J} \delta'_J) (\delta_J - \delta'_J) (\delta_J + \delta'_J - 1)$$

#### (γ) Αναλυτικές εκφράσεις βάσει απλοποιημένης διατομής

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο για μανδύες Ο/Σ με στόχο την εξαγωγή παραμετρικών εκφράσεων που να συσχετίζουν τη διαθέσιμη παραμορφωσιμότητα και αντοχή με τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του μανδύα Ο/Σ. Για απλοποίηση των υπολογισμών όλος ο οπλισμός θεωρείται ότι δρα στη θέση του προστιθέμενου οπλισμού (δηλ. στη θέση του οπλισμού του μανδύα). Ο υφιστάμενος διαμήκης οπλισμός,  $\rho_c$ , μπορεί είτε να αγνοηθεί είτε να μεταφερθεί στο κέντρο των εξωτερικών επιπέδων του διαμήκους οπλισμού του μανδύα χρησιμοποιώντας το θεώρημα των παράλληλων αξόνων (Σχήμα 3.1.2). (Ο διαμήκης οπλισμός του κορμού αγνοείται, καθώς θεωρείται, ότι έχει μικρή επιρροή στην καμπτική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου). Ο ισοδύναμος διαμήκης οπλισμός του μανδύα,  $\rho_e$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho_e = \rho_J + \rho_c \frac{(0.5h_c - d_c)^2}{AB(0.5h_J - d_J)^2} \quad (3.1.15)$$

όπου  $\rho_J (=A_J/(b_J h_J))$  είναι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του μανδύα (ένα κλάσμα του συνολικού εμβαδού της τελικής διατομής του μανδύα),  $h_J$ ,  $b_J$  είναι το ύψος και το πλάτος της ενισχυμένης διατομής,  $h_c$ ,  $b_c$  είναι το πλάτος και το ύψος της υφιστάμενης διατομής,  $A (=b_J/b_c)$

και  $B(=d_j/d_c)$  είναι οι συντελεστές που καθορίζουν την αύξηση σε πλάτος και ύψος του υφιστάμενου στοιχείου (πυρήνα), αντίστοιχα, εξαιτίας της προσθήκης του μανδύα.

Ανάλογα με το μέγεθος του αξονικού φορτίου, η διαρροή μπορεί να συμβεί είτε όταν ο εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός φτάσει το όριο διαρροής του είτε όταν η παραμόρφωση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη φτάσει μια συγκεκριμένη στάθμη παραμόρφωσης ( $\epsilon_c=1.8 \cdot f_c/E_c$ ).

(i) Διαρροή χάλυβα:

$$\xi_y = - \left[ (2\eta_c - 1)\rho_e + \frac{vf'_c}{E_c \epsilon_{sy}} \right] + \left\{ \left[ (2\eta_c - 1)\rho_e + \frac{vf'_c}{E_c \epsilon_{sy}} \right]^2 + 2 \left[ (1.10\eta_c - 0.10)\rho_e + \frac{vf'_c}{E_c \epsilon_{sy}} \right] \right\}^{0.5} \quad (3.1.16\alpha)$$

(ii) Διαρροή σκυροδέματος ( $\epsilon_c=1.8f_c/E_c$ ):

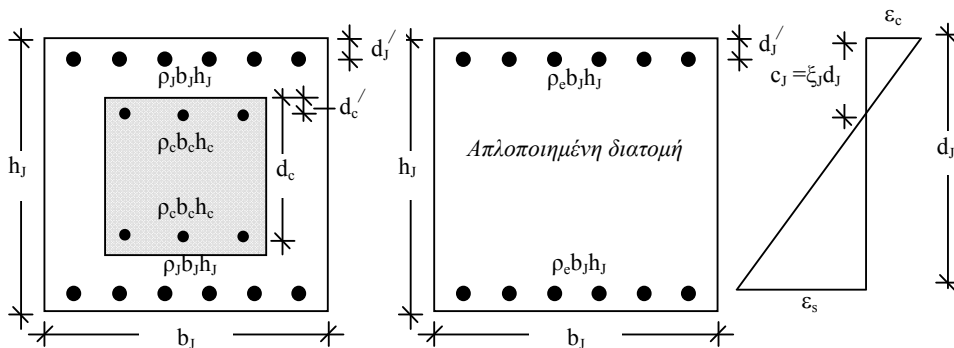
$$\xi_y = -[(2\eta_c - 1)\rho_e + 0.55\nu] + \left\{ [(2\eta_c - 1)\rho_e + 0.55\nu]^2 + 2(1.10\eta_c - 0.10)\rho_e \right\}^{0.5} \quad (3.1.16\beta)$$

Η δυσκαμψία του ενισχυμένου στοιχείου Ο/Σ με μανδύες Ο/Σ,  $K_{y,j}^J$ , συσχετίζεται με τον ισοδύναμο διαμήκη οπλισμό (εφελκόμενο ή θλιβόμενο) του μανδύα,  $\rho_{e,j}$ , μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$K_{y,j}^J = \frac{b_{j,j} h_{j,j}^3 E_c}{h_{st}^3} \left\{ 4.8\rho_{e,j} [\xi_{y,j} (-1 - 0.25\eta_c) + 1.15\eta_c + 0.10] + 3\xi_{y,j}^2 (1 - 0.66\xi_{y,j}) \right\} \quad (3.1.17)$$

Επίσης, η ροπή αντοχής στη διαρροή ενισχυμένου στοιχείου Ο/Σ με μανδύες Ο/Σ δίδεται ως εξής:

$$\frac{M_y}{\phi_y} = b_j h_j^3 E_c \left[ 0.40\rho_e [\xi_y (-1 - 0.25\eta_c) + 1.15\eta_c + 0.10] + 0.25\xi_y^2 (1 - 0.66\xi_y) \right] \quad (3.1.18)$$



Σχήμα 3.1.2 Απλοποιημένη διατομή στοιχείου Ο/Σ ενισχυμένου με μανδύα Ο/Σ.



### 3.1.4 Αξιολόγηση εκφράσεων ΚΑΝΕΠΕ (2011) για τους δείκτες απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ

Η επεξεργασία της πειραματικής βάσης που παρουσιάστηκε στο Π.Ε. 1.2 (Ενότητα 1.2.4.2) έδωσε στοιχεία σχετικά με τη στροφή διαρροής, μέγιστη στροφή και αντοχή, καθώς και άλλους δείκτες απόκρισης. Τα δεδομένα που προέκυψαν από την πρώτη μεθοδολογία εξεργασίας (Σχήμα 1.2.1, Πίνακας 1.2.4) χρησιμοποιούνται προκειμένου να αξιολογηθούν-βαθμονομηθούν οι εκφράσεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011).

#### (α) Δείκτες παραμορφωσιμότητας

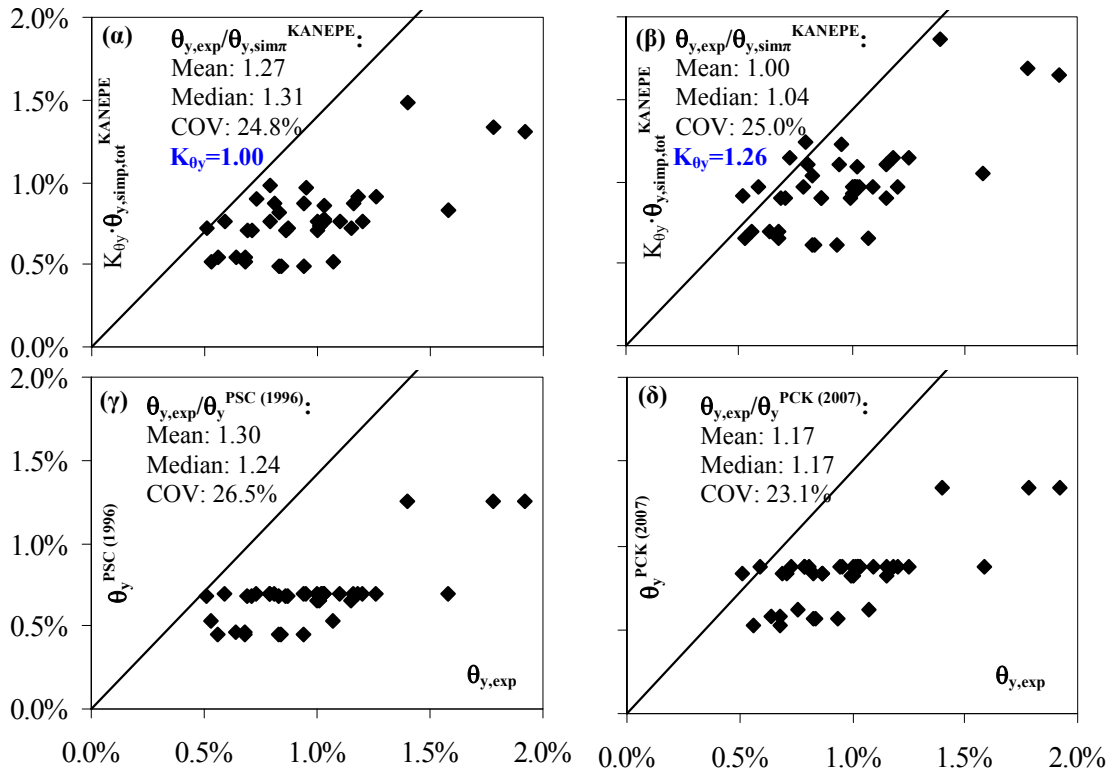
Από τους διάφορους δείκτες παραμορφωσιμότητας εξετάζονται εδώ η στροφή διαρροής, η στροφή στη μέγιστη απόκριση, και η πλαστιμότητα στροφών με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στη στροφή διαρροής.

#### Στροφή διαρροής

Στα γραφήματα του Σχήματος 3.1.3 συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές για τη στροφή διαρροής με τα μοντέλα των Priestley et al. (1996, 2007) που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.1.3, καθώς και με το απλοποιημένο μοντέλο του ΚΑΝΕΠΕ (2011), όπως αυτό παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.1 (Υπενθυμίζεται ότι ο όρος “απλοποιημένο” αναφέρεται στην απλοποιημένη έκφραση για τον υπολογισμό της καμπυλότητας διαρροής,  $\phi_y$ ). Στην απλοποιημένη έκφραση του ΚΑΝΕΠΕ η συνολική στροφή διαρροής,  $\theta_{y,simp,tot}^{KANEPPE}$ , περιλαμβάνει τη στροφή διαρροής λόγω καμπτικής παραμόρφωσης και λόγω ολίσθησης του διαμήκους οπλισμού. Στα Σχήματα 3.3.1(α) και (β) συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές με την απλοποιημένη έκφραση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) για διαφορετικούς συντελεστές μονολιθικότητας στροφής διαρροής,  $K_{\theta y}$ . Η εικόνα που παρουσιάζει η περίπτωση για  $K_{\theta y}=1.26$  (Σχήμα 3.1.3(β)), είναι βελτιωμένη ως προς τη μέση τιμή, και τον μέσο όρο, ενώ η διασπορά παραμένει σταθερή στο 25%.

Η σύγκριση των πειραματικών τιμών της στροφής διαρροής,  $\theta_{y,exp}$ , σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο των Priestley et al. (1996),  $\theta_y^{PSC}$ , και το μοντέλο των Priestley et al. (2007),  $\theta_y^{PCK}$ , παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.3.3(γ) και (δ), αντίστοιχα. Το μοντέλο των Priestley et al. (2007) παρουσιάζει καλύτερους δείκτες μέσης τιμής και μέσου όρου, καθώς και μειωμένη διασπορά σε σχέση με το μοντέλο των Priestley et al. (1996).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το απλοποιημένο μοντέλο του ΚΑΝΕΠΕ (2011) υιοθετώντας μια τιμή συντελεστή μονολιθικότητας στροφής διαρροής  $K_{\theta y}=1.26$  μπορεί να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της στροφής διαρροής υφιστάμενων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ.



**Σχήμα 3.1.3:** Σύγκριση πειραματικών τιμών στροφής διαρροής με τις τιμές στροφής διαρροής του απλοποιημένου μοντέλου του ΚΑΝΕΠΕ (2011) για (α)  $K_{\theta y}=1.00$ , (β)  $K_{\theta y}=1.26$ , και τα μοντέλα των: (γ) Priestley et al. (1996) και (δ) Priestley et al. (2007).

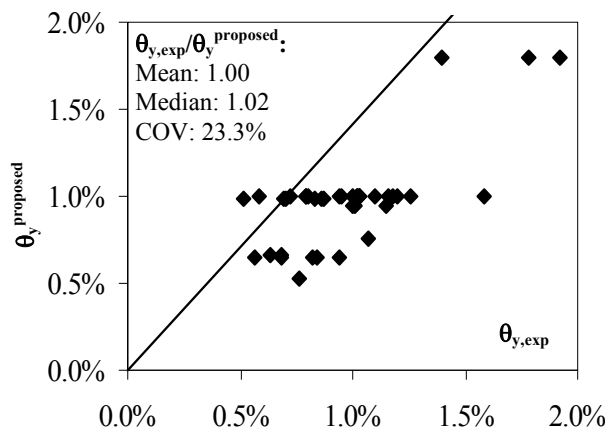
Με στόχο την περαιτέρω απλοποίηση της σχέσης για τον υπολογισμό της στροφής διαρροής στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ χρησιμοποιούνται οι πειραματικές τιμές για τη στροφή διαρροής και η σχέση της καμπτικής παραμόρφωσης για το μοντέλο προβόλου. Η στροφή διαρροής καθορίζεται επομένως από τη σχέση:

$$\theta_y^{\text{proposed}} = \frac{1}{3} \varphi_y L_V ; \varphi_y = \frac{\alpha \cdot f_y}{E_s h} \quad (3.1.19)$$

με το συντελεστή “α” να καθορίζεται από τις πειραματικές τιμές για τη στροφή διαρροής,  $\theta_{y,exp}$ :

$$\alpha = \frac{3\theta_{y,exp} E_s h}{f_y} \quad (3.1.20)$$

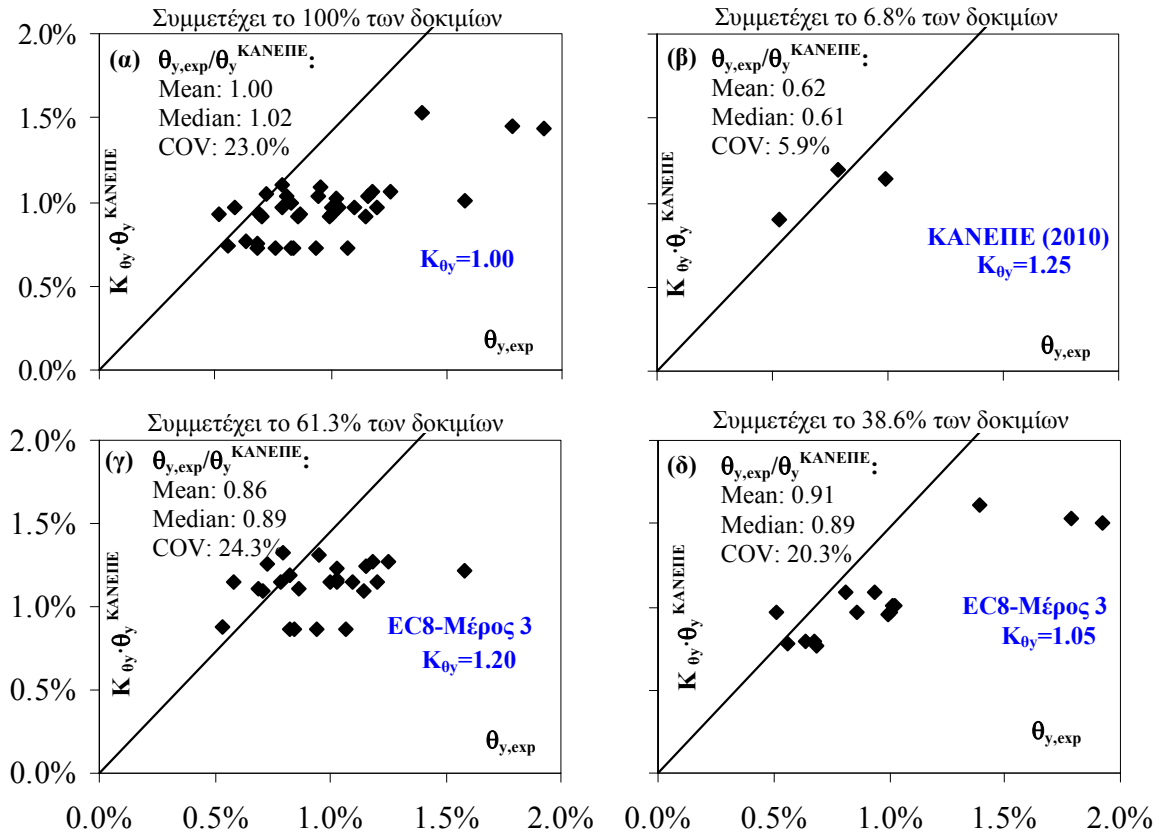
όπου  $E_s$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα,  $h$  είναι το ύψος της διατομής και  $f_y$  είναι η αντοχή διαρροής του χάλυβα. Η τιμή του συντελεστή α καθορίστηκε στα “3.07” και λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά οποιoδήποτε μηχανισμού απόκρισης στη στροφή διαρροής. Η σύγκριση των τιμών της στροφής διαρροής με βάση την προτεινόμενη έκφραση και τις αντίστοιχες πειραματικές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.4.



**Σχήμα 3.1.4:** Σύγκριση πειραματικών τιμών στροφής διαρροής,  $\theta_{y,exp}$ , με τις τιμές στροφής διαρροής βάσει του εξαγόμενου απλοποιημένου μοντέλου,  $\theta_{y,proposed}$ .

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η ημι-εμπειρική σχέση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) (Πίνακας 3.1.1) για τον προσδιορισμό των τιμών της στροφής διαρροής,  $\theta_y^{ΚΑΝΕΠΕ}$ , των δοκιμών της πειραματικής βάσης για διάφορες τιμές του συντελεστή μονολιθικότητας και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές στο Σχήμα 3.1.5. Από το σύνολο των δοκιμών (44) το 38.6% αντιστοιχεί σε δοκίμια τα οποία είχαν υποστεί εκτράχυνση της διεπιφάνειας μόνο, το 6.8% σε δοκίμια τα οποία είχαν υποστεί εκτράχυνση της διεπιφάνειας σε συνδυασμό με κάποιο μέσο σύνδεσης, ενώ το 54.5% σε δοκίμια με όλους τους άλλους πιθανούς τρόπους σύνδεσης, ακόμη και χωρίς καμιά επεξεργασία της διεπιφάνειας. Οι τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας που προτείνονται από τον Ευρωκώδικα 8-III (2005) για τη στρόφη διαρροής είναι  $K_{\theta y}=1.05$  για την περίπτωση εκτράχυνσης και 1.20 για οποιαδήποτε άλλο μέτρο ή για τη μη λήψη μέτρων, ενώ η τιμή  $K_{\theta y}=1.25$  προτείνεται από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011) για την περίπτωση συνδυασμού εκτράχυνσης με κάποιο άλλο μέσο σύνδεσης (Πίνακας 3.1.2).

Στο Σχήμα 3.1.5(α) συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές της στροφής διαρροής,  $\theta_{y,exp}$ , με τις τιμές που προκύπτουν από την ημι-εμπειρική σχέση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) για τη στρόφη διαρροής στην περίπτωση όπου ο συντελεστής μονολιθικότητας ληφθεί ίσος με τη μονάδα,  $K_{\theta y}=1.00$ . Σε αυτή τη σύγκριση συμμετέχει το 100% των δοκιμών της βάσης (Πίνακας 1.2.4). Στα Σχήματα 3.1.5(β), (γ), (δ) συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές της στροφής διαρροής ομάδων δοκιμών με τις τιμές που προκύπτουν κάνοντας χρήση της ημι-εμπειρικής σχέσης του ΚΑΝΕΠΕ (2011) τροποποιημένων με τον κατάλληλο συντελεστή μονολιθικότητας, ανάλογα με την επεξεργασία και τα μέσα σύνδεσης που έχουν χρησιμοποιηθεί στην κάθε ομάδα δοκιμών. Για παράδειγμα, το Σχήμα 3.1.5(δ) απεικονίζει τη σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών και τιμών από την προτεινόμενη σχέση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) για την περίπτωση όπου το μόνο μέσο σύνδεσης είναι η εκτράχυνση της διεπιφάνειας, γεγονός που καλύπτει το 38.6% των δοκιμών της πειραματικής βάσης.



**Σχήμα 3.1.5:** Σύγκριση πειραματικών τιμών στροφής διαρροής με τις τιμές στροφής διαρροής βάσει της ημι-εμπειρικής σχέσης του ΚΑΝΕΠΕ (2011) για τιμές του συντελεστή μονολιθικότητας: (α)  $K_{\theta y}=1.00$ , (β)  $K_{\theta y}=1.25$ , (γ)  $K_{\theta y}=1.20$  και (δ)  $K_{\theta y}=1.05$ .

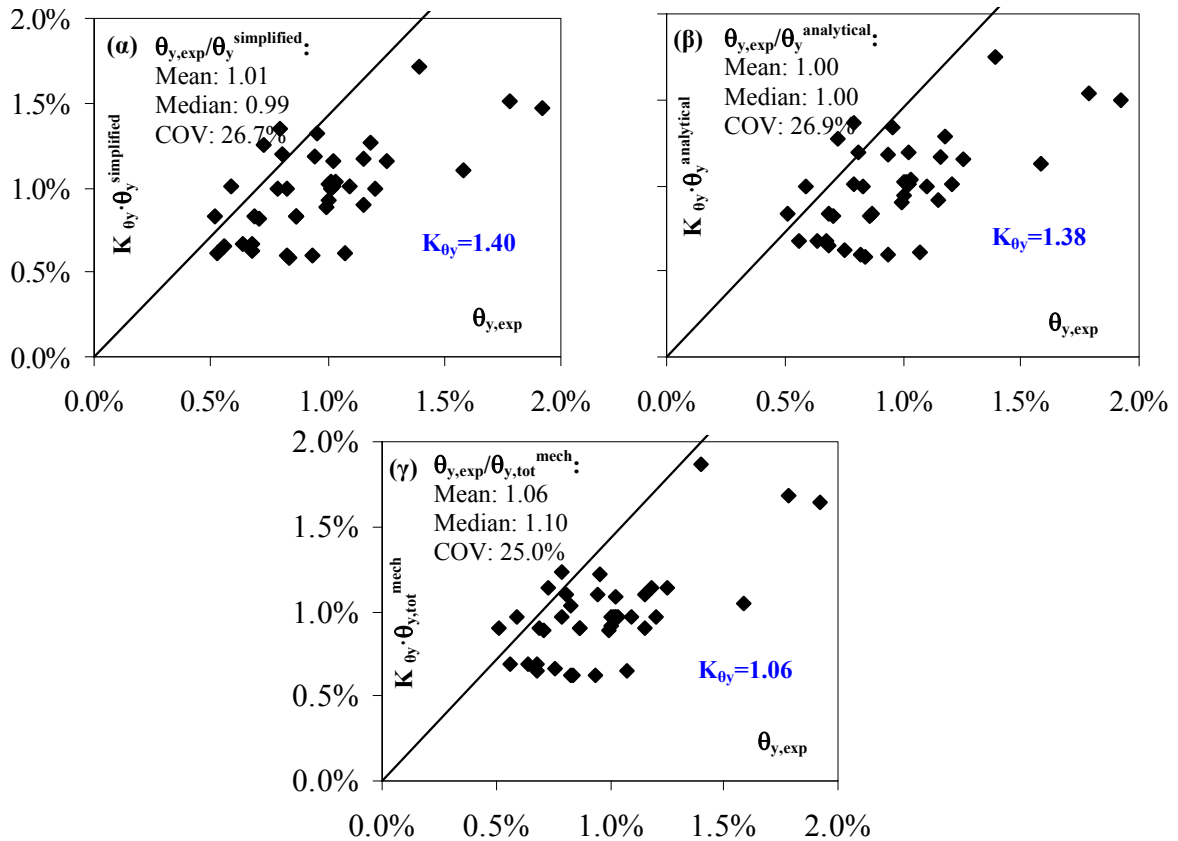
Η σύγκριση των πειραματικών τιμών της στροφής διαρροής και των αντίστοιχων τροποποιημένων με κατάλληλους συντελεστές μονολιθικότητας τιμών που προκύπτουν από τις αναλυτικές εκφράσεις βάσει της πραγματικής και της αναλυτικής διατομής (Θερμού 2007), και βάσει του μηχανικού μοντέλου προβόλου (*fib* Bulletin 4 2003), παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1.6(α), (β) και (γ), αντίστοιχα. Η μορφή των εξισώσεων και για τις τρεις περιπτώσεις είναι:

$$\theta_y^i = K_{\theta y} (\theta_y^{flex} + \theta_y^{slip}) = K_{\theta y} \left( \frac{\Phi_y L_v}{3} + \frac{\Phi_y L_b}{2} \right) \quad (3.1.21)$$

όπου  $K_{\theta y}$  είναι ο συντελεστής μονολιθικότητας για τη στροφή διαρροής,  $\theta_y^{flex}$  και  $\theta_y^{slip}$  είναι η καμπτική στροφή διαρροής και η στροφή διαρροής λόγω ολίσθησης του οπλισμού, αντίστοιχα,  $\Phi_y$  είναι η καμπυλότητα διαρροής,  $L_v$  είναι το άνοιγμα διάτμησης και  $L_b$  είναι το βασικό μήκος αγκύρωσης. Οι προτεινόμενες τιμές για το συντελεστή μονολιθικότητας  $K_{\theta y}$  που αναγράφονται για το κάθε μοντέλο στα Σχήματα 3.1.6, έχουν εξαχθεί με κριτήριο ο μέσος όρος και η μέση τιμή να βρίσκονται όσο το δυνατό πλησιέστερα στη μονάδα.

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται στο Σχήμα 3.1.6 δεν διαφοροποιούνται ουσιαδώς μεταξύ τους, αλλά ούτε και από τη σύγκριση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.5(α)

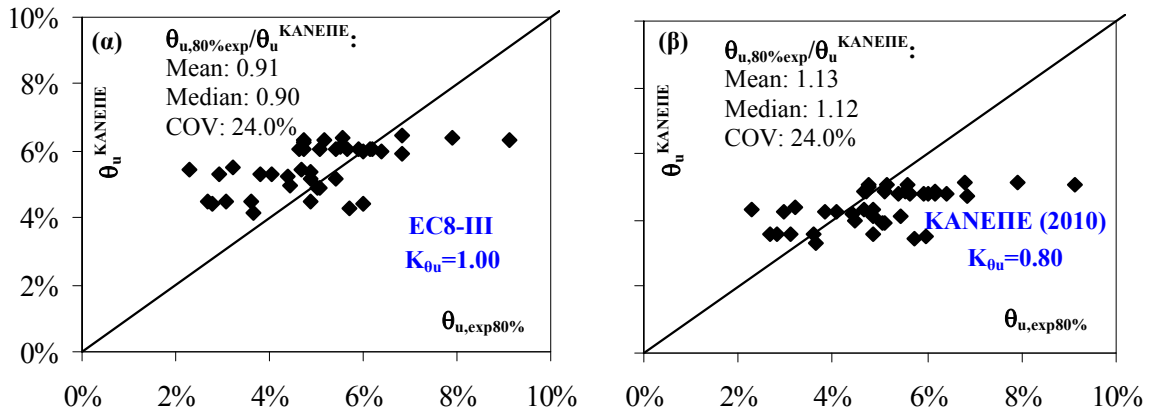
(επισημαίνεται ότι αφορά στο 100% των δοκιμών για  $K_{\theta y}=1$ ), δηλαδή της σύγκρισης των πειραματικών τιμών με αυτές της σχέσης του ΚΑΝΕΠΕ (2011), αν και η έκφραση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) δίνει ελαφρώς μικρότερη διασπορά (23% έναντι 26.7% και 25%). Επομένως, θα μπορούσαν οι σχέσεις που προκύπτουν από τις αναλυτικές εκφράσεις βάσει της πραγματικής και της αναλυτικής διατομής (Ενότητα 3.1.3), και βάσει του μηχανικού μοντέλου προβόλου (*fib* Bulletin 4 2003, Πίνακας 3.1.3) να χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικές της ημι-εμπειρικής έκφρασης του ΚΑΝΕΠΕ (2011) με χρήση των προτεινόμενων συντελεστών στροφής διαρροής,  $K_{\theta y}$ .



**Σχήμα 3.1.6:** Σύγκριση πειραματικών τιμών στροφής διαρροής με τις αντίστοιχες τροποποιημένες τιμές στροφής διαρροής βάσει των αναλυτικών εκφράσεων της πραγματικής και απλοποιημένης διατομής της Θερμού (2007), καθώς και του μηχανικού μοντέλου προβόλου (*fib* Bulletin 4, 2003).

Μέγιστη Στροφή

Η σύγκριση των πειραματικών τιμών της μέγιστης στροφής,  $\theta_{u,exp80\%}$ , με τις τιμές που προκύπτουν από την ημι-εμπειρική έκφραση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) (και του EC8-Μέρος 3, διότι πρόκειται για την ίδια σχέση, Πίνακας 3.1.1) κάνοντας χρήση των προτεινόμενων τιμών συντελεστών μονολιθικότητας (Πίνακας 3.1.2) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.7. Και στις δυο περιπτώσεις ο μέσος όρος και η μέση τιμή αποκλίνουν από τη μονάδα, ενώ η διασπορά διατηρείται σταθερή. Αν ο συντελεστής μονολιθικότητας διορθωνόταν και ελάμβανε την τιμή  $K_{\theta u}=0.90$ , τότε θα ήταν δυνατό η μέση τιμή να γίνει μονάδα με τη διασπορά να διατηρείται στα ίδια επίπεδα.



**Σχήμα 3.1.7:** Σύγκριση πειραματικών τιμών μέγιστης στρωφής με τις τιμές μέγιστης στρωφής βάσει της ημι-εμπειρικής σχέσης του ΚΑΝΕΠΕ (2011) για τιμές του συντελεστή μονολιθικότητας: (α)  $K_{\theta_u} = 1.00$  (EC8-Μέρος 3 2005), (β)  $K_{\theta_u} = 0.80$  (ΚΑΝΕΠΕ 2011).

Πλαστιμότητα στρωφών

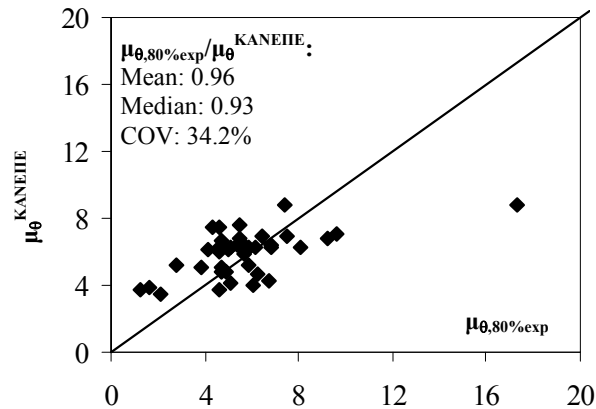
Ένας ακόμη δείκτης που εξετάζεται είναι η πλαστιμότητα στρωφών σύμφωνα με τις εκφράσεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011), που ορίζεται ως:

$$\mu_{\theta}^{KANEPE} = \frac{\theta_u^{KANEPE}}{\theta_y^{KANEPE}} \tag{3.1.22}$$

όπου  $\theta_u^{KANEPE}$  και  $\theta_y^{KANEPE}$  ορίζονται στον Πίνακα 3.1.1. Επίσης, ορίζεται η πλαστιμότητα στρωφών σύμφωνα με τις πειραματικές τιμές ως:

$$\mu_{\theta,80\%exp} = \frac{\theta_{u,80\%exp}}{\theta_{y,exp}} \tag{3.1.23}$$

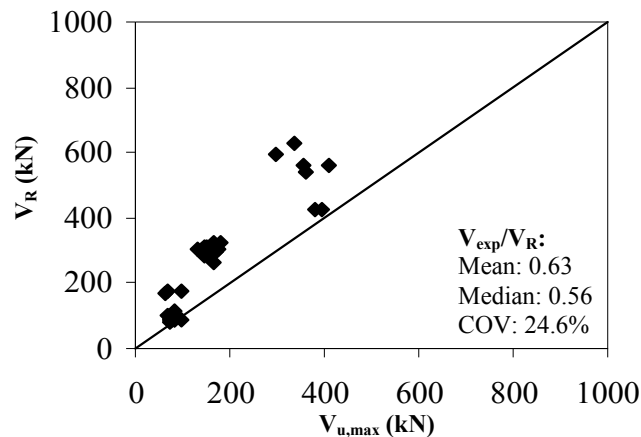
Στο Σχήμα 3.1.7 παρουσιάζεται η σύγκριση της πλαστιμότητας στρωφών μεταξύ πειραματικών τιμών και τιμών που έχουν εξαχθεί σύμφωνα με τις εκφράσεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011). Παρατηρείται ότι οι τιμές της πλαστιμότητας στρωφών για την πλειονότητα των δοκιμών κυμαίνονται μεταξύ 3 και 8.



**Σχήμα 3.1.7:** Σύγκριση πειραματικών τιμών πλαστιμότητας στροφών με τις τιμές που προκύπτουν από τις εκφράσεις του ΚΑΝΕΠΕ (2011).

### (β) Δείκτες αντοχής

Η έκφραση του ΚΑΝΕΠΕ (2011) (βλ. εξ. 3.1.2α) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αντοχής στοιχείων που αστοχούν διατμητικά. Στην περίπτωση των δοκιμών της πειραματικής βάσης, η αστοχία ήταν καμπτική. Οι πειραματικές τιμές της τέμνουσας κατά την αστοχία,  $V_{u,max}$ , όπως υπολογίστηκαν στην Ενότητα 1.2.5 του Π.Ε. 1.2, συγκρίνονται στο Σχήμα 3.1.8 με την έκφραση για τη  $V_R$  του ΚΑΝΕΠΕ (2011) και, όπως αναμενόταν, ο λόγος είναι συστηματικά μικρότερος της μονάδας (Μ.Ο. 0.63), αφού η αντοχή των δοκιμών καθορίζεται από την καμπτική τους αντοχή.



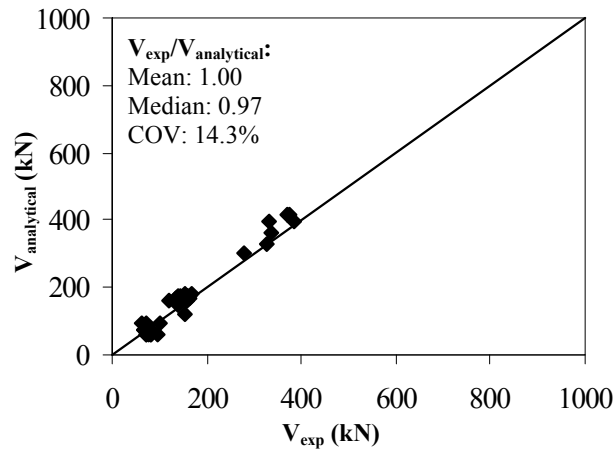
**Σχήμα 3.1.8:** Σύγκριση πειραματικών τιμών τέμνουσας κατά την αστοχία με τις τιμές που προκύπτουν από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011).

Στη συνέχεια εξετάζεται το καταπόσο οι εκφράσεις αντοχής με βάση την απλοποιημένη και την πραγματική διατομή Θερμού (2007) μπορούν να προβλέψουν την αντοχή των πειραματικών δοκιμών.

Η αντοχή βάσει της ανάλυσης της πραγματικής διατομής (Θερμού 2007) που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.1.3 δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{analytical} = 1.14 \left[ A_J \frac{h_J f_y}{L_V \eta_c} \frac{1}{(1-\xi_y)} (M'_{y,c} + M'_{y,c} + M'_{y,J}) \right] \quad (3.1.24)$$

όπου 1.14 είναι ένας συντελεστής προσαύξησης για καλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση των πειραματικών τιμών της αντοχής,  $V_{u,max}$ , με αυτές που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης (3.1.24),  $V_{analytical}$ , παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.9. Η σύγκλιση των πειραματικών τιμών και των τιμών που εξάγονται από την προτεινόμενη σχέση είναι πολύ καλή, γεγονός που καθιστά αξιόπιστη την Εξ. (3.1.24) για τον προσδιορισμό της αντοχής στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ.



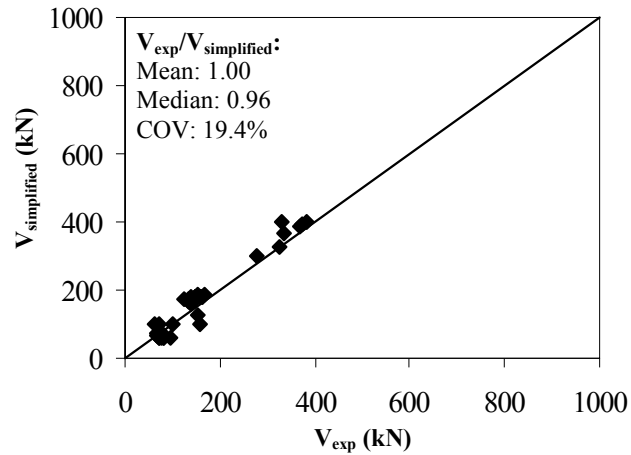
**Σχήμα 3.1.9:** Σύγκριση πειραματικών τιμών αντοχής,  $V_{exp}$ , με τις τιμές που προκύπτουν από την Εξ. (3.1.24) βάσει της πραγματικής διατομής (Θερμού 2010),  $V_{analytical}$ .

Επιπλέον, μελετάται η αξιοπιστία της έκφρασης για τον υπολογισμό της αντοχής βάσει του απλοποιημένου μοντέλου για μανδύες (Ενότητα 3.1.3), η οποία ορίζεται ως:

$$V_{simplified} = 1.06 A_J \frac{h_J f_y}{L_V \eta_c} \frac{1}{(1-\xi_y)} \left[ \frac{0.40 \rho_e [\xi_y (-1 - 0.25 \eta_c) + 1.15 \eta_c + 0.10]}{0.25 \xi_y^2 (1 - 0.66 \xi_y)} \right] \quad (3.1.25)$$

όπου 1.06 είναι διορθωτικός συντελεστής για καλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση πειραματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν αν γίνει χρήση της Εξ. (3.1.25) παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.10.





**Σχήμα 3.1.10:** Σύγκριση πειραματικών τιμών αντοχής,  $V_{exp}$ , με τις τιμές που προκύπτουν από την Εξ. (3.1.25) βάσει της απλοποιημένης διατομής (Θερμού 2010),  $V_{analytical}$ .

Από τη σύγκριση των Σχημάτων 3.1.9 και 3.1.10, συμπεραίνεται ότι και οι δυο εναλλακτικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό της αντοχής, δηλαδή αυτή βάσει της πραγματικής διατομής και αυτή βάσει της απλοποιημένης διατομής, είναι σε εύλογη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, με ελαφρώς καλύτερους δείκτες στην περίπτωση των εκφράσεων βάσει της πραγματικής διατομής.

### 3.1.5 Βιβλιογραφία Π.Ε. 3.1

- Eurocode 8-Part 1 (2004). "Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings." EN1998-1-2004:E, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- Eurocode 8-Part 3 (2005). "Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings." EN 1998-3:2005(E), European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- fib Bulletin 24 (2003). "Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings." *State of the art report, federation internationale du béton (fib)*, Lausanne Switzerland, 312.
- ΚΑΝΕΠΕ (2011). "Κανονισμός Επεμβάσεων." Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Τελικό Κείμενο, Σεπτέμβριος 2011.
- Priestley, Calvi and Kowalsky (2007)
- Priestley, M. J. N, Seible, F., and Calvi, G. M. (1996). Seismic design and retrofit of bridges. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Thermou, G. E., Pantazopoulou, S. J., and Elnashai, A.S. (2007) "Flexural behavior of brittle RC members rehabilitated with concrete jacketing" *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 133(10), 1373-1384.
- Tsioulou, O.T. and Dritsos, S.E. (2011). "A theoretical model to predict interface slip due to bending." *Materials and Structures*, 44(4), 825-843.

## Πακέτο Εργασίας 3.2 (Σχέσεις για τη συνολική στροφή του σύνθετου στοιχείου)

### 3.2.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή μανδύων Ο/Σ σε υφιστάμενα στοιχεία Ο/Σ είναι μια τεχνική ενίσχυσης, η επιτυχία της οποίας οφείλεται στο βαθμό συνεργασίας μεταξύ του πυρήνα (δηλαδή του υφιστάμενου στοιχείου) και του εξωτερικού κελύφους (του μανδύα Ο/Σ). Η απόκριση του αναβαθμισμένου στοιχείου μεταβάλλεται αναλόγως με το βαθμό ολίσθησης που επιτρέπει ο τρόπος σύνδεσης των δυο στοιχείων κατά μήκος της μεταξύ τους διεπιφάνειας. Η διαδικασία υπολογισμού της σχετικής ολίσθησης και των επιπτώσεων στα μηχανικά χαρακτηριστικά του αναβαθμισμένου στοιχείου προϋποθέτει τη χρήση αναλυτικών προσομοιωμάτων. Η πολυπλοκότητα που ενέχει αυτή η προσέγγιση εκτίμησης των τιμών σχεδιασμού οδήγησε σε απλούστευση της διαδικασίας με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών ή συντελεστών μονολιθικότητας. Η πρακτική της χρήσης των συντελεστών μονολιθικότητας απλοποιεί σημαντικά τους υπολογισμούς και βρίσκει εφαρμογή και σε άλλες μεθόδους για διάφορα δομικά στοιχεία (πλάκα, δοκό, υποστύλωμα, τοίχωμα ή στοιχείο θεμελίωσης). Οι συντελεστές μονολιθικότητας ορίζονται με βάση την εξής σχέση:

$$K = \frac{\text{Δείκτης απόκρισης σύνθετης διατομής}}{\text{Δείκτης απόκρισης "ίδιας" μονολιθικής διατομής}} \quad (3.2.1)$$

και τροποποιούν (μειώνουν ή αυξάνουν) το δείκτη απόκρισης του αντίστοιχου μονολιθικού στοιχείου.

Οι τιμές που υιοθετούνται από τους κανονισμούς (βλ. Πίνακα 3.1.2 για ΚΑΝΕΠΕ (2011) και EC8-Μέρος 3 (2005)) είναι εμπειρικές. Στην παρούσα έρευνα γίνεται προσπάθεια μέσω της αξιοποίησης του αναλυτικού μοντέλου (Ενότητα 1.1.1) που λαμβάνει υπόψη την **ολίσθηση στη διεπιφάνεια** μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος να διερευνηθεί η ευαισθησία των συντελεστών μονολιθικότητας στα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας και των μανδύων. Είναι αυτονόητη η δυσκολία ενός τέτοιου εγχειρήματος, αλλά και η σκοπιμότητά του, στο μέτρο που το διαθέσιμο διεθνώς πειραματικό υλικό είναι, όπως αναφέρθηκε και τεκμηριώθηκε σε προηγούμενες ενότητες, αρκετά περιορισμένο.

Η ολίσθηση της άνω και κάτω διεπιφάνειας του σύνθετου στοιχείου (Σχήμα 1.1.2) δημιουργεί μια επιπλέον στροφή, η οποία συνεισφέρει στην αύξηση της συνολικής στροφής διαρροής και της συνολικής μέγιστης στροφής στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ. Οι σχέσεις που ορίζουν την παραμόρφωση του σύνθετου στοιχείου σε όρους στροφών παρουσιάζονται στην Ενότητα 3.2.2 και η βασική διαφορά τους από εκείνες που παρουσιάστηκαν στην §3.1 είναι ότι λαμβάνεται υπόψη και η στροφή λόγω ολίσθησης των διεπιφανειών. Επιπλέον, για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, ορίζονται διάφοροι συντελεστές μονολιθικότητας, οι οποίοι σχετίζονται με δείκτες παραμορφωσιμότητας και αντοχής (Ενότητα 3.2.3). Τα στοιχεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν στο Π.Ε. 3.3, στο οποίο θα παρουσιαστεί παραμετρική μελέτη με στόχο την εξαγωγή τιμών και σχέσεων για τους διάφορους συντελεστές μονολιθικότητας.

### 3.2.2 Υπολογισμός στροφής διαρροής και αστοχίας στοιχείων Ο/Σ ενισχυμένων με μανδύες Ο/Σ

Η σύνθετη διατομή θεωρείται, ότι έχει φτάσει το όριο της διαρροής, όταν ο εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός του μανδύα φτάνει πρώτος στην αντοχή διαρροής ( $\epsilon_y$ ) ή εναλλακτικά, όταν η θλιπτική τάση του σκυροδέματος του μανδύα ξεπερνάει το όριο  $\epsilon_c=1.5\%$  (*fib Bulletin 24, 2003*). Η συνολική μέγιστη ανελαστική στροφή,  $\theta_{u,J}$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{u,J} = \theta_{u,J}^{\text{flex}} + \theta_{u,J}^{\text{slip}} + \theta_u^{\text{interf,slip}} \quad (3.2.2)$$

όπου  $\theta_{u,J}^{\text{flex}}$  είναι η μέγιστη ανελαστική στροφή λόγω καμπτικής παραμόρφωσης,  $\theta_{u,J}^{\text{slip}}$  είναι η μέγιστη ανελαστική στροφή λόγω ολίσθησης του διαμήκου οπλισμού του μανδύα και  $\theta_{u,J}^{\text{interf,slip}}$  η μέγιστη ανελαστική στροφή λόγω ολίσθησης των διεπιφανειών. Ο όρος της μέγιστης στροφής που αντιστοιχεί σε διατμητική παραμόρφωση έχει αγνοηθεί. Παραταύτα θα πρέπει να ελέγχεται αν το στοιχείο συνεχίζει να έχει προεξάρχουσα καμπτική συμπεριφορά και μετά την εφαρμογή των μανδύων, διότι λόγω αύξησης των διαστάσεων αλλάζει ο λόγος διάτμησης. Οι παραπάνω όροι αναλύονται ως εξής:

- Μέγιστη στροφή λόγω κάμψης,  $\theta_{u,J}^{\text{flex}}$  :

$$\theta_{u,J}^{\text{flex}} = \theta_{y,J}^{\text{flex}} + \theta_{p,J}^{\text{flex}} \quad (3.2.3\alpha)$$

$$\theta_{y,J}^{\text{flex}} = \frac{\varphi_{y,J} L_V}{3}; \theta_{p,J}^{\text{flex}} = \frac{(\varphi_{u,J} - \varphi_{y,J}) L_{\text{SP}} (L_V - 0.5L_p)}{L_V} \quad (3.2.3\beta)$$

όπου  $\varphi_{y,J}$  και  $\varphi_{u,J}$  είναι η καμπυλότητα διαρροής και αστοχίας του σύνθετου στοιχείου, αντίστοιχα,  $L_V$  είναι το άνοιγμα διάτμησης του στοιχείου και  $L_p$  είναι το μήκος της πλαστικής άρθρωσης.

- Μέγιστη στροφή λόγω ολίσθησης του διαμήκου οπλισμού,  $\theta_{u,J}^{\text{slip}}$  :

$$\theta_{u,J}^{\text{slip}} = \theta_{y,J}^{\text{slip}} + \theta_{p,J}^{\text{slip}} \quad (3.2.4\alpha)$$

$$\theta_{y,J}^{\text{slip}} = \frac{\varphi_{y,J} L_{b,y}}{2}; L_{b,y} = \frac{d_b}{4} \frac{f_y}{f_{by}}; f_y = \epsilon_y E_s \quad (3.2.4\beta)$$

$$\theta_{p,J}^{\text{slip}} = (\varphi_{u,J} - \varphi_{y,J}) \frac{(f_u - f_y)}{f_u} L_{bu}; f_u = f_y + (\epsilon_u - \epsilon_y) E' \quad (3.2.4\gamma)$$

$$L_{bu} = \frac{d_b}{4} \frac{f_u}{f_{bu}}; f_{bu} = 0.8 \cdot f_{by}$$

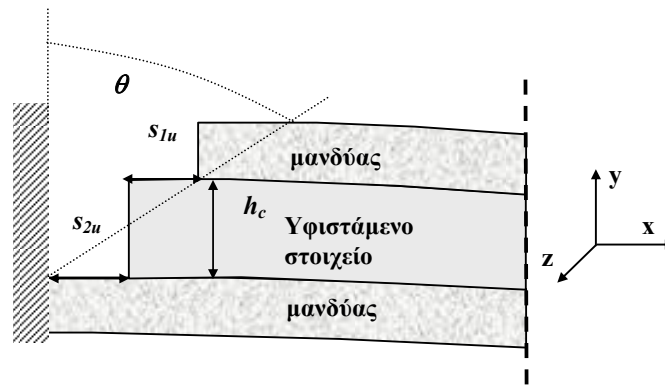
όπου  $\varphi_{y,J}$  και  $\varphi_{u,J}$  είναι η καμπυλότητα διαρροής και αστοχίας του σύνθετου στοιχείου, αντίστοιχα,  $L_{b,y}$  και  $L_{b,u}$  το μήκος αγκύρωσης στη διαρροή και αστοχία, αντίστοιχα,  $L_V$  είναι το άνοιγμα διάτμησης του στοιχείου,  $d_b$  η διάμετρος του διαμήκου οπλισμού,  $f_y$ ,  $f_u$  η αντοχή

διαρροής και η μέγιστη αντοχή του χάλυβα, αντίστοιχα,  $f_{by}$ ,  $f_{bu}$  η τάση συνάφειας στη διαρροή και στο μέγιστο, αντίστοιχα,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_u$  η παραμόρφωση διαρροής και η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα, αντίστοιχα, και  $E'$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του μετελαστικού κλάδου.

- Μέγιστη στροφή λόγω ολίσθησης διεπιφανειών,  $\theta_{u,J}^{inter.slip}$

$$\theta_{u,J}^{inter.slip} = \frac{(s_{1u} + s_{2u})}{h_c} \quad (3.2.5)$$

όπου  $s_{1u}$ ,  $s_{2u}$  είναι οι τιμές ολίσθησης στην άνω και κάτω διεπιφάνεια, αντίστοιχα, και  $h_c$  είναι το ύψος του πυρήνα της σύνθετης διατομής (Σχήμα 3.2.1). Για τον υπολογισμό της στροφής διαρροής λόγω ολίσθησης των διεπιφανειών,  $\theta_{y,J}^{inter.slip}$ , η εξίσωση είναι ίδια με την Εξ. (3.2.4), απλώς στη θέση των τιμών ολίσθησης άνω και κάτω διεπιφάνειας εισάγονται οι αντίστοιχες τιμές στο στάδιο διαρροής της σύνθετης διατομής.



**Σχήμα 3.2.1:** Στροφή στοιχείου Ο/Σ ενισχυμένου με μανδύα Ο/Σ εξαιτίας της ολίσθησης των διεπιφανειών.

Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση της απόκρισης στοιχείου Ο/Σ ενισχυμένου με μανδύα Ο/Σ, που έχει υπολογιστεί με βάση τη μονολιθική θεώρηση και με βάση το αναλυτικό προσομοίωμα, εισάγεται η έννοια της ισοδύναμης μονολιθικής καμπυλότητας,  $\varphi_{u,M}^{eq}$ , η οποία υπολογίζεται υποθέτοντας ίσες μετακινήσεις αστοχίας για την περίπτωση της μονολιθικής και της αναλυτικής προσέγγισης. Επομένως:

$$\varphi_{u,M}^{eq} = \frac{\left[ \theta_{u,J} - \frac{\varphi_{y,M} L_V}{3} - \frac{\varphi_{y,M} L_{b,y}}{2} + \frac{\varphi_{y,M} L_{SP} (L_V - 0.5L_{SP})}{L_V} + \frac{\varphi_{y,M} (f_u - f_y) L_{b,u}}{f_u} \right]}{\left[ \frac{L_{SP} (L_V - 0.5L_{SP})}{L_V} + \frac{(f_u - f_y) L_{b,u}}{f_u} \right]} \quad (3.2.6)$$

όπου  $\theta_{u,J}$  η μέγιστη στροφή του σύνθετου στοιχείου,  $\varphi_{y,M}$  η καμπυλότητα διαρροής του μονολιθικού στοιχείου,  $L_V$  το διαμητικό άνοιγμα του στοιχείου,  $L_{SP}$  το μήκος της πλαστικής άρθρωσης,  $L_{b,y}$  και  $L_{b,u}$  το μήκος αγκύρωσης στη διαρροή και αστοχία, αντίστοιχα, και  $f_y$ ,  $f_u$  η αντοχή διαρροής και η μέγιστη αντοχή του χάλυβα, αντίστοιχα.

### 3.2.3 Ορισμός συντελεστών μονολιθικότητας

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, οι ορισμοί που υιοθετούνται για τους συντελεστές μονολιθικότητας, αφορούν σε δείκτες παραμορφωσιμότητας και αντοχής σύμφωνα με τους ορισμούς της §8.2.1.5 του ΚΑΝΕΠΕ (2011) και της §A.4.2.2 του EC8-Part 3 (2005). Οι τιμές που ορίζονται από τους δυο αυτούς κανονισμούς δίνονται στον Πίνακα 3.1.2.

#### - Συντελεστές μονολιθικότητας για δείκτες **παραμορφωσιμότητας**

Σε επίπεδο στοιχείου ορίζονται οι συντελεστές μονολιθικότητας για τη στροφή διαρροής και τη μέγιστη στροφή (J: μανδουωμένο στοιχείο, M: μονολιθικό στοιχείο):

$$\text{Διαρροή: } K_{\theta y} = \frac{\theta_{y,J}}{\theta_{y,M}}; \text{ Μέγιστη: } K_{\theta u} = \frac{\theta_{u,J}}{\theta_{u,M}} \quad (3.2.7)$$

#### - Συντελεστές μονολιθικότητας για δείκτες **αντοχής**

$$\text{Μέγιστη αντοχή: } K_v = \frac{V_{J,\max}}{V_{M,\max}} \quad (3.2.8)$$

$$\text{Ροπή διαρροής: } K_{M_y} = \frac{M_{y,J}}{M_{y,M}} \quad (3.2.9)$$

#### - Συντελεστές μονολιθικότητας για δείκτες **δυσκαμψίας**

$$\text{Μέγιστη αντοχή: } K_k = \frac{K_{y,J}}{K_{y,M}} \quad (3.2.10)$$

όπου  $\theta_{y,J}$ ,  $\theta_{y,M}$  η στροφή διαρροής της σύνθετης (μανδουωμένης) διατομής και της “ίδιας” μονολιθικής διατομής,  $\theta_{u,J}$ ,  $\theta_{u,M}$  η στροφή αστοχίας της σύνθετης διατομής και της “ίδιας” μονολιθικής διατομής,  $V_{J,\max}$ ,  $V_{M,\max}$ , η μέγιστη αντοχή της σύνθετης διατομής και της “ίδιας” μονολιθικής διατομής,  $M_{y,J}$ ,  $M_{y,M}$  η ροπή διαρροής της σύνθετης διατομής και της “ίδιας” μονολιθικής διατομής και  $K_{y,J}$ ,  $K_{y,M}$  η δυσκαμψία διαρροής της σύνθετης διατομής και της “ίδιας” μονολιθικής διατομής. Η δυσκαμψία διαρροής ορίζεται ως ο λόγος της ροπής διαρροής προς την καμπυλότητα διαρροής ( $K_{y,J}=M_{y,J}/\varphi_{y,J}$ ,  $K_{y,M}=M_{y,M}/\varphi_{y,M}$ ).

Επισημαίνεται ότι η προσεγγιστική διαδικασία σχεδιασμού μανδουωμένων διατομών με τη χρήση των συντελεστών μονολιθικότητας και οι τιμές που προτείνονται από τον ΚΑΝΕΠΕ (βλ. Πίνακα 3.1.2) ισχύουν υπό δύο προϋθέσεις που θέτει ο κανονισμός. Μια από αυτές αφορά στον περιορισμό η επιδιωκόμενη αύξηση της αντοχής της διατομής να μην υπερβαίνει το διπλάσιο της αρχικής. Σε συνήθη οικοδομικά έργα και με βάση κατασκευαστικούς περιορισμούς, αλλά και κανονιστικούς περιορισμούς για τα ελάχιστα ποσοστά διαμήκους οπλισμού, τίθεται ένα ελάχιστο πάχος μανδύα περί τα 70 mm, καθώς και ένα ελάχιστο ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του μανδύα, αλλά και ολόκληρης της σύνθετης διατομής 1%. Με αυτά ως δεδομένα, η αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου ξεπερνάει κατά πολύ το διπλάσιο της αρχικής αντοχής. Άρα, οι υπολογιζόμενοι και στο πλαίσιο του παρόντος έργου

συντελεστές κατά κανόνα δεν εμπίπτουν στην περιοχή τιμών αύξησης αντοχής που προσδιορίζει ο ΚΑΝΕΠΕ. Επισημαίνεται εδώ ότι στον EC8-Part 3 (2005) δεν υφίσταται ο προαναφερθείς περιορισμός στην αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου.

### **3.2.4 Βιβλιογραφία Π.Ε. 3.2**

Eurocode 8-Part 3 (2005). "Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings." EN 1998-3:2005(E), European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

*fib* Bulletin 24 (2003). "Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings." *State of the art report, federation internationale du béton (fib)*, Lausanne Switzerland, 312.

ΚΑΝΕΠΕ (2011). "Κανονισμός Επεμβάσεων." Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Τελικό Κείμενο, Σεπτέμβριος 2011.

### **Πακέτο Εργασίας 3.3 (Παραμετρική διερεύνηση και συντελεστές μονολιθικότητας)**

#### **3.3.1 Εισαγωγή**

Στην παρούσα ενότητα του έργου διενεργήθηκε συστηματική παραμετρική διερεύνηση με βάση το αναλυτικό προσομοίωμα (εκτεταμένη περιγραφή του έγινε στο Π.Ε. 1.1) προκειμένου να διαπιστωθεί η ευαισθησία των προτεινόμενων συντελεστών μονολιθικότητας (βλ. §3.2.3) στις παραμέτρους σχεδιασμού του μανδύα και στα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος. Οι τιμές που προέκυψαν για τους συντελεστές μονολιθικότητας χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων. Επιπλέον, τα δεδομένα από την επεξεργασία της πειραματικής βάσης (Ενότητα 1.2, § 1.2.4) χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των πειραματικών τιμών των συντελεστών μονολιθικότητας, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν τόσο για σύγκριση με τις προτεινόμενες τιμές των κανονισμών (ΚΑΝΕΠΕ 2011, EC8-Μέρος 3 2005) όσο και με τις προτεινόμενες εκφράσεις για τους συντελεστές μονολιθικότητας.

#### **3.3.2 Περιγραφή παραμετρικής διερεύνησης**

Η παραμετρική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για τετραγωνική και ορθογωνική διατομή πυρήνα διαστάσεων 250x250 mm και 300x400 mm, αντίστοιχα. Οι λεπτομέρειες όπλισης, οι ποσότητες διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού, καθώς και τα χαρακτηριστικά των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι αντιπροσωπευτικά της πρακτικής που διέπεται από την παλιότερη γενιά κανονισμών και συγκεκριμένα των δεκαετιών '60-'70. Επομένως, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού ήταν  $\rho_c=1\%$  και οι συνδετήρες  $\varnothing 6/300$ . Για το διαμήκη οπλισμό του πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν δυο ποιότητες, λείου χάλυβα St I και χάλυβα με νευρώσεις St III, ενώ για τους συνδετήρες σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε λείος χάλυβας ποιότητας St I. Για το σκυρόδεμα του πυρήνα επιλέχθηκαν οι κατηγορίες B160, B225 (παλαιοί κανονισμοί) και C20/25 (περίπου B300 παλαιών κανονισμών). Καθορίστηκαν τρία πάχη μανδύα, 75, 100 και 125 mm. Το ποσοστό οπλισμού του μανδύα ( $\rho_s=A_s/(b_s h_s - b_c h_c)$ ) κυμάνθηκε μεταξύ 1% και 4%, ενώ οι συνδετήρες που τοποθετήθηκαν ήταν  $\varnothing 8/200$ . Μια ακόμη παράμετρος που διερευνήθηκε ήταν το ανηγμένο αξονικό φορτίο, που στην παρούσα έρευνα θεωρήθηκε ότι ασκείται σε όλη τη διατομή και κυμάνθηκε από 0 ως 30%. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επιρροή της ποσότητας των βλήτρων ως μέσο σύνδεσης υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα. Τα υλικά κατασκευής του μανδύα ήταν νευροχάλυβας κατηγορίας B500C και σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και C50/60.

Η αύξηση του πάχους του μανδύα οδηγεί πάντα σε μείωση του λόγου διάτμησης. Στην περίπτωση της τετραγωνικής και της ορθογωνικής διατομής της παραμετρικής μελέτης το στοιχείο συνεχίζει να έχει προεξάρχουσα καμπτική λειτουργία με μείωση του λόγου από 6 σε 3 (για μέγιστο πάχος μανδύα 125 mm) και από 3.8 σε 2.7 (για πάχος μανδύα 75 mm), αντίστοιχα. Δεν μελετάται εδώ η περίπτωση κοντών (πριν ή μετά την επέμβαση) υποστυλωμάτων.

**Πίνακας 3.3.1** Διακύμανση παραμέτρων προς διερεύνηση.

Πάχος μανδύα (mm)	75, 100, 125
Ποσοστό διαμήκους οπλισμού μανδύα ( $\rho_J = A_J / (b_J h_J - b_c h_c)$ ), %)	1, 2, 3, 4
Ανηγμένο αξονικό φορτίο ( $v^* = N / [(b_J \cdot h_J - b_c \cdot h_c) \cdot f_{c,J} + b_c \cdot h_c \cdot f_{c,c}]$ ), %)	0, 10, 20, 30

### 3.3.3 Ορισμός σημείου διαρροής και αστοχίας

Το αναλυτικό προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή καμπυλών απόκρισης υπό τη μορφή διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων ( $M - \varphi$ ) σε μονότονη φόρτιση με ή χωρίς την παρουσία ολίσθησης στη διεπιφάνεια μεταξύ υφιστάμενης διατομής και μανδύα. Οι πολυγραμμικές καμπύλες  $M - \varphi$  μετετράπησαν σε διγραμμικές κάνοντας χρήση του προγράμματος Bilin (Παναγόπουλος και Κάππος 2009), το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Κατασκευών Ο/Σ και Φέρουσας Τοιχοποιίας του ΑΠΘ. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία θεωρείται ότι για συγκεκριμένη πτώση της μέγιστης αντοχής που μπορεί να ορισθεί από τον χρήστη θα πρέπει να ισχύει ο κανόνας των ίσων εμβαδών μεταξύ πραγματικού και διγραμμικού διαγράμματος (ίση απορρόφηση ενέργειας), καθώς και ότι η κλίση του ελαστικού κλάδου ορίζεται από το σημείο της αρχής των αξόνων και το σημείο στο οποίο η αντοχή είναι ίση με το 60% της δύναμης διαρροής  $V_y$  (Σχήμα 1.2.3). Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία των αναλυτικών καμπυλών ήσαν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της βάσης, δηλαδή: (i) πτώση της μέγιστης αντοχής κατά 80%, (ii) να υπάρχει κράτυνση στο μετελαστικό κλάδο και (iii) περιορισμός της κλίσης του μετελαστικού κλάδου μεταξύ 0 και 10%.

Οι διγραμμικές καμπύλες καθόρισαν το σημείο διαρροής, ενώ το σημείο αστοχίας καθορίστηκε για τη μεν μονολιθική απόκριση ως το σημείο εκείνο στο οποίο η θλιπτική τάση του περισφιγμένου σκυροδέματος φτάνει σε στάθμη  $0.85f_c$ , ενώ για την περίπτωση της απόκρισης της σύνθετης διατομής με ολίσθηση το σημείο στο οποίο είτε η άνω είτε η κάτω διεπιφάνεια φτάνει πρώτη σε τιμή ολίσθησης 2 mm. Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται ότι υιοθετήθηκε ως μέγιστη τιμή ολίσθησης αυτή των 2 mm σύμφωνα με τους Tassios & Vintzēleou (1987), Vintzēleou & Tassios (1986, 1987) και όχι το 1 mm που ορίζει ο ΚΑΝΕΠΕ (2011) για ταυτόχρονη δράση τριβής και βλήτρου, το οποίο κρίνεται ιδιαίτερα συντηρητικό (βεβαίως, οι κανονισμοί τείνουν, ευλόγως, να υιοθετούν συντηρητικές τιμές).

Οι τιμές καμπυλότητας στις θέσεις διαρροής και αστοχίας μετετράπησαν σε τιμές στροφής ακολουθώντας τη διαδικασία της παραγράφου 3.2.2. Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης μονολιθικής καμπυλότητας,  $\varphi_{u,M}^{eq}$ , η οποία υπολογίζεται υποθέτοντας ίσες μετακινήσεις αστοχίας για την περίπτωση της μονολιθικής συμπεριφοράς και της αναλυτικής προσέγγισης (βλ. Εξ. (3.2.5)) χρησιμοποιήθηκε ως τιμή μετακίνησης η στροφή αστοχίας της σύνθετης διατομής με ολίσθηση.

### 3.3.4 Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συνολικά 8 ομάδων σύνθετων στοιχείων ενισχυμένων με μανδύα. Οι ομάδες 1-7 έχουν διατομή πυρήνα τετραγωνική 250x250 mm, ενώ η 8<sup>η</sup> ομάδα διαφοροποιείται με ορθογωνική διατομή πυρήνα διαστάσεων 300x400 mm. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης υπό μορφή διαγραμμάτων, όπου ο άξονας των τετμημένων αντιστοιχεί στο ανηγμένο αξονικό



φορτίο, ενώ οι τεταγμένες στο συντελεστή μονολιθικότητας που διερευνάται κάθε φορά συναρτήσει του ανηγμένου ποσοστού του διαμήκους οπλισμού του μανδύα.

Η διακύμανση των παραμέτρων μελέτης για τις 8 ομάδες διερευνήσεων παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3.2.

**Πίνακας 3.3.2** Διαμόρφωση ομάδων παραμετρικής διερεύνησης.

Παράμετροι	Ομάδες παραμετρικής					
	1η	2η	3η	4η	5η	6η
B160 ( $f_{cm}=10$ MPa)	√					
B225 ( $f_{cm}=16$ MPa)		√	√			√
C20/25( $f_{cm}=28$ MPa)				√	√	
C25/30 ( $f_{cm}=33$ MPa)	√	√		√		
C50/60 ( $f_{cm}=58$ MPa)			√		√	√
St I ( $f_{ym}=250$ MPa)	√	√	√	√	√	√
St III ( $f_{ym}=480$ MPa)		√	√	√	√	√
B500C ( $f_y=500$ MPa)	√	√	√	√	√	√
$\rho_{j^*}=1\%\sim 2\%$				√	√	
$\rho_{j^*}=1\%\sim 4\%$	√	√	√			√
$\rho_s=0, 0.12\%, 0.24\%$		√				
$t_j=75$ mm	√	√	√	√	√	√
$t_j=100$ mm		√				
$t_j=125$ mm		√				

### **1<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων:**

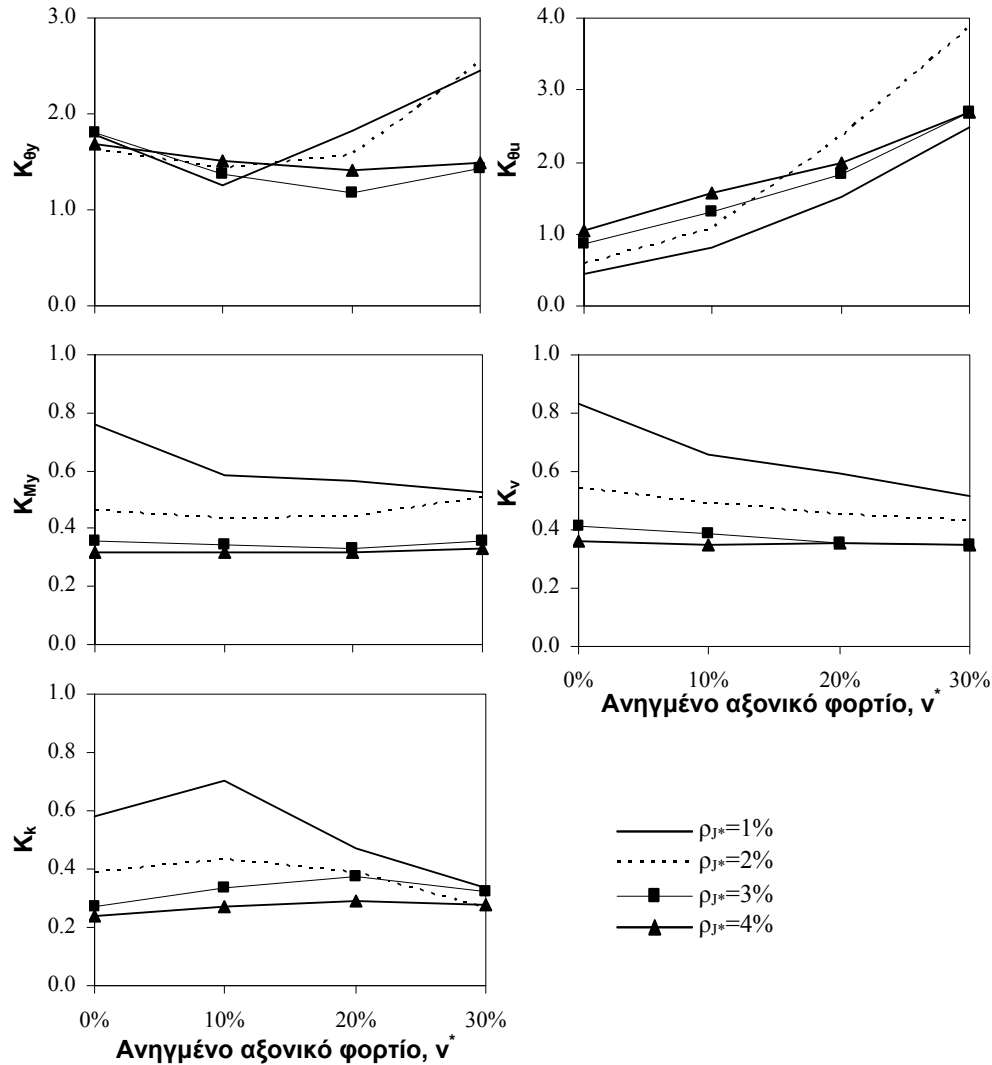
Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι περιπτώσεις με αρχική διατομή τετραγωνική 250x250 mm και πάχος μανδύα 75 mm. Η ποιότητα των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι B160 για το σκυρόδεμα και St I για το διαμήκη οπλισμό και τους συνδετήρες. Ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 και χάλυβα ποιότητας B500c. Με παραμέτρους μελέτης τη διακύμανση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του μανδύα διαμορφώθηκαν προς ανάλυση οι 16 περιπτώσεις που παρουσιάζονται λεπτομερώς στον Πίνακα 3.3.3.

Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις για τους συντελεστές μονολιθικότητας που περιγράφονται στην Ενότητα 3.2.3 παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.1, συναρτήσει του αξονικού φορτίου  $\nu^*$ . Παρατηρείται ότι το αξονικό φορτίο έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στην περίπτωση του συντελεστή  $K_{\theta w}$ , ενώ η επιρροή του ποσοστού οπλισμού  $\rho_{j^*}$  είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση των συντελεστών που σχετίζονται με την αντοχή ( $K_v, K_{My}$ ).

Πίνακας 3.3.3 Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 1<sup>ης</sup> ομάδας.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
S111	400	400	12.5	8	1.00%	0	0.99%
S112	400	400	12.5	8	1.00%	384.25	0.99%
S113	400	400	12.5	8	1.00%	768.5	0.99%
S114	400	400	12.5	8	1.00%	1152.75	0.99%
S121	400	400	17.6	8	2.00%	0	1.60%
S122	400	400	17.6	8	2.00%	384.25	1.60%
S123	400	400	17.6	8	2.00%	768.5	1.60%
S124	400	400	17.6	8	2.00%	1152.75	1.60%
S131	400	400	21.6	8	3.00%	0	2.21%
S132	400	400	21.6	8	3.00%	384.25	2.21%
S133	400	400	21.6	8	3.00%	768.5	2.21%
S134	400	400	21.6	8	3.00%	1152.75	2.21%
S141	400	400	20.3	12	4.00%	0	2.82%
S142	400	400	20.3	12	4.00%	384.25	2.82%
S143	400	400	20.3	12	4.00%	768.5	2.82%
S144	400	400	20.3	12	4.00%	1152.75	2.82%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.



Σχήμα 3.3.1: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 1<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων.

## 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων:

Στη δεύτερη ομάδα ανήκουν οι περιπτώσεις με αρχική διατομή τετραγωνική 250x250 mm και πάχη μανδύα 75 mm, 100 mm και 125 mm. Η ποιότητα των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι B225 για το σκυρόδεμα, St III για το διαμήκη οπλισμό και St I για τους συνδετήρες. Ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 και χάλυβα ποιότητας B500C. Επιπλέον, μελετήθηκε η επιρροή των βλήτρων στη διεπιφάνεια μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα για τις περιπτώσεις: (α) μηδενικού ποσοστού βλήτρων, (β) ελάχιστου ποσοστού βλήτρων σύμφωνα με ΚΑΝΕΠΕ (2011), §8.2.1.3β(v) ίσο με  $\rho_{\delta, \min} = 0.20 f_{ctm} / f_{yk} \geq 0.12\%$  (1Ø16/600 mm), και (γ) δυο φορές το ελάχιστο ποσοστό βλήτρων ίσο με  $\rho_{\delta} = 2\rho_{\delta, \min} = 0.24\%$  (1Ø16/300 mm). Με παραμέτρους μελέτης τη διακύμανση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του μανδύα και το ποσοστό των βλήτρων που τοποθετήθηκαν στη διεπιφάνεια διαμορφώθηκαν προς διερεύνηση οι 72 περιπτώσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7, 3.3.8.

Πίνακας 3.3.4 Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 2<sup>ης</sup> ομάδας για πάχος μανδύα 75 mm.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
S211	400	400	12.5	8	1.00%	0	0.99%
S212	400	400	12.5	8	1.00%	384.25	0.99%
S213	400	400	12.5	8	1.00%	768.5	0.99%
S214	400	400	12.5	8	1.00%	1152.75	0.99%
S221	400	400	17.6	8	2.00%	0	1.60%
S222	400	400	17.6	8	2.00%	384.25	1.60%
S223	400	400	17.6	8	2.00%	768.5	1.60%
S224	400	400	17.6	8	2.00%	1152.75	1.60%
S231	400	400	21.6	8	3.00%	0	2.21%
S232	400	400	21.6	8	3.00%	384.25	2.21%
S233	400	400	21.6	8	3.00%	768.5	2.21%
S234	400	400	21.6	8	3.00%	1152.75	2.21%
S241	400	400	20.3	12	4.00%	0	2.82%
S242	400	400	20.3	12	4.00%	384.25	2.82%
S243	400	400	20.3	12	4.00%	768.5	2.82%
S244	400	400	20.3	12	4.00%	1152.75	2.82%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

Πίνακας 3.3.5 Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 2<sup>ης</sup> ομάδας για πάχος μανδύα 100 mm, χωρίς βλήτρα στη διεπιφάνεια.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$	$\rho_\sigma$
M211	450	450	14.9	8	1.00%	0	1.00%	0.00%
M212	450	450	14.9	8	1.00%	786	1.00%	0.00%
M213	450	450	14.9	8	1.00%	1572	1.00%	0.00%
M214	450	450	14.9	8	1.00%	2358	1.00%	0.00%
M221	450	450	21.1	8	2.00%	0	1.69%	0.00%
M222	450	450	21.1	8	2.00%	786	1.69%	0.00%
M223	450	450	21.1	8	2.00%	1572	1.69%	0.00%
M224	450	450	21.1	8	2.00%	2358	1.69%	0.00%
M231	450	450	21.1	12	3.00%	0	2.38%	0.00%
M232	450	450	21.1	12	3.00%	786	2.38%	0.00%
M233	450	450	21.1	12	3.00%	1572	2.38%	0.00%
M234	450	450	21.1	12	3.00%	2358	2.38%	0.00%
M241	450	450	24.4	12	4.00%	0	3.07%	0.00%
M242	450	450	24.4	12	4.00%	786	3.07%	0.00%
M243	450	450	24.4	12	4.00%	1572	3.07%	0.00%
M244	450	450	24.4	12	4.00%	2358	3.07%	0.00%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

**Πίνακας 3.3.6** Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 2<sup>ης</sup> ομάδας για πάχος μανδύα 100 mm και χαμηλό ποσοστό ( $\rho_\delta$ ) οπλισμού βλήτρων.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$	$\rho_\delta$
M211-1	450	450	14.9	8	1.00%	0	1.00%	0.12%
M212-1	450	450	14.9	8	1.00%	786	1.00%	0.12%
M213-1	450	450	14.9	8	1.00%	1572	1.00%	0.12%
M214-1	450	450	14.9	8	1.00%	2358	1.00%	0.12%
M221-1	450	450	21.1	8	2.00%	0	1.69%	0.12%
M222-1	450	450	21.1	8	2.00%	786	1.69%	0.12%
M223-1	450	450	21.1	8	2.00%	1572	1.69%	0.12%
M224-1	450	450	21.1	8	2.00%	2358	1.69%	0.12%
M231-1	450	450	21.1	12	3.00%	0	2.38%	0.12%
M232-1	450	450	21.1	12	3.00%	786	2.38%	0.12%
M233-1	450	450	21.1	12	3.00%	1572	2.38%	0.12%
M234-1	450	450	21.1	12	3.00%	2358	2.38%	0.12%
M241-1	450	450	24.4	12	4.00%	0	3.07%	0.12%
M242-1	450	450	24.4	12	4.00%	786	3.07%	0.12%
M243-1	450	450	24.4	12	4.00%	1572	3.07%	0.12%
M244-1	450	450	24.4	12	4.00%	2358	3.07%	0.12%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

**Πίνακας 3.3.7** Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 2<sup>ης</sup> ομάδας για πάχος μανδύα 100 mm και υψηλότερο ποσοστό ( $\rho_\delta$ ) οπλισμού βλήτρων.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$	$\rho_\delta$
M211-2	450	450	14.9	8	1.00%	0	1.00%	0.24%
M212-2	450	450	14.9	8	1.00%	786	1.00%	0.24%
M213-2	450	450	14.9	8	1.00%	1572	1.00%	0.24%
M214-2	450	450	14.9	8	1.00%	2358	1.00%	0.24%
M221-2	450	450	21.1	8	2.00%	0	1.69%	0.24%
M222-2	450	450	21.1	8	2.00%	786	1.69%	0.24%
M223-2	450	450	21.1	8	2.00%	1572	1.69%	0.24%
M224-2	450	450	21.1	8	2.00%	2358	1.69%	0.24%
M231-2	450	450	21.1	12	3.00%	0	2.38%	0.24%
M232-2	450	450	21.1	12	3.00%	786	2.38%	0.24%
M233-2	450	450	21.1	12	3.00%	1572	2.38%	0.24%
M234-2	450	450	21.1	12	3.00%	2358	2.38%	0.24%
M241-2	450	450	24.4	12	4.00%	0	3.07%	0.24%
M242-2	450	450	24.4	12	4.00%	786	3.07%	0.24%
M243-2	450	450	24.4	12	4.00%	1572	3.07%	0.24%
M244-2	450	450	24.4	12	4.00%	2358	3.07%	0.24%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

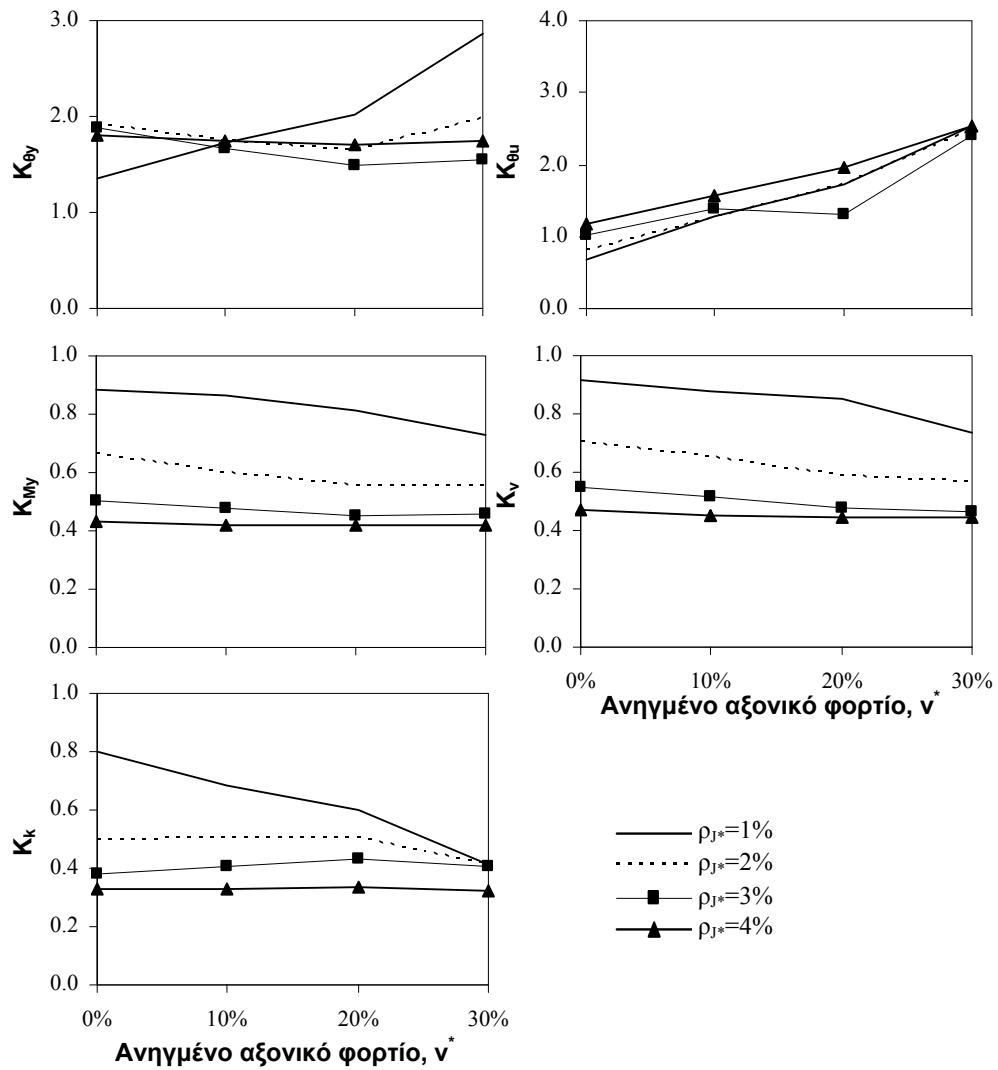
Πίνακας 3.3.8 Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 2ης ομάδας για πάχος μανδύα 125 mm.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
L211	500	500	17.3	8	1.00%	0	1.00%
L212	500	500	17.3	8	1.00%	942.75	1.00%
L213	500	500	17.3	8	1.00%	1885.5	1.00%
L214	500	500	17.3	8	1.00%	2828.25	1.00%
L221	500	500	24.4	8	2.00%	0	1.75%
L222	500	500	24.4	8	2.00%	942.75	1.75%
L223	500	500	24.4	8	2.00%	1885.5	1.75%
L224	500	500	24.4	8	2.00%	2828.25	1.75%
L231	500	500	24.4	12	3.00%	0	2.50%
L232	500	500	24.4	12	3.00%	942.75	2.50%
L233	500	500	24.4	12	3.00%	1885.5	2.50%
L234	500	500	24.4	12	3.00%	2828.25	2.50%
L241	500	500	24.4	16	4.00%	0	3.25%
L242	500	500	24.4	16	4.00%	942.75	3.25%
L243	500	500	24.4	16	4.00%	1885.5	3.25%
L244	500	500	24.4	16	4.00%	2828.25	3.25%

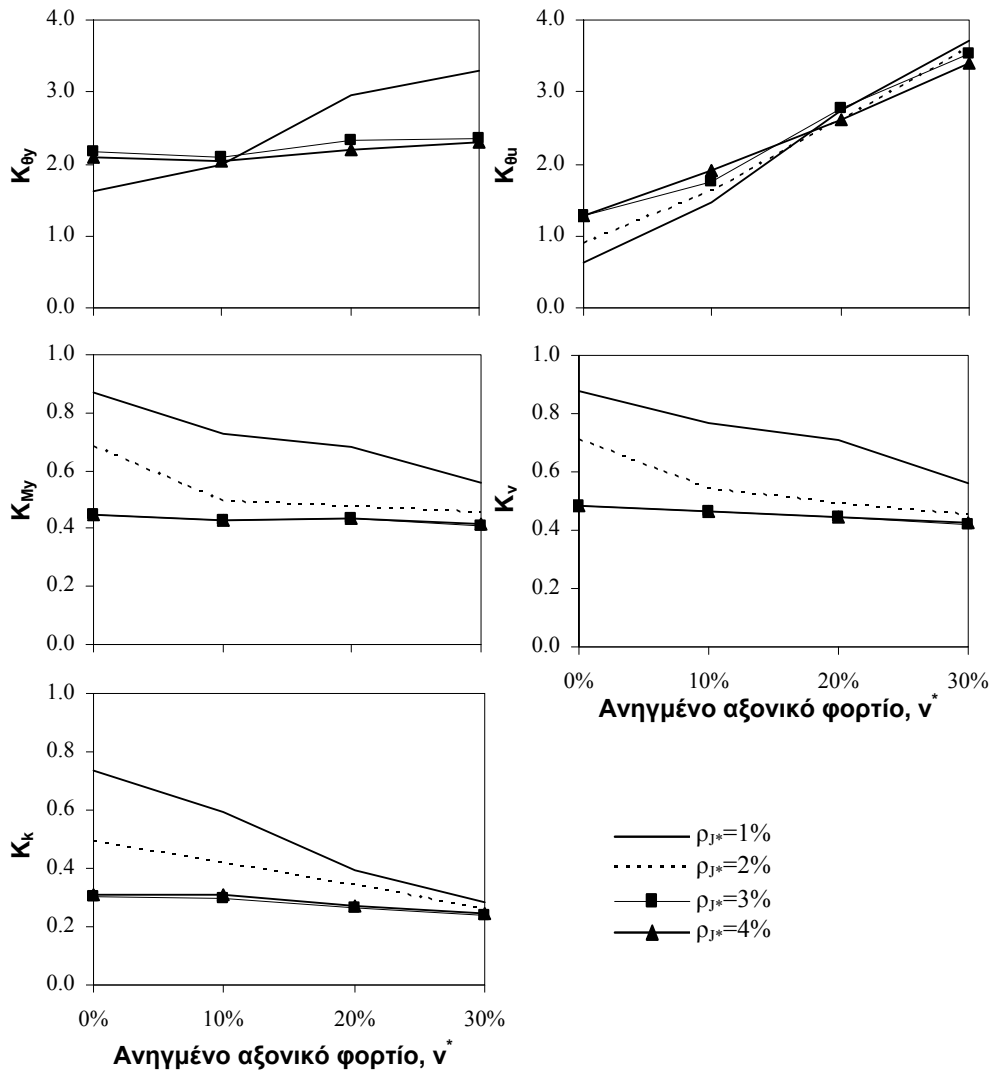
\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

Οι συντελεστές μονολιθικότητας που προκύπτουν από τις αναλύσεις για τις περιπτώσεις μανδύα πάχους 75 mm, 100 mm, 125 mm παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, και 3.3.5, αντίστοιχα (το Σχήμα 3.3.4 παρουσιάζεται με εποπτικότερη μορφή στο Παράρτημα 3.3 όπου διαχωρίζεται στο Σχήμα Π3.3.1 για  $\rho_{J^*}=1\%$ , 2% και στο Σχήμα Π3.3.2 για  $\rho_{J^*}=3\%$ , 4%).

Η επιρροή των βασικών παραμέτρων  $n$  και  $\rho_{J^*}$  είναι παρόμοια όπως και στην Ομάδα αναλύσεων 1, ενώ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.4, η πρόσθετη όπλιση της διεπιφάνειας με βλήτρα δεν έχει ιδιαίτερα μεγάλη επιρροή στην τιμή των  $K$ .

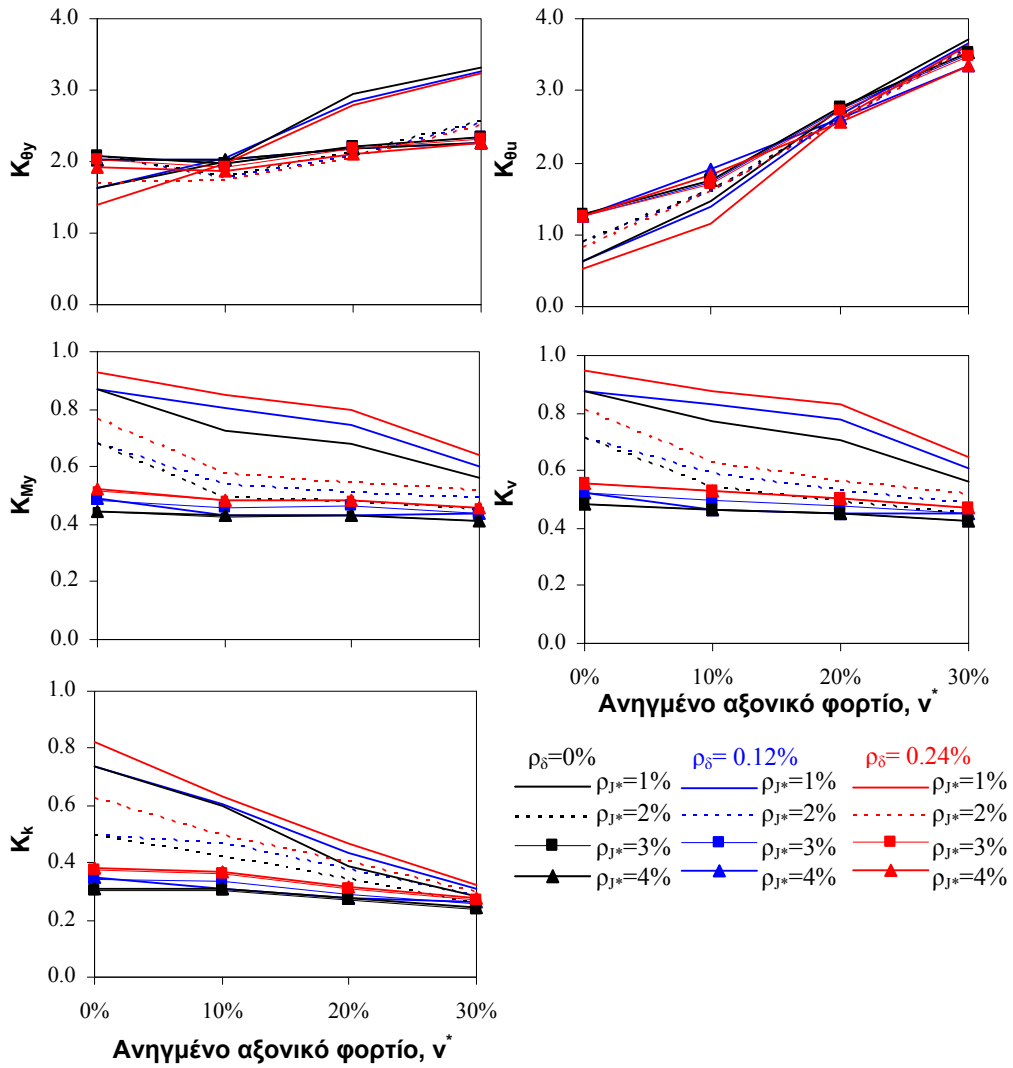


Σχήμα 3.3.2: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων με πάχος μανδύα 75 mm.

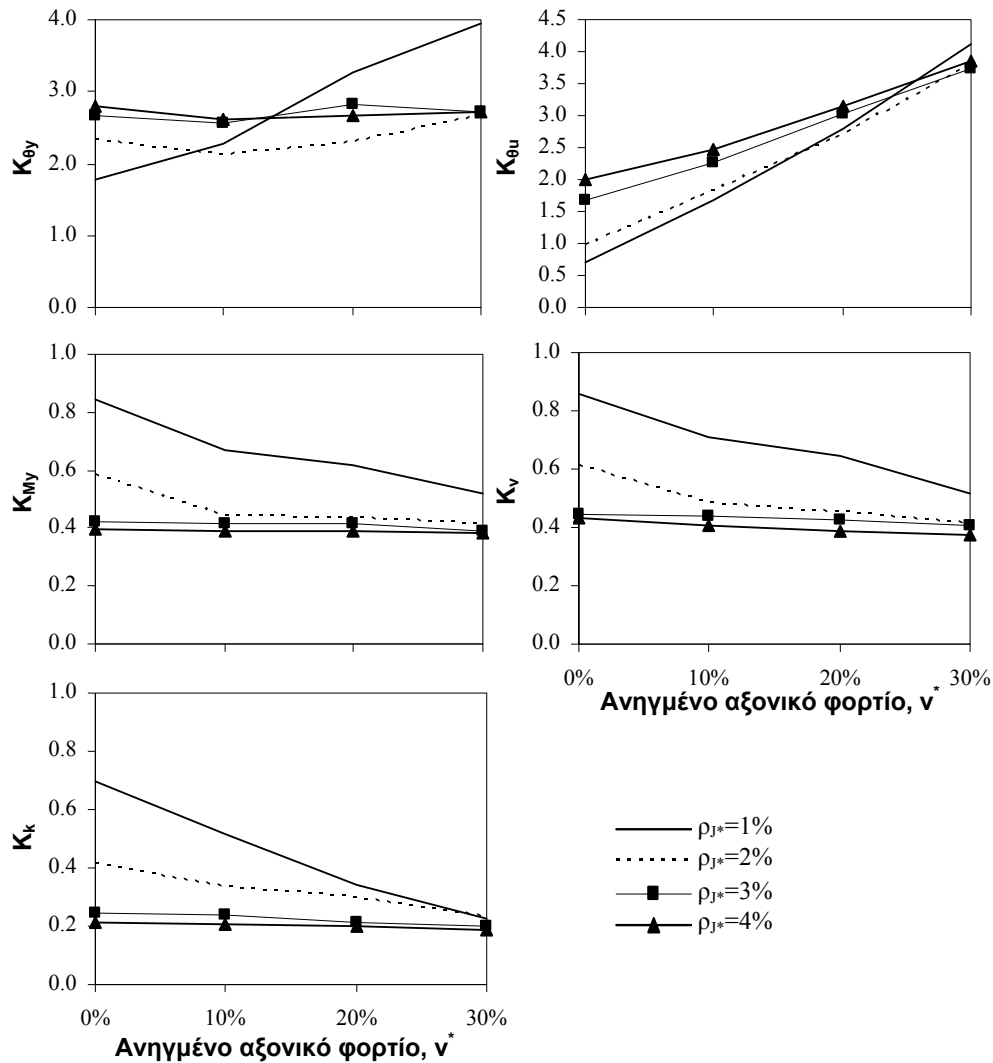


Σχήμα 3.3.3: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων με πάχος μανδύα 100 mm.





**Σχήμα 3.3.4:** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μονολιθικότητας για την 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων για πάχος μανδύα 100 mm, ανηγμένο ποσοστό βλήτρων, ρ<sub>δ</sub>: 0%, 0.12% και 0.24%.



Σχήμα 3.3.5: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων με πάχος μανδύα 125 mm.

### 3<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων:

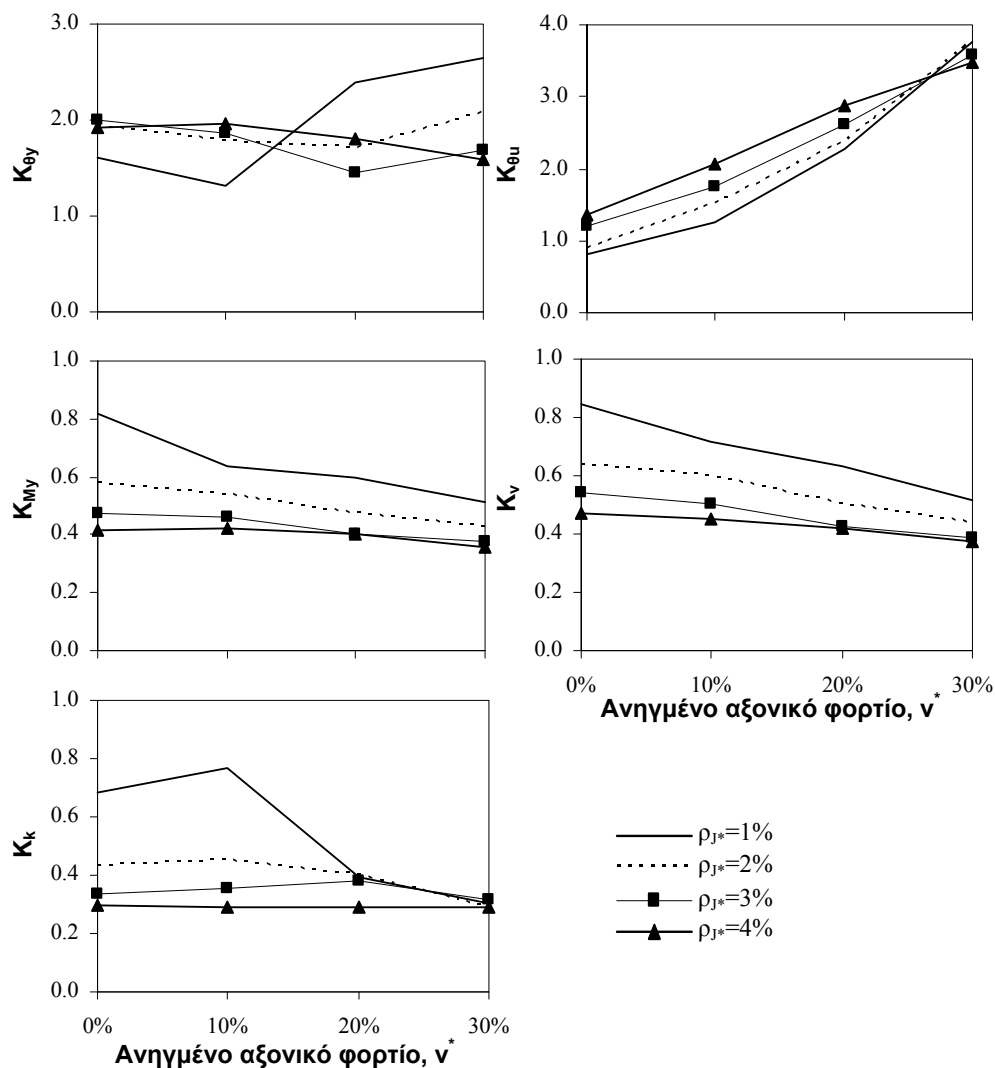
Η διαφοροποίηση των περιπτώσεων της 3<sup>ης</sup> ομάδας σε σχέση με αυτές της 2<sup>ης</sup> για πάχος μανδύα 75 έγκειται στην ποιότητα σκυροδέματος του μανδύα. Έτσι λοιπόν, η αρχική διατομή είναι τετραγωνική 250x250 mm και το πάχος του μανδύα 75 mm. Η ποιότητα των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι B225 για το σκυρόδεμα, St III για το διαμήκη σπλισμό και St I για τους συνδετήρες. Ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα ποιότητας C50/60 και χάλυβα ποιότητας B500c. Με παραμέτρους μελέτης τη διακύμανση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και το ποσοστό του διαμήκους σπλισμού του μανδύα διαμορφώθηκαν προς ανάλυση οι 16 περιπτώσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3.9.

Πίνακας 3.3.9 Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 3ης ομάδας.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
S311	400	400	12.5	8	1.00%	0	0.99%
S312	400	400	12.5	8	1.00%	665.5	0.99%
S313	400	400	12.5	8	1.00%	1331	0.99%
S314	400	400	12.5	8	1.00%	1996.5	0.99%
S321	400	400	17.6	8	2.00%	0	1.60%
S322	400	400	17.6	8	2.00%	665.5	1.60%
S323	400	400	17.6	8	2.00%	1331	1.60%
S324	400	400	17.6	8	2.00%	1996.5	1.60%
S331	400	400	21.6	8	3.00%	0	2.21%
S332	400	400	21.6	8	3.00%	665.5	2.21%
S333	400	400	21.6	8	3.00%	1331	2.21%
S334	400	400	21.6	8	3.00%	1996.5	2.21%
S341	400	400	20.3	12	4.00%	0	2.82%
S342	400	400	20.3	12	4.00%	665.5	2.82%
S343	400	400	20.3	12	4.00%	1331	2.82%
S344	400	400	20.3	12	4.00%	1996.5	2.82%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη σπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

Οι συντελεστές μονολιθικότητας που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.6. Ισχύουν οι ήδη αναφερθείσες παρατηρήσεις σχετικά με την επιρροή των βασικών παραμέτρων.



Σχήμα 3.3.6: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 3<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων.

#### 4<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων:

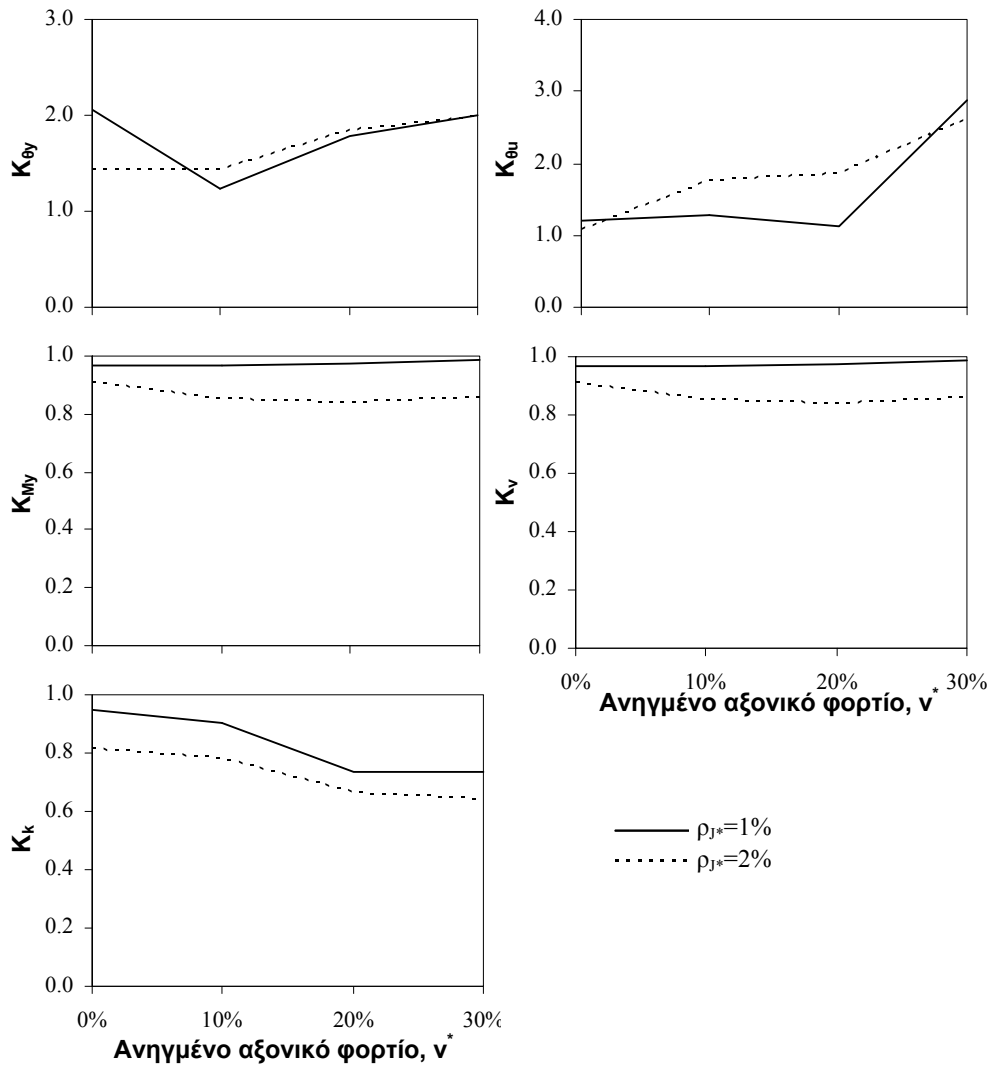
Στην 4<sup>η</sup> ομάδα διερευνάται η ευαισθησία των συντελεστών μονολιθικότητας στην περίπτωση υψηλότερης θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος πυρήνα σε σχέση με τις περιπτώσεις μελέτης των ομάδων 1, 2 και 3. Η αρχική διατομή είναι τετραγωνική 250x250 mm και το πάχος του μανδύα 75 mm. Η ποιότητα των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι C20/25 ( $\approx$ B300) για το σκυρόδεμα, St III για το διαμήκη σπλισμό και St I για τους συνδετήρες. Ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 και χάλυβα ποιότητας B500c. Με παραμέτρους μελέτης τη διακύμανση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και το ποσοστό του διαμήκους σπλισμού του μανδύα να κυμαίνεται μεταξύ 1% και 2% διαμορφώθηκαν προς ανάλυση οι 8 περιπτώσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3.10.

Οι συντελεστές μονολιθικότητας που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.7.

**Πίνακας 3.3.10** Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 4<sup>ης</sup> ομάδας.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^{\infty}$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
S811	400	400	12.5	8	1.00%	0	0.99%
S812	400	400	12.5	8	1.00%	496.75	0.99%
S813	400	400	12.5	8	1.00%	993.5	0.99%
S814	400	400	12.5	8	1.00%	1490.25	0.99%
S821	400	400	17.6	8	2.00%	0	1.60%
S822	400	400	17.6	8	2.00%	496.75	1.60%
S823	400	400	17.6	8	2.00%	993.5	1.60%
S824	400	400	17.6	8	2.00%	1490.25	1.60%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.



**Σχήμα 3.3.7:** Συντελεστές μονολιθικότητας για την 4<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων.

**5<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων:**

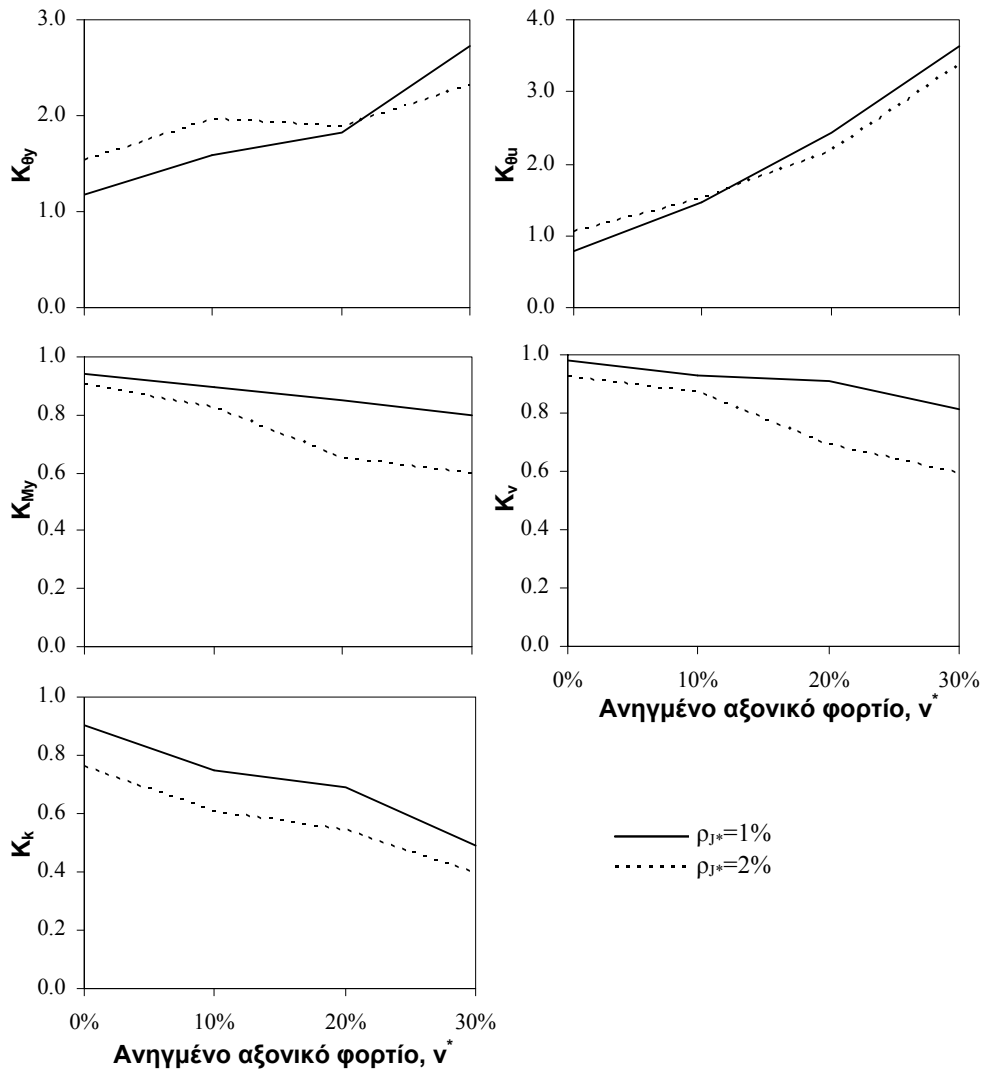
Οι περιπτώσεις της 5<sup>ης</sup> ομάδας διαφοροποιούνται από αυτές της 4<sup>ης</sup> ομάδας ως προς την αντοχή του σκυροδέματος του μανδύα. Η αρχική διατομή είναι τετραγωνική 250x250 mm και το πάχος του μανδύα 75 mm. Η ποιότητα των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι B300 για το σκυρόδεμα, St III για το διαμήκη οπλισμό και St I για τους συνδετήρες. Ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα ποιότητας C50/60 και χάλυβα ποιότητας B500c. Με παραμέτρους μελέτης τη διακύμανση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του μανδύα να κυμαίνεται μεταξύ 1% και 2% διαμορφώθηκαν προς ανάλυση οι 8 περιπτώσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3.11.

**Πίνακας 3.3.11** Περιγραφή περιπτώσεων μελέτης 5<sup>ης</sup> ομάδας.

Όνομασία	$b_j^*$	$h_j^*$	$d_{b,j}^*$	$n_j$	$\rho_{j^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
<b>S911</b>	400	400	12.5	8	1.00%	0	0.99%
<b>S912</b>	400	400	12.5	8	1.00%	740.5	0.99%
<b>S913</b>	400	400	12.5	8	1.00%	1481	0.99%
<b>S914</b>	400	400	12.5	8	1.00%	2221.5	0.99%
<b>S921</b>	400	400	17.6	8	2.00%	0	1.60%
<b>S922</b>	400	400	17.6	8	2.00%	740.5	1.60%
<b>S923</b>	400	400	17.6	8	2.00%	1481	1.60%
<b>S924</b>	400	400	17.6	8	2.00%	2221.5	1.60%

\*mm,  $d_{b,j}^*$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

Οι συντελεστές μονολιθικότητας που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.8.



Σχήμα 3.3.8: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 5<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων.

### 6<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων:

Στην 6<sup>η</sup> ομάδα ανήκουν οι περιπτώσεις μελέτης με διατομή πυρήνα *ορθογωνική*, διαστάσεων 300x400 mm και πάχος μανδύα 75 mm. Η ποιότητα των υλικών της υφιστάμενης διατομής είναι B225 για το σκυρόδεμα, St III για το διαμήκη σπλισμό και St I για τους συνδετήρες. Ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα ποιότητας C50/60 και χάλυβα ποιότητας B500c. Με παραμέτρους μελέτης τη διακύμανση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και το ποσοστό του διαμήκους σπλισμού του μανδύα να κυμαίνεται μεταξύ 1% και 4% διαμορφώθηκαν προς ανάλυση οι 16 περιπτώσεις που παρουσιάζονται διεξοδικά στον Πίνακα 3.3.12.



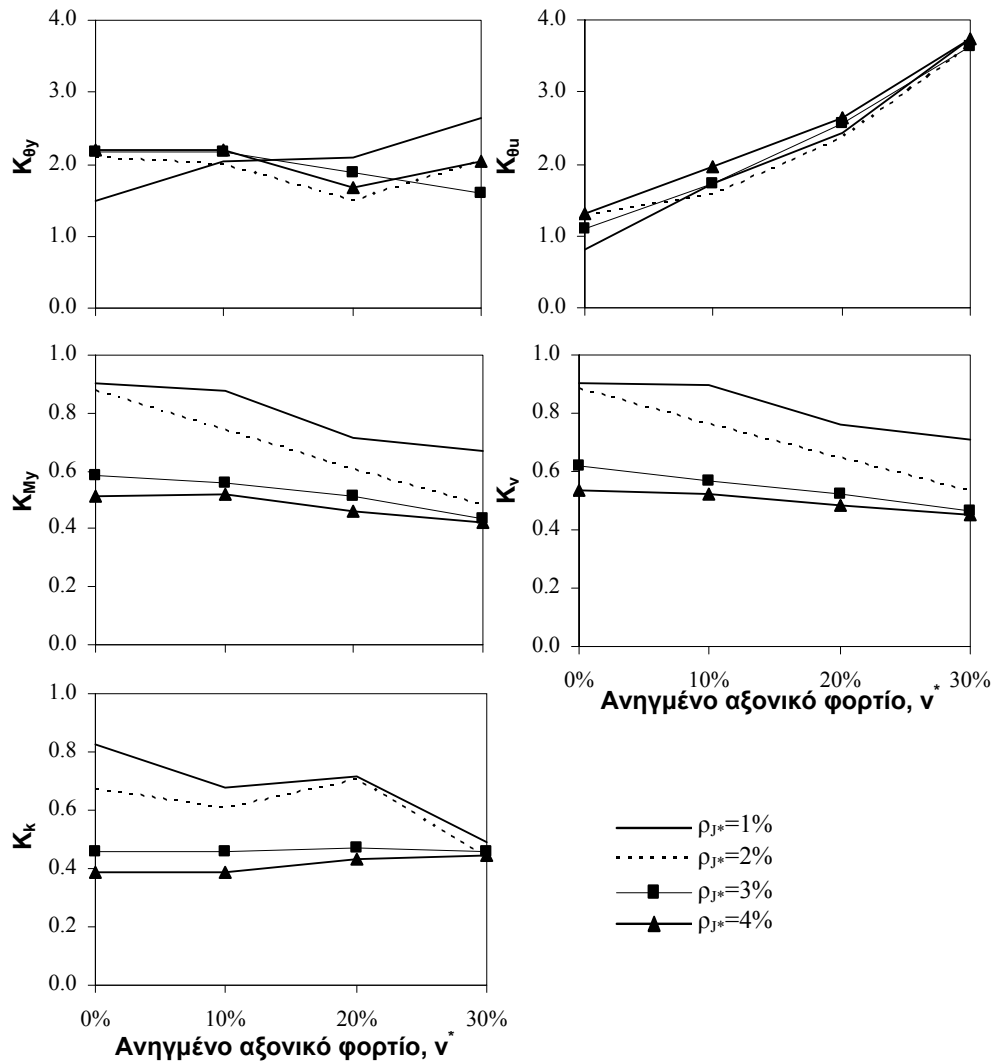


Πίνακας 3.3.12 Περιγραφή παραμετρικών αναλύσεων 6<sup>ης</sup> ομάδας.

Όνομασία	$b_J^*$	$h_J^*$	$d_{b,J}^*$	$n_J$	$\rho_{J^*}$	N (kN)	$\rho_{tot}$
S411	450	550	14.2	8	1.00%	0	1.01%
S412	450	550	14.2	8	1.00%	931.5	1.01%
S413	450	550	14.2	8	1.00%	1863	1.01%
S414	450	550	14.2	8	1.00%	2794.5	1.01%
S421	450	550	20.1	8	2.00%	0	1.53%
S422	450	550	20.1	8	2.00%	931.5	1.53%
S423	450	550	20.1	8	2.00%	1863	1.53%
S424	450	550	20.1	8	2.00%	2794.5	1.53%
S431	450	550	20.1	12	3.00%	0	2.04%
S432	450	550	20.1	12	3.00%	931.5	2.04%
S433	450	550	20.1	12	3.00%	1863	2.04%
S434	450	550	20.1	12	3.00%	2794.5	2.04%
S441	450	550	20.1	16	4.00%	0	2.56%
S442	450	550	20.1	16	4.00%	931.5	2.56%
S443	450	550	20.1	16	4.00%	1863	2.56%
S444	450	550	20.1	16	4.00%	2794.5	2.56%

\*mm,  $\infty$  καθορίστηκε από την απαίτηση του αντίστοιχου ποσοστού σε διαμήκη οπλισμό του μανδύα, ώστε να προκύπτει ακέραιος αριθμός ράβδων, συμμετρικά τοποθετημένων περιμετρικά της διατομής.

Οι συντελεστές μονολιθικότητας που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.9. Ισχύουν και εδώ οι ήδη αναφερθείσες παρατηρήσεις σχετικά με την επιρροή των βασικών παραμέτρων.



Σχήμα 3.3.9: Συντελεστές μονολιθικότητας για την 6<sup>η</sup> ομάδα μελέτης.

Οι αναλύσεις που διενεργήθηκαν για το σύνολο των προσομοιωμάτων της παραμετρικής μελέτης κατέδειξαν την ευαισθησία των συντελεστών μονολιθικότητας τόσο στα υλικά κατασκευής της υφιστάμενης διατομής (πυρήνα) και του μανδύα, όσο και στο ανηγμένο ποσοστό του διαμήκους σπλισμού του μανδύα για αυξανόμενο αξονικό φορτίο.

Συνοπτικά η διακύμανση των τιμών των συντελεστών μονολιθικότητας έχει ως εξής:

- Ομάδες 1-5: υφιστάμενη διατομή **τετραγωνική** διαστάσεων 250x250 mm, η οποία ενισχύεται με μανδύα πάχους **75 mm**.  $K_{\theta y}=1.17\sim 2.86$ ,  $K_{\theta u}=0.45\sim 1.87$ ,  $K_{My}=0.32\sim 0.99$ ,  $K_r=0.35\sim 1.02$  και  $K_k=0.24\sim 0.95$ .
- Ομάδα 2A: υφιστάμενη διατομή τετραγωνική διαστάσεων 250x250 mm, η οποία ενισχύεται με μανδύα πάχους **100 mm**. (i) χωρίς πρόσθετα βλήτρα:  $K_{\theta y}=1.63\sim 3.30$ ,

$K_{\theta u}=0.63\sim 3.71$ ,  $K_{My}=0.41\sim 0.87$ ,  $K_r=0.42\sim 0.88$  και  $K_k=0.24\sim 0.73$ , (ii) με τον ελάχιστο αριθμό βλήτρων σύμφωνα με ΚΑΝΕΠΕ (2011):  $K_{\theta y}=1.63\sim 4.85$ ,  $K_{\theta u}=0.72\sim 4.05$ ,  $K_{My}=0.43\sim 0.87$ ,  $K_r=0.45\sim 0.88$  και  $K_k=0.22\sim 0.73$ , (iii) με διπλάσιο αριθμό βλήτρων από τον ελάχιστο:  $K_{\theta y}=1.39\sim 4.81$ ,  $K_{\theta u}=0.53\sim 4.01$ ,  $K_{My}=0.48\sim 0.93$ ,  $K_r=0.50\sim 0.95$  και  $K_k=0.23\sim 0.82$

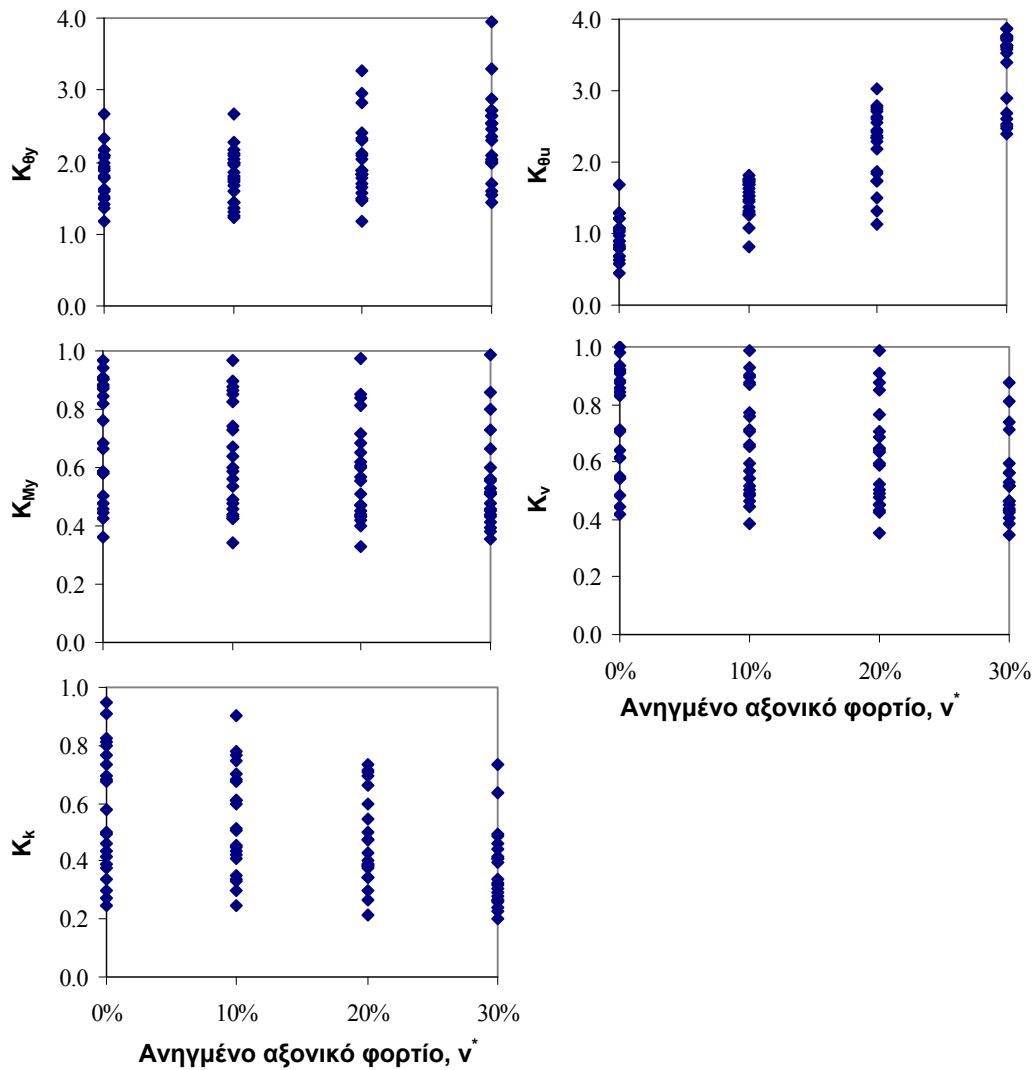
- Ομάδα 2B: υφιστάμενη διατομή τετραγωνική διαστάσεων 250x250 mm, η οποία ενισχύεται με μανδύα πάχους **125 mm**.  $K_{\theta y}=1.78\sim 3.94$ ,  $K_{\theta u}=0.69\sim 4.13$ ,  $K_{My}=0.39\sim 0.85$ ,  $K_r=0.37\sim 0.85$  και  $K_k=0.19\sim 0.70$ .
- Ομάδα 6: υφιστάμενη διατομή **ορθογωνική** διαστάσεων 300x400 mm και πάχος μανδύα 75 mm.  $K_{\theta y}=1.49\sim 2.64$ ,  $K_{\theta u}=0.81\sim 3.73$ ,  $K_{My}=0.42\sim 0.90$ ,  $K_r=0.45\sim 0.91$  και  $K_k=0.38\sim 0.82$ .

Οι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές για τους συντελεστές μονολιθικότητας που αφορούν σε μεγέθη αντοχής και δυσκαμψίας παρουσιάζονται για ανηγμένα ποσοστά διαμήκους οπλισμού μανδύα 3% και 4%, τα οποία δεν είναι συνήθη στην πράξη. Επιπλέον, ο ελάχιστος αριθμός βλήτρων στη διεπιφάνεια μεταξύ υφιστάμενου στοιχείου και μανδύα δεν έχει ορατή επιρροή, ενώ η επιρροή του διπλάσιου του ελαχίστου αριθμού βλήτρων είναι μικρή. Υπενθυμίζεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις δρουν ως βλήτρα οι συνδετήρες του μανδύα.

### **3.3.5 Αναλυτικές εκφράσεις για τους συντελεστές μονολιθικότητας δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

Στην Ενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια για την εξαγωγή εκφράσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας που αφορούν στους δείκτες απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ και που μελετήθηκαν στην παραμετρική διερεύνηση που διεξήχθη στις προηγούμενες ενότητες χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου. Η παραμετρική διερεύνηση κατέδειξε την ευαισθησία των συντελεστών μονολιθικότητας όχι μόνο στα χαρακτηριστικά του μανδύα (πάχος μανδύα,  $t_j$ , ποσοστό διαμήκους οπλισμού μανδύα,  $\rho_{j*}$ ), αλλά και στις ιδιότητες των υλικών κατασκευής τόσο του πυρήνα όσο και του μανδύα, καθώς και στο αξονικό φορτίο. Στο Σχήμα 3.3.10 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του συνόλου των παραμετρικών αναλύσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας που καθορίστηκαν στην Ενότητα 3.2.3. Όλες οι τιμές  $K$  στο σχήμα δίνονται συναρτήσει του ανηγμένου αξονικού φορτίου  $\nu^*$ , χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το  $\nu$  είναι πάντα η παράμετρος με την μεγαλύτερη επιρροή στο  $K$ .

Η εξαγωγή γενικευμένων εκφράσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας για το σύνολο των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν είναι δύσκολο εγχείρημα λόγω της μεγάλης διασποράς που παρατηρείται στις υπολογισθείσες τιμές (Σχήμα 3.3.10). Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε στην παρούσα έρευνα ήταν η εξαγωγή εκφράσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας βάσει των αποτελεσμάτων της 2<sup>ης</sup> Ομάδας παραμετρικών αναλύσεων. Υπενθυμίζεται ότι η ομάδα αυτή συγκεντρώνει την πλειονότητα των παραμέτρων που μελετήθηκαν, ενώ οι ιδιότητες των υλικών κατασκευής του πυρήνα και του μανδύα είναι οι πιο αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών.



**Σχήμα 3.3.10:** Συντελεστές μονολιθικότητας για το σύνολο των ομάδων παραμετρικών αναλύσεων.

Οι προτεινόμενες εκφράσεις για τους  $K$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.13, μαζί με τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης ( $R^2$ ). Για κάθε συντελεστή μονολιθικότητας και για τα τρία ποσοστά διαμήκους οπλισμού του μανδύα που μελετώνται,  $\rho_j=1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$  (το  $4\%$  δίνει τιμές πολύ κοντά στο ποσοστό  $3\%$  και επιπλέον είναι εξαιρετικά σπάνιο στην πράξη να εξαντληθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό) εξήχθησαν εκφράσεις συναρτήσεως του ανηγμένου αξονικού φορτίου,  $v^*$ , και του πάχους του μανδύα,  $t_j$ . Το ανηγμένο αξονικό φορτίο κυμάνθηκε μεταξύ  $0$  και  $30\%$ , ενώ τα πάχη του μανδύα που ελήφθησαν υπόψη ήταν  $75$  mm,  $100$  mm,  $125$  mm, με τα  $100$  mm να αντιπροσωπεύουν την πλέον συνήθη κατασκευαστική πρακτική.

Πίνακας 3.3.13 Προτεινόμενες εκφράσεις συντελεστών μονολιθικότητας.

$K_i$	$\rho_{J^*}$	Προτεινόμενες εκφράσεις
$K_{\theta_y}$	1%	$K_{\theta_y} = (0.0531t_J + 0.7899)v^* + 0.0085t_J + 0.66, R^2=96.3\%$
	2%	$K_{\theta_y} = (-0.0066t_J^2 + 1.3439t_J - 50.575)v^{*2} + (0.0151t_J - 5.0168)v^* + 0.0077t_J + 1.3356,$
	3%	$K_{\theta_y} = (0.0323t_J - 3.2045)v^* + 0.0161t_J + 0.5747, R^2=60\%$
$K_{\theta_u}$	1%	$K_{\theta_u} = (0.1091t_J - 1.605)v^* + 0.608, R^2=99.2\%$
	2%	$K_{\theta_u} = (0.07731t_J + 0.2677)v^* + 0.83, R^2=99.1\%$
	3%	$K_{\theta_u} = (0.16231t_J - 11.746)v^* + 1.5461, R^2=91.3\%$
$K_{M_y}$	1%	$K_{M_y} = (-0.0105t_J + 0.208)v^* - 0.0016t_J + 1.0153, R^2=94.6\%$
	2%	$K_{M_y} = (-0.0025t_J - 0.278)v^* - 0.0021t_J + 0.8217, R^2=77.03\%$
	3%	$K_{M_y} = (-0.0018t_J + 0.0544)v^* + 0.0015t_J + 0.3102, R^2=77.15\%$
$K_r$	1%	$K_r = (-0.0105t_J + 0.173)v^* - 0.0017t_J + 1.0544, R^2=94.8\%$
	2%	$K_r = (-0.0032t_J - 0.3341)v^* - 0.0023t_J + 0.8801, R^2=91.6\%$
	3%	$K_r = (-0.0032t_J - 0.518)v^* - 0.002t_J + 0.6886, R^2=97.1\%$
$K_k$	1%	$K_k = (-0.0069t_J - 0.7724)v^* - 0.0026t_J + 0.9983, R^2=98.3\%$
	2%	$K_k = (-0.0064t_J - 0.1034)v^* - 0.0022t_J + 0.6966, R^2=85.2\%$
	3%	$K_k = (-0.0052t_J + 0.432)v^* - 0.0028t_J + 0.5982, R^2=75.8\%$

$R^2$ : coefficient of determination (συντελεστής συσχέτισης)

Στην περίπτωση όπου ληφθεί πάχος του μανδύα 100 mm και ποσοστό του διαμήκους οπλισμού  $\rho_{J^*}=1\%$ , τότε οι παραπάνω εκφράσεις απλοποιούνται σημαντικά και οδηγούν σε γραμμικές συναρτήσεις του ανηγμένου αξονικού φορτίου (σημειώνεται ότι το ανηγμένο αξονικό φορτίο είναι παράμετρος που εμπεριέχει τόσο τη γεωμετρία του μανδουωμένου στοιχείου όσο και την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του μανδύα):

$$K_{\theta_y} = 6.10 \cdot v^* + 1.51 \quad (3.3.1)$$

$$K_{\theta_u} = 9.31 \cdot v^* + 0.61 \quad (3.3.2)$$

$$K_{M_y} = -0.84 \cdot v^* + 0.86 \quad (3.3.3)$$

$$K_r = -0.88 \cdot v^* + 0.88 \quad (3.3.4)$$

$$K_k = -1.46 \cdot v^* + 0.74 \quad (3.3.5)$$

Σημειώνεται ότι η ανωτέρω περίπτωση δεν είναι μόνο η αντιπροσωπευτικότερη των συνήθων τιμών πάχους και οπλισμού μανδύα (σε πραγματικές επεμβάσεις, σε αντιδιαστολή με τα πειραματικά δοκίμια), αλλά και εκείνη που παρουσιάζει την υψηλότερη συσχέτιση με το νέφος τιμών των παραμετρικών αναλύσεων ( $R^2=0.95\pm 0.99$ ), γεγονός που συνηγορεί υπέρ της υιοθέτησης των σχέσεων αυτών (ενδεχομένως με κατάλληλη στρογγύλευση των εμπειρικών συντελεστών τους) σε μελλοντική έκδοση του ΚΑΝΕΠΕ. Το μόνο αντεπιχείρημα για υιοθέτηση σχέσεων που αντιστοιχούν σ' αυτά τα  $\rho_j$  και  $t_j$  είναι ότι δεν αποτελούν κάτω όριο για τους συντελεστές  $K$ . Βεβαίως, το γεγονός ότι οι συγκρίσεις με τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αναλυτική μέθοδος που χρησιμοποιείται εδώ είναι ενγένη συντηρητική (χαμηλότερα  $K$  από τα πειραματικά), αλλά και το γεγονός ότι οι ανωτέρω σχέσεις αντιστοιχούν σε αμελητέα επιρροή των πρόσθετων (πέραν των συνδετήρων του μανδύα) βλήτρων, εξισορροπούν το προαναφερθέν μειονέκτημα. Εν πάση περιπτώσει, για λόγους πληρότητας, παρατίθενται στη συνέχεια και οι αντίστοιχες σχέσεις για το δυσμενέστερο ποσοστό, δηλ.  $\rho_j=3\%$ :

$$K_{\theta y} = 0.03 \cdot v^* + 2.18 \quad (3.3.6)$$

$$K_{\theta u} = 4.49 \cdot v^* + 1.55 \quad (3.3.7)$$

$$K_{My} = -0.13 \cdot v^* + 0.46 \quad (3.3.8)$$

$$K_r = -0.84 \cdot v^* + 0.49 \quad (3.3.9)$$

$$K_k = -0.09 \cdot v^* + 0.32 \quad (3.3.10)$$

Πρόσθετες σχέσεις που αντιστοιχούν στην περίπτωση πάχους 75 mm που είναι η συνθηθέστερη στα πειραματικά προγράμματα δίνονται στην §3.3.7.

### **3.3.6 Πειραματικές τιμές για τους συντελεστές μονολιθικότητας δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ**

Τα δεδομένα από την επεξεργασία της πειραματικής βάσης της Ενότητας 1.2.4 βάσει των δυο εναλλακτικών μεθοδολογιών για τη μετατροπή των περιβαλλουσών των υστερητικών καμπυλών απόκρισης σε διγραμμικές καμπύλες (Πίνακες 1.2.4, 1.2.5, Παράρτημα Π.Ε. 1.2) χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τιμών για τους συντελεστές μονολιθικότητας που ορίζονται στην Ενότητα 3.2.3. Στην περαιτέρω επεξεργασία για τους συντελεστές μονολιθικότητας συμπεριλαμβάνονται εκείνες οι πειραματικές μελέτες στις οποίες είχε κατασκευαστεί μονολιθικά δοκίμιο ενισχυμένο με μανδύα. Στην επεξεργασία για τους συντελεστές μονολιθικότητας ο αριθμός των δοκιμίων που λήφθηκαν υπόψη ανέρχεται στα 37 από το σύνολο των 44 δοκιμίων της βάσης. Σημειώνεται ότι στην πειραματική μελέτη των Bousias et al. (2007a), το μονολιθικό δοκίμιο Q-RCM κατασκευάστηκε ώστε να έχει τις ίδιες διαστάσεις και τον οπλισμό του μανδουμένου στοιχείου χωρίς όμως τον οπλισμό της υφιστάμενης διατομής. Το δοκίμιο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τις συγκρίσεις και στην ομάδα Bousias et al. (2007b).

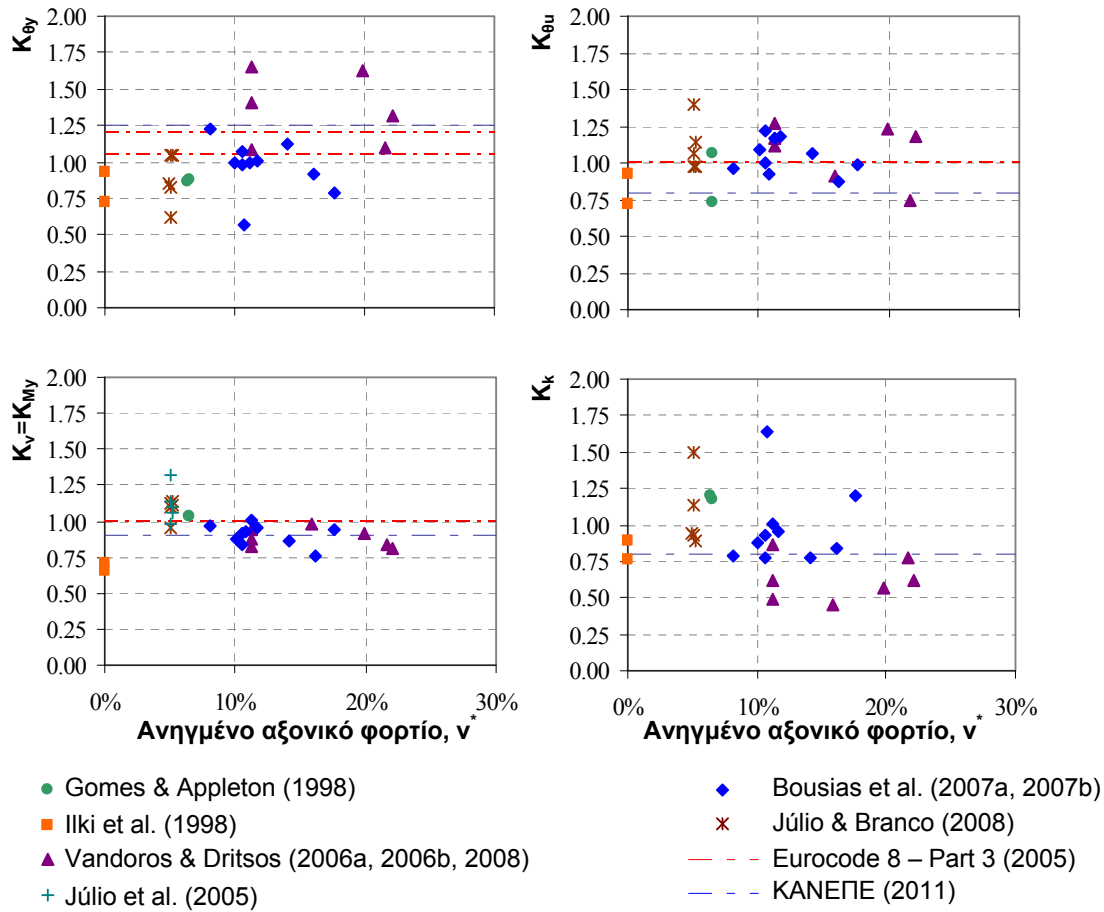
Η διακύμανση των χαρακτηριστικών των δοκιμών που επελέγησαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.14. Τα δοκίμια με μανδύα πάχους 30 mm αντιστοιχούν στο 8.11%, με 100 mm στο 8.11%, με 75 mm στο 51.35%, και με 35 mm το 32.43% του πλήθους των δοκιμών που ελήφθησαν υπόψη (37 δοκίμια). Στην περίπτωση της πειραματικής μελέτης των Júlio et al. (2005) δεν δίνονται στοιχεία για μεγέθη στρωφών για το μονολιθικό δοκίμιο (M3) με συνέπεια να μην μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές στρωφής διαρροής και στρωφής στο μέγιστο.

**Πίνακας 3.3.14** Διακύμανση παραμέτρων δοκιμών της πειραματικής βάσης που χρησιμοποιήθηκαν στην εξαγωγή συντελεστών μονολιθικότητας.

Αναφορά	$t_j^{\#}$	$\rho_c$ (%)	$\rho_J$ (%)	$f_{c,c}^*$	$f_{c,J}^*$	$f_{y,c}^*$	$f_{y,J}^*$	$f_{yw,c}^*$	$f_{yw,J}^*$	$v^*$ (%)
Gomes & Appleton (1998)	30	1.13	1.64	53.2~58.2	49.6~58.2	480	480	480	480	6.3~6.4
Ilki et al. (1998)	100	1.79	1.54	44.3~50.6	7.0~14.9	531~550	501	425	425	0
Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	75	0.98	1.29	22.9~36.8	17.8~55.8	313	487	425	599	11.3~23.0
Júlio et al. (2005)	35	1.18	1.43	28.3~28.9	28.4~68.6	400	400	400	400	5.0~8.2
Bousias et al. (2007a), (2007b)	75	0.98	1.29	22.9~28.1	24.1~55.3	313	487	425	599	8.1~18.0
Júlio & Branco (2008)	35	1.18	1.43	28.5~28.9	28.6~68.7	520	520	520	520	5.0~8.2
Διακύμανση παραμέτρων	30~100	0.98~1.79	1.29~1.64	22.9~58.2	7.0~68.7	313~550	480~520	425~520	425~599	0~23.0

$\#$  mm,  $^*$ MPa

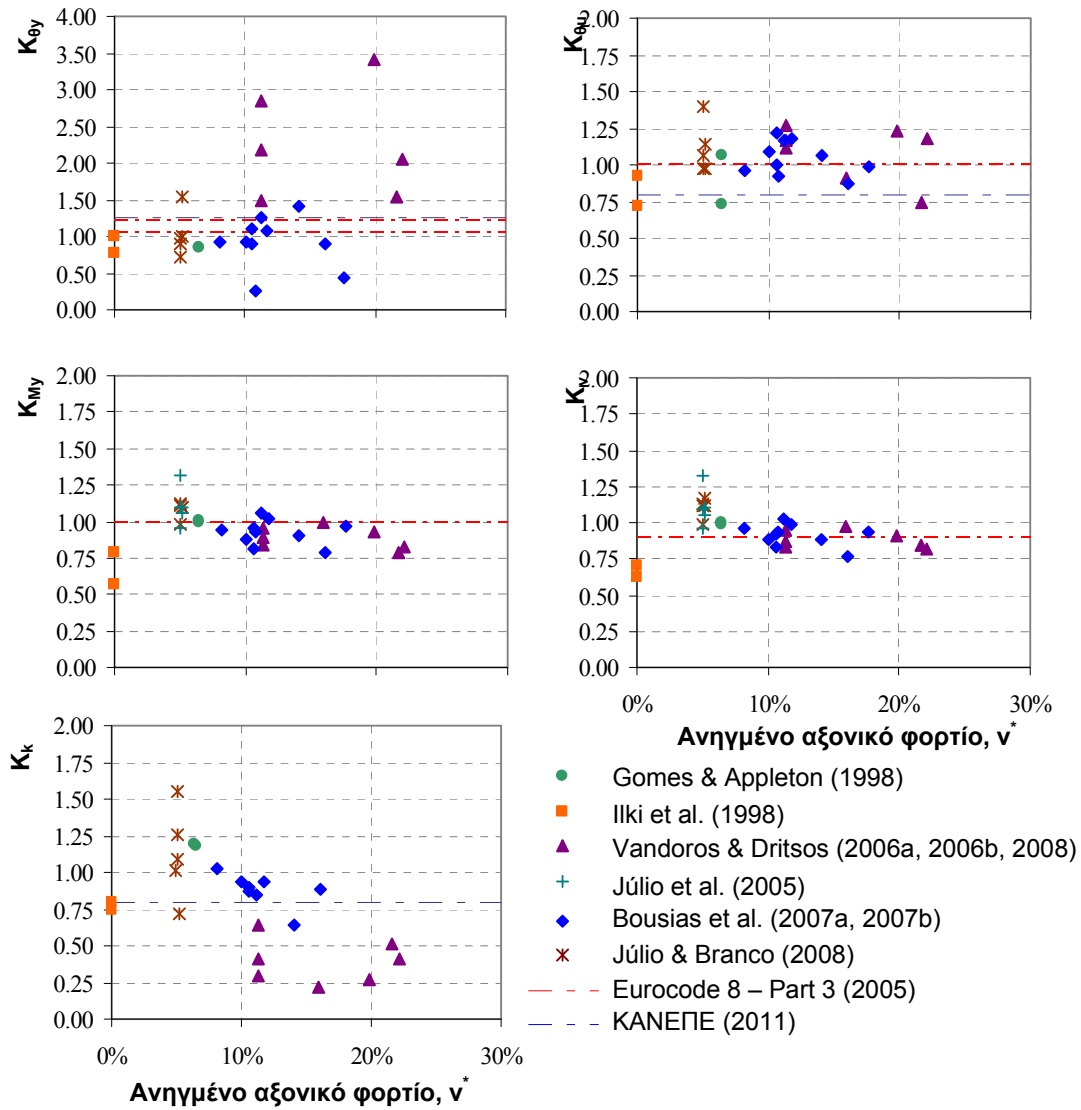
Οι πειραματικές τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.3.11 και 3.3.12 για την 1η και 2η μεθοδολογία μετατροπής των περιβαλλουσών των υστερητικών καμπυλών απόκρισης σε διγραμμικές καμπύλες, αντίστοιχα (υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι στόχος της πρώτης μεθοδολογίας ήταν η εξαγωγή ελαστοπλαστικής (χωρίς κράτυνση) καμπύλης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.2., ενώ στόχος της 2ης μεθοδολογίας η εξαγωγή διγραμμικής καμπύλης μέσω του προγράμματος Bilin (Παναγόπουλος και Κάππος 2009) με παραμέτρους για την επεξεργασία την πτώση της μέγιστης αντοχής κατά 80%, την ύπαρξη κράτυνσης στο μετελαστικό κλάδο, και τον περιορισμό της κλίσης του μετελαστικού κλάδου μεταξύ 0 και 10%). Επιπλέον, στα γραφήματα των Σχημάτων 3.3.11, 3.3.12 έχουν σημειωθεί και οι τιμές των διαφόρων συντελεστών μονολιθικότητας όπως ορίζονται στον Πίνακα 3.1.2 από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011) και τον EC8-Μέρος 3 (2005).



**Σχήμα 3.3.11:** Πειραματικές τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας σύμφωνα με την 1<sup>η</sup> μεθοδολογία επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων.

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 3.3.11 και 3.3.12 διαφαίνεται η μεγάλη διασπορά των τιμών των συντελεστών μονολιθικότητας  $K_{\theta y}$ ,  $K_{\theta u}$  και  $K_k$ . Επιπροσθέτως, στην περίπτωση του  $K_{\theta y}$  η σημαντική διαφορά στις τιμές που προκύπτουν από τις δυο μεθοδολογίες επεξεργασίας για την περίπτωση της ομάδας δοκιμίων των Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008) οφείλεται στη σημαντική διαφορά στον ορισμό της στροφής διαρροής του μονολιθικού δοκιμίου (M) (βλ. Παράρτημα Π.Ε. 1.2). Το εύρος των τιμών που λαμβάνουν οι συντελεστές μονολιθικότητας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3.15.





**Σχήμα 3.3.12:** Πειραματικές τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας σύμφωνα με την 2<sup>η</sup> μεθοδολογία επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων.

**Πίνακας 3.3.15** Διακύμανση των πειραματικών τιμών των συντελεστών μονολιθικότητας.

Αναφορά		$K_{\theta y}$	$K_{\theta u}$	$K_{My}$	$K_v$	$K_k$
1 <sup>η</sup> Μεθοδολογία	Gomes & Appleton (1998)	0.87	0.73, 1.07	1.03, 1.04	1.03, 1.04	1.18, 1.20
	Ilki et al. (1998)	0.73, 0.93	0.72, 0.92	0.65, 0.70	0.65, 0.70	0.76, 0.89
	Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	1.09~2.18	0.75~1.26	0.81~0.98	0.81~0.98	0.45~0.86
	Júlio et al. (2005)	-	-	0.98~1.32	0.98~1.32	-
	Bousias et al. (2007a), (2007b)	0.57~1.22	0.88~1.21	0.76~1.00	0.76~1.00	0.77~1.64
	Júlio & Branco (2008)	0.62~1.05	0.97~1.40	0.95~1.14	0.95~1.14	0.89~1.50
2 <sup>η</sup> Μεθοδολογία	Gomes & Appleton (1998)	0.84	0.73, 1.07	0.99, 1.00	0.99, 1.00	1.18, 1.20
	Ilki et al. (1998)	0.77, 1.00	0.72, 0.92	0.57, 0.79	0.62, 0.70	0.74, 0.79
	Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008)	1.49~4.54	0.75~1.26	0.78~0.99	0.82~0.98	0.22~0.64
	Júlio et al. (2005)	-	-	0.96~1.32	-	-
	Bousias et al. (2007a), (2007b)	0.26~1.41	0.88~1.21	0.79~1.06	0.76~1.02	0.64~3.65
	Júlio & Branco (2008)	0.71~1.53	0.97~1.41	0.98~1.13	0.98~1.17	0.72~1.56

### 3.3.7 Σύγκριση προτεινόμενων εκφράσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας δεικτών απόκρισης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες με πειραματικές τιμές

Στην παρούσα ενότητα επιλέγονται οι τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας που έχουν προκύψει από τα πειραματικά δεδομένα και αντιστοιχούν σε μανδύες πάχους 75 mm και 100 mm (τα πάχη αυτά θεωρούνται αντιπροσωπευτικά στην κατασκευαστική πρακτική, κυρίως τα 100 mm). Επομένως, χρησιμοποιούνται οι πειραματικές μελέτες των Ilki et al. (1998), Vandoros & Dritsos (2006a, 2006b, 2008), Bousias et al. (2007a), (2007b). Σε αυτές τις πειραματικές μελέτες ο σπλισμός του μανδύα,  $\rho_{j^*}$ , λαμβάνει δυο διαφορετικές τιμές: 1.54% για 3 δοκίμια των Ilki et al. (1998) με πάχος 100 mm και 1.29% για 19 δοκίμια των άλλων μελετών με πάχος 75 mm. Στόχος σε αυτή την ενότητα είναι η σύγκριση των προτεινόμενων εκφράσεων για τους συντελεστές μονολιθικότητας (Πίνακας 3.3.13) με τις πειραματικές τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας. Για το σκοπό αυτόν επιλέγεται η εξειδίκευση των εκφράσεων του Πίνακα 3.3.13 για ανηγμένο ποσοστό διαμήκους σπλισμού  $\rho_{j^*}=1\%$  και πάχος μανδύα 75 mm (όπως στην πλειονότητα των δοκιμών). Οι σχέσεις που προκύπτουν είναι:

$$K_{\theta y} = 4.77 \cdot v^* + 1.30 \quad (3.3.11)$$

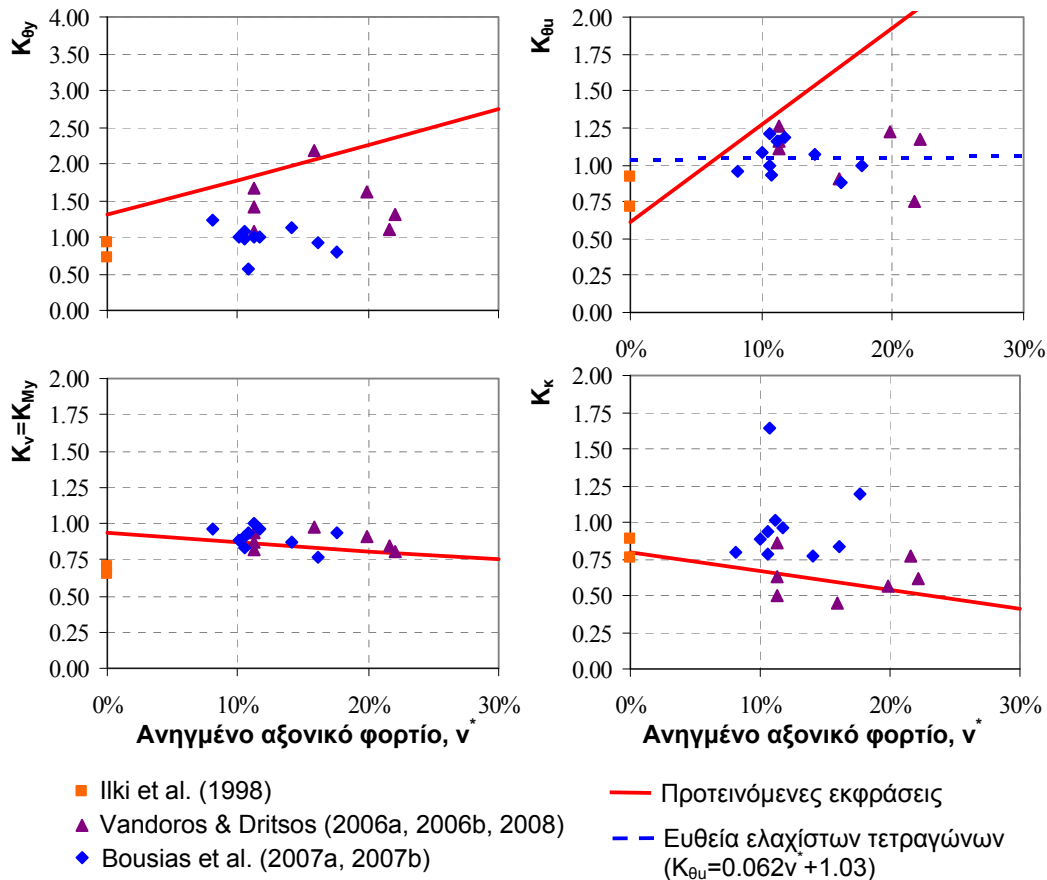
$$K_{\theta u} = 6.58 \cdot v^* + 0.61 \quad (3.3.12)$$

$$K_{My} = -0.58 \cdot v^* + 0.90 \quad (3.3.13)$$

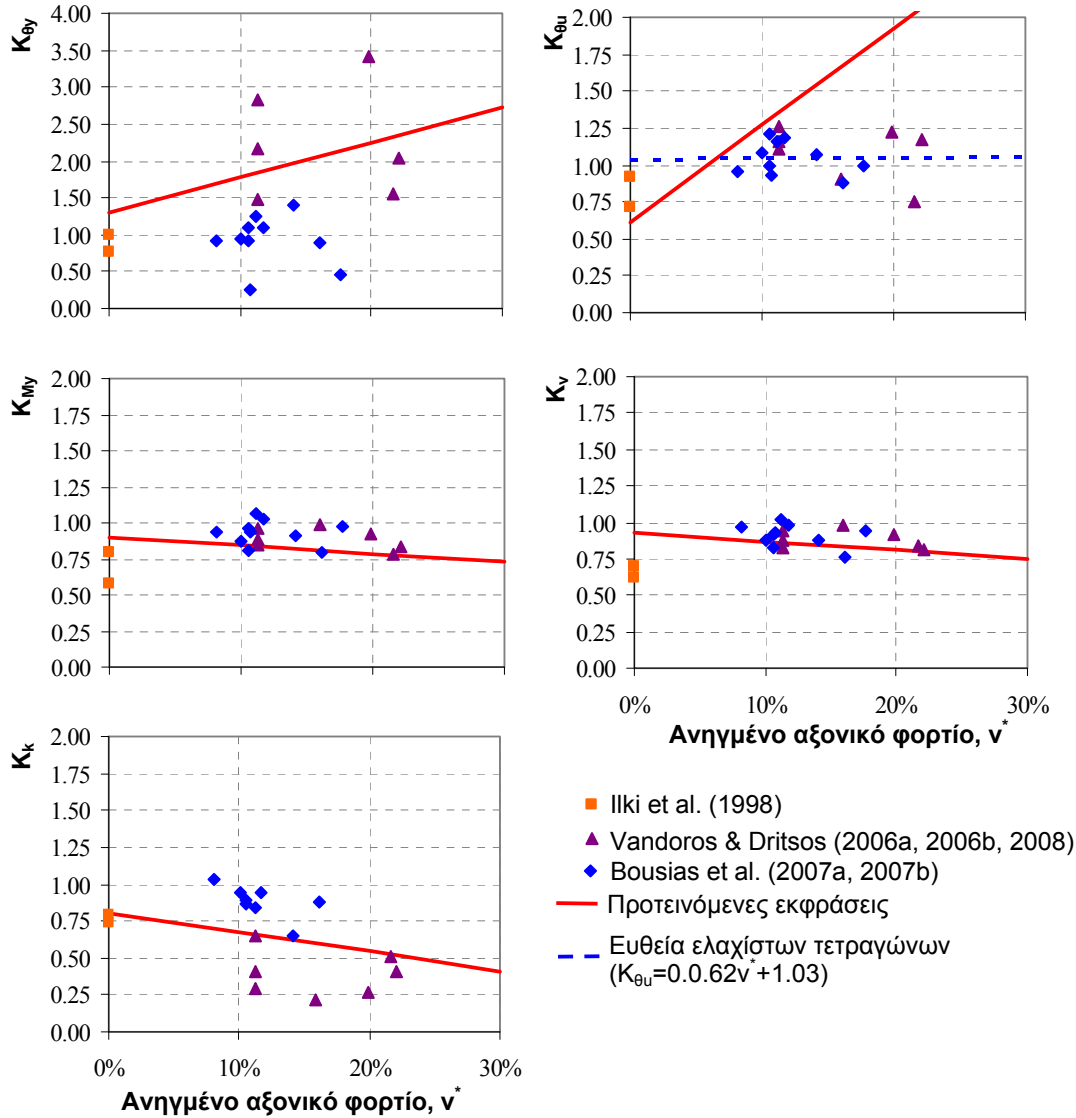
$$K_r = -0.61 \cdot v^* + 0.93 \quad (3.3.14)$$

$$K_k = -1.29 \cdot v^* + 0.80 \tag{3.3.15}$$

Οι καμπύλες που προκύπτουν από την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων για διάφορες τιμές του αξονικού φορτίου (καμπύλη κόκκινου χρώματος) σχεδιάζονται στα ίδια διαγράμματα με τις πειραματικές τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας (Σχήματα 3.3.13 και 3.3.14, αντιστοιχούν στην 1<sup>η</sup> και τη 2<sup>η</sup> μέθοδο επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων). Παρατηρείται ότι οι προτεινόμενες εκφράσεις προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τους συντελεστές μονολιθικότητας αντοχής και ροπής διαρροής ( $K_v=K_{My}$ ) που προκύπτουν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και με τις δυο μεθοδολογίες. Στην περίπτωση του συντελεστή μονολιθικότητας για τη δυσκαμψία,  $K_k$ , στην μεν 1<sup>η</sup> μεθοδολογία επεξεργασίας η προτεινόμενη σχέση παρέχει ένα εύλογο κάτω όριο, στη δε 2<sup>η</sup> μεθοδολογία μια μέση εκτιμήτρια. Εκεί όπου υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών βάσει των προτεινόμενων σχέσεων και των πειραματικών τιμών είναι για τους συντελεστές μονολιθικότητας στροφής διαρροής,  $K_{\theta y}$ , και στροφής στο μέγιστο,  $K_{\theta u}$ . Με βάση τα αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> μεθοδολογίας επεξεργασίας η προτεινόμενη σχέση μέχρι και αξονικό φορτίο 10% αποτελεί ένα άνω όριο τόσο για τον  $K_{\theta y}$  όσο και για τον  $K_{\theta u}$ . Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και από τη σύγκριση της προτεινόμενης έκφρασης με τις πειραματικές τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας βάσει της 2<sup>ης</sup> μεθοδολογίας.



Σχήμα 3.3.13: Συντελεστές μονολιθικότητας για το σύνολο των ομάδων παραμετρικών αναλύσεων.



**Σχήμα 3.3.14:** Συντελεστές μονολιθικότητας για το σύνολο των ομάδων παραμετρικών αναλύσεων.

Από τις προηγούμενες συγκρίσεις προκύπτει ότι οι προταθείσες απλοποιητικές σχέσεις  $K_M(v^*)$  και  $K_k(v^*)$  μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε αντικατάσταση των σταθερών τιμών για τα  $K$  που υιοθετούν σήμερα ο ΚΑΝΕΠΕ και ο Ευρωκώδικας 8-3, βεβαίως με σαφώς καθορισμένο πεδίο εφαρμογής (περιοχή τιμών για τις λοιπές παραμέτρους όπως το  $t_j$  και το  $\rho_j^*$ ). Το ίδιο θα μπορούσε να υποστηριχθεί και για το  $K_{\theta y}(v^*)$  που αφενός είναι παράμετρος που είναι όχι μόνο δύσκολο να μετρηθεί, αλλά και ο ορισμός της εμπεριέχει σημαντική αβεβαιότητα (βλ. διαφορά στα σχετικά διαγράμματα στα Σχ. 3.3.13 και 3.3.14), Αντιθέτως, το αναλυτικό προσομοίωμα φαίνεται ότι υπερεκτιμά τις τιμές των  $K_{\theta u}(v^*)$  για ανηγμένα αξονικά φορτία μεγαλύτερα του 0.1 κάτι που δημιουργεί πρόβλημα στην πρακτική εφαρμογή (υπερεκτιμάται η διαθέσιμη πλαστικότητα του μανδουωμένου στοιχείου), συνεπώς για την περίπτωση αυτή είναι σκοπιμότερο να χρησιμοποιείται η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων που προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα (φαίνεται με μπλε διακεκομμένη γραμμή στα Σχ. 3.3.13 και 3.3.14).

### 3.3.8 Σχολιασμός αποτελεσμάτων παραμετρικής - Συμπεράσματα

Στο αναλυτικό προσομοίωμα (§ 1.1.2) οι μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας που λαμβάνονται υπόψη είναι η αντίσταση των διεπιφανειών σε τριβή και η αντίσταση λόγω της δράσης βλήτρου (υπενθυμίζεται ότι στο αναλυτικό προσομοίωμα ως βλήτρα λαμβάνονται τα σκέλη του συνδετήρα του μανδύα που εμπεριέχονται σε μήκος ίσο με την απόσταση των ρωγμών,  $c$ , καθώς και τα βλήτρα που τοποθετούνται στη διεπιφάνεια μεταξύ παλαιού στοιχείου και μανδύα ως εγκάρσιος οπλισμός της διεπιφάνειας). Από την εφαρμογή των σχέσεων που περιγράφουν τους δύο αυτούς μηχανισμούς για τις περιπτώσεις μελέτης της παραμετρικής ανάλυσης διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση σε τριβή συνεισφέρει το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής αντίστασης της διεπιφάνειας. Βεβαίως στη γενική περίπτωση το ποσοστό συμμετοχής της αντίστασης των βλήτρων στη συνολική αντίσταση της διεπιφάνειας μπορεί να αυξηθεί, ανάλογα με τη διάμετρο και την απόσταση των συνδετήρων του μανδύα, την απόσταση των ρωγμών,  $c$ , καθώς και τα βλήτρα που τοποθετούνται ως εγκάρσιος οπλισμός διεπιφάνειας. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα (που συνήθως είναι χαμηλότερη σε σχέση με αυτή του μανδύα) παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της αντοχής της διεπιφάνειας και αυτό διότι η μέγιστη διατμητική τάση που μεταφέρεται μέσω τριβής,  $\tau_u$ , εξαρτάται από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα (Εξ. (1.1.5)). Σε περίπτωση χαμηλής ή μέτριας θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος του πυρήνα (π.χ. 1<sup>η</sup> ομάδα περιπτώσεων παραμετρικής ανάλυσης, όπου χρησιμοποιείται B160 και 2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> όπου χρησιμοποιείται B225), η αντοχή της διεπιφάνειας έφτασε ως μία τιμή που καθόρισε και την ανώτατη στάθμη αντοχής ολόκληρης της διατομής. Επομένως, για εκείνη τη στάθμη έντασης όπου έχει ήδη εξαντληθεί η αντοχή της διεπιφάνειας, η περαιτέρω αύξηση του διαμήκους οπλισμού του μανδύα δεν έχει καμιά επιρροή στην αύξηση της αντοχής της σύνθετης διατομής. Αντίθετα στην περίπτωση ύπαρξης πυρήνα με σημαντική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (π.χ. 4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup> ομάδα περιπτώσεων μελέτης) παρατηρείται ότι η απόκριση της σύνθετης διατομής πλησιάζει την απόκριση της αντίστοιχης μονολιθικής, ιδιαίτερα για ανηγμένα ποσοστά διαμήκους οπλισμού του μανδύα μέχρι και 2%, και ανηγμένο αξονικό φορτίο μέχρι και 0.2.

Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να ανατρέξει κανείς στην πειραματική βάση (Ενότητα 1.2.3) προκειμένου να διαπιστωθεί η διακύμανση των παραμέτρων σχεδιασμού των δοκιμών. Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2.1 το ανηγμένο ποσοστό του διαμήκους οπλισμού των υφιστάμενων στοιχείων κυμαίνεται από 0.81 ως 2.01%, ενώ του μανδύα 0.75 ~ 1.64%, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα 22.9 ~ 55.9 MPa, ενώ του μανδύα 17.8 ~ 68.7 MPa (με εξαίρεση την ομάδα των πειραμάτων των Ilki et al. (1998) λόγω των ιδιαίτερα χαμηλών τιμών της θλιπτικής αντοχής του μανδύα). Το ανηγμένο αξονικό φορτίο (με την παραδοχή ότι ασκείται σε όλη την ενισχυμένη διατομή) κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0.23. Σύμφωνα με τις διαπιστώσεις των ερευνητών τα πειράματα των οποίων συμπεριλαμβάνονται στην πειραματική βάση (Πίνακες 1.2.2. 1.2.3), αλλά και τις συγκρίσεις μεταξύ αναλυτικής και μονολιθικής απόκρισης σε σχέση με τις πειραματικές καμπύλες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 1.3.7, η πειραματική καμπύλη συνήθως βρίσκεται μεταξύ των ορίων της μονολιθικής και της αναλυτικώς προσδιοριζόμενης απόκρισης, με τη δεύτερη να είναι κοντά στη μονολιθική. Επομένως, για αυτή τη διακύμανση των παραμέτρων σχεδιασμού που καλύπτει η πειραματική βάση συμπεραίνει κανείς ότι οι τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας που

προτείνονται από την §8.2.1.5 του ΚΑΝΕΠΕ (2011) και την §A.4.2.2 του EC8-Part 3 (2005) είναι ρεαλιστικές και κατάλληλες για εφαρμογή.

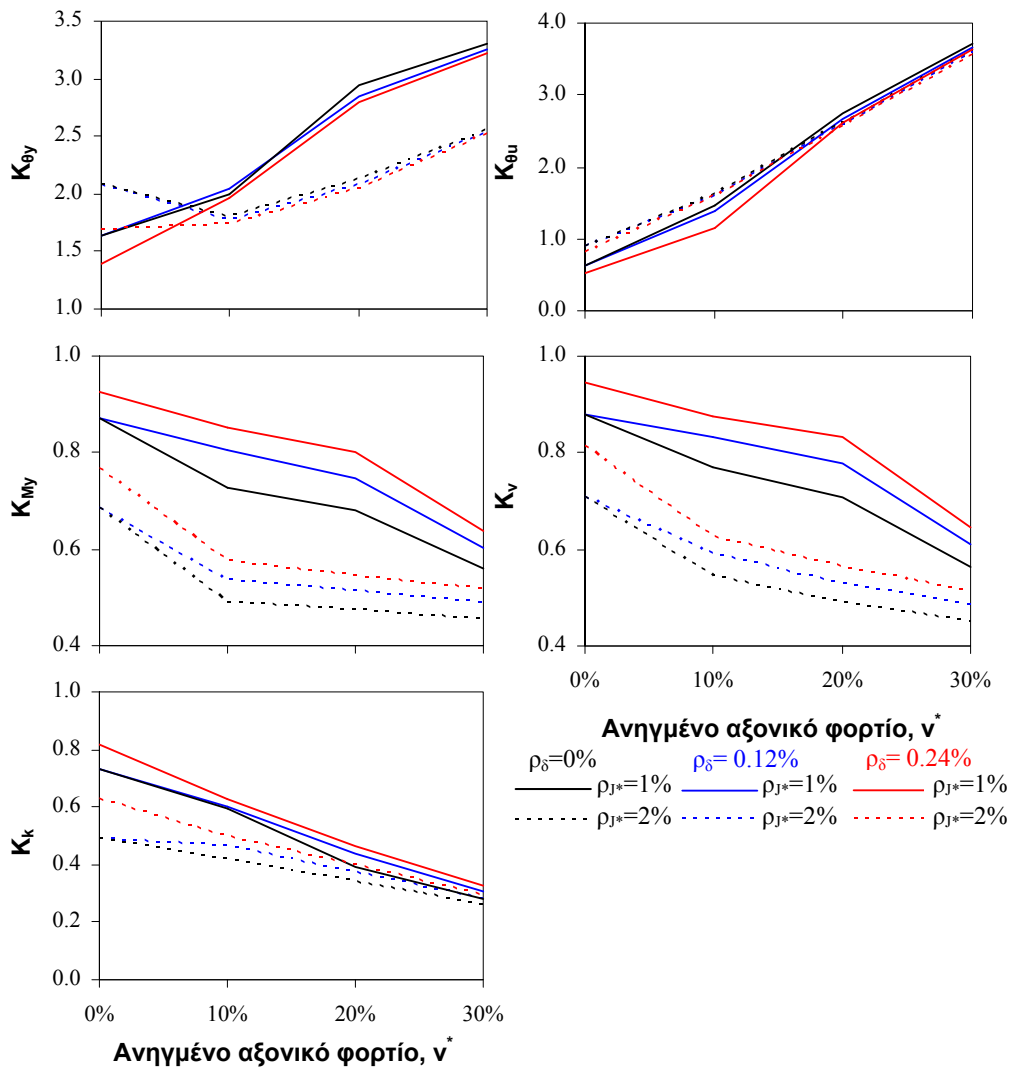
Τα κύρια **συμπεράσματα** και **συστάσεις** για μελλοντική έρευνα που προέκυψαν από την διεξαγωγή της παραμετρικής διερεύνησης είναι τα ακόλουθα:

1. Διαπιστώθηκε η ευαισθησία των συντελεστών μονολιθικότητας στα υλικά κατασκευής της υφιστάμενης διατομής (πυρήνα) και του μανδύα, καθώς και στο ανηγμένο ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του μανδύα για αυξανόμενο αξονικό φορτίο.
2. Προέκυψε ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης του ζητήματος της απόκρισης μανδύων με χαμηλή θλιπτική αντοχή πυρήνα. Μια σειρά πειραμάτων σε μανδουωμένες διατομές με ασθενή πυρήνα θα βοηθούσε σημαντικά ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για τη σκοπιμότητα (ή μη) χρήσης των προτεινόμενων συντελεστών μονολιθικότητας από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011) και τον EC8-Part 3 (2005). Επιπλέον, χρήζει περαιτέρω διερεύνησης η απόκριση διεπιφανειών με σημαντική διαφορά μεταξύ θλιπτικής αντοχής παλαιάς και νέας διεπιφάνειας, περίπτωση που είναι ιδιαίτερα συνήθης στις πρακτικές εφαρμογές.
3. Οι τιμές των συντελεστών μονολιθικότητας που προτείνονται από τον ΚΑΝΕΠΕ (2011) και τον EC8-Part 3 (2005) μπορούν να χρησιμοποιούνται με ασφάλεια για συγκεκριμένα όρια διακύμανσης των υλικών κατασκευής του πυρήνα και του μανδύα, καθώς και του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου. Αυτά τα όρια καθορίζονται από τα πειραματικά δεδομένα και αντιστοιχούν σε:
  - (i) ανηγμένο ποσοστό διαμήκους οπλισμού υφιστάμενων στοιχείων 0.81 ~ 2.01%,
  - (ii) ανηγμένο ποσοστό διαμήκους οπλισμού μανδύα 0.75 ~ 1.64%,
  - (iii) θλιπτική αντοχή σκυροδέματος πυρήνα 22.9 ~ 55.9 MPa,
  - (iv) θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μανδύα 17.8 ~ 68.7 MPa
  - (v) ανηγμένο αξονικό φορτίο (με θεώρηση ότι ασκείται σε όλη την ενισχυμένη διατομή) 0 ~ 0.23.
4. Οι προταθείσες απλοποιητικές σχέσεις για τους συντελεστές  $K_M(\dot{v}^*)$  και  $K_k(\dot{v}^*)$  μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε αντικατάσταση των σταθερών τιμών για τα  $K$  που υιοθετούν σήμερα ο ΚΑΝΕΠΕ και ο Ευρωκώδικας 8-3, βεβαίως με σαφώς καθορισμένο πεδίο εφαρμογής (περιοχές για τις λοιπές παραμέτρους όπως το  $t_j$  και το  $\rho_j^*$ ). Για τους συντελεστές  $K_{\theta y}(\dot{v}^*)$  και  $K_{\theta u}(\dot{v}^*)$  είναι σαφές ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα.

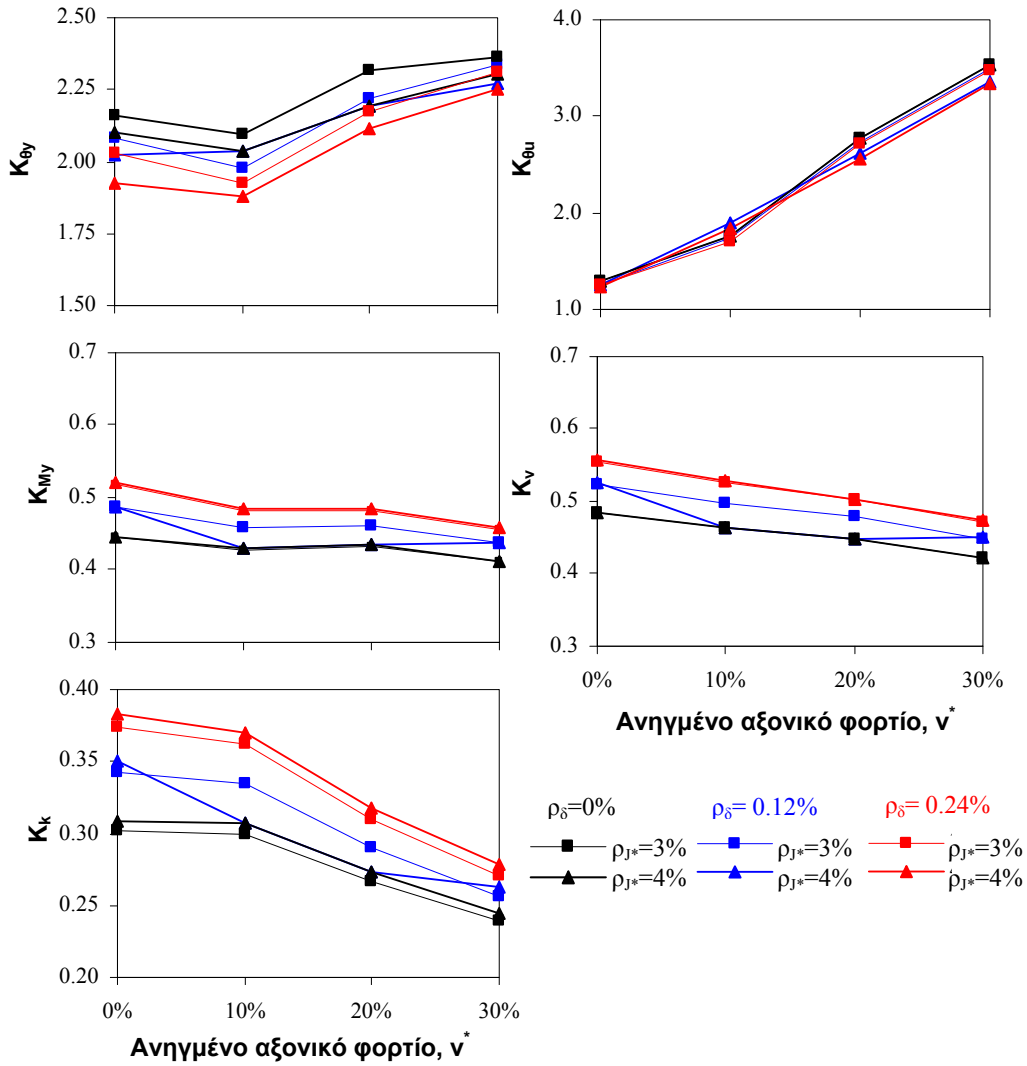
### 3.3.9 Βιβλιογραφία Π.Ε. 3.3

- Eurocode 8-Part 3 (2005). "Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings." EN 1998-3:2005(E), European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- ΚΑΝΕΠΕ (2011). "Κανονισμός Επεμβάσεων." Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Τελικό Κείμενο, Σεπτέμβριος 2011.
- Tassios T. and Vintzēleou V.E. (1987). "Concrete-to-concrete friction. ASCE J. Struct. Eng., 113(4), 832-849.
- Vintzēleou, E., and Tassios, T. (1986). "Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions." *Magazine of Concrete Research*, 38(134), 13-22.
- Vintzēleou, E., and Tassios, T. (1987). "Behavior of dowels under cyclic deformations." *ACI Structural Journal*, 84(1), 18-30.

**Παράρτημα Π.Ε. 3.3: Συμπληρωματικά διαγράμματα συντελεστών μονολιθικότητας**



**Σχήμα Π3.3.1:** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μονολιθικότητας για την 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων για πάχος μανδύα 100 mm, ανηγμένο ποσοστό διαμήκους οπλισμού 1%, 2% και ανηγμένο ποσοστό βλήτρων,  $\rho_\delta$ : 0%, 0.12% και 0.24%.



**Σχήμα Π3.3.2:** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μονολιθικότητας για την 2<sup>η</sup> ομάδα παραμετρικών αναλύσεων για πάχος μανδύα 100 mm, ανηγμένο ποσοστό διαμήκους οπλισμού 3%, 4% και ανηγμένο ποσοστό βλήτρων, ρ<sub>δ</sub>: 0%, 0.12% και 0.24%.



## 2.4. Συνολικά αποτελέσματα και παραδοτέα του έργου

### 2.4.1 Αποτελέσματα και αξιοποίηση

Η αντιστοίχιση όσων περιλαμβάνονται στην παρούσα έκθεση με τα κατά τη σύμβαση παραδοτέα του έργου παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα της §2.2.

Τα αποτελέσματα του έργου αποτελούν υλικό βαθμονόμησης για τους συντελεστές μονολιθικότητας που ορίζονται στους σημερινούς κανονισμούς (EC8-3 2005, ΚΑΝΕΠΕ 2010), και εμπλουτίζουν και τη διεθνή γνώση σε θέματα διαστασιολόγησης στοιχείων Ο/Σ που ενισχύονται με μανδύες Ο/Σ. Συνεπώς η δυνατότητα αξιοποίησης των αποτελεσμάτων είναι προφανής, αλλά εξαρτάται, βεβαίως, κυρίως από τη βούληση των αρμόδιων επιτροπών, στις οποίες πάντως η συμμετοχή της Ερευνητικής Ομάδος είναι συνεχής και ουσιώδης (ο ΕΥ του έργου είναι μέλος της Επιτροπής Στήριξης του ΚΑΝΕΠΕ).

### 2.4.2 Κατάλογος δημοσιεύσεων στο πλαίσιο του έργου

Μέχρι στιγμής έχει παρουσιαστεί και δημοσιευτεί σε πρακτικά διεθνούς συνεδρίου με κριτές η εξής εργασία:

Thermou, G. E., Papanikolaou, V. S, and Kappos A. J. (2011). “Analytical model for predicting the response of old-type columns rehabilitated with concrete jacketing under reversed cyclic loading.” Proc., ECCOMAS Thematic Conference “**Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2011)**”, Corfu, Greece. Paper No 137.

Βρίσκονται στη φάση ετοιμασίας για υποβολή δυο εργασίες σε διεθνή περιοδικά, μία με βάση το αναλυτικό προσομοίωμα και μία με βάση το υπολογιστικό προσομοίωμα, και εξετάζεται το ενδεχόμενο υποβολής μίας ακόμη σε περιοδικό υπολογιστικής-αλγοριθμικής κατεύθυνσης με βάση τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε (§1.3.6). Επίσης υποβλήθηκαν ή θα υποβληθούν περαιτέρω εργασίες σε συνέδρια με κριτές. Συγκεκριμένα έγινε ήδη δεκτές δυο περιλήψεις εργασιών που υποβλήθηκαν στο 15<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Συνέδριο Σεισμικής Μηχανικής (15<sup>th</sup> WCEE, Λισαβόνα 2012), οι οποίες αφορούν στο αναλυτικό προσομοίωμα και στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε.

### 3. ΣΧΟΛΙΑ - ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

#### 3.1. Τεχνολογία / Τεχνογνωσία που αποκτήθηκε στο πλαίσιο του έργου

Δεν προβλέπονται στο πλαίσιο του έργου παραδοτέα ή προϊόντα τα οποία θα κατοχυρωθούν με licenses ή δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας. Αποτελέσματα του έργου παρουσιάστηκαν ήδη στο διεθνές συνέδριο COMPDYN 2011, καθώς επίσης από τον ΕΥ σε πρόσφατο σεμινάριο του ΤΕΕ για τον ΚΑΝΕΠΕ (Καβάλα Δεκ. 2011), και θα παρουσιασθούν ως επιστημονικές δημοσιεύσεις σε περιοδικά και συνέδρια με σύστημα κριτών (βλ. §2.4.2).

#### 3.2. Λοιπές παρατηρήσεις

Η πορεία εκπόνησης του έργου κατέδειξε ότι ο αρχικώς προβλεπόμενος από τη σύμβαση χρόνος εκπόνησης (που υπαγορευόταν και από το επείγον της διαδικασίας βαθμονόμησης του ΚΑΝΕΠΕ) δεν ήταν επαρκής, δεδομένου του μεγάλου όγκου της προβλεπόμενης δουλειάς αλλά και των ιδιαίτερων δυσκολιών που ενείχε, κυρίως το τμήμα του έργου που αφορούσε στην ανάπτυξη νέου λογισμικού (ως προς το οποίο το πραγματοποιηθέν έργο είναι πολλαπλάσιο του συμβατικώς προβλεπομένου). Η παράταση που ζητήθηκε ήταν, μετά και σχετική διαβούλευση με το Φορέα χρηματοδότησης, μόνο τετράμηνη, με αποτέλεσμα στην αρχική υποβολή (30/6/11) να μην συμπεριληφθεί ο τελικός έλεγχος του τμήματος του λογισμικού που αναφέρεται στην ολίσθηση στη διεπιφάνεια υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης (η περίπτωση της μονότονης φόρτισης είχε ολοκληρωθεί πλήρως) και η τελική παραμετρική διερεύνηση, προϋπόθεση της οποίας είναι η ολοκλήρωση των ελέγχων του λογισμικού.

Το σύνολο των προβλεπόμενων στη σύμβαση εργασιών ολοκληρώθηκε επιτυχώς στις 30/6/911 και, μετά από σχετική συνεννόηση με το Φορέα χρηματοδότησης, υποβλήθηκε στις 6/10/11 η τελική έκθεση του έργου. Στις 21-12-2011 στάλθηκαν από τον ΟΑΣΠ οι παρατηρήσεις της Επιτροπής Κρίσης του Έργου, με βάση τις οποίες έγινε σειρά πρόσθετων εργασιών οι οποίες περιλήφθηκαν στην παρούσα αναθεωρημένη τελική έκθεση (κυρίως στις ενότητες 2.2 και 3.3, υπάρχουν όμως και διορθώσεις-βελτιώσεις στις περισσότερες ενότητες).