



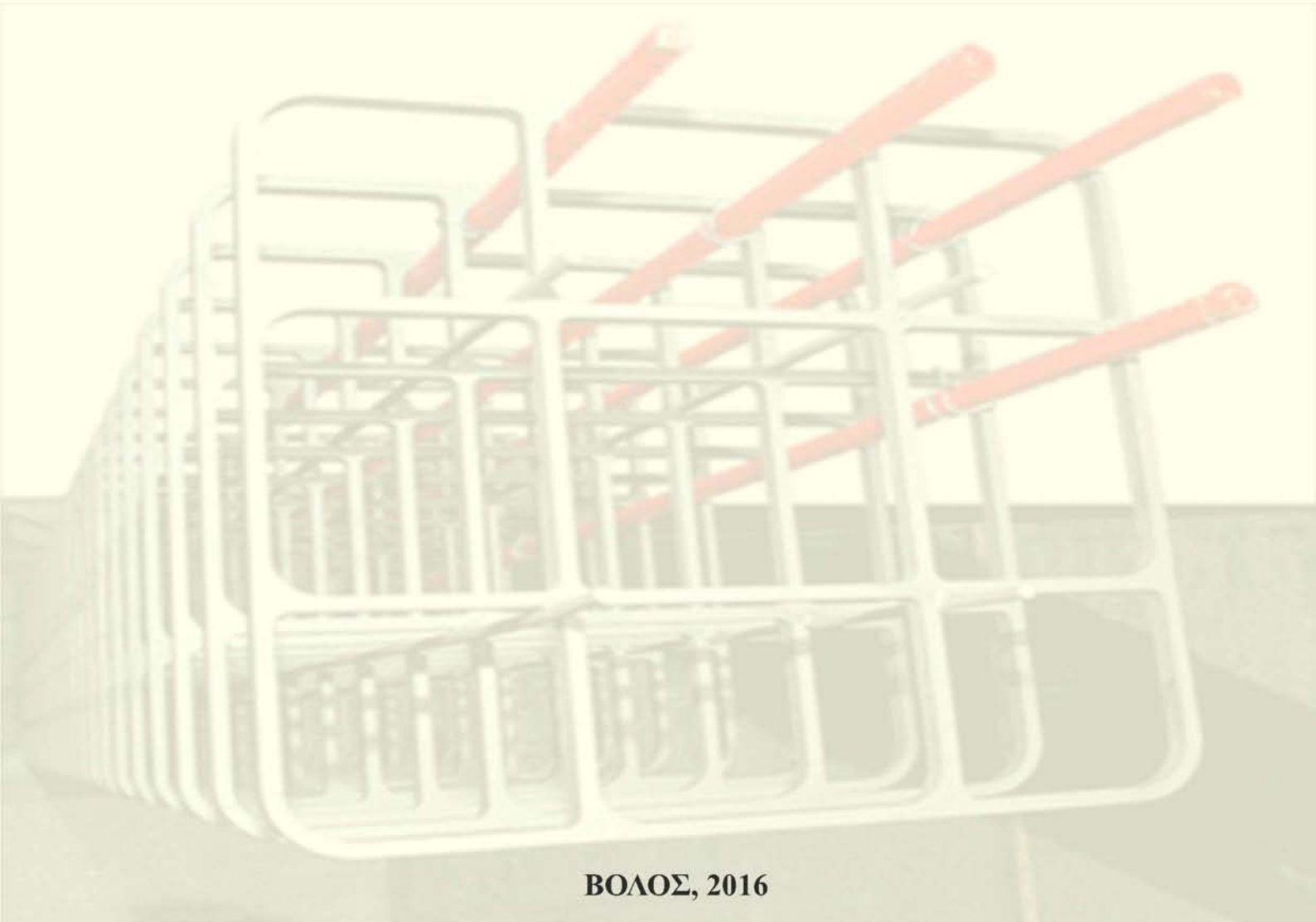
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Αναλυτική και πειραματική αξιολόγηση  
προσομοιωμάτων για την περίσφιγξη θλιβόμενων  
στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω  
ινοπλισμένων πολυμερών»**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ  
ΠΑΠΑΡΙΖΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ  
ΜΩΡΕΤΤΗ ΜΑΡΙΝΑ**



**ΒΟΛΟΣ, 2016**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αναλυτική και πειραματική αξιολόγηση  
προσομοιωμάτων για την περίσφιγξη θλιβόμενων  
στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω  
ινοπλισμένων πολυμερών**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ**

**ΠΑΠΑΡΙΖΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ**

**ΜΩΡΕΤΤΗ ΜΑΡΙΝΑ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΒΟΛΟΣ, 2016**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα. Μωρέττη Μαρίνα, για την καθοδήγηση και την άμεση και ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, τον κ. Κουτσελίνη Αλέκο, ΕΤΕΠ, για την πολύτιμη συμβολή του σε όλες τις φάσεις κατασκευής των δοκιμών του πειραματικού προγράμματος, καθώς επίσης τον καθηγητή κ. Περδικάρη Φίλιππο και τον υποψήφιο διδάκτορα Παπαθεοχάρη Θεοχάρη για τις χρήσιμες υποδείξεις και συμβουλές τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη της για την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Γενικά στοιχεία για την περίσφιγξη μέσω ινοπλισμένων πολυμερών	1
1.2	Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	3

## 2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1	Εισαγωγή.....	5
2.2	Μοντέλα που επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται .....	5
2.2.1	Ευρωκώδικας 2 (EN1992-1-1) και Ευρωκώδικας 8 (EN1998-3) .....	5
2.2.2	Y.-C. Wang, K. Hsu (2007) .....	8
2.2.3	Pellegrino C. and Modena C. (2010).....	16
2.2.4	Roussakis T. and Karabinis A. (2008) .....	27
2.2.5	S. P. Tastani, et al. (2006, 2010).....	28

## 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

3.1	Εισαγωγή.....	38
3.2	Συνοπτική περιγραφή των δεδομένων από την βιβλιογραφία .....	40
3.3	Ενδεικτικά παραδείγματα υπολογισμού .....	42
3.3.1	Παράδειγμα Wang YC, and Hsu K. (2007) .....	43
3.3.2	Παράδειγμα Pellegrino C. and Modena C. (2010) .....	49
3.3.3	Παράδειγμα Roussakis T. and Karabinis A. (2008) .....	51
3.3.4	Παράδειγμα S. P. Tastani, et al. (2006, 2010).....	53
3.4	Προβλέψεις μοντέλων .....	56
3.4.1	Πίνακες αποτελεσμάτων.....	56
3.4.2	Σύγκριση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων .....	58
3.4.3	Στατιστικά στοιχεία .....	60



3.5	Συμπεράσματα.....	63
-----	-------------------	----

## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

4.1	Μορφή δοκιμών.....	65
4.2	Σύμβαση για τον συμβολισμό των δοκιμών .....	65
4.3	Υλικά και διαδικασία κατασκευής των δοκιμών.....	67
4.3.1	Οπλισμός .....	67
4.3.2	Σκυρόδεμα.....	73
4.3.3	Διαμόρφωση άκρων ( <i>capping</i> ).....	76
4.3.4	Ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) .....	77
4.3.5	Εποξειδική ρητίνη .....	77
4.3.6	Μέθοδος εφαρμογής των υφασμάτων ΙΟΠ στα δοκίμια .....	78
4.4	Μετρητική διάταξη .....	81
4.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικού προγράμματος.....	82
4.5.1	Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος ( $f_{ck}^*$ ).....	82
4.5.2	Άοπλος κύλινδρος ( <i>Cyl_1</i> ) .....	83
4.5.3	Δοκίμιο <i>M_R(150)</i> .....	84
4.5.4	Δοκίμιο <i>O_R(150)</i> .....	87
4.5.5	Δοκίμιο <i>O_R(150)_C(1)</i> .....	90
4.5.6	Υπέρθεση διαγραμμάτων κυλινδρικών δοκιμών <i>R(150)</i> .....	93
4.5.7	Δοκίμιο <i>M_S(150)</i> .....	94
4.5.8	Δοκίμιο <i>O_S(150)</i> .....	96
4.5.9	Δοκίμιο <i>O_S(150)_C(1)</i> .....	98
4.5.10	Υπέρθεση διαγραμμάτων δοκιμών <i>S(150)</i> .....	100
4.5.11	Δοκίμιο <i>M_S(100)</i> .....	102
4.5.12	Δοκίμιο <i>O_S(100)</i> .....	104
4.5.13	Δοκίμιο <i>O_S(100)_C(1)</i> .....	106
4.5.14	Υπέρθεση διαγραμμάτων δοκιμών <i>S(100)</i> .....	108
4.5.15	Υπέρθεση διαγραμμάτων δοκιμών περισφιγμένων με ΙΟΠ.....	109

4.6	Συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία .....	109
-----	---	-----

## **5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

5.1	Προβλέψεις μοντέλων .....	112
-----	---------------------------	-----

5.2	Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα <i>Ε. Μηλιώκα, (2016)</i> .....	114
-----	--	-----

## **6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

6.1	Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων.....	118
-----	---	-----

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	123
----------------------	-----

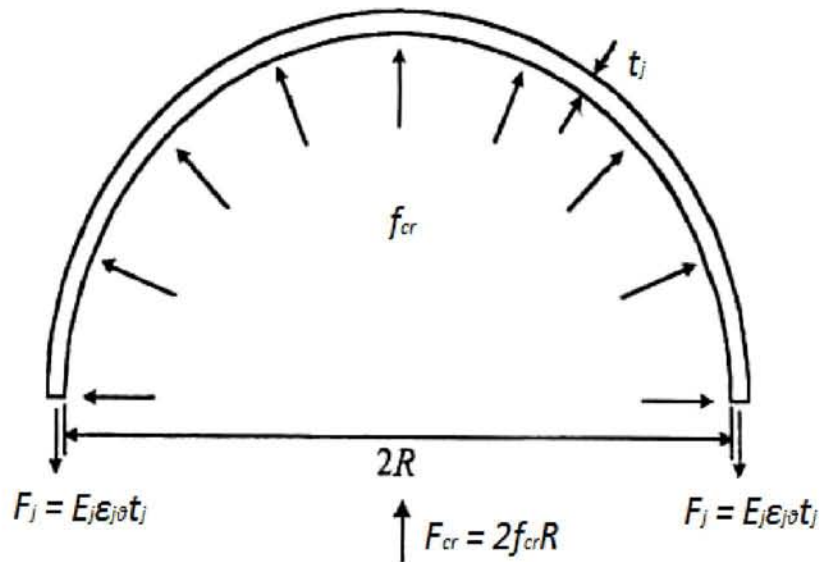
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	127
---------------------	-----

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	129
---------------------	-----

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά στοιχεία για την περίσφιγξη μέσω ινοπλισμένων πολυμερών

Η επικόλληση ινοπλισμένων υφασμάτων μέσω ρητίνης εξωτερικά σε στοιχεία από σκυρόδεμα οδηγεί σε βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων αυτών, κυρίως μέσω του μηχανισμού περίσφιγξης. Οι ίνες τοποθετούνται εγκάρσια στην αξονική διεύθυνση του στοιχείου. Η εφαρμογή αξονικού θλιπτικού φορτίου στο στοιχείο οδηγεί σε εγκάρσια διόγκωση η οποία προκαλεί ενεργοποίηση των ινών. Οι ίνες ασκούν τάσεις εγκάρσια στον άξονα του στοιχείου και μέσω της αναπτυσσόμενης τριαξονικής θλιπτικής καταπόνησης αυξάνεται σημαντικά η θλιπτική αντοχή του στοιχείου. Η παρεχόμενη περίσφιγξη από τις ίνες θεωρείται «παθητική» καθώς ενεργοποιείται ως αντίδραση στην δρώσα θλιπτική αξονική δύναμη.



**Σχήμα 1.1** Εγκάρσια πίεση  $f_{cr}$  που παράγεται λόγω περίσφιγξης σε κύλινδρο παρουσία υφάσματος πάχους  $t_j$  (H. Toutanji and Y. Deng, 2002)

Σύμφωνα με το σχήμα, η ισορροπία δυνάμεων δίνει:

$$2 f_{cr} R = 2 E_j \epsilon_{j\theta} t_j \Rightarrow f_{cr} D = 2 t_j E_j \epsilon_{j\theta} \Rightarrow f_{cr} = \frac{2 t_j}{D} E_j \epsilon_{j\theta} \Rightarrow f_{cr} = \frac{1}{2} \rho_j E_j \epsilon_{j\theta}$$

που είναι και η σχέση που προσδιορίζει την τιμή της τάσης που αναπτύσσεται, όπου

$$\rho_j = \frac{4 t_j}{D}$$

Η δράση των ινών είναι, γενικώς, ανάλογη με την περίσφιγξη που παρέχει ο εγκάρσιος οπλισμός (συνδετήρες). Οι συνδετήρες ενεργοποιούνται όταν αναπτυχθεί ανηγμένη παραμόρφωση, είτε λόγω εγκάρσιας διόγκωσης που προκαλείται όταν το σκυρόδεμα που

περιβάλλουν υποβάλλεται σε θλιπτική καταπόνηση (αξονική θλίψη, ή λοξή θλίψη παρουσία τέμνουσας), είτε λόγω εφελκυστικής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος (παρουσία τέμνουσας). Εκτός του γεγονότος ότι οι συνδετήρες ενεργοποιούνται επίσης όταν διασχίζονται από ρωγμή, ενώ το ΙΟΠ μόλις ρηγματωθεί αστοχεί, σημαντική είναι η διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο υλικών: Τα υλικά ΙΟΠ συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την αστοχία τους η οποία είναι απότομη και ψαθυρή. Οι συνδετήρες μετά την διαρροή τους ασκούν μία περίπου σταθερή τάση περίσφιγξης (θεωρώντας αμελητέα κράτυνση για τις αναμενόμενες ανηγμένες παραμορφώσεις), όμως μειώνεται η αποτελεσματικότητά τους στον περιορισμό της διόγκωσης του σκυροδέματος καθώς παραμορφώνονται πλαστικά.

Διατίθενται πολλά μοντέλα στην διεθνή βιβλιογραφία για την περιγραφή των ιδιοτήτων σκυροδέματος υπό θλίψη, διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων (σ-ε) λόγω περίσφιγξης με ΙΟΠ. Τα μοντέλα αυτά έχουν προκύψει στην συντριπτική τους πλειοψηφία από δοκιμές σε άοπλα στοιχεία μικρής κλίμακας (κυρίως κυλίνδρων) που υποβλήθηκαν σε θλίψη. Σε πολλά από αυτά τα μοντέλα η σύμπτωση των αναλυτικών προβλέψεων με τα πειραματικά αποτελέσματα σε άοπλους κυλίνδρους υπό θλίψη είναι πολύ καλή (Καλογεράκης, 2013).

Το γενικό ερώτημα που τίθεται είναι πόσο αξιόπιστα είναι τα μοντέλα αυτά για την περιγραφή της συμπεριφοράς στοιχείων μεγάλης κλίμακας, τα οποία υποβάλλονται σε σύνθετη καταπόνηση και μάλιστα παρουσία οπλισμών.

Η κλίμακα των δοκιμών δεν φαίνεται να επηρεάζει την συμπεριφορά υποστυλωμάτων κυκλικής διατομής, συνεπώς η συμπεριφορά των κανονικών υποστυλωμάτων υπό θλίψη μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τις δοκιμές των αντίστοιχων δοκιμών μικρής κλίμακας με την προϋπόθεση τήρησης της σχέσης ομοιότητας για την κλίμακα των δοκιμών (scale effects). Αντιθέτως, για υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής ο περιορισμένος αριθμός των υφιστάμενων δοκιμών δεν επιτρέπει μία αντίστοιχη αναγωγή (Hollaway and Teng, 2008).

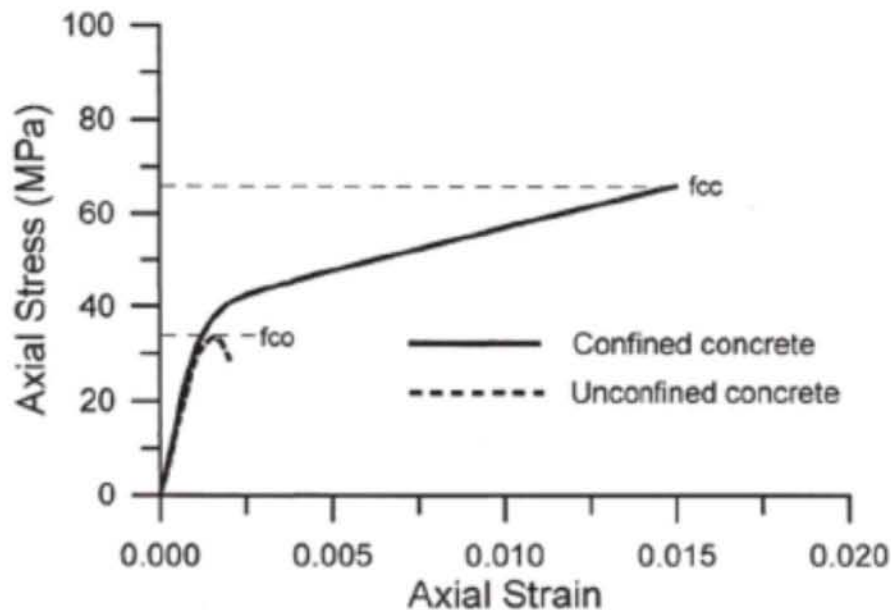
Η σύνθετη καταπόνηση ενός στοιχείου σε ροπή και αξονική (έκκεντρη εφαρμογή της θλιπτικής δύναμης στην διατομή) οδηγεί στη δημιουργία μη ομοιόμορφων ορθών τάσεων στην διατομή. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής βάσει της θεωρίας της κάμψης (παραδοχή επιπεδότητας διατομών) και την χρήση του διαγράμματος (σ-ε) με τα χαρακτηριστικά του περισφιγμένου με ΙΟΠ σκυροδέματος μπορεί να γίνει σε περίπτωση υποστυλωμάτων με κυκλική διατομή (Hollaway and Teng, 2008). Δηλαδή να θεωρηθεί ότι η επιρροή του ΙΟΠ στα χαρακτηριστικά (σ-ε) του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης

διατομής που υποβάλλεται σε κάμψη μπορεί να ληφθεί από το διάγραμμα (σ-ε) που έχει προκύψει από δοκιμή σε κεντρική θλίψη στοιχείου περισφιγμένου με ίδια χαρακτηριστικά ΙΟΠ. Σε περίπτωση ορθογωνικής όμως διατομής, κυρίως δε με διαφορετικές διαστάσεις στις δύο διευθύνσεις, η απλοποίηση αυτή ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα (Hollaway and Teng, 2008).

## 1.2 Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρουσία των οπλισμών σε ένα στοιχείο σκυροδέματος περισφιγμένο με ΙΟΠ το οποίο υποβάλλεται σε κεντρική θλίψη προφανώς διαφοροποιεί την συμπεριφορά σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο άοπλο στοιχείο. Ενδεικτικά:

- α) Ο διαμήκης οπλισμός συνεισφέρει στην ανάληψη αξονικής δύναμης.
- β) Οι συνδετήρες συνεισφέρουν στην ανάληψη τέμνουσας.
- γ) Εάν ο διαμήκης οπλισμός αστοχήσει πρόωρα έναντι λυγισμού, τότε ο λυγισμός των ράβδων είναι πιθανό να προκαλέσει την πρόωρη αστοχία του ΙΟΠ, χωρίς να ενεργοποιηθεί πλήρως η αντοχή του.



**Σχήμα 1.2** Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης περισιγμένου και απερίσιφικτου κυλίνδρου σκυροδέματος υπό κεντρική θλίψη (Li, Fang and Chern, 2003).

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την συμπεριφορά οπλισμένων κοντών στοιχείων σε κλίμακα 1:3 που υποβάλλονται σε κεντρική θλίψη. Πιο αναλυτικά, για στοιχεία που έχουν διαστασιοποιηθεί σύμφωνα με τον παλαιό ελληνικό κανονισμό σκυροδέματος του 1954 και ως εκ τούτου έχουν αραιούς συνδετήρες, διερευνάται η αναγκαία περίσιφιξη μέσω ΙΟΠ ώστε

να αναβαθμιστούν τα χαρακτηριστικά τους σε κεντρική θλίψη σε βαθμό που να αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά στοιχείων οπλισμένων έναντι τέμνουσας σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς. Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη:

α) **Αναλυτικό μέρος:** Εξετάστηκαν μοντέλα από την βιβλιογραφία που αποσκοπούν στην εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής οπλισμένων στοιχείων με περίσφιγξη από ΙΟΠ τα οποία υποβάλλονται σε κεντρική θλίψη. Τέσσερα μοντέλα που θεωρήθηκαν καταλληλότερα εφαρμόστηκαν σε πειραματικά αποτελέσματα από την βιβλιογραφία με στόχο να αξιολογηθεί η ικανότητά τους να ερμηνεύσουν αξιόπιστα τα πειραματικά αποτελέσματα. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών έγινε και η διαστασιολόγηση των δοκιμών της πειραματικής έρευνας.

β) **Πειραματικό μέρος:** Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε κεντρική θλίψη στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, 9 δοκίμια ύψους 30 εκατοστών, κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D=150\text{mm}$  (3 δοκίμια), καθώς και τετραγωνικής διατομής  $100\times 100$  (3 δοκίμια) και  $150\times 150$  (3 δοκίμια).

## 2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Επιλέχθηκαν από την βιβλιογραφία μοντέλα που προσομοιώνουν την συμπεριφορά υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με ΙΟΠ τα οποία υποβάλλονται σε κεντρική θλίψη. Τα μοντέλα εκτιμούν την τελική αντοχή σε θλίψη καθώς και την τάση περίσφιγξης λόγω ΙΟΠ, και τις ανηγμένες παραμορφώσεις.

Πριν την παρουσίαση των μοντέλων γίνεται αναφορά στις αντίστοιχες διατάξεις τους Ευρωκώδικα, ο οποίος λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση των μοντέλων αλλά και των πειραματικών αποτελεσμάτων στη συνέχεια της εργασίας. Επίσης κατά την παρουσίαση του κάθε μοντέλου γίνεται αναφορά σε ενδεχόμενα πειράματα στα οποία βασίστηκαν τα μοντέλα και συμπεράσματα που προέκυψαν από τους ερευνητές.

### 2.2 Μοντέλα που επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται

#### 2.2.1 Ευρωκώδικας 2 (EN1992-1-1) και Ευρωκώδικας 8 (EN1998-3)

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, παράγραφος 3.1.9, (*Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1, EN 1992-1-1: 2004*), η σχέση τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων για το περισφιγμένο σκυρόδεμα μπορεί να προκύψει από τις σχέσεις:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,000 + 5,0 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \text{ για } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck} \quad (1.1)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,125 + 2,50 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \text{ για } \sigma_2 > 0,05 f_{ck} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left( f_{ck,c} / f_{ck} \right)^2 \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \cdot \sigma_2 / f_{ck} \quad (1.4)$$

όπου  $\varepsilon_{c2} = 0,002$  και  $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$  για σκυρόδεμα αντοχής  $f_{ck} \leq 50$  MPa και

$f_{ck}$  η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

$f_{ck,c}$  η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

$\sigma_2$  η ενεργός πλευρική τάση λόγω της περίσφιγξης

$\varepsilon_{c2,c}$  η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην μέγιστη θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

$\varepsilon_{cu2,c}$  η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος

Επίσης, η παράγραφος Α.4.4.3 του Ευρωκώδικα 8 - μέρος 3, (*Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3, EN 1998-3: 2005*), αναφέρεται στην δράση της περίσφιγξης λόγω μανδυνών ΙΟΠ σε στοιχεία σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα:

Η αναγκαία τάση περίσφιγξης που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να επιτευχθεί μία επιδιωκόμενη πλαστιμότητα εξαρτάται από τον λόγο  $I_\chi = \mu_{\varphi,tar} / \mu_{\varphi,ava}$ , ανάμεσα στο δείκτη πλαστιμότητας στόχο (target) και στον διαθέσιμο (available) δείκτη πλαστιμότητας και μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$f_1 = 0,4 I_\chi^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} \quad (1.5)$$

όπου  $f_c$  η αντοχή του σκυροδέματος

$\varepsilon_{cu}$  η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος

$\varepsilon_{ju}$  η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του μανδύα ΙΟΠ που υιοθετείται και είναι μικρότερη από την ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας των ινών του ΙΟΠ  $\varepsilon_{fu}$ .

Στην περίπτωση των κυκλικών διατομών, τυλιγμένων με συνεχείς στρώσεις ΙΟΠ (όχι λωρίδες), η τάση περίσφιγξης που εφαρμόζεται από μία στρώση ΙΟΠ ισούται με

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{ju} \quad (1.6),$$

όπου  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ

$\rho_f$  το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα ΙΟΠ που σχετίζεται με το πάχος του μανδύα

$$\text{ως: } \rho_f = 4t_f / D \quad (1.7)$$



όπου  $t_f$  το πάχος του μανδύα ΙΟΠ και

$D$  η διάμετρος της διατομής

Στην περίπτωση ορθογωνικών διατομών στις οποίες οι γωνίες έχουν στρογγυλευθεί για να διευκολύνουν την εφαρμογή του μανδύα ΙΟΠ, η τάση περίσφιγξης που εφαρμόζεται από το ΙΟΠ ισούται με  $f_1' = k_s f_1$  (1.8)

$$\text{με: } k_s = 2R_c / D \quad (1.9)$$

$R_c$  η ακτίνα στρογγυλέματος των γωνιών της διατομής

$$\text{και } f_1 = 2E_f \varepsilon_{ju} t_f / D \quad (1.10) \quad , \text{ όπου όμοια με πριν}$$

$D$  το μήκος της μεγαλύτερης πλευράς της διατομής

$t_f$  το πάχος του μανδύα ΙΟΠ

$\varepsilon_{ju}$  η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του μανδύα ΙΟΠ

$E_f$  το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ

Δεν υπάρχει συγκεκριμένη διάταξη στον Ευρωκώδικα για το πώς εισάγεται ακριβώς η τάση περίσφιγξης λόγω ΙΟΠ και συνδετήρων ταυτόχρονα στη σχέση (1.1 – 1.2) από την οποία υπολογίζεται η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η εκτίμηση ότι η πλευρική τάση  $\sigma_2$  είναι το άθροισμα της πλευρικής τάσης περίσφιγξης λόγω συνδετήρων ( $\alpha \rho_{sx} f_{yw}$ ) (Ευρωκώδικας 8- μέρος 3, Α.3.2.2, (8), (b), (Α.6)) και της πλευρικής τάσης περίσφιγξης λόγω του μανδύα ΙΟΠ που υπολογίζεται από τις παραπάνω σχέσεις ( $f_1$ ). Επομένως,

$$\text{για κυκλική διατομή :} \quad \boxed{\sigma_2 = \alpha \rho_{sx} f_{yw} + 0,5 \cdot \rho_f E_f \varepsilon_{ju}} \quad (1.11)$$

$$\text{για ορθογωνική διατομή :} \quad \boxed{\sigma_2 = \alpha \rho_{sx} f_{yw} + \frac{2R_c}{D} \cdot \frac{2E_f \varepsilon_{ju} t_f}{D}} \quad (1.12)$$

Με βάση την παράγραφο 5.4.3.2.2 του Ευρωκώδικα 8- μέρος 1, EN 1998-1: 2005

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s \quad (1.13)$$

Ο συντελεστής  $\alpha$  εκφράζει την «αποδοτικότητα» της περισφιγξης και υπολογίζεται ως εξής:

α) για ορθογωνικές διατομές:

$$\alpha_n = 1 - \sum_n b_i^2 / 6b_o h_o \quad (1.14)$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \quad (1.15)$$

όπου

$n$  είναι το συνολικό πλήθος διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από κλειστούς συνδετήρες ή μονοσκελείς συνδετήρες, και

$b_i$  είναι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ράβδων που συγκρατούνται με συνδετήρες (βλέπε Σχήμα 5.7, Ευρωκώδικας 8, EN 1998-1: 2005)

$b_o, h_o$  οι διαστάσεις της διατομής του πυρήνα

$s$  η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων

β) Για κυκλικές διατομές με κυκλικούς συνδετήρες και διάμετρο περισφιγμένου πυρήνα  $D_o$  (έως τον άξονα των συνδετήρων):

$$\alpha_n = 1 \quad (1.16)$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2D_o}\right)^2 \quad (1.17)$$

### 2.2.2 Υ.-C. Wang, K. Hsu (2007)

Ο στόχος της μελέτης είναι να παρουσιάσει μια σειρά από εξισώσεις σχεδιασμού για τον υπολογισμό της αξονικής αντοχής οπλισμένων υποστυλωμάτων περισφιγμένων με ΙΟΠ. Οι εξισώσεις που προτείνονται βαθμονομούνται αξιοποιώντας τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών με υποστυλώματα τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής.

Εξισώσεις σχεδιασμού

Η ονομαστική κεντρική θλιπτική αντοχή, σε όρους αξονικού φορτίου,  $P_n$ , δίνεται από την σχέση:

$$P_n = P_{cn} + P_{sn} \quad (2.1)$$

όπου  $P_{cn}$  και  $P_{sn}$  είναι η κεντρική θλιπτική αντοχή που φέρει το σκυρόδεμα και ο διαμήκης οπλισμός αντίστοιχα. Εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$P_{cn} = 0,3 f'_c A_{cu} + f'_{cc,j} A_{cj} + f'_{cc,js} A_{cjs} \quad (2.2)$$

$$P_{sn} = f_{sy} A_s \quad (2.3)$$

όπου  $f'_{cc,j}$  και  $f'_{cc,js}$  είναι η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος λόγω του μανδύα ΙΟΠ και του συνδυασμού συνδετήρων και μανδύα ΙΟΠ αντίστοιχα.

$A_{cu}$ ,  $A_{cj}$  και  $A_{cjs}$  είναι οι περισφιγμένες επιφάνειες που αναφέρονται σε διαφορετικές περιοχές

$$A_{cu} = A_{cc,j} - A_{e,j} \quad (2.4)$$

$$A_{cj} = A_{e,j} - A_{e,s} \quad (2.5)$$

$$A_{cjs} = A_{e,s} \quad (2.6)$$

όπου  $A_{cc,j}$  είναι η επιφάνεια σκυροδέματος που περικλείεται από τον μανδύα ΙΟΠ,

$A_{e,j}$  η ενεργός περισφιγμένη επιφάνεια σκυροδέματος από τον μανδύα ΙΟΠ

$A_{e,s}$  η περισφιγμένη επιφάνεια σκυροδέματος από τους συνδετήρες.

Οι παραπάνω επιφάνειες δίνονται από τους τύπους:

$$A_{cc,j} = t_x t_y - A_s - (4r^2 - \pi r^2) \quad (2.7)$$

$$A_{e,j} = t_x t_y - \frac{w_{jx}^2 + w_{jy}^2}{3} \tan \theta_j - A_s - (4r^2 - \pi r^2) \quad (2.8)$$

$$A_{e,s} = \left( d_x d_y - \sum \frac{w_s'^2}{6} \right) \left( 1 - 0.5 \frac{s'}{d_x} \right) \left( 1 - 0.5 \frac{s'}{d_y} \right) \quad (2.9)$$

Στο **Σχήμα 2.1** καθορίζονται τα μεγέθη των παραπάνω εξισώσεων. Ο όρος  $s'$  είναι η καθαρή απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων. Η γωνία  $\theta_j$  λόγω παρουσίας του ΙΟΠ ορίζεται, χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα, ίση με  $45^\circ$ . Η γωνία  $\theta_s$  λόγω της περισφίγξης από τους συνδετήρες επίσης θεωρείται ίση με  $45^\circ$ .

$t_x$  και  $t_y$  οι διαστάσεις της διατομής

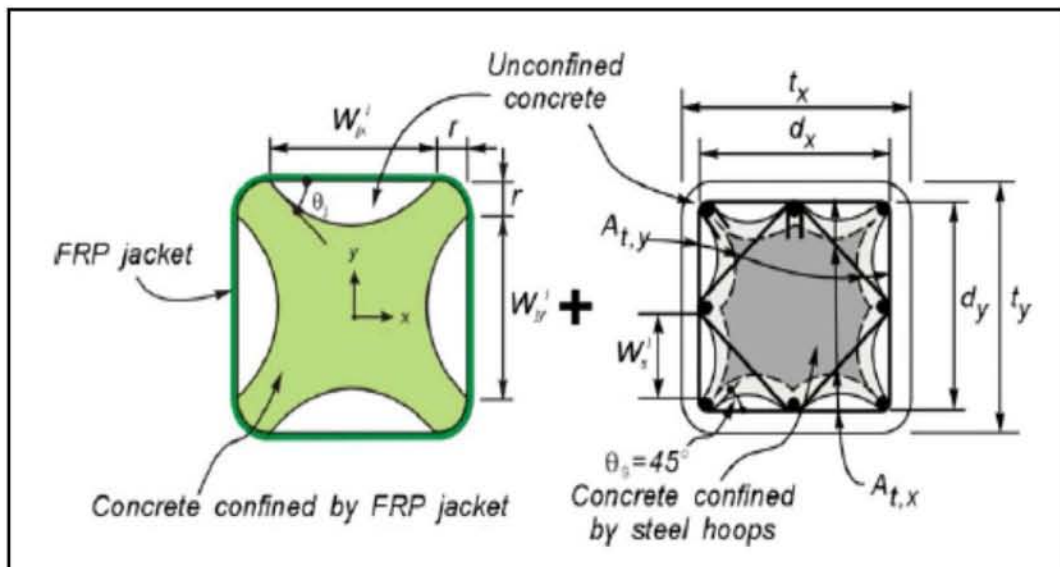
$A_s$  το εμβαδό του διαμήκη οπλισμού

$r$  η ακτίνα στρογγύλευσης των γωνιών της διατομής

$w_{ji}'$  το μήκος των ευθύγραμμων τμημάτων της διατομής

$d_x$  και  $d_y$  οι διαστάσεις του πυρήνα σκυροδέματος που περισφίγεται από τους συνδετήρες

$w_s'$  η «καθαρή» απόσταση μεταξύ γειτονικών ράβδων που συγκρατούνται από τους συνδετήρες



**Σχήμα 2.1** Περισφίγμένες περιοχές σε ορθογωνική διατομή λόγω συνδετήρων και μανδύα ΙΟΠ (Y.-C. Wang, K. Hsu, 2007)

Κατά τον σχεδιασμό είναι αναγκαίο να μειωθεί η ονομαστική θλιπτική αντοχή που δίνεται από την εξ. (2.1) για να συνυπολογιστούν παράγοντες όπως αποκλίσεις στις ιδιότητες των υλικών, η διασπορά στην εξίσωση, η κάμψη των υποστυλωμάτων, η φύση και η συνέπειες

της αστοχίας, η μείωση της φέρουσας ικανότητας μετά από μακροχρόνια φόρτιση. Οι μειώσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν μέσω μειωτικών συντελεστών,  $\phi$ , όπως φαίνεται στην σχέση:

$$\phi P_n = \phi_c P_{cn} + \phi_s P_{sn} \quad (2.10)$$

Ο κανονισμός ACI 318 απαιτεί για υποστυλώματα το αξονικό θλιπτικό φορτίο αστοχίας να μην υπερβαίνει την  $\phi P_n$  υπολογιζόμενη με την σχέση:

$$\phi P_n = 0.80\phi(0.85P_{cn} + P_{sn}) \quad (2.11)$$

Για στοιχεία που υπόκεινται σε θλίψη με εγκάρσιους συνδετήρες ο μειωτικός συντελεστής  $\phi$  λαμβάνεται ίσος με 0,7, καθώς και  $\phi_c = 0,476$ ,  $\phi_s = 0,56$  οπότε η εξίσωση (2.10) γίνεται:

$$\phi P_n = 0,476P_{cn} + 0,56P_{sn} \quad (2.12)$$

$$\phi P_n \geq P_u \quad (2.13)$$

όπου  $P_u$  η κεντρική θλιπτική δύναμη σχεδιασμού στο υποστυλόμε.

#### Εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος

Η θλιπτική αντοχή,  $f'_{cc}$ , του περισφιγμένου σκυροδέματος δίνεται από την σχέση

$$f'_{cc} = k_c f'_c \quad (2.14)$$

στην οποία  $f'_c$  είναι η κυλινδρική θλιπτική αντοχή του άοπλου σκυροδέματος και  $k_c$  ο συντελεστής αύξησης της αντοχής, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 \quad (2.15)$$

$$\alpha_1 = 1.25 \left( 1.8 \sqrt{1 + 7.94 \frac{F_1}{f'_c}} - 1.6 \frac{F_1}{f'_c} - 1 \right) \quad (2.16.a)$$

$$\alpha_2 = \left[ 1.4 \frac{f_1}{F_1} - 0.6 \left( \frac{f_1}{F_1} \right)^2 - 0.8 \right] \sqrt{\frac{F_1}{f'_c}} + 1 \quad (2.16.b)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις  $F_1$  και  $f_1$  είναι η μέγιστη και η ελάχιστη πλευρική τάση λόγω περίσφιγξης αντίστοιχα.

Περίσφιγξη λόγω του μανδύα ΙΟΠ. μόνον

Οι τάσεις λόγω περίσφιγξης που αναπτύσσονται από τον μανδύα ΙΟΠ στις κατευθύνσεις  $x$  και  $y$  είναι:

$$f_{1,jx} = \rho_{jx} 0,005 E_p \quad (2.17.\alpha)$$

$$f_{1,jy} = \rho_{jy} 0,005 E_p \quad (2.17.\beta)$$

όπου  $E_p$  το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα ΙΟΠ. Το 0,005 αντιπροσωπεύει την εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση του μανδύα ΙΟΠ. Τα ποσοστά ΙΟΠ ορίζονται ως :

$$\rho_{jx} = 2 \frac{t_j}{t_y} \quad (2.18.\alpha) \quad \rho_{jy} = 2 \frac{t_j}{t_x} \quad (2.18.\beta)$$

όπου  $t_j$  είναι το ονομαστικό πάχος του μανδύα ΙΟΠ ενώ  $t_x$  και  $t_y$  είναι οι διαστάσεις της διατομής.

Περίσφιγξη λόγω των εγκάρσιων συνδετήρων μόνον

Οι τάσεις λόγω περίσφιγξης που αναπτύσσονται από τους συνδετήρες στις κατευθύνσεις  $x$  και  $y$  είναι:

$$f_{1,sx} = \rho_{sx} f_{syh} \quad (2.19.\alpha) \quad f_{1,sy} = \rho_{sy} f_{syh} \quad (2.19.\beta)$$

όπου  $f_{syh}$  είναι η τάση διαρροής των συνδετήρων.

Τα ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού ορίζονται ως

$$\rho_{sx} = \frac{A_{t,x}}{s d_y} \quad (2.20.\alpha) \quad \rho_{sy} = \frac{A_{t,y}}{s d_x} \quad (2.20.\beta)$$

όπου  $d_x$  και  $d_y$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ σκελών του περιμετρικού συνδετήρα στην  $x$  και  $y$  κατεύθυνση αντίστοιχα.  $A_{t,x}$ ,  $A_{t,y}$  είναι οι επιφάνειες του εγκάρσιου οπλισμού που είναι παράλληλες στην  $x$  και  $y$  κατεύθυνση αντίστοιχα. Ενώ  $s$  είναι η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων καθ' ύψος.

Περίσφιγξη λόγω συνδυασμού εγκάρσιου οπλισμού και μανδύα ΙΟΠ.

Η τάση λόγω περίσφιγξης που δρα στην επιφάνεια  $A_{cc,j}$  λόγω και των δύο τρόπων περίσφιγξης είναι :

$$f_1 = f_{1,s} + f_{1,j} \quad (2.21)$$

Οπότε, η θλιπτική αξονική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος μόνο με μανδύα ΙΟΠ ,  $f'_{cc,j}$  , υπολογίζεται αντικαθιστώντας τις εξ. (2.17α) και (2.17β) στις εξ. (2.16α) και (2.16β) . Επιπλέον, η θλιπτική αξονική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος με συνδυασμό μανδύα ΙΟΠ και συνδετήρες,  $f'_{cc,js}$  , υπολογίζεται αντικαθιστώντας την εξ. (2.21) στην εξ. (2.16). Αφού υπολογίζονται τα παραπάνω η ονομαστική θλιπτική αντοχή, σε όρους αξονικού φορτίου που φέρει το σκυρόδεμα , υπολογίζεται από την εξ. (2.2).

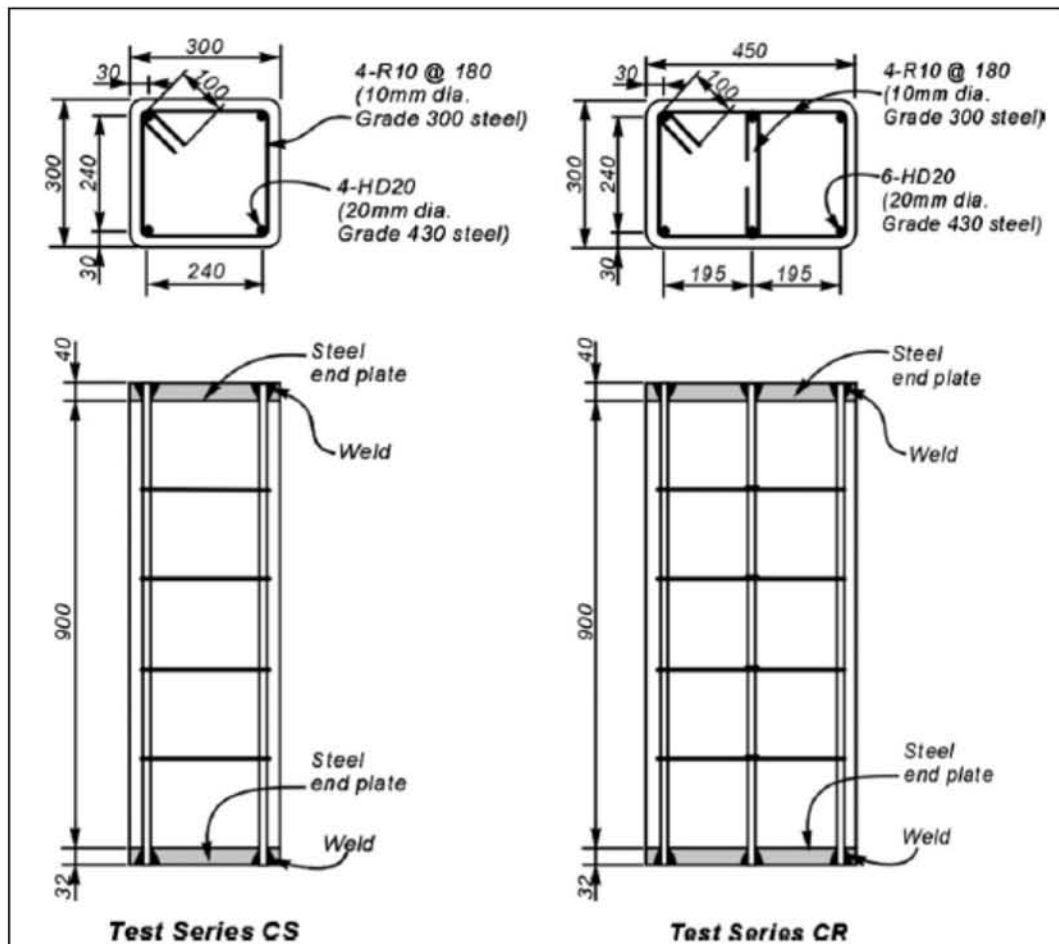
Εφαρμογή του μοντέλου σε αποτελέσματα πειραματικού προγράμματος

Χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμών ύψους 900 mm. Η πρώτη σειρά αποτελείται από δοκίμια με τετραγωνική διατομή 300 mm , ενώ η δεύτερη από ορθογωνική διατομή 300x400 mm. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών καθώς και οι λεπτομέρειες του οπλισμού φαίνονται στον Πίνακα 2.1 και το Σχήμα 2.2.

Το ποσοστό του διαμήκη οπλισμού είναι 1,5%. Κάθε σειρά δοκιμών αποτελείται από τρία υποστυλώματα. Οι γωνίες των διατομών στρογγυλεύθηκαν με ακτίνα 30 mm. Σε κάθε σειρά το πρώτο υποστυλώμα μένει ατύλιχτο για να λειτουργήσει ως δοκίμιο ελέγχου. Στα υπόλοιπα δοκίμια τοποθετούνται 2 και 6 στρώσεις από ΙΟΠ γυαλιού αντίστοιχα. Το πάχος του κάθε φύλλου είναι 1,27 mm. Το τελικό μήκος υπερκάλυψης του μανδύα είναι 150 mm. Τα δοκίμια έμειναν με τους μανδύες για δύο εβδομάδες πριν δοκιμαστούν σε θερμοκρασία 18-20°C. Το αξονικό φορτίο εφαρμόστηκε σταδιακά, με ρυθμό παραμορφώσεων 0,00001 mm/mm/s.

Πίνακας 2-1 Ιδιότητες των υλικών Wang and Hsu (2007)

Mechanical properties of materials							
Material	Area (mm <sup>2</sup> )	$E$ (GPa)	$f'_c$ at test (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{sh}$ (%)	$\epsilon_u$ (%)
Concrete	–	21	19	–	–	–	0.3
R10 steel stirrups	78.5	203	–	365	434	1.50	19.00
HD20 steel bars	314.2	200	–	439	592	1.17	6.67
GFRP 1.27 mm for 1-ply thick.	–	20.5	–	–	375	–	2.0



Σχήμα 2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες όπλισης των δοκιμών (Wang and Hsu, 2007)



Πίνακας 2-2 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας (Wang and Hsu, 2007)

Measured and predicted compressive loads				
Unit	Compressive load (kN)			Predicted <sup>(2)</sup>
	Measured			
	at 0.2% axial strain	at 0.5% transverse strain <sup>(1)</sup>	Maximum	
CS0	2127		2127	
CS2 ( $f'_c = 18.9$ MPa)		2335	2525	2355
CS6		2978	4025	2949
CR0	3268		3268	
CR2 ( $f'_c = 18.9$ MPa)		3420	3598	3300
CR6		4200	4494	3924
<i>Notes:</i> (1) Average of three sides. Ignores the transverse strain measured over the overlapped side.				
(2) Using a jacket strain of 0.5%.				

Συμπεράσματα

Η αντοχή και η ικανότητα παραμόρφωσης αυξάνονται καθώς αυξάνεται το πάχος του μανδύα ΙΟΠ, δηλαδή το πλήθος των φύλλων του μανδύα.

Στα δοκίμια χωρίς μανδύα ΙΟΠ συνέβη λυγισμός των ράβδων του διαμήκη σπλισμού και προκλήθηκε θρυμματισμός της επικάλυψης. Το θλιπτικό αξονικό φορτίο μειώθηκε απότομα πριν φτάσει τη θλιπτική παραμόρφωση του 0,2%. Αυτό το υποστύλωμα επέδειξε μικρή ικανότητα παραμόρφωσης. Σε δοκίμια που επαρκούσε το πάχος του μανδύα ΙΟΠ έτσι ώστε να μην σημειωθεί πρόωρος λυγισμός του διαμήκη σπλισμού, ο τύπος της αστοχίας ήταν η αποκόλληση (debonding) των φύλλων ΙΟΠ. Στα δοκίμια με ακόμα μεγαλύτερο πάχος μανδύα, δηλαδή 6 φύλλα ΙΟΠ, η αστοχία σημειώθηκε σχεδόν μετά από διπλάσιο φορτίο σε σχέση με το αρχικό δοκίμιο, χωρίς μανδύα ΙΟΠ. Επίσης η αστοχία συνέβη λόγω αστοχίας του μανδύα στις στρογγυλεμένες γωνίες της διατομής.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιβεβαίωσαν ότι ο μανδύας ΙΟΠ προσφέρει θαυμάσια περίσφιγξη στις τετραγωνικές αλλά και στις ορθογωνικές διατομές, αυξάνοντας την τάση αλλά και την τροπή αστοχίας. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος αυτή συμβάλλει στην αποτροπή του πρόωρου λυγισμού των ράβδων του διαμήκη σπλισμού. Τέλος οι προβλεπόμενες τιμές του προτεινόμενου μοντέλου συσχετίζονται καλά με τα πειραματικά

αποτελέσματα, στην περίπτωση των δοκιμίων με δύο στρώσεις ΙΟΠ (CR2, CS2), ενώ υπάρχει υποτίμηση της πειραματικής τιμής στα δοκίμια με έξι στρώσεις ΙΟΠ (CR6, CS6)

### 2.2.3 Pellegrino C. and Modena C. (2010)

Το μοντέλο εστιάζει στην αλληλεπίδραση μεταξύ του υπάρχοντος οπλισμού από χάλυβα και την εξωτερική ενίσχυση με ΙΟΠ. Αυτή η αλληλεπίδραση είναι σημαντική από τη στιγμή που η διαμόρφωση του οπλισμού από χάλυβα επηρεάζει τον τρόπο που αναπτύσσονται οι ρωγμές κατά την αστοχία επομένως και την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με ΙΟΠ σε σχέση με την αντοχή και την πλαστιμότητα.

Οι ερευνητές παρέχουν αναλυτικά εκφράσεις για (1) την ενεργή τάση λόγω περίσφιγξης στην αστοχία, (2) την μέγιστη τάση, (3) την τάση αστοχίας, (4) την αξονική ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας, (5) την αξονική ανηγμένη παραμόρφωση σε σχέση με την μέγιστη τάση.

Το μοντέλο προτείνει διαφορετικές σχέσεις για κάθε τύπο υποστυλώματος (κυκλική και ορθογωνική διατομή, με ή χωρίς οπλισμό από χάλυβα).

Λήφθηκαν υπόψη αποτελέσματα από πειράματα σε 219 υποστυλώματα κυκλικής διατομής χωρίς οπλισμό, 77 υποστυλώματα κυκλικής διατομής με οπλισμό από χάλυβα, 135 υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής χωρίς οπλισμό, και 156 υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής με οπλισμό από χάλυβα, όλα περισφιγμένα με ΙΟΠ.

Για την τάση περίσφιγξης λόγω ΙΟΠ εφαρμόζεται η σχέση:

$$f_{lf} = \frac{1}{2} k_f \rho_f E_f \varepsilon_f^{eff} \quad (3.1)$$

$$\text{όπου } \rho_f = \frac{4n_f t_f}{D} \quad \text{για υποστυλώματα με κυκλική διατομή} \quad (3.2.a)$$

$$\text{και } \rho_f = \frac{2n_f t_f (b+h)}{bh} \quad \text{για υποστυλώματα με ορθογωνική διατομή} \quad (3.2.b)$$

όπου  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ,  $n_f$  και  $t_f$  αριθμός στρώσεων και πάχος μιας στρώσης ΙΟΠ, αντίστοιχα. Ενώ  $D, b, h$  οι γεωμετρικές διαστάσεις του στοιχείου.

Ο  $k_f$  είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης και ορίζεται ως :

$$k_f = k_\alpha \cdot k_\alpha \cdot k_h \quad (3.3)$$

όπου  $k_h$  συντελεστής οριζόντιας αποδοτικότητας που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_h = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh} \quad (3.4)$$

$k_v$  συντελεστής αποδοτικότητας καθ' ύψος που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$k_v = \left( 1 - \frac{p'_f}{2 \cdot d_{\min}} \right)^2 \quad (3.5)$$

όπου  $p'_f$  η «καθαρή» απόσταση μεταξύ δύο λωρίδων ΙΟΠ και  $d_{\min}$  η ελάχιστη διάσταση της διατομής. Για συνεχές ύφασμα ΙΟΠ ο συντελεστής  $k_v = 1$ .

$k_\alpha$  συντελεστής που χρησιμοποιείται όταν οι ίνες ΙΟΠ είναι σπειροειδώς τοποθετημένες με γωνία  $\alpha$  σε σχέση με τη διατομή του μέλους και μπορεί να υπολογιστεί ως

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha} \quad (3.6)$$

Ο όρος  $\varepsilon_f^{eff}$  είναι η ενεργός εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία αυτή η παραμόρφωση είναι μικρότερη από την παραμόρφωση αστοχίας του ΙΟΠ,  $\varepsilon_{fu}$ . Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο μειωτικός συντελεστής  $k_\varepsilon$ .

$$\varepsilon_f^{eff} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} \quad (3.7)$$

Οι Xiao και Wu (2000) και Matthys et al. (2005) προτείνουν σύμφωνα με τα πειραματικά τους αποτελέσματα :  $k_\varepsilon = 0,5$ . Ενώ οι Lam και Teng (2003) προτείνουν ένα εύρος τιμών μεταξύ 0,6 και 0,85.

Για υποστυλώματα με συνδετήρες από χάλυβα η τάση περίσφιγξης λόγω του εγκάρσιου οπλισμού υπολογίζεται ως:

$$f_{ls} = \frac{1}{2} k_s \rho_{st} f_{y,st} \quad (3.8)$$

όπου  $\rho_{st}$  το ογκομετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού,  $f_{y,st}$  η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού και  $k_s$  ο συντελεστής αποδοτικότητας των συνδετήρων. Ο συντελεστής αποδοτικότητας υπολογίζεται από την σχέση:

$$k_s = k_{es} k_v \quad (3.9)$$

όπου  $k_{es}$  ο συντελεστής οριζόντιας αποδοτικότητας που ορίζεται ως:

$$k_{es} = \frac{1 - \sum (w_{xi}^2 + w_{yi}^2) / 6xy}{1 - \rho_{cc}} \quad (3.10)$$

με  $k_{es} = 1$  για κυκλικές διατομές

Ενώ  $k_v$  είναι ο συντελεστής της αποδοτικότητας καθ' ύψος και ορίζεται ως:

$$k_v = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (3.11)$$

για κυλινδρικά υποστυλώματα περισφιγμένα με κυκλικούς συνδετήρες

$$k_v = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (3.12)$$

για κυλινδρικά υποστυλώματα περισφιγμένα με σπείρα

$$k_v = \frac{(1 - s' / 2x)(1 - s' / 2y)}{1 - \rho_{cc}} \quad (3.13)$$

για ορθογωνικά υποστυλώματα

Στις παραπάνω εξισώσεις  $x$  και  $y$  είναι τα μήκη του περιμετρικού συνδετήρα

$w_{xi}, w_{yi}$  οι αποστάσεις μεταξύ δύο διαμήκων ράβδων, οι οποίες συγκρατούνται από συνδετήρες, κατά μήκος των δύο κύριων κατευθύνσεων στη διατομή

$\rho_{cc}$  το γεωμετρικό ποσοστό του διαμήκη οπλισμού

$d_s$  η διάμετρος του συνδετήρα ή της σπείρας

$S'$  η καθαρή απόσταση μεταξύ δύο συνδετήρων/σπειρών

Τάση περισφιγξης κατά την αστοχία  $P_u$

Υπολογίζεται ως άθροισμα της συνεισφοράς του ΙΟΠ ( $f_{lf}$ ) και του εγκάρσιου οπλισμού από χάλυβα  $f_{ls}$  μειωμένο με τον λόγο  $A_{cc} / A_g$ , όπου  $A_{cc}$  είναι η επιφάνεια της διατομής που περικλείεται από τους συνδετήρες και  $A_g$  η συνολική επιφάνεια της διατομής.

$$P_u = f_{lf} + f_{ls} \frac{A_{cc}}{A_g} \quad (3.14)$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας  $k_e$  για το ΙΟΠ ορίζεται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το αν το υποστυλώμα έχει οπλισμό από χάλυβα ή όχι.

Σε ότι αφορά τα περισφιγμένα με ΙΟΠ υποστυλώματα χωρίς οπλισμό, η κύρια αιτία της μείωσης της αποδοτικότητας είναι οι οξείες γωνίες των ορθογωνικών διατομών. Εκτός από ότι μειώνεται η περισφιγμένη επιφάνεια, προκαλείται συγκέντρωση τάσεων κοντά στις γωνίες με αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης τάσης αστοχίας του ΙΟΠ.

Με γραμμική παλινδρόμηση πειραματικών αποτελεσμάτων προτείνεται η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή  $k_e$  σε υποστυλώματα χωρίς οπλισμό:

$$k_e = 0,25 + 0,25(2r/b) \quad (3.15)$$

όπου  $r$  είναι η ακτίνα καμπύλωσης των γωνιών και  $b$  η μικρότερη διάσταση της διατομής. Για  $2r/b = 1$ , δηλαδή κυκλική διατομή,  $k_e = 0,5$ .

Για υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα ο συντελεστής δεν εξαρτάται ξεκάθαρα από τον λόγο  $2r/b$ . Αυτό πιθανά αποδίδεται στην δράση των συνδετήρων κοντά στις γωνίες, οι οποίοι μειώνουν την συγκέντρωση τάσεων στο ΙΟΠ ανεξάρτητα από την καμπυλότητα της γωνίας. Στις περιπτώσεις αυτές βρέθηκε ότι ο συντελεστής  $k_e$  εξαρτάται από την παράμετρο  $C$  που ορίζεται ως:

$$C = \frac{E_{y,long} \cdot \rho_{y,long}}{E_f \cdot \rho_f} \quad (3.16)$$

όπου  $E_{y,long}$  και  $\rho_{y,long}$  το μέτρο ελαστικότητας και το γεωμετρικό ποσοστό του διαμήκη οπλισμού, αντίστοιχα, ενώ  $E_f$  και  $\rho_f$  το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ και το ποσοστό του ΙΟΠ.

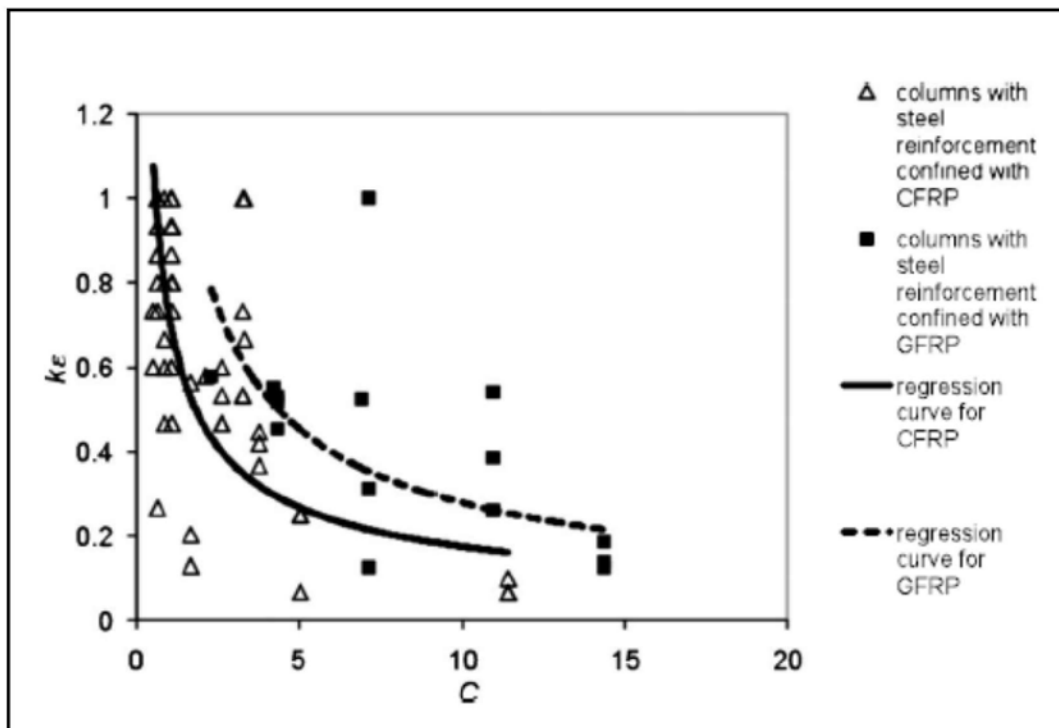
Η παράμετρος  $C$  είναι ορισμένη με τρόπο που παίρνει υπόψη τις αρνητικές συνέπειες που έχει η συγκέντρωση τάσεων στο ΙΟΠ εξαιτίας του λυγισμού των κατακόρυφων ράβδων. Αν η δυσκαμψία του ΙΟΠ δεν είναι αρκετή για να αντισταχθεί στον λυγισμό, είναι δυνατό να συμβεί συγκέντρωση τάσεων και να προκληθεί πρόωμη αστοχία.

Από αυτή την παρατήρηση συνεπάγεται ότι η αποδοτικότητα του συντελεστή της περίσφιγξης μειώνεται σε υποστυλώματα με ΙΟΠ και οπλισμό από χάλυβα όταν το μηχανικό ποσοστό οπλισμού αυξάνεται σε σχέση με το μηχανικό ποσοστό ΙΟΠ.

Λαμβάνοντας υπόψη πειραματικά δεδομένα με μια σχέση παλινδρόμησης πάλι, οι ερευνητές καταλήγουν στην έκφραση:

$$k_s = \gamma C^{-0.7} \leq 0,8 \quad (3.17)$$

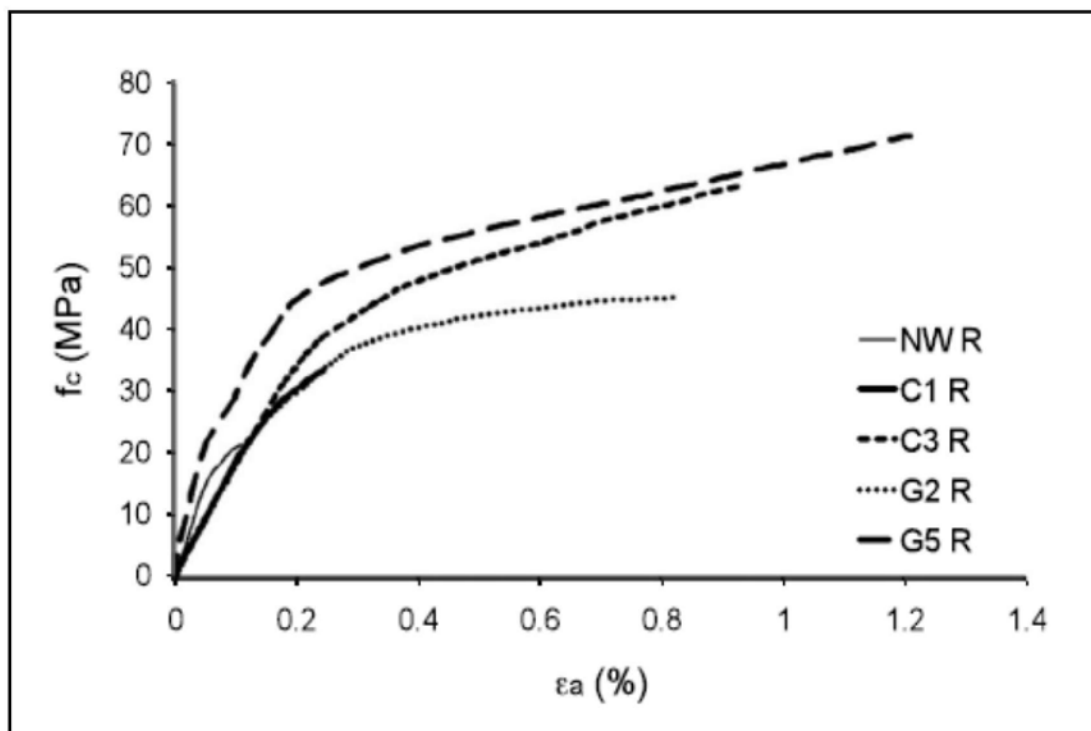
όπου το  $\gamma$  είναι ίσο με 0,7 για ΙΟΠ από άνθρακα και 1,5 για ΙΟΠ από γυαλί.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα  $k_s - C$  (Pellegrino C. and Modena C. ,2010)

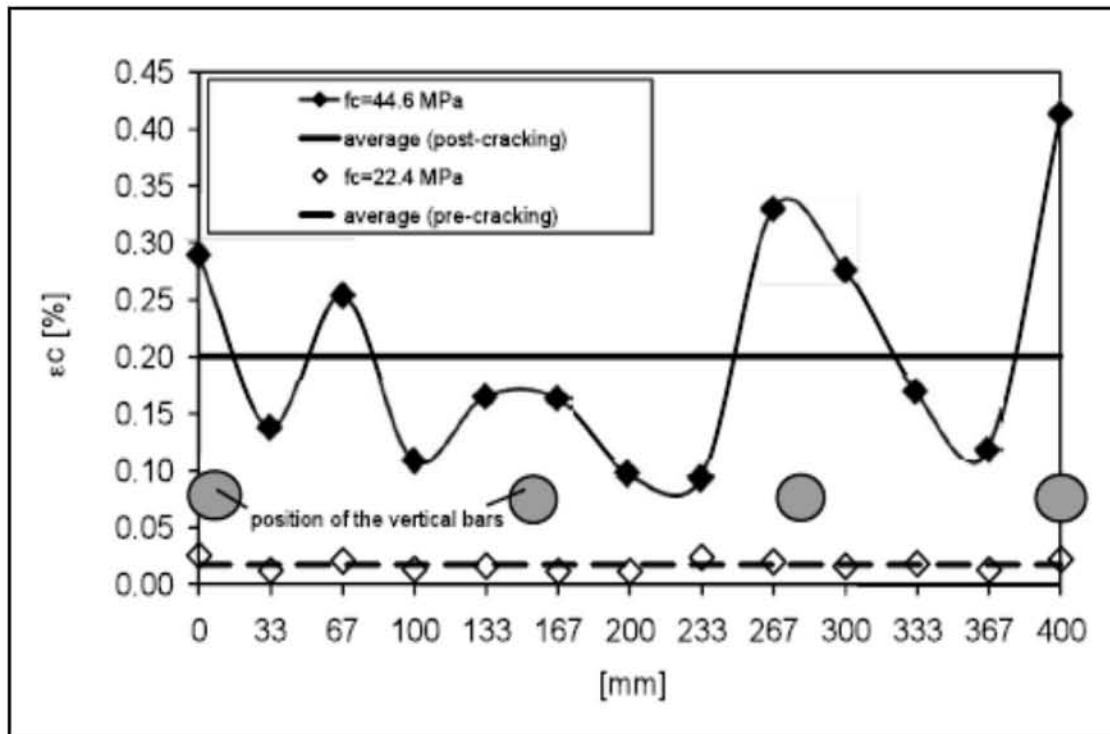
Πειραματική βάση δεδομένων για προσδιορισμό του  $k_{\varepsilon}$ 

Οι παραπάνω σχέσεις προέκυψαν με βάση πειραματικά αποτελέσματα των Pellegrino et al. (2004) και Tinazzi et al. (2003), από δοκιμές σε θλίψη κυλινδρικών υποστυλωμάτων με οπλισμό. Το ύψος των δοκιμίων ήταν 800 mm και η διάμετρος 350 mm. Ο εγκάρσιος οπλισμός ήταν συνδετήρες διαμέτρου 8 mm σε απόσταση 200 mm, ενώ ο διαμήκης οπλισμός 8 ράβδοι διαμέτρου 14 mm κατά μήκος της περιμέτρου, σε ίσες αποστάσεις. Το πάχος μιας στρώσης ΙΟΠ άνθρακα ήταν 0,165 mm ενώ μιας στρώσης ΙΟΠ γυαλιού 0,230 mm.

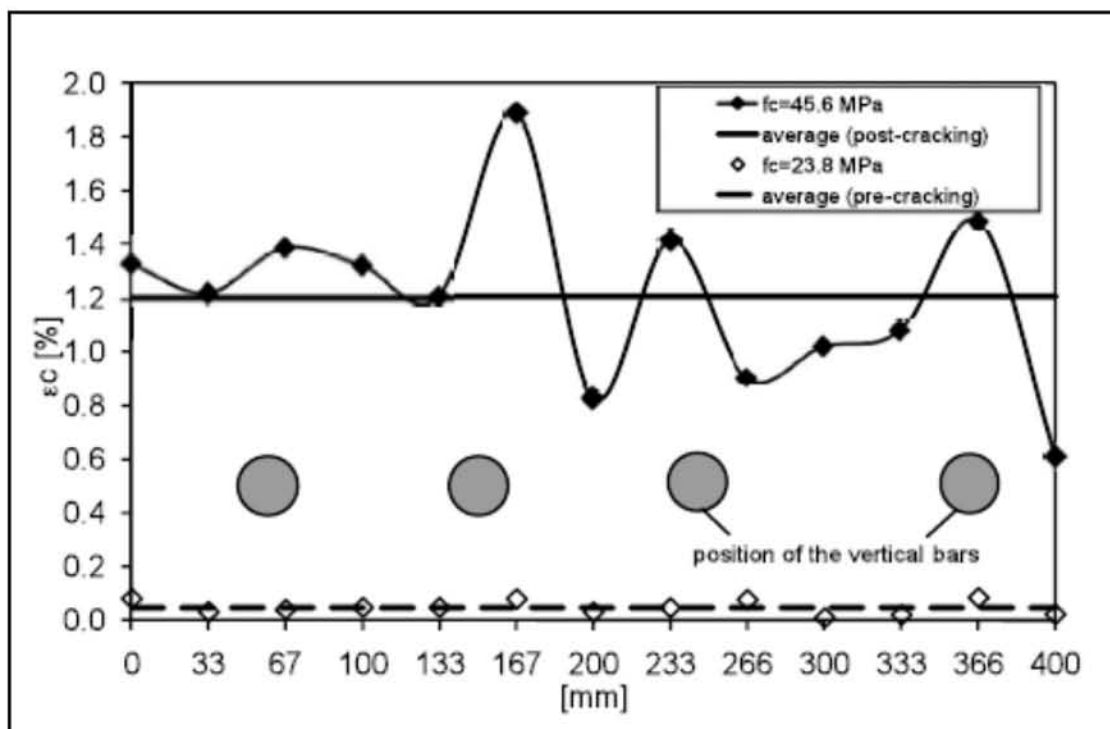


**Σχήμα 2.4** Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης για υποστυλώματα με συνδετήρες. NWR= χωρίς εξωτερικό ΙΟΠ, C1R= περίσφιγξη με μία στρώση ΙΟΠ άνθρακα, C3R= περίσφιγξη με τρεις στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα, G2R= περίσφιγξη με δύο στρώσεις ΙΟΠ γυαλιού, G5R= περίσφιγξη με πέντε στρώσεις ΙΟΠ γυαλιού. (Pellegrino C., Modena C., 2010)

Έγιναν πολύ ακριβείς μετρήσεις των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος της περιμέτρου των δοκιμίων ( $\varepsilon_{lat}$  = lateral strain) σε σχέση με τη θέση των ράβδων του διαμήκη οπλισμού (Σχήματα 2.5 και 2.6). Παρατηρείται ότι υπάρχει απότομη μεταβολή των ανηγμένων παραμορφώσεων στη θέση των ράβδων του διαμήκη οπλισμού. Αυτό συμβαίνει γιατί ο λυγισμός των ράβδων προκαλεί πίεση στον μανδύα ΙΟΠ και έχει ως συνέπεια τον επηρεασμό του συντελεστή αποδοτικότητας.



**Σχήμα 2.5** Ανηγγμένες παραμορφώσεις κατά μήκος της περιμέτρου ( $\varepsilon_{lat}$  = lateral strain) στην αρηγμάτωτη φάση ( $f_c=22.4$  MPa) και στην ρηγματωμένη ( $f_c= 44.6$  MPa) για περίσφιγξη με ΙΟΠ άνθρακα (Pellegrino C. , Modena C., 2010)

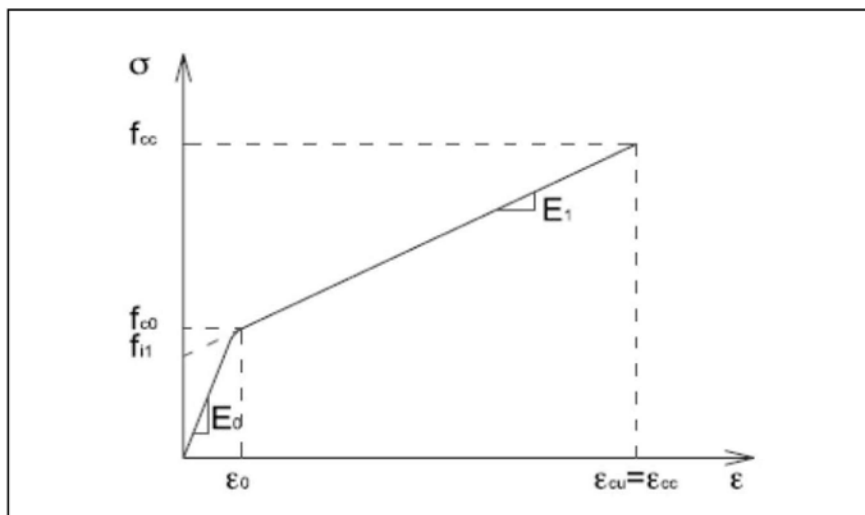


**Σχήμα 2.6** Ανηγγμένες παραμορφώσεις κατά μήκος της περιμέτρου ( $\varepsilon_{lat}$  = lateral strain) στην αρηγμάτωτη φάση ( $f_c=23.8$  MPa) και στην ρηγματωμένη ( $f_c= 45.6$  MPa) για περίσφιγξη με ΙΟΠ γυαλιού. (Pellegrino C. , Modena C., 2010)

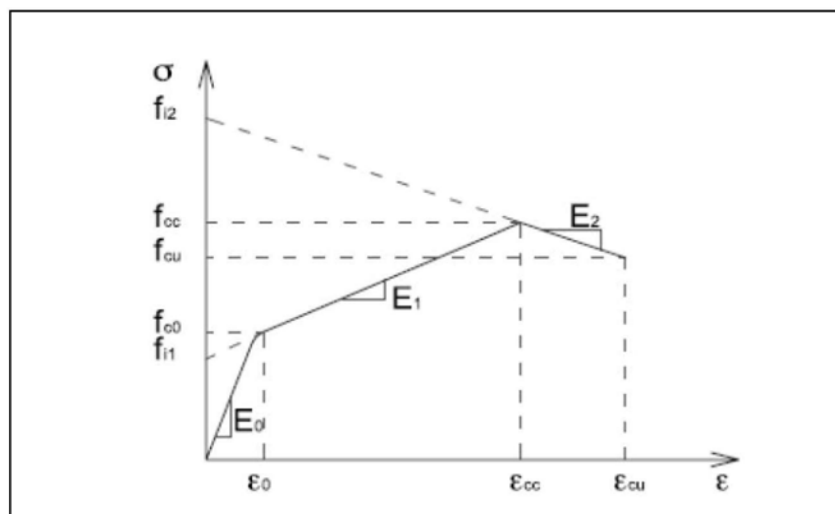


Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων

Τα πειράματα για σκυρόδεμα περισφιγμένο με ΙΟΠ δείχνουν ότι το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων, μετά από μία πρώτη φάση όπου είναι πολύ όμοιο με αυτό του σκυροδέματος χωρίς περισφιγξη, ακολουθεί μια πλαστική φάση με κλάδο που αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την αποδοτικότητα της περισφιγξης. Διατομές με επαρκώς στρογγυλεμένες γωνίες (π.χ. σύμφωνα με τους Wang and Wu (2008)), με  $2r/b \geq 0,3$  ) συνήθως εμφανίζουν κλάδο που αυξάνεται μέχρι την αστοχία. Ορθογωνικές διατομές με μεγάλο λόγο μεταξύ των διαστάσεων ή μικρή καμπύλωση των γωνιών π.χ.  $2r/b < 0,3$  συνήθως εμφανίζουν στο τέλος πτωτικό κλάδο.



**Σχήμα 2.7** Ιδεατό διάγραμμα σ-ε για υποστρώματα με  $2r/b \geq 0.3$  (Pellegrino C., Modena C., 2010)



**Σχήμα 2.8** Ιδεατό διάγραμμα σ-ε για υποστρώματα με  $2r/b < 0.3$  (Pellegrino C., Modena C., 2010)

Το προτεινόμενο μοντέλο για την σχέση τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων βασίζεται στο διγραμμικό, με τέσσερις παραμέτρους, μοντέλο των Richard and Abbott (1975) :

$$\sigma = \frac{(E_0 - E_1)\varepsilon}{\left[1 + \left(\frac{(E_0 - E_1)\varepsilon}{f_{i1}}\right)^n\right]^{1/n}} + E_1\varepsilon \quad \text{για} \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \quad (3.18)$$

όπου  $E_0$  το μέτρο ελαστικότητας του απερίσφιγκτου σκυροδέματος (η κλίση του πρώτου κλάδου),  $E_1$  η κλίση του δεύτερου κλάδου που μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$E_1 = \frac{f_{cc} - f_{c0}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{c0}} \quad (3.19)$$

όπου  $f_{c0}$  και  $\varepsilon_{c0}$  η μέγιστη τάση και τροπή για απερίσφιγκτο σκυρόδεμα ενώ  $f_{cc}$  και  $\varepsilon_{cc}$  η μέγιστη τάση και τροπή για το περισφιγμένο σκυρόδεμα. Ενώ  $f_{i1}$ , η τιμή της τάσης που αντιστοιχεί στην τομή του κατακόρυφου άξονα με τον δεύτερο κλάδο του διαγράμματος, όπως φαίνεται στο σχήμα.

$$f_{i1} = f_{cc} - E_1\varepsilon_{cc} \quad (3.20)$$

$n$  η παράμετρος που σχετίζεται με την καμπυλότητα της μετάβασης από τον ένα κλάδο στον άλλο και ορίζεται ως:

$$n = 1 + \frac{1}{\frac{E_0}{E_{c0}} - 1} \quad (3.21)$$

$$E_{c0} = \frac{f_{c0}}{\varepsilon_{c0}}, \quad (3.22)$$

Στα υποστυλώματα με  $2r/b < 0,3$  ο κλάδος που μειώνεται είναι γραμμικός και ορίζεται από την εξίσωση της ευθείας που περνάει από τα σημεία της μέγιστης τάσης και της τάσης αστοχίας.

$$\sigma = E_2\varepsilon - f_{i2} \quad \text{για} \quad \varepsilon_{cc} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \quad (3.23)$$

$$E_2 = \frac{f_{cu} - f_{cc}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cc}} \quad (3.24)$$

$$f_{i1} = \frac{\varepsilon_{cu} \cdot f_{c0} - \varepsilon_{c0} \cdot f_{cu}}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{cu}} \quad (3.25)$$

Μέγιστη τάση

Το μοντέλο για την μέγιστη τάση βασίζεται στο μοντέλο του Harajli (2006), αλλά οι παράμετροι **A** και **a** υπολογίζονται μέσω μιας σχέσης παλινδρόμησης με βάση τα πειραματικά δεδομένα μόνο για υποστυλώματα με  $2r/b \geq 0,3$ . Λαμβάνοντας υπόψη χωριστά τους συντελεστές για κάθε τύπο δοκιμίου οι τιμές φαίνονται στον **Πίνακα 2-3**.

$$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + k_1 \cdot \frac{P_u}{f_{c0}} \quad (3.26)$$

$$k_1 = k_A \cdot k_R \quad (3.27)$$

$$k_A = A \left( \frac{P_u}{f_{c0}} \right)^{-a} \quad (3.28)$$

Όπου  $f_{c0}$  είναι η αντοχή του άοπλου σκυροδέματος, και  $P_u$  η συνολική εγκάρσια τάση περισφιγξης λόγω συνδετήρων και ΙΟΠ που υπολογίζεται από την εξ. (3.14).

**Πίνακας 2-3** Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών A και a στην εξ. (3.28)

	ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ		ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	
	χωρίς οπλισμό	με οπλισμό	χωρίς οπλισμό	με οπλισμό
<b>A</b>	3,55	2,95	2,25	1,35
<b>a</b>	0,15	0,40	0,25	0,50

Για ορθογωνικά υποστυλώματα με  $2r/b < 0,3$  η περισφιξη που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση είναι μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί στην τάση αστοχίας. Ο μειωτικός συντελεστής  $k_R$  ορίζεται ως:

$$k_R = 1 - 2,5(0,3 - 2r/b) \quad (3.29)$$

$$\text{Ενώ για } 2r/b \geq 0,3 \quad k_R = 1. \quad (3.30)$$

Τάση αστοχίας

Για υποστυλώματα με  $2r/b < 0,3$ , η τάση αστοχίας  $f_{cu}$  είναι μειωμένη συγκριτικά με την μέγιστη τάση  $f_{cc}$  περίσφιγξης, που μπορεί να επιτευχθεί σε περίπτωση επαρκούς καμπύλωσης των γωνιών. Ο λόγος τους μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{f_{cu}}{f_{cc}} = 0,55 + 1,5(2r/b) \quad (3.31)$$

Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα η αναλογία μεταξύ τάσης αστοχίας  $f_{cu}$  και μέγιστης τάσης  $f_{cc}$  προσεγγίζει τιμές κοντά στη μονάδα όταν  $2r/b \geq 0,3$ .

Αξονική ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας

Ο λόγος  $\varepsilon_{cu} / \varepsilon_{c0}$  υπολογίζεται ως συνάρτηση της τάσης περίσφιξης  $P_u$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 2 + B \left( \frac{P_u}{f_{c0}} \right) \quad (3.32)$$

όπου η παράμετρος **B** δίνεται από τον **Πίνακα 2-4**

**Πίνακας 2-4** Προτεινόμενες τιμές του συντελεστή **B** για την εξ. (3.32)

	ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ		ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	
	χωρίς οπλισμό	με οπλισμό	χωρίς οπλισμό	με οπλισμό
<b>B</b>	23	28	23	28

Αξονική ανηγμένη παραμόρφωση κατά την μέγιστη τάση (μόνο για  $2r/b < 0,3$ )

Λόγω ελλিপών δεδομένων στην βιβλιογραφία προτείνεται η ίδια σχέση όπως για τον λόγο  $f_{cu} / f_{cc}$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{cu}} = 0,55 + 1,5(2r/b) \quad (3.33)$$

Παρατηρήσεις

Εάν η δυσκαμψία του εξωτερικού μανδύα ΙΟΠ δεν επαρκεί ώστε ο μανδύας να μπορεί να αντισταθεί στον λυγισμό των κατακόρυφων ράβδων, είναι δυνατό να συμβεί συγκέντρωση

τάσεων που με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία και μείωση της αποδοτικότητας περίσφιγξης του μανδύα ΙΟΠ.

Η αύξηση της αντοχής εξαιτίας της περίσφιγξης με μανδύα ΙΟΠ είναι μικρότερη στα υποστρώματα όπου υπάρχουν συνδετήρες από εκείνα όπου δεν υπάρχουν ακόμη και αν η συνολική αύξηση της αντοχής είναι μεγαλύτερη λόγω της παρουσίας συνδετήρων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραματικών δεδομένων φαίνεται ότι η κύρια παράμετρος που επηρεάζει την μορφή του διαγράμματος τάσεων – τροπών είναι ο λόγος  $2r/b$ .

Επίσης αναφέρεται ότι για υποστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα ο συντελεστής  $k_e$  δεν εξαρτάται καθαρά από τον λόγο  $2r/b$ . Αυτό πιθανά συμβαίνει λόγω της δράσης των συνδετήρων κοντά στις γωνίες που μειώνουν την συγκέντρωση τάσεων στο ΙΟΠ ανεξάρτητα από την καμπυλότητα της γωνίας. Στις περιπτώσεις αυτές ο συντελεστής  $k_e$  εξαρτάται σημαντικά από την παράμετρο  $C$ .

#### *2.2.4 Roussakis T. and Karabinis A. (2008)*

Το μοντέλο επικεντρώνεται στην επίδραση στρώσεων ΙΟΠ στην περίσφιγξη υποοπλισμένων στοιχείων με εξαιρετικά χαμηλή αντοχή σκυροδέματος.

Επίσης επισημαίνεται ότι κατά την διαδικασία βαθμονόμησης πολλών εμπειρικών μοντέλων είναι αναγκαία η πλευρική ανηγμένη παραμόρφωση κατά την αστοχία του μανδύα ΙΟΠ, για να εκτιμηθεί η πλευρική τάση κατά την αστοχία που μεταφέρεται στον πυρήνα σκυροδέματος από τον μανδύα ΙΟΠ. Όταν δεν υπάρχει μια λογική έκφραση της ενεργούς εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης του σκυροδέματος κατά την αστοχία, που είναι ίση με την ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του μανδύα ΙΟΠ, συχνά χρησιμοποιείται η τιμή που αντιστοιχεί στην ανηγμένη παραμόρφωση κατά τον εφελκυσμό των ινών του ΙΟΠ που δίνουν οι κατασκευαστές.

Το μοντέλο για να υπερβεί τον υπολογισμό της πλευρικής ανηγμένης παραμόρφωσης κατά την αστοχία του περισφιγμένου με ΙΟΠ σκυροδέματος, συσχετίζει την ενίσχυση της αντοχής με την αξονική δυσκαμψία του μανδύα ΙΟΠ αντλώντας δεδομένα από πειραματικές δοκιμές. Ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης καταλήγει στην εξής σχέση, που εκφράζει την πλευρική ανηγμένη παραμόρφωση κατά την αστοχία ( $\varepsilon_{je}$ ) του ομοιόμορφα περισφιγμένου σκυροδέματος:

$$\varepsilon_{je} k_1 = 2(-0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248) \quad (4.1)$$

όπου  $k_1 = (f_{cc} - f_{co}) / \sigma_2$  (4.2) ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης για κυκλικές διατομές και  $E_{f\mu} = 10 \text{MPa}$ .

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στο μοντέλο του Richart e al. (1928)

$$f_{cc,FRP} / f_{co} = k_1 (0,5 \rho_f E_f \varepsilon_{je} / f_{co}) + 1 \quad (4.3)$$

η προτεινόμενη σχέση γίνεται

$$f_{cc,FRP} / f_{co} = (\rho_f E_f / f_{co}) (-0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248) + 1 \quad (4.4.a)$$

όπου  $\rho_f = 4t_f / d$  και  $d$  η διάμετρος της διατομής

Λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της διατομής θεωρείται για τετραγωνικές διατομές

$$f_{cc,FRP} / f_{co} = 2(\rho_f E_f / f_{co}) (-0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248) (2r / b) + 1 \quad (4.4.b)$$

όπου  $b$  είναι η εξωτερική διάσταση της διατομής και  $r$  η ακτίνα καμπύλωσης των γωνιών της διατομής.

Για οπλισμένα δοκίμια η τάση αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{cc} = f_{cc,FRP} + \Delta f_{cc,stirrup} + f_{cc,bars} \quad (4.5) \text{ όπου η } f_{cc,FRP} \text{ υπολογίζεται από την εξ. (4.4), η}$$

$\Delta f_{cc,stirrup}$  από τις σχέσεις του κανονισμού Model Code 90 (3.5-3) και (3.5.-4):

$$\Delta f_{cc,stirrup} = f_{co} (1 + 2,5 \alpha \omega_w) - f_{co} \quad \text{για} \quad \sigma_2 / f_{co} < 0,05 \quad (4.5.a) \text{ και}$$

$$\Delta f_{cc,stirrup} = f_{co} (1 + 1,25 \alpha \omega_w) - f_{co} \quad \text{για} \quad \sigma_2 / f_{co} > 0,05 \quad (4.5.b)$$

όπου  $\sigma_2 / f_{co} = 0,5 \alpha \omega_{wd}$  και η  $f_{cc,bars}$  από την συνολική αντοχή των ράβδων οπλισμού.

## 2.2.5 S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)

Το μοντέλο αυτό στοχεύει στην ερμηνεία του τρόπου αστοχίας στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα τα οποία έχουν ενισχυθεί περιμετρικά με επικόλληση ινοπλισμένων πολυμερών. Εξετάζει την αποτελεσματικότητα των ΙΟΠ ως μέσο περίσφιγξης με έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ μανδύα ΙΟΠ και του διαμήκη οπλισμού κατά την έναρξη του λυγισμού των ράβδων που υποβάλλονται σε θλιπτική αξονική φόρτιση. Σε αντίθεση με τα

περισσότερα διατιθέμενα προσομοιώματα στην βιβλιογραφία τα οποία αποσκοπούν στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τιμών του διαγράμματος (σ-ε), το μοντέλο αυτό μελετάει την αλληλεπίδραση των επιμέρους μηχανισμών αντοχής και δίνει τρόπο εκτίμησης του πιθανού τρόπου αστοχίας ανάμεσα σε:

- Κονιορτοποίηση σκυροδέματος
- Λυγισμό ράβδων διαμήκους οπλισμού
- Αποκόλληση υπερκαλυπτόμενου τμήματος υφάσματος

Επίσης, σε περίπτωση που βάσει του μοντέλου εκτιμάται ότι θα συμβεί κονιορτοποίηση του σκυροδέματος λόγω ισχυρής περισφιγξης τότε παρέχεται τρόπος υπολογισμού των μειωμένων ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος κατά την αστοχία,  $\varepsilon_{cc,u}$  (όπου η αστοχία λογίζεται για μείωση της μέγιστης αντοχής κατά 15% φθίνων κλάδος), αφαιρώντας το πλαστικό μέρος των ανηγμένων παραμορφώσεων.

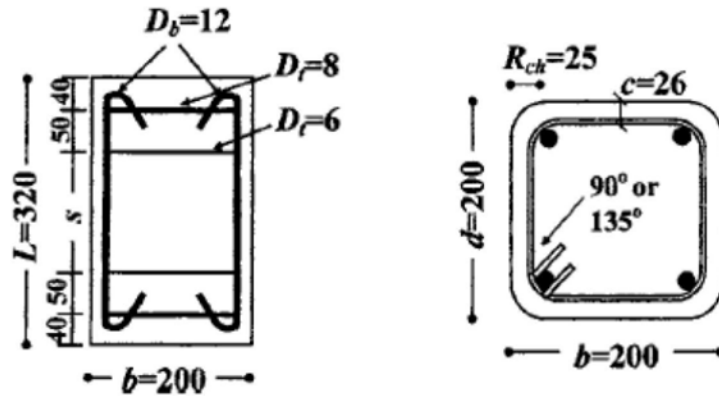
Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο αυτό, καθώς αποτυπώνει μία προσπάθεια βαθύτερης ερμηνείας των επιμέρους μηχανισμών αστοχίας, ή οποία κρίνεται χρήσιμη για την κατανόηση της συμπεριφοράς στοιχείων περισφιγμένων με ινοπλισμένα πολυμερή.

#### Πειραματική διαδικασία

Δοκιμάστηκαν σε κεντρική θλίψη 31 κοντά υποστυλώματα. Τα δοκίμια είχαν 200 mm τετραγωνική διατομή αναπαριστώντας σε κλίμακα 1:2 υποστύλωμα με 400 mm διατομή. Το ύψος των δοκιμίων ήταν 320 mm. Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από 4 ράβδους διαμέτρου 12 mm με τάση διαρροής 562 MPa. Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κυλινδρικής αντοχής 15 MPa αν και στο διάστημα των δοκιμών ανέβηκε σε 21,2 MPa. Στα περισσότερα δοκίμια ο οπλισμός διαμορφώθηκε με βάση παλαιότερες πρακτικές όπλισης. Χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες διαμέτρου 6 mm με τάση διαρροής 220 MPa. Σε 26 δοκίμια οι συνδετήρες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 140 mm. Στα υπόλοιπα 5 δοκίμια σε απόσταση 75 mm.

Από τα 31 δοκίμια, τέσσερα χρησιμοποιήθηκαν ως δοκιμαστικά, 12 υποβλήθηκαν σε θλίψη μέχρι να χαθεί η επικάλυψη και στη συνέχεια επισκευάστηκαν, ενώ τα υπόλοιπα 15 ενισχύθηκαν πριν την φόρτιση. Σε 6 δοκίμια εφαρμόστηκαν λωρίδες ΙΟΠ, πάχους 50 mm και σε 5 mm απόσταση μεταξύ τους, ενώ στα υπόλοιπα μανδύες που καλύπτουν όλο το ύψος του δοκιμίου.

Ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του κατασκευαστή για την εφαρμογή ΙΟΠ άνθρακα και γυαλιού στην πλευρική επιφάνεια των δοκιμίων. Η ύφανση των ινών ήταν προσανατολισμένη κατά μήκος της περιφέρειας των δοκιμίων. Οι ονομαστικές ιδιότητες των υλικών ΙΟΠ ήταν: για ΙΟΠ άνθρακα, μέτρο ελαστικότητας  $E_{f,C} = 235$  GPa, εφελκυστική αντοχή  $f_{f,C} = 3500$  MPa, τροπή θραύσης  $\epsilon_{fu,C} = 1,5\%$ , πάχος στρώσης  $t_{f,C} = 0,13$  mm και για ΙΟΠ γυαλιού,  $E_{f,G} = 75$  GPa,  $f_{f,G} = 1500$  MPa,  $\epsilon_{fu,G} = 2,1\%$ ,  $t_{f,G} = 0,17$  mm, αντίστοιχα.



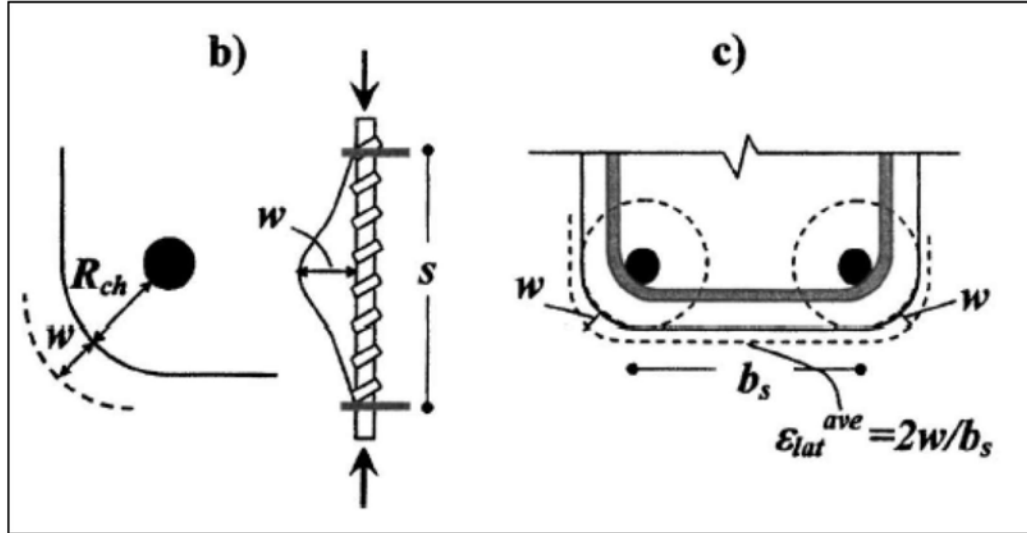
Σχήμα 2.9 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων (Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., et al., 2006)

#### Επίδραση του λυγισμού των ράβδων στην διάρρηξη του μανδύα

Για να ερευνηθεί η σχέση μεταξύ του λυγισμού των ράβδων και της διάρρηξης του μανδύα ΙΟΠ, εξετάζει ένα τμήμα της ράβδου μεταξύ δύο διαδοχικών συνδετήρων σε απόσταση  $s$ . Για συμμετρικό λυγισμό η ράβδος θα εκτραπεί προς τα έξω κατά  $w$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10 (b). Ο μανδύας ΙΟΠ θα υποστεί αντίστοιχα μία τροπή  $\epsilon_{fh}$  για να ακολουθήσει την πλευρική εκτροπή της ράβδου. Έτσι, σε πολικές συντεταγμένες η τοπική τροπή  $\epsilon_{fh}$  υπολογίζεται ως η εφαπτόμενη τροπή ενός κυλίνδρου ακτίνας  $R_{ch}$ , που υποβάλλεται σε μία ακτινική μετατόπιση  $w$ , όπου  $R_{ch}$  είναι η ακτίνα καμπύλωσης των γωνιών του δοκιμίου:

$$\epsilon_{fh} = \frac{w}{R_{ch} + 0.5D_b} \quad (5.1)$$





**Σχήμα 2.10** (b) συμμετρικός λυγισμός των ράβδων (c) ορισμός της μέσης πλευρικής τροπής στο μέσο του δοκιμίου όταν οι γωνιακές ράβδοι λυγίζουν προς τα έξω κατά  $w$  (Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., et al., 2006)

Υποθέτοντας ότι όλες οι ράβδοι λυγίζουν συμμετρικά προς τα έξω, η μέση εγκάρσια τροπή εκτιμάται ως  $\varepsilon_{lat}^{ave} = 2w/b_s$  (5.2), όπου  $b_s$  είναι το ευθύ, μη καμπυλωμένο, τμήμα της πλευράς της διατομής. Η μέση τιμή που υπολογίζεται εδώ είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό στρώσεων του μανδύα. Αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως κατώτατο όριο γιατί δεν παίρνει υπόψη την πρόσθετη τροπή  $\varepsilon_f^{dil}$  που επιβάλλεται στον μανδύα από την διόγκωση του πυρήνα σκυροδέματος της διατομής. Έτσι μετά τον λυγισμό των ράβδων, οι εγκάρσιες τροπές ποικίλουν κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής. Φτάνουν την ονομαστική ικανότητα παραμόρφωσης στις γωνίες όπου συμβαίνει διάρρηξη του μανδύα. Οπουδήποτε αλλού η μέση τροπή ισούται με:

$$\varepsilon_{lat}^{ave} = 2(\varepsilon_{fu} - \varepsilon_f^{dil}) \frac{R_{ch} + 0.5D_b}{b_s} + \varepsilon_f^{dil} \quad (5.3)$$

Η αύξηση της αξονικής θλιπτικής τροπής που μπορεί να αναπτυχθεί στη μέγιστη φόρτιση μπορεί να συσχετιστεί με την πλευρική εκτροπή των ράβδων  $w$ :

$$\Delta\varepsilon_{cc} = \frac{w^2 \pi^2 (1 + 3w^2 \pi^2 / 16s^2)}{4s^2} \quad (5.4)$$

Στην περίπτωση κυκλικής διατομής, θα χρησιμοποιηθεί στην εξ. (5.3) η ακτίνα της διατομής αντί της  $R_{ch}$ . Επομένως, μετά τον λυγισμό των ράβδων η ικανότητα παραμόρφωσης του μανδύα θα εξαντληθεί σε πολύ υψηλότερες τιμές του  $w$ . Αντίστοιχα μέσω της εξ. (5.4) σε

υψηλότερες τιμές θλιπτικής τροπής σε σχέση με την τετραγωνική διατομή. Η αντίστοιχη μέση τροπή του μανδύα θα είναι ίση με την ονομαστική ικανότητα παραμόρφωσης:

$$\varepsilon_{jh} = \varepsilon_{lat}^{ave} = 2\pi w / 2\pi R = w / R \quad (5.5)$$

### Τάση περίσφιξης λόγω του μανδύα ΙΟΠ

Η τάση περίσφιξης  $\sigma_{lat}$  υπολογίζεται ως:

$$\sigma_{lat} = 0.5 \left( k_f^{conf} \rho_{fv} E_f \varepsilon_f^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{y,st} \right) = 0.5 \left( k_f^{conf} \rho_{fv} f_f^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{y,st} \right) \quad (5.6)$$

,όπου  $\rho_{vf} = 2nt_f(b+d)/bd$  (5.7) (n ο αριθμός των στρώσεων) και  $k_f^{conf}, k_{st}^{conf}$  οι γεωμετρικοί συντελεστές αποδοτικότητας του μανδύα ΙΟΠ και των συνδετήρων αντίστοιχα.

Ενώ  $k_f^{conf} = 1 - (b_s^2 + d_s^2) / [3A_g(1 - \rho_s)]$  (5.8), όπου  $\rho_s$  το γεωμετρικό ποσοστό του διαμήκη οπλισμού και  $b_s, d_s$  τα ευθύγραμμα τμήματα της πλευράς της διατομής μετά την καμπύλωση των γωνιών.

Ένα θέμα που παραμένει ανοιχτό είναι ο ορισμός μιας τιμής για την ενεργό τάση του μανδύα ΙΟΠ,  $f_f^{eff}$ . Μία καθιερωμένη διαδικασία είναι να εκτιμηθεί η τάση του μανδύα από την ενεργό τροπή  $\varepsilon_f^{eff}$  και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού  $E_f$ . Μία εύλογη άνω οριακή τιμή για την  $\varepsilon_f^{eff}$  υπολογίζεται από την ονομαστική αντοχή του μανδύα χρησιμοποιώντας το συντελεστή  $\varphi = 0,9$ , δηλαδή  $f_f^{eff} = 0,9 f_{fu}$ . Μεγαλύτερη συσχέτιση, στην πειραματική διαδικασία, έχει η χρησιμοποίηση της μέσης πλευρικής τροπής που παρατηρείται κατά την διάρρηξη του μανδύα  $\varepsilon_{jr}$ , δηλαδή  $f_f^{eff} = E_f \varepsilon_{jr}$ .

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η κλασική σχέση για την περίσφιξη των Richart et al. (1928), για τον υπολογισμό της τελικής αντοχής είναι αξιόπιστη, δηλαδή:

$$f_{cc,j} = f_c' + \lambda \sigma_{lat} \quad (5.9), \text{ θεωρώντας } \lambda = 3.$$

### Ικανότητα παραμόρφωσης του περισφιγμένου με μανδύα ΙΟΠ σκυροδέματος

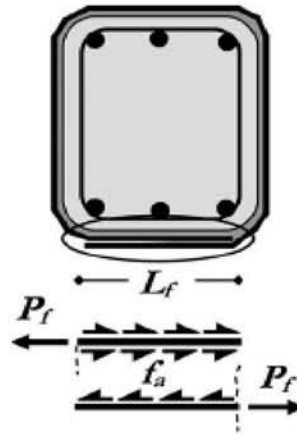
Διάφορα σενάρια μπορούν να οδηγήσουν στην αστοχία του μανδύα. Η αποκόλληση του μανδύα γύρω από το μήκος υπερκάλυψης ( $\varepsilon_f^{deb}$ ), η θραύση του μανδύα εξαιτίας της υπερβολικής διόγκωσης του σκυροδέματος ( $\varepsilon_f^{dil}$ ), η τοπική θραύση του μανδύα κοντά στον

οπλισμό λόγω λυγισμού της ράβδου ( $\varepsilon_f^{buckl}$ ). Για την εκτίμηση της ενεργούς τροπής που χρησιμοποιείται στην εξ. (5.6), ως  $\varepsilon_f^{eff}$ , λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή των τριών αυτών τροπών, δηλαδή:

$$\varepsilon_f^{eff} = \min \{ \varepsilon_f^{deb}, \varepsilon_f^{dil}, \varepsilon_f^{buckl} \} \leq \varepsilon_{fu} \quad (5.10)$$

Παραμόρφωση λόγω αποκόλλησης του μανδύα ΙΟΠ ( $\varepsilon_f^{deb}$ )

Για την αγκύρωση των στρώσεων του μανδύα απαιτείται μήκος υπερκάλυψης  $L_f$ , για κάθε στρώση. Προκειμένου να αναπτυχθεί η εφελκυστική δύναμη της στρώσης, στη συγκολλητική ρητίνη επιβάλλονται διατμητικές τάσεις. Θεωρείται ότι η διατμητική αντοχή της ρητίνης είναι  $f_{a,u}$  και η ολίσθηση λόγω της διατμητικής τάσης  $s_{a,u}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



**Σχήμα 2.11** Διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συγκολλητική ρητίνη στο μήκος υπερκάλυψης της στρώσης (Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., e al., 2006)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε στρώση του ΙΟΠ περιλαμβάνει γραμμικά ελαστικό υλικό, οι τάσεις έχουν γραμμική σχέση με τις τροπές. Η τροπική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα τμήμα στρώσης ΙΟΠ που παραμορφώνεται αξονικά, μήκους  $dx$  ισούται με το ελαστικό έργο που απαιτείται για την παραμόρφωση της ρητίνης:

$$t_f \int_0^{L_f} \left( \int_0^{\varepsilon_f^{deb}} f_f(\varepsilon_f) d\varepsilon_f \right) dx = \int_0^{L_f} \left( \int_0^{s_{a,u}} f_a(s) ds \right) dx \Rightarrow \left( \frac{1}{2} (\varepsilon_f^{deb})^2 E_f \right) t_f L_f = \left( \frac{1}{2} f_{au} s_{a,u} \right) L_f$$

$$\Rightarrow \varepsilon_f^{deb} = \sqrt{\frac{f_{a,u} s_{a,u}}{E_f t_f}} \quad (5.11)$$

Η σχέση (5.11) δίνει την συσχέτιση μεταξύ της ανηγμένης παραμόρφωσης  $\varepsilon_f^{deb}$  του υφάσματος ΙΟΠ κατά την έναρξη της αποκόλλησης και της αντίστοιχης τιμής ολίσθησης  $s_{a,u}$ . Συνεπώς η τιμή της  $\varepsilon_f^{deb}$  εξαρτάται από την τάση συνάφειας  $f_{a,u}$  της ρητίνης μεταξύ των στρώσεων, και από την δυστένεια του μανδύα ( $E_f t_f$ ).

Το ελάχιστο απαραίτητο μήκος υπερκάλυψης  $L_{f,min}$  εκτιμάται με ισορροπία δυνάμεων και αντικαθιστώντας την τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης  $\varepsilon_f^{deb}$  από την (5.11):

$$t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f^{deb} = L_{f,min} \cdot f_{a,u} \Rightarrow t_f \cdot E_f \cdot \sqrt{\frac{f_{a,u} s_{a,u}}{E_f t_f}} = L_{f,min} \cdot f_{a,u} \Rightarrow L_{f,min} = \sqrt{\frac{s_{a,u} E_f t_f}{f_{a,u}}} \quad (5.12)$$

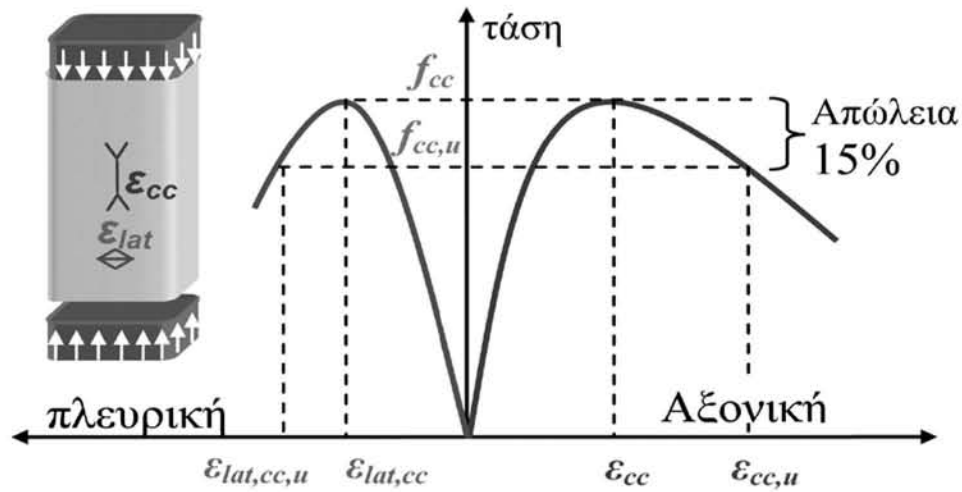
Επομένως ο κρίσιμος έλεγχος για το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος υπερκάλυψης είναι στην ακραία (εξωτερική) στρώση. Για την εκτίμηση της ανηγμένης παραμόρφωσης αποκόλλησης  $\varepsilon_f^{deb}$  και του ελάχιστου απαιτούμενου μήκους υπερκάλυψης  $L_{f,min}$  μέσω των εξισώσεων (5.11) και (5.12), αντιστοίχως, προτείνονται οι τυπικές τιμές (Ταστάνη, 2010):  $f_{a,u} = 5MPa$  και  $s_{a,u} = 1mm$ .

#### Παραμόρφωση λόγω διόγκωσης του πυρήνα σκυροδέματος ( $\varepsilon_f^{dil}$ )

Η εγκάρσια τροπή κατά την θραύση του μανδύα λόγω υπερβολικής διόγκωσης του σκυροδέματος σχετίζεται με την ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης του περισφιγμένου πυρήνα  $\varepsilon_f^{dil} = \nu \varepsilon_{cc,u}$  (5.13), όπου  $\nu$  ο φαινόμενος λόγος του Poisson κατά την αστοχία. Η αξονική θλιπτική τροπή που αντιστοιχεί στην ικανότητα παραμόρφωσης του περισφιγμένου πυρήνα,  $\varepsilon_{cc,u}$  μπορεί να εκτιμηθεί από την τάση περίσφιγξης χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\varepsilon_{cc,u} = \varepsilon_{cu} + 0,075 \cdot \left( \frac{k_{if}^{conf} \rho_{ifv} E_f \varepsilon_{if}^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{yst}}{f_c'} - 0,1 \right) \geq \varepsilon_{cu} \quad ; \quad 0,003 \leq \varepsilon_{cu} \leq 0,004 \quad (5.14)$$

, όπου  $\varepsilon_{cu}$  η τροπή αστοχίας του απερίσφιγκτου σκυροδέματος σε θλίψη. Για την τιμή της  $\varepsilon_f^{eff}$ , χρησιμοποιείται η μετρούμενη κατά τις δοκιμές πλευρική τροπή κατά την αστοχία του μανδύα  $\varepsilon_{jr}$ . Για χαμηλό έως μέσο επίπεδο περίσφιγξης ( $\varepsilon_{cc,u}$  μέχρι και 6 φορές  $\varepsilon_{c0}$ ), μία λογική τιμή του  $\nu_u (= \varepsilon_{jr} / \varepsilon_{cc,u})$  είναι 1, ενώ για μεγαλύτερο επίπεδο περίσφιγξης  $\nu_u = 0,5$ .



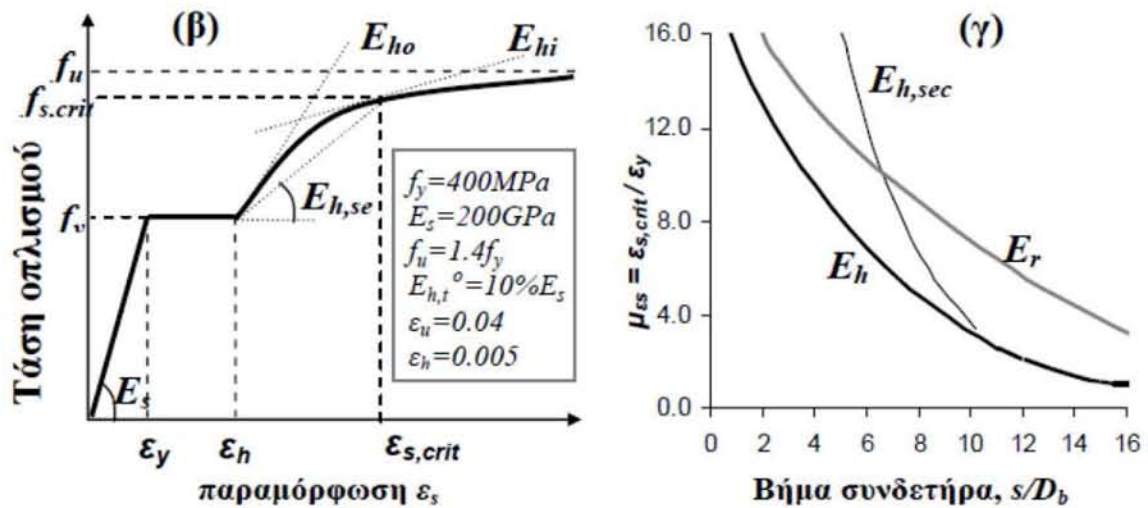
Σχήμα 2.12 Διαγράμματα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων στοιχείου υπό κεντρική θλίψη (Ταστάνη, Δερβίσης, Πανταζοπούλου. 2010)

### Παραμόρφωση λόγω λυγισμού των ράβδων ( $\varepsilon_f^{buckl}$ )

Όπως προέκυψε και από τα πειραματικά αποτελέσματα, ο λυγισμός των ράβδων του διαμήκη οπλισμού προκαλεί σχίσσιμο του μανδύα και ψαθυρή αστοχία, περιορίζοντας την ικανότητα παραμόρφωσης. Η κρίσιμη αξονική τροπή που μπορεί να αντέξει το σκυρόδεμα καθώς φορτίζεται μέχρι την αστοχία δίνεται από την εξ. (5.14) και είναι συνάρτηση της τάσης περισφίγξης που μπορεί να ενεργοποιηθεί. Από την άλλη, μία θλιβόμενη ράβδος θα λυγίσει συμμετρικά σε μία τάση  $f_{s,crit}$ , η οποία εξαρτάται από τον διαθέσιμο λόγο  $s/D_b$ , όπου  $s$  η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων. Η σχέση μεταξύ τους είναι (Pantazopoulou 1998; Papia et al. 1998):

$$s/D_b = 1.5 \sqrt{\frac{E_h}{f_{s,crit}}} \quad (5.15)$$

, όπου  $E_h$  το μέτρο ελαστικότητας στην περιοχή κράτυνσης του χάλυβα. Για να εκτιμηθεί η μέση εγκάρσια τροπή,  $\varepsilon_f^{buckl}$ , που αντιστοιχεί στην αξονική τροπή λυγισμού,  $\varepsilon_{s,crit}$ , χρειάζεται μία τιμή του φαινομενικού λόγου του Poisson  $\nu_u$ . Θεωρείται ότι  $\nu_u = 0.5$  για κυκλικές διατομές και  $\nu_u = 1$  για τετραγωνικές διατομές. Επομένως η εγκάρσια τροπή στο μανδύα είναι  $\varepsilon_f^{buckl} = 2 \frac{R_{ch}}{b_s} (\varepsilon_{f_u} - \nu_u \varepsilon_{s,crit}) + \varepsilon_f^{dil}$  (5.16).



**Σχήμα 2.13** Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης και διάγραμμα προσδιορισμού κρίσιμης αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_{s,crit}$  συναρτήσει του λόγου  $s/D_b$  (Τασάνη Σ.Π., Δερβίσης Α., Πανταζοπούλου Σ.Ι., 2010)

Η μεθοδολογία που υιοθετείται για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{s,crit}$  περιγράφεται στο **Σχήμα 2.13**.

1) Χάραξη διαγράμματος σ-ε (Σχήμα 2.13) βάση των σχέσεων των Mander et al (1984):

A: διαρροή χάλυβα ( $f_y, \varepsilon_y$ )

B: έναρξη κράτυνσης χάλυβα ( $f_y, \varepsilon_h$ )

Γ: αστοχία χάλυβα ( $f_u, \varepsilon_u$ )

BΓ: καμπύλη κράτυνσης χάλυβα. Τα σημεία ( $f_s, \varepsilon_s$ ) προσδιορίζονται από την σχέση (5.17)

$$f_s = f_u + (f_y - f_u) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_s}{\varepsilon_u - \varepsilon_h} \right)^p \quad (5.17)$$

$$\text{όπου } p = E_{ho} \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_h}{f_u - f_y} \right)$$

$$E_{hi} = E_{ho} \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_s}{\varepsilon_u - \varepsilon_h} \right)^{p-1} \quad (5.18)$$

όπου  $E_{ho}$  = εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας κατά την έναρξη της κράτυνσης

$E_{hi}$  = εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας στον κλάδο της κράτυνσης

Εάν δεν διατίθενται τα ακριβή χαρακτηριστικά του χάλυβα οι συγγραφείς προτείνουν:

$\varepsilon_h=0.005$ ,  $E_{ho}= 10\% E$ ,  $f_u=1.4 f_y$  και  $\varepsilon_u=0.04$ .

2) Προσδιορισμός της κρίσιμης παραμόρφωσης λυγισμού ( $\varepsilon_{s,crit}$ )

Μέσω του διαγράμματος  $(\varepsilon_s/\varepsilon_y) - (s/D_b)$  (**Σχήμα 2.13**), για την τιμή του λόγου  $(s/D_b)$  προσδιορίζεται ο λόγος  $(\varepsilon_{s,crit}/\varepsilon_y)$ .

Το διάγραμμα  $(\varepsilon_s/\varepsilon_y) - (s/D_b)$  γίνεται ως εξής:

Για τιμές παραμορφώσεων στον κλάδο ΒΓ ( $\varepsilon_y \leq \varepsilon_{si} \leq \varepsilon_u$ ) υπολογίζονται:

(i) η αντίστοιχη τιμή της  $f_{si}$  από την (5.17)

(ii) η αντίστοιχη τιμή του  $E_{hi}$  από την (5.18)

(iii) η αντίστοιχη  $s/D_b$  από την (5.15)

και επομένως προσδιορίζεται το σημείο  $(\varepsilon_{si}/\varepsilon_y) - (s/D_b)$  του διαγράμματος.

#### Παρατηρήσεις από το πειραματικό πρόγραμμα

Η περίσφιγξη με μανδύα ΙΟΠ προσφέρει σημαντική αύξηση της αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσης σε όλα τα δοκίμια. Ο μανδύας περιορίζει την πλευρική διαστολή του εγκιβωτισμένου πυρήνα σκυροδέματος.

Η τάση περίσφιγξης μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η αξονική θλιπτική τροπή του πυρήνα, χάρη στην ολοένα αυξανόμενη ενεργοποίηση του ΙΟΠ. Αυτός ο μηχανισμός αντίστασης αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα τροπικής ενέργειας στα δοκίμια. Η αστοχία του μανδύα ΙΟΠ απελευθερώνει την αποθηκευμένη ενέργεια προκαλώντας εκρηκτική αστοχία, με απότομη μείωση της αντοχής μετά το σημείο αιχμής και ψαθυρή αστοχία κυρίως στην περίπτωση των ΙΟΠ άνθρακα.

Η αποδοτικότητα της περίσφιγξης και η ικανότητα παραμόρφωσης αυξήθηκε περισσότερο στην περίπτωση των ΙΟΠ άνθρακα συγκριτικά με τα ΙΟΠ γυαλιού, εξαιτίας της μεγαλύτερης δυσκαμψίας και αντοχής των ΙΟΠ άνθρακα. Σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμίων με παλαιού τύπου χαρακτηριστικά όπλισης, σημειώθηκε πρόωρη διάρρηξη του μανδύα, στις γωνίες των δοκιμίων συνοδευόμενη από λυγισμό των ράβδων του διαμήκη οπλισμού. Το γεγονός ότι ο μανδύας ΙΟΠ στηρίζει τον κύριο οπλισμό έναντι του λυγισμού είναι μία κύρια διαφορά σε σχέση με την περίσφιγξη που προσφέρει η ύπαρξη μόνον συνδετήρων.

### 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 θα εφαρμοστούν σε δοκίμια από την βιβλιογραφία. Στην συνέχεια θα σχολιαστεί η απόδοση του κάθε μοντέλου με κριτήριο την συσχέτιση των θεωρητικών προβλέψεων με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρειάζεται να σημειωθούν τα εξής:

- Επειδή τα μοντέλα έχουν παραλλαγές στον συμβολισμό των παραμέτρων, για την παρουσίαση των χαρακτηριστικών των δοκιμών ακολουθείται ενιαίος συμβολισμός σύμφωνα με τον **Πίνακα 3-1**.

**Πίνακας 3-1** Ενιαίος συμβολισμός χαρακτηριστικών δοκιμών βιβλιογραφίας

<b>D</b>	διάμετρος
<b>b</b>	η μία διάσταση της διατομής
<b>h</b>	η άλλη διάσταση της διατομής
<b>H</b>	Ύψος δοκιμίου
<b>r</b>	ακτίνα καμπύλωσης γωνίας διατομής
<b>c<sub>nom</sub></b>	επικάλυψη
<b>s</b>	απόσταση συνδετήρων καθ' ύψος
<b>D<sub>st</sub></b>	διάμετρος συνδετήρα
<b>n<sub>st</sub></b>	αριθμός σκελών συνδετήρα σε μία διεύθυνση
<b>f<sub>sy,st</sub></b>	τάση διαρροής χάλυβα εγκάρσιου οπλισμού
<b>ρ<sub>st,v</sub></b>	ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού
<b>D<sub>b</sub></b>	διάμετρος διαμήκη οπλισμού
<b>n<sub>b</sub></b>	αριθμός ράβδων στη διατομή
<b>f<sub>sy</sub></b>	τάση διαρροής χάλυβα διαμήκη οπλισμού
<b>ρ<sub>long</sub></b>	γεωμετρικό ποσοστό διαμήκη οπλισμού
<b>n<sub>f</sub></b>	αριθμός στρώσεων ΙΟΠ
<b>E<sub>f</sub></b>	μέτρο ελαστικότητας ΙΟΠ
<b>ε<sub>fu</sub></b>	τροπή θράυσης ΙΟΠ
<b>f<sub>fu</sub></b>	τάση θράυσης ΙΟΠ
<b>t<sub>f</sub></b>	πάχος μίας στρώσης ΙΟΠ
<b>ρ<sub>vf</sub></b>	ογκομετρικό ποσοστό μανδύα ΙΟΠ



- Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων αφορά στην πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων.
- Για όσα δοκίμια δεν γινόταν συγκεκριμένη αναφορά στην επικάλυψη των οπλισμών, υιοθετήθηκε τιμή που προκύπτει από τη βιβλιογραφία σε δοκίμια με αντίστοιχη διατομή και διάμετρο ράβδων διαμήκους οπλισμού.
- Στα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών όπου η θλιπτική αντοχή δίνεται σε όρους αξονικού φορτίου, μετατρέπεται σε όρους τάσης με βάση τη σχέση  $f'_{cc} = \frac{P_{\max}}{A_g}$ , όπου  $A_g = A_c - (4r^2 - \pi r^2)$
- Το μοντέλο των Wang and Hsu (2007) δεν περιλαμβάνει δοκίμια με κυκλική διατομή, ωστόσο εφαρμόζονται οι σχέσεις του μοντέλου και στην περίπτωση των δοκιμίων με κυκλική διατομή, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν έχω μη περισφιγμένη περιοχή στη διατομή, δηλαδή  $A_{cu} = 0$ .

Στην συνέχεια παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων διασποράς η συσχέτιση των προβλέψεων του κάθε μοντέλου με τα αποτελέσματα από κάθε πειραματικό πρόγραμμα. Παράλληλα με τα μοντέλα που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται και οι προβλέψεις με βάση τις εξισώσεις υπολογισμού του Ευρωκώδικα (EC8).

Στα διαγράμματα αυτά συγκρίνεται η προβλεπόμενη θλιπτική αντοχή με την αντίστοιχη πειραματική. Η διαγώνιος στα διαγράμματα παριστάνει την τέλεια συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προβλέψεων από τα μοντέλα. Αριστερά της γραμμής αυτής βρίσκονται τα δοκίμια των οποίων θλιπτική αντοχή υποεκτιμάται από τα μοντέλα, ενώ δεξιά της γραμμής αυτής βρίσκονται τα δοκίμια στα οποία τα μοντέλα υπερεκτιμούν την θλιπτική αντοχή (κατά της ασφαλείας). Επίσης, υιοθετείται διαφορετικός συμβολισμός ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής (ορθογωνική ή κυκλική) και διαφορετικό χρώμα ανάλογα με το υλικό του ΙΟΠ (άνθρακας ή γυαλί).

Στην συνέχεια γίνεται σχολιασμός της ικανότητας των μοντέλων να προβλέψουν την θλιπτική αντοχή των δοκιμίων. Για κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε ο λόγος της τιμής της πειραματικής αντοχής προς την τιμή της προβλεπόμενης αντοχής από το μοντέλο  $f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$ , καθώς και τα στατιστικά τους στοιχεία, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας.

### 3.2 Συνοπτική περιγραφή των δεδομένων από την βιβλιογραφία

Η εφαρμογή των μοντέλων έγινε σε 78 δοκίμια από 18 πειραματικές έρευνες. Πρόκειται για 25 δοκίμια με κυκλική διατομή, 36 δοκίμια με τετραγωνική διατομή και 17 δοκίμια με ορθογωνική διατομή. Στους **Πίνακες 3-2** και **3-3** που ακολουθούν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων. Η ονομασία τους καθορίζεται από τους τίτλους των βιβλιογραφικών αναφορών.

**Πίνακας 3-2** Χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμίων και αποτελέσματα βιβλιογραφίας

α/α	ΔΟΚΙΜΙΑ	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ								EXP
		διαστάσεις	$f_c$	$\rho_{long}$	$s/D_b$	$\rho_{st,v}$	FRP	$n_f$	$\rho_{vf}$	
1	Rodrigues, C. C. Et al.(2001) _50	D150	37,7	0,0096	8,33	0,0052	C	2	0,0089	83,30
2	Rodrigues, C. C. et al. (2001) _100	D150	37,7	0,0096	16,67	0,0026	C	2	0,0089	81,50
3	Rodrigues, C. C., et al. (2001) _150	D150	37,7	0,0096	25,00	0,0017	C	2	0,0089	82,50
4	Chaallal, O., et al.(2003)	200x350	25	0,0163	5,26	0,0173	C	2	0,0157	34,44
5	Cole, C., and Belarbi, A. (2001)	181x181	21	0,0156	14,02	0,0068	C	2	0,0074	29,60
6	Esfahani, M. R. et al. (2004) _prism	180x180	46,1	0,0017	47,06	0,0019	C	2	0,0444	41,95
7	Esfahani, M. R., et al. (2004) _round	D203	46,1	0,0017	47,06	0,0016	C	2	0,0394	77,81
8	Feng, P., et al. (2002) _C1	200x200	21,1	0,0079	20,00	0,0045	C	1	0,0022	26,26
9	Feng, P., et al. (2002) _G1	200x200	21,1	0,0079	20,00	0,0045	G	1	0,0061	26,93
10	Feng, P., et al. (2002) _G2	200x200	21,1	0,0079	20,00	0,0045	G	2	0,0122	27,93
11	Feng, P., et al. (2002) _G3	200x200	21,1	0,0079	20,00	0,0045	G	3	0,0182	28,93
12	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C1_S	131,5x131,5	15,2	0,0118	12,50	0,0164	C	1	0,0040	25,89
13	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C2_S	131,5x131,5	15,2	0,0118	12,50	0,0164	C	2	0,0079	37,61
14	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C3_S	131,5x131,5	15,2	0,0118	12,50	0,0164	C	3	0,0119	48,00
15	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C1_R	176x102	15,2	0,0113	12,50	0,0181	C	1	0,0040	21,98
16	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C3_R	176x102	15,2	0,0113	12,50	0,0181	C	3	0,0121	37,12
17	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C1_Re	214x79	15,2	0,0120	12,50	0,0275	C	1	0,0045	18,92
18	Harajli, M. H.,et al. (2006)_C3_Re	214x79	15,2	0,0120	12,50	0,0275	C	3	0,0135	29,51
19	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-1-1-40a	250x250	15,92	0,0101	14,29	0,0059	C	1	0,0026	20,58
20	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-1-3-40a	250x250	15,92	0,0101	14,29	0,0059	C	3	0,0079	37,57
21	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-1-3-10a	250x250	15,92	0,0099	14,29	0,0059	C	3	0,0079	24,92
22	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-1-5-40a	250x250	15,92	0,0099	14,29	0,0059	C	3	0,0079	29,45
23	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-1-3-20a	250x250	15,92	0,0101	14,29	0,0059	C	5	0,0132	51,91
24	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-2-1-40a	300x150	15,92	0,0104	14,58	0,0102	C	1	0,0033	18,38
25	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-2-3-40a	300x150	15,92	0,0104	14,58	0,0102	C	3	0,0099	35,15
26	Ilki A. et al. (2008)_LSR-R-2-5-40a	300x150	15,92	0,0104	14,58	0,0102	C	5	0,0165	50,68
27	Ilki A. et al. (2008)_LSR-C-1-a	D250	15,11	0,0096	14,50	0,0082	C	1	0,0026	29,07
28	Ilki A. et al. (2008)_LSR-C-3-a	D250	15,61	0,0096	14,50	0,0082	C	3	0,0079	54,68
29	Ilki A. et al. (2008)_LSR-C-5-a	D250	15,11	0,0096	14,50	0,0082	C	5	0,0132	85,18
30	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-1-050-3-40	250x250	27,58	0,0101	3,57	0,0238	C	3	0,0079	44,67
31	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-1-100-3-40	250x250	27,58	0,0101	7,14	0,0119	C	3	0,0079	45,80
32	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-1-200-3-40	250x250	27,58	0,0101	14,29	0,0059	C	3	0,0079	42,08
33	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-1-050-5-40	250x250	27,58	0,0101	3,57	0,0238	C	5	0,0132	57,40
34	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-1-100-5-40	250x250	27,58	0,0101	7,14	0,0119	C	5	0,0132	57,73
35	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-1-200-5-40	250x250	27,58	0,0101	14,29	0,0059	C	5	0,0132	58,72
36	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-2-050-3-40	300x150	27,58	0,0104	4,17	0,0358	C	3	0,0099	40,34
37	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-2-100-3-40	300x150	27,58	0,0104	8,33	0,0179	C	3	0,0099	43,04
38	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-2-175-3-40	300x150	27,58	0,0104	14,58	0,0102	C	3	0,0099	40,80
39	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-2-050-5-40	300x150	27,58	0,0104	4,17	0,0358	C	5	0,0165	60,33
40	Ilki A. et al. (2008)_NSR-R-2-100-5-40	300x150	27,58	0,0104	8,33	0,0179	C	5	0,0165	53,13



Πίνακας 3-3 Χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμών και αποτελέσματα βιβλιογραφίας

α/α	ΔΟΚΙΜΙΑ	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ								EXP
		διαστάσεις	$f_c$	$\rho_{long}$	$s/D_b$	$\rho_{st,v}$	FRP	$n_f$	$\rho_{vf}$	
41	Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-050-3	D250	27,58	0,0096	5,00	0,0238	C	3	0,0079	77,59
42	Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-145-3	D250	27,58	0,0096	14,50	0,0082	C	3	0,0079	71,95
43	Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-145-5	D250	27,58	0,0096	14,50	0,0082	C	5	0,0132	94,45
44	Li, Y., Fang, T., et al. (2003)_1	D300	17,2	0,0121	10,50	0,0134	C	1	0,0015	32,27
45	Li, Y., Fang, T., et al. (2003)_2	D300	17,2	0,0121	10,50	0,0134	C	2	0,0029	39,89
46	Matthys, S., et al. (2006)_K2	D400	34,3	0,0090	11,67	0,0042	C	5	0,0059	54,30
47	Matthys, S., et al. (2006)_K5	D400	34,3	0,0090	11,67	0,0042	G	2	0,0060	37,20
48	De Paula, R. F. et al. (2002)_CC	D150	27,5	0,0128	16,67	0,0026	C	2	0,0059	103,40
49	De Paula, R. F., et al. (2002)_QR2C	151x151	27,5	0,0101	16,67	0,0026	C	2	0,0058	53,00
50	De Paula, R. F., et al. (2002)_QR3C	154x154	27,5	0,0101	16,67	0,0025	C	2	0,0057	68,60
51	Tastani, S. P., et al. (2006)_C2	200x200	21,2	0,0115	11,67	0,0122	C	2	0,0052	27,77
52	Tastani, S. P., et al. (2006)_C4	200x200	21,2	0,0115	11,67	0,0122	C	4	0,0105	34,13
53	Tastani, S. P., et al. (2006)_G2	200x200	21,2	0,0115	11,67	0,0122	G	2	0,0068	25,44
54	Tastani, S. P., et al. (2006)_G4	200x200	21,2	0,0115	11,67	0,0122	G	4	0,0136	32,22
55	De luca A. et al. (2011)_G5_S	610x610	37,3	0,0109	15,98	0,0024	G	5	0,0081	43,78
56	De luca A. et al. (2011)_G5_R	737x508	48	0,0108	15,98	0,0024	G	5	0,0082	56,40
57	De luca A. et al. (2011)_G5_Re	508x356	34,7	0,0112	14,02	0,0043	G	5	0,0118	43,75
58	Roussakis T. et al. (2008)_C1	200x200	13,4	0,0155	14,29	0,0041	C	1	0,0023	24,10
59	Roussakis T. et al. (2008)_C3	200x200	13,4	0,0155	14,29	0,0041	C	3	0,0070	34,72
60	Roussakis T. et al. (2008)_G3	200x200	13,4	0,0155	14,29	0,0041	G	3	0,0092	30,09
61	Carey, S. A., et al. (2005)_medscale	D264	33,2	0,0104	13,37	0,0029	C	1	0,0152	54,50
62	Carey, S. A., et al. (2005)_full scale	D610	33,2	0,0139	12,01	0,0034	C	3	0,0197	72,90
63	Yu-Lei Bai, et al. (2012)	D200	38	0,0400	15,00	0,0085	C	1	0,0033	59,40
64	Chastre C. and Silva M. (2010)_150	D150	38	0,0096	25,00	0,0019	C	2	0,0089	80,82
65	Chastre C. and Silva M. (2010)_100	D150	38	0,0096	16,67	0,0029	C	2	0,0089	81,10
66	Chastre C. and Silva M. (2010)_50	D150	38	0,0096	8,33	0,0058	C	2	0,0089	81,48
67	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_1	D250	35,2	0,0138	12,50	0,0040	C	1	0,0028	50,73
68	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_2	D250	35,2	0,0138	12,50	0,0040	C	2	0,0056	70,87
69	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_3	D250	35,2	0,0138	12,50	0,0040	C	3	0,0084	75,52
70	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_4	D250	35,2	0,0138	12,50	0,0040	C	4	0,0113	93,32
71	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CS2	300x300	18,9	0,0141	9,00	0,0087	G	2	0,0339	25,94
72	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CS6	300x300	18,9	0,0141	9,00	0,0087	G	6	0,1016	33,09
73	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CR2	450x300	18,9	0,0140	9,00	0,0068	G	2	0,0282	25,33
74	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CR6	450x300	18,9	0,0140	9,00	0,0068	G	6	0,0847	31,11
75	Bournas D. et al. (2007)_s200_R2	200x200	16,17	0,0115	16,67	0,0078	C	2	0,0068	37,27
76	Bournas D. et al. (2007)_s200_R3	200x200	16,17	0,0115	16,67	0,0078	C	3	0,0102	44,65
77	Bournas D. et al. (2007)_s100_R2	200x200	16,17	0,0115	8,33	0,0155	C	2	0,0068	37,27
78	Bournas D. et al. (2007)_s100_R3	200x200	16,17	0,0115	8,33	0,0155	C	3	0,0102	44,65

### 3.3 Ενδεικτικά παραδείγματα υπολογισμού

Παρακάτω εφαρμόζεται ενδεικτικά κάθε μοντέλο για τα δοκίμια **(8)** *Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002)* \_C1 ορθογωνικής διατομής με μία στρώση ΙΟΠ άνθρακα και **(41)** *Ilki A. et al. (2008)*\_NSR-C-050-3 κυκλικής διατομής και τρεις στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα. Στον **Πίνακα 3-4** που ακολουθεί δίνονται τα γεωμετρικά και τεχνικά στοιχεία κάθε δοκιμίου.

**Πίνακας 3-4** Χαρακτηριστικά δοκιμίων παραδείγματος υπολογισμού

	<b>Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002) _C1</b>	<b>Ilki A. et al. (2008)_NSR-C- 050-3</b>
<b>D</b>	-	250 mm
<b>b</b>	200 mm	-
<b>h</b>	200 mm	-
<b>H</b>	600 mm	500 mm
<b>r</b>	20 mm	-
<b>c<sub>nom</sub></b>	25 mm	25 mm
<b>s</b>	200 mm	50 mm
<b>D<sub>st</sub></b>	6 mm	8 mm
<b>n<sub>st</sub></b>	2	2
<b>f<sub>sy,st</sub></b>	290,8 Mpa	476 Mpa
<b>p<sub>st,v</sub></b>	0,0045	0,0238
<b>D<sub>b</sub></b>	10 mm	10 mm
<b>n<sub>b</sub></b>	4	6
<b>f<sub>sy</sub></b>	342 Mpa	367 Mpa
<b>p<sub>long</sub></b>	0,008	0,01
<b>n<sub>f</sub></b>	1	3
<b>E<sub>f</sub></b>	235000 Mpa	230000 Mpa
<b>ε<sub>fu</sub></b>	0,0151	0,015
<b>t<sub>f</sub></b>	0,111 mm	0,165 mm
<b>f<sub>c</sub></b>	21,1 MPa	27,58 MPa
<b>f<sub>cc</sub><sup>exp</sup></b>	26,26 MPa	77,59 MPa

3.3.1 Παράδειγμα Wang YC, and Hsu K. (2007)

Δοκίμιο (8) Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002) \_C1

**Τάση περίσφιγξης λόγω των εγκάρσιων οπλισμού**

Από την εξ. (2.20) :

$$A_{t,x} = 2 \cdot \frac{\pi D_{st}^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 56,55 mm^2,$$

$$A_{t,y} = 2 \cdot \frac{\pi D_{st}^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 56,55 mm^2$$

$$d_x = b - 2 \cdot c_{nom} = 200 - 2 \cdot 25 = 150 mm$$

$$d_y = h - 2 \cdot c_{nom} = 200 - 2 \cdot 25 = 150 mm$$

$$s = 200 mm, \quad s' = s - D_{st} = 200 - 6 = 194 mm$$

$$\rho_{sx} = \frac{A_{t,x}}{s d_y} = \frac{56,55}{200 \cdot 150} = 0,001885, \quad \rho_{sy} = \frac{A_{t,y}}{s d_x} = \frac{56,55}{200 \cdot 150} = 0,001885$$

Από την εξ. (2.19) :

$$f_{1,sx} = \rho_{sx} f_{syh} = 0,00185 \cdot 291 = 0,54 MPa$$

$$f_{1,sy} = \rho_{sy} f_{syh} = 0,00185 \cdot 291 = 0,54 MPa$$

**Τάση περίσφιγξης λόγω των μανδύα ΙΟΠ**

$$\text{Από την εξ. (2.18): } \rho_{jx} = 2 \frac{t_j}{t_y} = 2 \frac{0,111}{200} = 0,00111, \quad \rho_{jy} = 2 \frac{t_j}{t_x} = 2 \frac{0,111}{200} = 0,00111$$

$$t_y = b = 200 mm \quad \text{και} \quad t_x = h = 200 mm$$

Από την εξ. (2.17) :

$$f_{1,jx} = \rho_{jx} 0,005 E_p = 0,00111 \cdot 0,005 \cdot 235000 = 1,30 MPa$$

$$f_{1,jy} = \rho_{jy} 0,005 E_p = 0,00111 \cdot 0,005 \cdot 235000 = 1,30 MPa$$

$$E_p = E_f = 235000 MPa$$

Από την εξ. (2.16) :

$$F_1 = \max(f_{1,jx}, f_{1,jy}) \text{ και } f_1 = \min(f_{1,jx}, f_{1,jy}) \text{ δηλαδή } F_1 = f_1 = 1,30 MPa$$

$$\alpha_1 = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_1}{f'_c}} - 1,6 \frac{F_1}{f'_c} - 1 \right) = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{1,30}{21,10}} - 1,6 \frac{1,30}{21,10} - 1 \right) = 1,37$$

$$\alpha_2 = \left[ 1,4 \frac{f_1}{F_1} - 0,6 \left( \frac{f_1}{F_1} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{F_1}{f'_b}} + 1 = \left[ 1,4 \frac{1,30}{1,30} - 0,6 \left( \frac{1,30}{1,30} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{1,30}{21,10}} + 1 = 1$$

Από τις εξ. (2.14) και (2.15) :

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 = 1,37 \cdot 1 = 1,37$$

$$f'_{cc,j} = k_c f'_c = 1,37 \cdot 21,10 = 28,91 MPa$$

**Τάση περίσφιγξης λόγω συνδυασμού εγκάρσιου οπλισμού και μανδύα ΙΟΠ**

Από την εξ. (2.21) :

$$f_{1,x} = 0,54 + 1,30 = 1,84 = f_{1,y}$$

Χρησιμοποιώντας την (2.16) :

$$F_1 = \max(f_{1,x}, f_{1,y}) = f_1 = \min(f_{1,x}, f_{1,y}) = 1,84 MPa$$

$$\alpha_1 = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_1}{f'_c}} - 1,6 \frac{F_1}{f'_c} - 1 \right) = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{1,84}{21,10}} - 1,6 \frac{1,84}{21,10} - 1 \right) = 1,506$$

$$\alpha_2 = \left[ 1,4 \frac{f_1}{F_1} - 0,6 \left( \frac{f_1}{F_1} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{F_1}{f'_c}} + 1 = \left[ 1,4 \frac{1,84}{1,84} - 0,6 \left( \frac{1,84}{1,84} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{1,84}{21,10}} + 1 = 1$$

Από τις εξ. (2.14) και (2.15) :

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 = 1,506 \cdot 1 = 1,506$$

$$f'_{cc,js} = k_c f'_c = 1,506 \cdot 21,10 = 31,78 MPa$$

**Υπολογισμός περισφιγμένων επιφανειών**

Στην κατεύθυνση x:

$$w'_s = b - 2 \cdot c_{nom} - 2 \cdot D_b - 2 \cdot D_{st} = 200 - 2 \cdot 25 - 2 \cdot 10 - 2 \cdot 6 = 118mm$$

Στην κατεύθυνση y:

$$w'_s = b - 2 \cdot c_{nom} - 2 \cdot D_b - 2 \cdot D_{st} = 200 - 2 \cdot 25 - 2 \cdot 10 - 2 \cdot 6 = 118mm$$

Από την εξ. (2.9) :

$$\begin{aligned} A_{e,s} &= \left( d_x d_y - \sum \frac{w_s'^2}{6} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{s'}{d_x} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{s'}{d_y} \right) = \\ &= \left( 150 \cdot 150 - 4 \cdot \frac{118^2}{6} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{194}{150} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{194}{150} \right) = \\ &= 13217,33 \cdot 0,35 \cdot 0,35 = 1620mm^2 \end{aligned}$$

Από τις εξ. (2.7) και εξ. (2.8) θέτοντας  $\theta_j = 45^\circ$

$$t_{x,y} = b, h = 200mm$$

$$\begin{aligned} A_{e,j} &= t_x t_y - \frac{w_{jx}^2 + w_{jy}^2}{2} \tan \theta_j - A_s - (4r^2 - \pi r^2) = \\ &= 200 \cdot 200 - \frac{(200 - 2 \cdot 20)^2 + (200 - 2 \cdot 20)^2}{3} \tan 45 - 4 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} - (4 \cdot 20^2 - \pi \cdot 20^2) = \\ &= 40000 - 17066,67 \cdot \tan 45 - 100\pi - 343,36 = 22275,81mm^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{cc,j} &= t_x t_y - A_s - (4r^2 - \pi r^2) = 200 \cdot 200 - 4 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} - (4 \cdot 20^2 - \pi \cdot 20^2) = \\ &= 40000 - 100\pi - (1600 - 400\pi) = 39342,48mm^2 \end{aligned}$$

Από τις εξ. (2.4), (2.5), (2.6) :

$$A_{cu} = A_{cc,j} - A_{e,j} = 39342,48 - 22275,81 = 17066,67mm^2$$

$$A_{cj} = A_{e,j} - A_{e,s} = 22275,81 - 1620 = 20655,81mm^2$$

$$A_{cjs} = A_{e,s} = 1620mm^2$$

Από τις εξ. (2.1), (2.2), (2.3) :

$$\begin{aligned} P_{cn} &= 0,3 f'_c A_{cu} + f'_{cc,j} A_{cj} + f'_{cc,js} A_{cjs} = \\ &= 0,3 \cdot 21,10 \cdot 17066,67 + 28,91 \cdot 20655,81 + 31,78 \cdot 1620 = \\ &= 756675,08 N = 756,68 kN \end{aligned}$$

$$P_{sn} = f_{sy} A_s = 342 \cdot 314,16 = 107442,72 N = 107,44 kN$$

$$P_n = P_{cn} + P_{sn} = 756,68 + 107,44 = 861,12 kN$$

Επομένως

$$f'_{cc} = \frac{P_{\max}}{A_g} = \frac{861,12 \cdot 1000}{39656,64} = 21,71 MPa$$

$$\text{όπου } A_g = A_c - (4r^2 - \pi r^2) = 200 \cdot 200 - (4 \cdot 20^2 - \pi 20^2) = 39656,64.$$

Δοκίμιο (41) Ilki A. et al. (2008)\_NSR-C-050-3

**Τάση περίσφιγξης λόγω των εγκάρσιων οπλισμού**

Από την εξ. (2.20) :

$$A_t = 2 \cdot \frac{\pi D_{st}^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 100,53 mm^2,$$

$$d_x = D - 2 \cdot c_{nom} = 250 - 2 \cdot 25 = 200 mm$$

$$s = 50 mm, \quad s' = s - D_{st} = 50 - 8 = 42 mm$$

$$\rho_s = \frac{A_t}{sd} = \frac{100,53}{50 \cdot 200} = 0,0101$$

Από την εξ. (2.19) :

$$f_{1,s} = \rho_s f_{syh} = 0,0101 \cdot 476 = 4,79 MPa$$

**Τάση περίσφιγξης λόγω του μανδύα ΙΟΠ**



$$\text{Από την εξ. (2.18): } \rho_j = 4 \frac{n \cdot t_j}{D} = 4 \frac{3 \cdot 0,165}{250} = 0,0079 \quad ,$$

Από την εξ. (2.17) :

$$f_{1,j} = \rho_j 0,005 E_p = 0,0079 \cdot 0,005 \cdot 230000 = 9,09 \text{MPa}$$

Από την εξ. (2.16) :  $F_1 = f_1 = 9,09 \text{MPa}$

$$\alpha_1 = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_1}{f'_c}} - 1,6 \frac{F_1}{f'_c} - 1 \right) = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{9,09}{27,58}} - 1,6 \frac{9,09}{27,58} - 1 \right) = 2,37$$

$$\alpha_2 = \left[ 1,4 \frac{f_1}{F_1} - 0,6 \left( \frac{f_1}{F_1} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{F_1}{f'_c}} + 1 = \left[ 1,4 \frac{9,09}{9,09} - 0,6 \left( \frac{9,09}{9,09} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{1,30}{27,58}} + 1 = 1$$

Από τις εξ. (2.14) και (2.15) :

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 = 2,37 \cdot 1 = 2,37$$

$$f'_{cc,j} = k_c f'_c = 2,37 \cdot 27,58 = 65,37 \text{MPa}$$

**Τάση περίσφιγξης λόγω συνδυασμού εγκάρσιου οπλισμού και μανδύα ΙΟΠ**

Από την εξ. (2.21) :

$$f_1 = f_{1,s} + f_{1,j} = 4,79 + 9,09 = 13,88$$

Χρησιμοποιώντας την (2.16) :

$$F_1 = f_1 = 13,88 \text{MPa}$$

$$\alpha_1 = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_1}{f'_c}} - 1,6 \frac{F_1}{f'_c} - 1 \right) = 1,25 \left( 1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{13,88}{27,58}} - 1,6 \frac{13,88}{27,58} - 1 \right) = 2,774$$

$$\alpha_2 = \left[ 1,4 \frac{f_1}{F_1} - 0,6 \left( \frac{f_1}{F_1} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{F_1}{f_c}} + 1 = \left[ 1,4 \frac{13,88}{13,88} - 0,6 \left( \frac{13,88}{13,88} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{13,88}{27,58}} + 1 = 1$$

Από τις εξ. (2.14) και (2.15):

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 = 2,774 \cdot 1 = 2,774$$

$$f'_{cc,js} = k_c f'_c = 2,774 \cdot 27,58 = 76,51 \text{ MPa}$$

#### Υπολογισμός περισφιγμένων επιφανειών

$$\text{Εφόσον υποθέτω } d = D - 2c_{nom} = 250 - 2 \cdot 25 = 200 \text{ mm}$$

Από την εξ. (2.9) :

$$\begin{aligned} A_{e,s} &= \left( \pi \frac{d^2}{4} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{s'}{d} \right)^2 = \\ &= \left( \pi \frac{200^2}{4} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{42}{200} \right)^2 = \\ &= 31415,93 \cdot 0,801 = 25165 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Από τις εξ. (2.7) και εξ. (2.8) υποθέτω

$$A_{e,j} = A - A_s = \pi \frac{D^2}{4} - n \cdot \pi \frac{D_b^2}{4} = \pi \frac{250^2}{4} - 6 \cdot \pi \frac{10^2}{4} = 48616 \text{ mm}^2$$

οπότε και  $A_{cc,j} = A_{e,j}$

Από τις εξ. (2.4), (2.5), (2.6) :

$$A_{cu} = A_{cc,j} - A_{e,j} = 0$$

$$A_{cj} = A_{e,j} - A_{e,s} = 48616 - 25165 = 23451 \text{ mm}^2$$

$$A_{cjs} = A_{e,s} = 25165 \text{ mm}^2$$

Από τις εξ. (2.1), (2.2), (2.3) :

$$\begin{aligned} P_{cn} &= 0,3 f'_c A_{cu} + f'_{cc,j} A_{cj} + f'_{cc,js} A_{cjs} = \\ &= 0 + 65,37 \cdot 23451 + 76,51 \cdot 25165 = \\ &= 3458366,02 N = 3459 kN \end{aligned}$$

$$P_{sn} = f_{sy} A_s = 367 \cdot 471,239 = 172944,68 N = 173 kN$$

$$P_n = P_{cn} + P_{sn} = 3459 + 173 = 3632 kN$$

Επομένως

$$f'_{cc} = \frac{P_{\max}}{A_g} = \frac{3632 \cdot 1000}{49087,39} = 73,99 MPa$$

$$\text{όπου } A_g = A_c = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{250^2}{4} = 49087,39.$$

### 3.3.2 Παράδειγμα Pellegrino C. and Modena C. (2010)

**Δοκίμιο (8) Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002) \_C1**

$$f_{lf} = \frac{1}{2} k_f \rho_f E_f \epsilon_f^{eff}$$

$$\rho_f = \frac{2 n_f t_f (b+h)}{bh} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 0,111 \cdot (200+200)}{200 \cdot 200} = 0,0022$$

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha} = 1$$

$$k_v = \left( 1 - \frac{P'_f}{2 \cdot d_{\min}} \right)^2 = 1$$

$$k_h = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh} = 1 - \frac{(200-2 \cdot 20)^2 + (200-2 \cdot 20)^2}{3 \cdot 200 \cdot 200} = 0,57$$

$$k_f = k_\alpha \cdot k_v \cdot k_h = 0,57$$

$$\varepsilon_f^{eff} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu}$$

$$k_\varepsilon = \gamma C^{-0.7} \leq 0,8 \quad \gamma = 0,7 \text{ για CFRP}$$

$$C = \frac{E_{y,long} \cdot \rho_{y,long}}{E_f \cdot \rho_f} = \frac{200000 \cdot 0,008}{235000 \cdot 0,0022} = 3,01$$

$$\rho_{y,long} = \frac{A_{s,long}}{bh} = \frac{n_b \cdot \pi \cdot D_b^2 / 4}{bh} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^2 / 4}{200 \cdot 200} = 0,008$$

$$k_\varepsilon = \gamma C^{-0.7} = 0,7 \cdot 3,01^{-0.7} = 0,32$$

$$\text{Άρα } \varepsilon_f^{eff} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} = 0,32 \cdot 0,0151 = 0,005$$

$$\text{Και } f_{lf} = \frac{1}{2} k_f \rho_f E_f \varepsilon_f^{eff} = \frac{1}{2} \cdot 0,57 \cdot 0,0022 \cdot 235000 \cdot 0,005 = 0,73 MPa$$

$$f_{ls} = \frac{1}{2} k_s \rho_{st} f_{y,st}$$

$$k_{es} = \frac{1 - \sum (w_{xi}^2 + w_{yi}^2) / 6xy}{1 - \rho_{cc}} = \frac{1 - [2 \cdot (128^2 + 128^2) / (6 \cdot 144 \cdot 144)]}{1 - 0,008} = 0,48$$

$$k_v = \frac{(1 - s' / 2x)(1 - s' / 2y)}{1 - \rho_{cc}} = \frac{(1 - 194 / 2 \cdot 144)(1 - 194 / 2 \cdot 144)}{1 - 0,008} = 0,11$$

$$k_s = k_{es} k_v = 0,48 \cdot 0,11 = 0,05$$

$$\text{Οπότε } f_{ls} = \frac{1}{2} k_s \rho_{st} f_{y,st} = \frac{1}{2} \cdot 0,05 \cdot 0,0039 \cdot 290,8 = 0,03 MPa$$

Άρα

$$P_u = f_{lf} + f_{ls} \frac{A_{cc}}{A_g} = 0,73 + 0,03 \cdot \frac{(200 - 2 \cdot c_{nom} - D_b)^2}{200 \cdot 200} = 0,73 + 0,03 \cdot \frac{140^2}{200^2} = 0,75 MPa$$

$$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + k_1 \cdot \frac{P_u}{f_{c0}}$$

$$k_1 = k_A \cdot k_R = 7,18 \cdot 0,75 = 5,384$$

$$k_A = A \left( \frac{P_u}{f_{c0}} \right)^{-\alpha} = 1,35 \left( \frac{0,75}{21,1} \right)^{-0,5} = 7,18$$

$$\text{Για } 2r/b < 0,3 \Rightarrow 2 \cdot 20 / 200 = 0,2 < 0,3 \Rightarrow$$

$$k_R = 1 - 2,5 \cdot (0,3 - 2r/b) = 1 - 2,5 \cdot (0,3 - 0,2) = 0,75$$

$$\underline{f_{cc} = f_{c0} + k_1 \cdot P_u = 21,1 + 5,385 \cdot 0,75 = 25,14 \text{ MPa}}$$

### 3.3.3 Παράδειγμα Roussakis T. and Karabinis A. (2008)

**Δοκίμιο (8) Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002) \_C1**

Για οπλισμένα δοκίμια η τάση αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{cc} = f_{cc,FRP} + \Delta f_{cc,stirrup} + f_{cc,bars}$$

$$f_{cc,FRP} / f_{co} = 2 \left( \rho_f E_f / f_{co} \right) \left( -0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248 \right) (2r/b) + 1$$

$$\rho_f = 4t_f / d = \frac{4 \cdot 0,111}{200} = 0,0022$$

Επειδή πρόκειται για τετραγωνική διατομή με  $b=h=200\text{mm}$  θεωρώ ότι  $d=200\text{mm}$  για τον υπολογισμό του  $\rho_f$ . Εναλλακτικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η σχέση

$$\rho_f = \frac{2t_f (b+h)}{bh} \quad \text{που δίνει πρακτικά το ίδιο αποτέλεσμα. Επομένως:}$$

$$\begin{aligned} f_{cc,FRP} / f_{co} &= 2 \left( \rho_f E_f / f_{co} \right) \left( -0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248 \right) (2r/b) + 1 = \\ &= 2 \left( 0,0022 \cdot 235000 / 21,1 \right) \left( -0,4142 \cdot 235000 \cdot 10^{-6} / 10 + 0,0248 \right) (2 \cdot 20 / 200) + 1 = \\ &= 2 \cdot 24,5 \cdot 0,01506 \cdot 0,2 + 1 = 1,15 \end{aligned}$$

$$f_{cc,FRP} = 1,15 f_{c0} = 1,15 \cdot 21,1 = 24,27 \text{ MPa}$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $a_n$ :

$$b_0 = b - 2c_{nom} - D_{st} = 200 - 2 \cdot 25 - 6 = 144mm = h_0$$

$$b_i = b_0 - D_{st} - D_b = 144 - 6 - 10 = 128mm$$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n b_i^2 / 6b_o h_o = 1 - \frac{2 \cdot 128^2 + 2 \cdot 128^2}{6 \cdot 144 \cdot 144} = 1 - 0,5267 = 0,4733$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = \left(1 - \frac{200}{2 \cdot 144}\right)^2 = 0,0934$$

$$a = a_n \cdot a_s = 0,4733 \cdot 0,0934 = 0,04$$

$$\omega_{wd} = \rho_{st,v} \frac{f_{sy,st}}{f_{c0}} = \frac{(2b_0 + 2h_0) \cdot A_{s,st}}{b_0 \cdot h_0 \cdot s} \cdot \frac{f_{sy,st}}{f_{c0}} = \frac{(2 \cdot 144 + 2 \cdot 144) \cdot (\pi 6^2 / 4)}{144 \cdot 144 \cdot 200} \cdot \frac{290,8}{21,1} = 0,0541$$

$$\sigma_2 / f_{co} = 0,5\alpha\omega_{wd} = 0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,0541 = 0,001 < 0,05$$

$$\Delta f_{cc,stirrup} = f_{co} (1 + 2,5\alpha\omega_w) - f_{co} =$$

$$= 21,1(1 + 2,5 \cdot 0,04 \cdot 0,0541) - 21,1 = 0,11$$

$$f_{cc,bars} = \frac{f_{sy} \cdot A_{s,long}}{A_c - r^2(4 - \pi) - A_{s,long}} = \frac{342 \cdot 4\pi \frac{10^2}{4}}{200 \cdot 200 - 20^2(4 - \pi) - 4\pi \frac{10^2}{4}} = 2,73$$

$$f_{cc} = f_{cc,FRP} + \Delta f_{cc,stirrup} + f_{cc,bars} = 24,27 + 0,11 + 2,73 = 27,11MPa$$

<b>Δοκίμιο (41) Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-050-3</b>
---

Για οπλισμένα δοκίμια η τάση αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{cc} = f_{cc,FRP} + \Delta f_{cc,stirrup} + f_{cc,bars}$$

$$f_{cc,FRP} / f_{co} = 2 \left( \rho_f E_f / f_{co} \right) \left( -0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248 \right) (2r/b) + 1$$

$$\rho_f = 4t_f / d = \frac{4 \cdot 3 \cdot 0,165}{250} = 0,0079$$

$$\begin{aligned} f_{cc,FRP} / f_{co} &= \left( \rho_f E_f / f_{co} \right) \left( -0,4142 E_f \times 10^{-6} / E_{f\mu} + 0,0248 \right) + 1 = \\ &= \left( 0,0079 \cdot 230000 / 27,6 \right) \left( -0,4142 \cdot 230000 \cdot 10^{-6} / 10 + 0,0248 \right) + 1 = \\ &= 65,83 \cdot 0,015 + 1 = 2,005 \end{aligned}$$

$$f_{cc,FRP} = 1,15 f_{co} = 2,005 \cdot 27,6 = 55,35 MPa$$

$$d_0 = d - 2c_{nom} - D_{st} = 250 - 2 \cdot 25 - 8 = 192 mm$$

$$\alpha_n = 1$$

$$\alpha_s = \left( 1 - \frac{s}{2d_0} \right)^2 = \left( 1 - \frac{50}{2 \cdot 192} \right)^2 = 0,757$$

$$a = a_n \cdot a_s = 0,757$$

$$\omega_{wd} = \rho_{st,v} \frac{f_{sy,st}}{f_{co}} = \frac{4 \cdot A_{s,st}}{d_0 \cdot s} \cdot \frac{f_{sy,st}}{f_{co}} = \frac{4(\pi 8^2 / 4)}{192 \cdot 50} \cdot \frac{476}{27,6} = 0,361$$

$$\sigma_2 / f_{co} = 0,5 \alpha \omega_{wd} = 0,5 \cdot 0,757 \cdot 0,361 = 0,14 > 0,05$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{cc,stirrup} &= f_{co} (1 + 1,25 \alpha \omega_w) - f_{co} = \\ &= 27,6 (1 + 1,25 \cdot 0,757 \cdot 0,361) - 27,6 = 9,43 \end{aligned}$$

$$f_{cc,bars} = \frac{f_{sy} \cdot A_{s,long}}{A_c - A_{s,long}} = \frac{367 \cdot 6 \pi \frac{10^2}{4}}{\pi \frac{250^2}{4} - 6 \pi \frac{10^2}{4}} = 3,56$$

$$f_{cc} = f_{cc,FRP} + \Delta f_{cc,stirrup} + f_{cc,bars} = 55,35 + 9,43 + 3,56 = 68,34 MPa$$

### 3.3.4 Παράδειγμα S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)

**Δοκίμιο (8) Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002) \_C1**

$$\sigma_{lat} = 0,5 \left( k_f^{conf} \rho_{fv} E_f \varepsilon_f^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{y,st} \right) = 0,5 \left( k_f^{conf} \rho_{fv} f_f^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{y,st} \right)$$

$$\rho_{vf} = 2nt_f (b+d) / bd = 2 \cdot 1 \cdot 0,111 \cdot (200+200) / 200 \cdot 200 = 0,0022$$

$$\rho_{sv} = (b+h) \cdot A_{st} / (b \cdot h \cdot s) = 0,0045$$

$$k_f^{conf} = 1 - (b_s^2 + d_s^2) / [3A_g (1 - \rho_s)] =$$

$$= 1 - ((200 - 2 \cdot 20)^2 + (200 - 2 \cdot 20)^2) / [3 \cdot 39656,6 \cdot (1 - 0,0079)] = 0,566$$

$$A_g = bh - 4 \cdot (R_{ch}^2 - \pi R_{ch}^2 / 4) = 200 \cdot 200 - 4(20^2 - \pi \cdot 20^2 / 4) = 39656,6 mm^2$$

$$k_{st}^{conf} = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0,333 \cdot 0,059 = 0,02$$

$$\varepsilon_f^{eff} = \min \{ \varepsilon_f^{deb}, \varepsilon_f^{dil}, \varepsilon_f^{buckl} \} \leq \varepsilon_{fu}$$

$$f_f^{eff} = 0,9 f_{fu} = 0,9 \cdot 3550 = 3195 MPa \Rightarrow \varepsilon_f^{eff} = \frac{3195}{235000} = 0,0136$$

$$\varepsilon_{cc,u} = \varepsilon_{cu} + 0,075 \left( \frac{k_f^{conf} \rho_{fv} E_f \varepsilon_f^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{yst}}{f_c} - 0,1 \right)$$

$$\varepsilon_{cc,u} = 0,004 + 0,075 \left( \frac{0,566 \cdot 0,0022 \cdot 235000 \cdot 0,0135 + 0,2 \cdot 0,0045 \cdot 291}{21,1} - 0,1 \right) = 0,011$$

$$\varepsilon_{cc,u} / \varepsilon_{c0} = 0,011 / 0,002 = 5,5 < 10 \quad \text{Άρα} \quad \nu_u = 0,5$$

$$\text{Οπότε} \quad \boxed{\varepsilon_f^{dil} = \nu_u \cdot \varepsilon_{cc,u} = 0,5 \cdot 0,011 = 0,0055}$$

$$\boxed{\varepsilon_f^{deb} = \sqrt{\frac{f_{a,u} s_{a,u}}{E_f t_f}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 1}{235000 \cdot 0,111}} = 0,0138}$$

Από την καμπύλη λυγισμού για  $s / D_b = 20$  προκύπτει  $\varepsilon_{s,crit} / \varepsilon_y = 0,9$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = \frac{342}{200000} = 0,0017 \quad \text{οπότε} \quad \varepsilon_{s,crit} = 0,0016$$

$$\varepsilon_f^{buckl} = 2 \frac{R_{ch}}{b_s} (\varepsilon_{fu} - \nu_u \varepsilon_{s,crit}) + \varepsilon_f^{dil} = 2 \frac{20}{160} (0,0151 - 1 \cdot 0,0016) + 0,0055 = 0,0081$$

$$\text{Επομένως} \quad \varepsilon_f^{eff} = \min \{ \varepsilon_f^{deb}, \varepsilon_f^{dil}, \varepsilon_f^{buckl} \} \leq \varepsilon_{fu} = \varepsilon_f^{dil} = 0,0055$$



$$\begin{aligned}\sigma_{lat} &= 0.5 \left( k_f^{conf} \rho_{fv} E_f \varepsilon_f^{eff} + k_{st}^{conf} \rho_{sv} f_{y,st} \right) = \\ &= 0,5 \left( 0,566 \cdot 0,0022 \cdot 235000 \cdot 0,0055 + 0,2 \cdot 0,0045 \cdot 291 \right) = 0,82 MPa\end{aligned}$$

$$f_{cc,j} = f'_c + \lambda \sigma_{lat} = 21,1 + 3 \cdot 0,82 = 23,56 MPa$$

## 3.4 Προβλέψεις μοντέλων

## 3.4.1 Πίνακες αποτελεσμάτων

Πίνακας 3-5 Θεωρητικά αποτελέσματα με βάση τα μοντέλα και τον Ευρωκώδικα 8 (α)

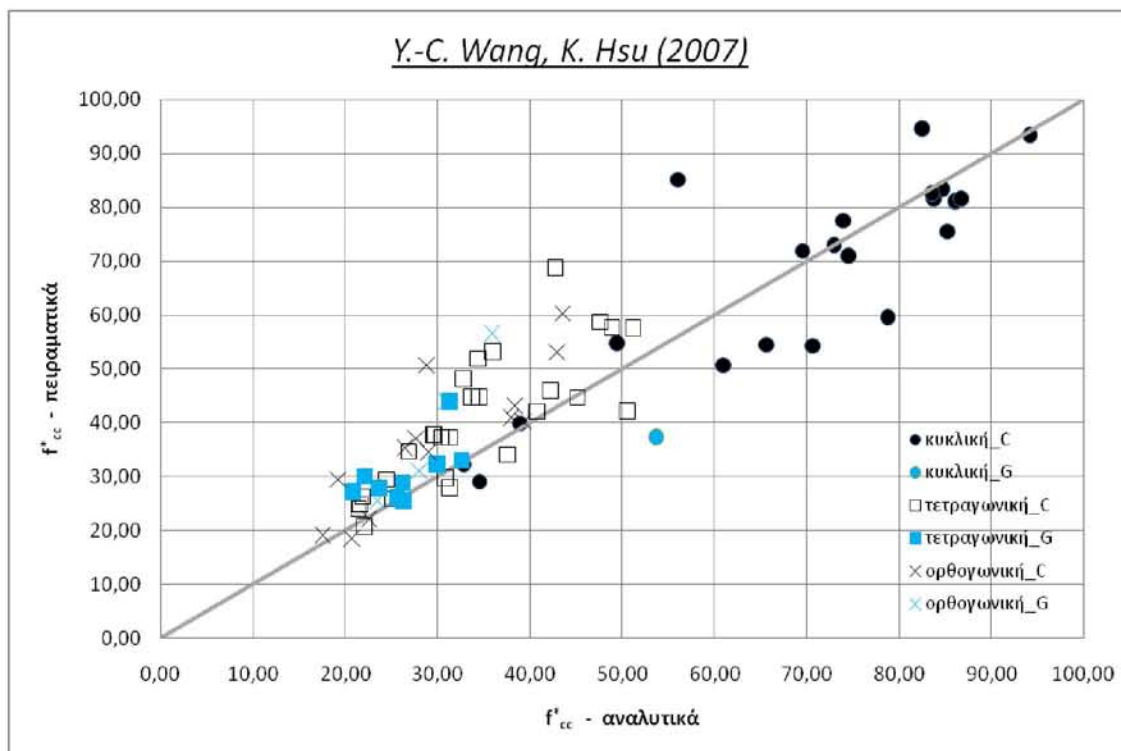
α/α	ΔΟΚΙΜΙΑ	EXP		EC8	ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ			
		$f_c$	$f_{cc}$		Wang_Hsu	Pellegrino	Tastani	Roussakis
1	Rodrigues, C. C. Et al.(2001) _50	37,70	83,30	82,93	84,62	89,93	73,12	74,65
2	Rodrigues, C. C. et al. (2001) _100	37,70	81,50	80,74	83,75	89,11	71,68	72,45
3	Rodrigues, C. C., et al. (2001) _150	37,70	82,50	80,15	83,51	88,89	71,31	71,86
4	Chaallal, O., et al.(2003)	25,00	34,44	32,07	29,05	30,49	29,94	43,04
5	Cole, C., and Belarbi, A. (2001)	21,00	29,60	31,53	30,88	30,71	37,95	37,04
6	Esfahani, M. R. et al. (2004) _prism	46,10	41,95	58,45	50,58	61,02	64,02	65,62
7	Esfahani, M. R., et al. (2004) _round	46,10	77,81	95,36	107,35	112,19	81,88	109,35
8	Feng, P., et al. (2002) _C1	21,10	26,26	25,29	21,83	25,12	23,55	27,10
9	Feng, P., et al. (2002) _G1	21,10	26,93	24,09	20,86	25,54	22,23	27,45
10	Feng, P., et al. (2002) _G2	21,10	27,93	26,60	23,72	28,49	26,65	30,95
11	Feng, P., et al. (2002) _G3	21,10	28,93	27,97	26,17	30,14	29,09	34,44
12	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C1_S	15,20	25,89	21,84	25,18	20,63	23,57	29,48
13	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C2_S	15,20	37,61	25,73	29,57	24,79	36,41	35,82
14	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C3_S	15,20	48,00	29,62	32,82	28,68	46,88	42,16
15	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C1_R	15,20	21,98	19,47	22,50	21,24	20,88	30,55
16	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C3_R	15,20	37,12	23,82	27,69	30,31	42,01	47,19
17	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C1_Re	15,20	18,92	20,89	17,50	20,46	28,89	36,80
18	Harajli, M. H.,et al. (2006) _C3_Re	15,20	29,51	23,83	19,22	27,49	39,74	60,85
19	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-1-1-40a	15,92	20,58	22,24	22,08	21,46	20,57	26,05
20	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-1-3-40a	15,92	37,57	29,52	29,47	29,49	37,57	37,92
21	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-1-3-10a	15,92	24,92	21,33	21,65	20,79	29,65	24,49
22	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-1-5-40a	15,92	29,45	24,06	24,52	23,66	32,57	28,96
23	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-1-3-20a	15,92	51,91	36,81	34,43	35,11	51,82	49,79
24	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-2-1-40a	15,92	18,38	20,50	20,74	21,90	20,99	31,90
25	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-2-3-40a	15,92	35,15	25,56	26,36	31,06	39,05	56,63
26	Ilki A. et al. (2008) _LSR-R-2-5-40a	15,92	50,68	30,62	28,84	35,92	54,43	81,36
27	Ilki A. et al. (2008) _LSR-C-1-a	15,11	29,07	31,71	34,48	27,74	27,71	31,24
28	Ilki A. et al. (2008) _LSR-C-3-a	15,61	54,68	55,05	49,46	50,10	49,12	50,28
29	Ilki A. et al. (2008) _LSR-C-5-a	15,11	85,18	77,25	56,05	65,67	69,53	68,33
30	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-1-050-3-40	27,58	44,67	50,96	45,09	46,86	53,30	57,90
31	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-1-100-3-40	27,58	45,80	45,21	42,26	45,90	50,46	52,15
32	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-1-200-3-40	27,58	42,08	42,64	40,79	45,45	49,23	49,58
33	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-1-050-5-40	27,58	57,40	58,24	51,12	53,86	67,55	69,77
34	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-1-100-5-40	27,58	57,73	52,50	48,83	53,16	64,71	64,02
35	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-1-200-5-40	27,58	58,72	49,93	47,67	52,84	63,48	61,45
36	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-2-050-3-40	27,58	40,34	42,94	39,32	48,08	54,93	72,55
37	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-2-100-3-40	27,58	43,04	39,82	38,39	47,67	51,21	69,43
38	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-2-175-3-40	27,58	40,80	38,68	37,89	47,51	50,71	68,29
39	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-2-050-5-40	27,58	60,33	48,00	43,46	54,34	70,31	97,28
40	Ilki A. et al. (2008) _NSR-R-2-100-5-40	27,58	53,13	44,88	42,97	54,03	66,59	94,16

Πίνακας 3-6 Θεωρητικά αποτελέσματα με βάση τα μοντέλα και τον Ευρωκώδικα 8 (β)

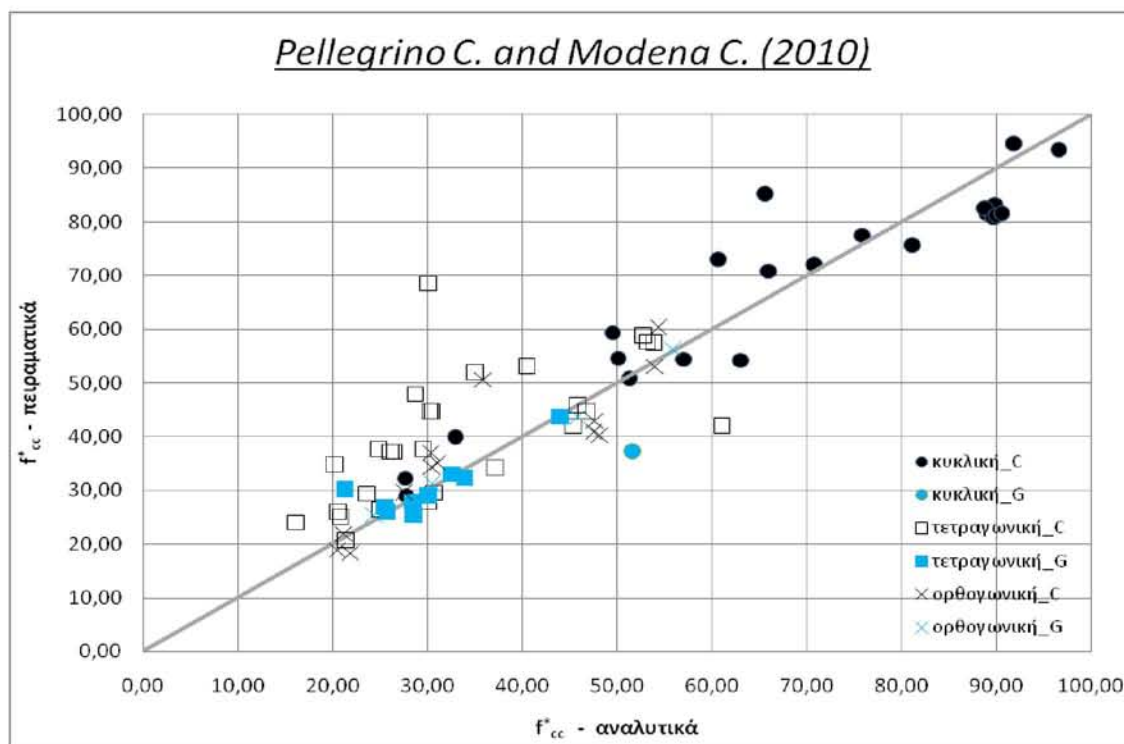
α/α	ΔΟΚΙΜΙΑ	EXP		EC8	ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ			
		$f_c$	$f_{cc}^*$		Wang_Hsu	Pellegrino	Tastani	Roussakis
41	Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-050-3	27,58	77,59	84,04	73,99	75,90	72,06	68,35
42	Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-145-3	27,58	71,95	68,51	69,47	70,88	61,09	62,25
43	Ilki A. et al. (2008)_NSR-C-145-5	27,58	94,45	91,28	82,54	91,90	82,00	80,80
44	Li, Y., Fang, T., et al. (2003)_1	17,20	32,27	32,06	32,77	27,65	25,30	28,23
45	Li, Y., Fang, T., et al. (2003)_2	17,20	39,89	39,67	38,94	32,93	34,93	33,39
46	Matthys, S., et al. (2006)_K2	34,30	54,30	59,82	70,63	63,09	52,60	62,57
47	Matthys, S., et al. (2006)_K5	34,30	37,20	48,44	53,61	51,66	39,42	51,37
48	De Paula, R. F. et al. (2002)_CC	27,50	103,40	61,30	63,24	57,94	56,38	54,28
49	De Paula, R. F., et al. (2002)_QR2C	27,50	53,00	39,07	35,99	40,46	40,78	42,96
50	De Paula, R. F., et al. (2002)_QR3C	27,50	68,60	30,34	42,70	30,17	32,75	51,91
51	Tastani, S. P., et al. (2006)_C2	21,20	27,77	30,34	31,31	30,17	32,75	36,99
52	Tastani, S. P., et al. (2006)_C4	21,20	34,13	36,11	37,63	37,20	50,45	46,27
53	Tastani, S. P., et al. (2006)_G2	21,20	25,44	27,92	26,33	28,60	25,50	33,25
54	Tastani, S. P., et al. (2006)_G4	21,20	32,22	31,26	29,98	33,88	31,96	38,78
55	De luca A. et al. (2011)_G5_S	37,30	43,78	44,11	31,36	44,04	40,77	44,70
56	De luca A. et al. (2011)_G5_R	48,00	56,40	53,19	35,85	55,90	50,03	55,70
57	De luca A. et al. (2011)_G5_Re	34,70	43,75	42,44	30,84	45,90	39,44	44,29
58	Roussakis T. et al. (2008)_C1	13,40	24,10	17,37	21,38	16,14	16,47	24,75
59	Roussakis T. et al. (2008)_C3	13,40	34,72	21,73	26,85	20,29	32,42	31,42
60	Roussakis T. et al. (2008)_G3	13,40	30,09	22,78	22,06	21,28	25,44	27,28
61	Carey, S. A., et al. (2005)_medscale	33,20	54,50	55,26	65,67	57,12	46,36	62,93
62	Carey, S. A., et al. (2005)_full scale	33,20	72,90	60,39	72,87	60,76	52,00	71,76
63	Yu-Lei Bai, et al. (2012)	38,00	59,40	58,57	78,71	49,51	49,25	71,29
64	Chastre C. and Silva M. (2010)_150	38,00	80,82	79,11	85,99	89,82	72,81	72,96
65	Chastre C. and Silva M. (2010)_100	38,00	81,10	79,59	86,15	89,97	73,11	73,44
66	Chastre C. and Silva M. (2010)_50	38,00	81,48	81,49	86,77	90,56	74,36	75,34
67	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_1	35,20	50,73	54,11	61,00	51,29	45,77	53,03
68	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_2	35,20	70,87	67,17	74,56	66,03	58,19	63,09
69	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_3	35,20	75,52	80,24	85,28	81,20	69,25	73,14
70	Chastre C. et al. (2010)_150(6)_4	35,20	93,32	93,30	94,09	96,57	80,30	83,20
71	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CS2	18,90	25,94	26,01	25,60	25,75	23,55	33,09
72	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CS6	18,90	33,09	32,95	32,52	32,62	43,82	46,40
73	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CR2	18,90	25,33	24,69	23,39	24,39	22,46	32,58
74	Wang Y-C. and Hsu K. (2008)_CR6	18,90	31,11	27,77	28,01	30,43	36,33	43,66
75	Bournas D. et al. (2007)_s200_R2	16,17	37,27	26,57	30,39	26,16	32,63	36,07
76	Bournas D. et al. (2007)_s200_R3	16,17	44,65	30,61	33,75	30,23	40,81	42,05
77	Bournas D. et al. (2007)_s100_R2	16,17	37,27	28,64	31,37	26,45	33,59	38,13
78	Bournas D. et al. (2007)_s100_R3	16,17	44,65	32,67	34,53	30,44	41,77	44,11



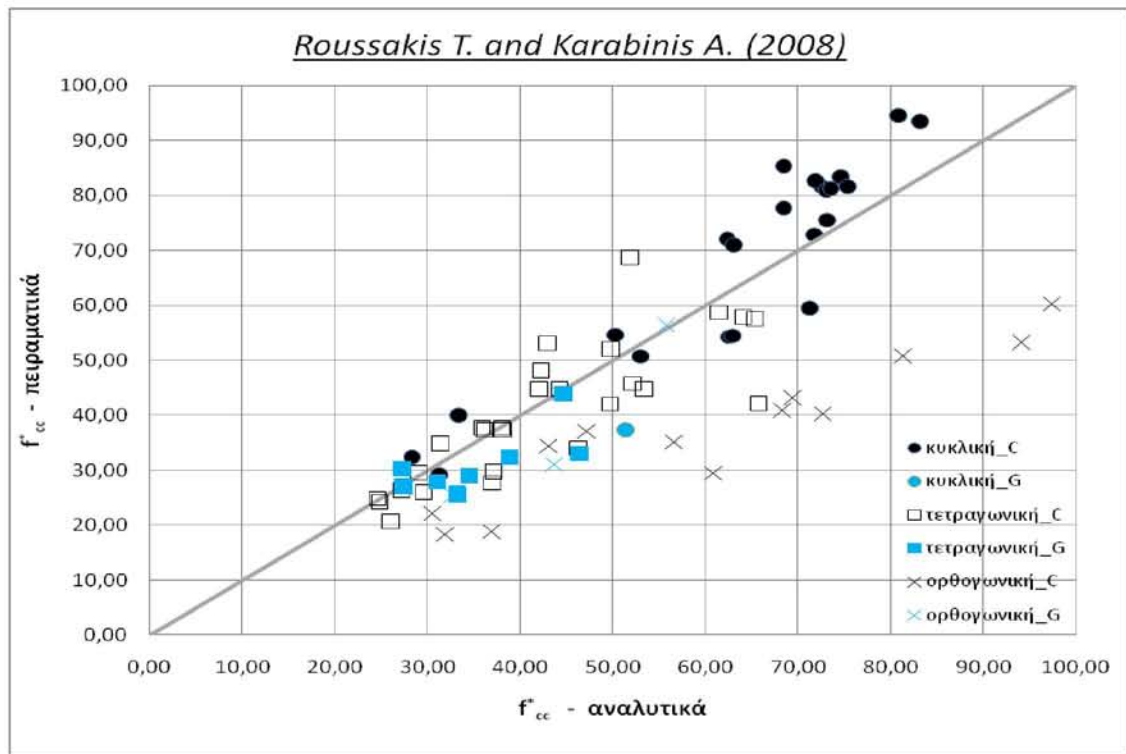
3.4.2 Σύγκριση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων



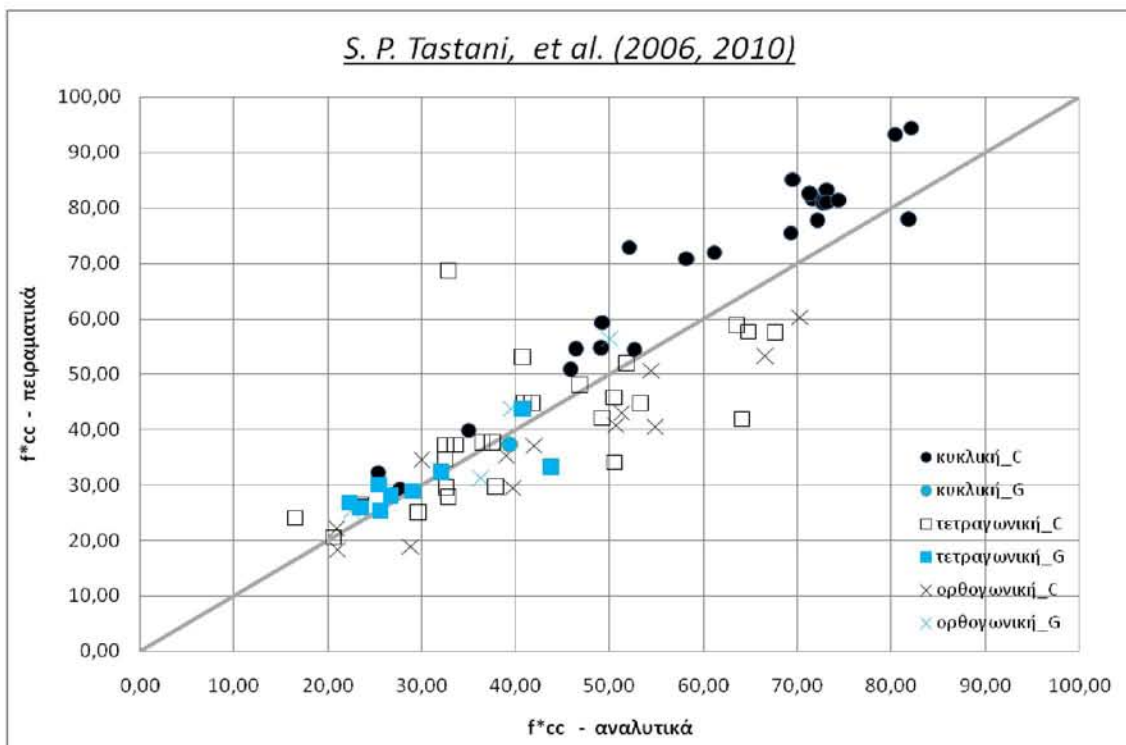
Σχήμα 3.1 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)



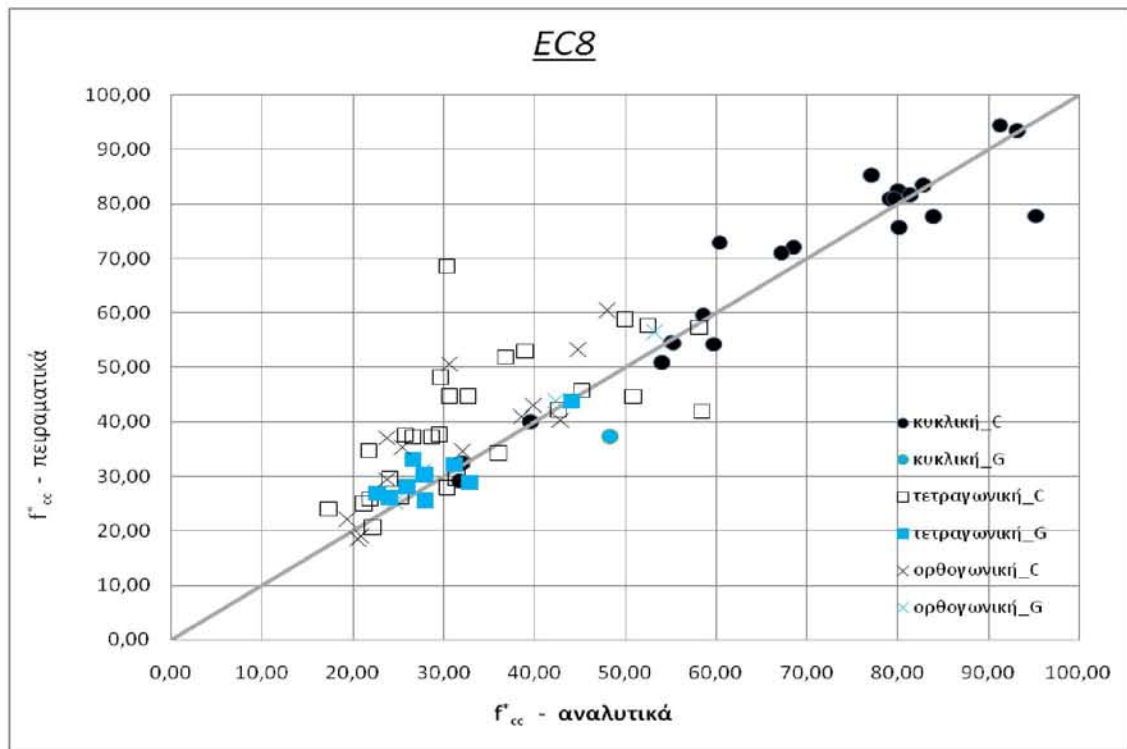
Σχήμα 3.2 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των Pellegrino C. and Modena C. (2010)



**Σχήμα 3.3** Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008)



**Σχήμα 3.4** Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)



Σχήμα 3.5 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα (EC8 - EN 1998-3: 2005)

### 3.4.3 Στατιστικά στοιχεία

Πίνακας 3-7 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)

Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)				
Διατομή	Πλήθος Δοκιμών	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
		Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
ΚΥΚΛΙΚΗ	25	0,98	0,21	0,217
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ	36	1,17	0,19	0,159
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ	17	1,24	0,24	0,190

Πίνακας 3-8 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των Pellegrino C. and Modena C. (2010)

Pellegrino C. and Modena C. (2010)				
Διατομή	Πλήθος Δοκιμών	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
		Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
ΚΥΚΛΙΚΗ	25	1,03	0,21	0,208
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ	36	1,20	0,31	0,260
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ	17	1,03	0,15	0,144

Πίνακας 3-9 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)

S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)				
Διατομή	Πλήθος Δοκιμών	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
		Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
ΚΥΚΛΙΚΗ	25	1,16	0,17	0,145
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ	36	1,03	0,25	0,240
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ	17	0,91	0,15	0,168

Πίνακας 3-10 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008)

Roussakis T. and Karabinis A. (2008)				
Διατομή	Πλήθος Δοκιμών	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
		Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
ΚΥΚΛΙΚΗ	25	1,08	0,22	0,209
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ	36	0,94	0,15	0,158
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ	17	0,68	0,15	0,223

Πίνακας 3-11 Στατιστικά στοιχεία για τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 8

EC8				
Διατομή	Πλήθος Δοκιμών	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
		Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
ΚΥΚΛΙΚΗ	25	1,02	0,16	0,161
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ	36	1,18	0,29	0,242
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ	17	1,15	0,21	0,184

Πίνακας 3-12 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΣΥΝΟΛΙΚΑ)

MONTELO	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)	1,13	0,23	0,203
Pellegrino C. and Modena C. (2010)	1,11	0,26	0,239
S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)	1,04	0,22	0,215
Roussakis T. and Karabinis A. (2008)	0,93	0,23	0,244
EC8	1,12	0,25	0,219

Πίνακας 3-13 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ)

MONTELO	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)	0,98	0,21	0,217
Pellegrino C. and Modena C. (2010)	1,03	0,21	0,208
S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)	1,16	0,17	0,145
Roussakis T. and Karabinis A. (2008)	1,08	0,22	0,209
EC8	1,02	0,16	0,161

Πίνακας 3-14 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ)

MONTELO	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)	1,17	0,19	0,159
Pellegrino C. and Modena C. (2010)	1,20	0,31	0,260
S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)	1,03	0,25	0,240
Roussakis T. and Karabinis A. (2008)	0,94	0,15	0,158
EC8	1,18	0,29	0,242

Πίνακας 3-15 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ)

MONTELO	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$		
	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)	1,24	0,24	0,190
Pellegrino C. and Modena C. (2010)	1,03	0,15	0,144
S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)	0,91	0,15	0,168
Roussakis T. and Karabinis A. (2008)	0,68	0,15	0,223
EC8	1,15	0,21	0,184



### 3.5 Συμπεράσματα

Αξιολογώντας τη σύγκριση των τιμών και τα στατιστικά στοιχεία παρατηρείται ότι όλα τα μοντέλα, με εξαίρεση το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008), στην πλειοψηφία των δοκιμίων, υποεκτιμούν την τιμή της θλιπτικής αντοχής. Με κριτήριο την μέση τιμή, το μοντέλο των S. P. Tastani, et al. (2006, 2010) προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές. Ωστόσο, για όλα τα μοντέλα, ο συντελεστής μεταβλητότητας λαμβάνει τιμές ( $>0,10$ ) που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ομοιογένεια στο δείγμα των τιμών.

Επιπλέον, υπάρχει πιο ικανοποιητική προσέγγιση στα δοκίμια με κυκλική διατομή σε σχέση με τα πρισματικά δοκίμια σε όλα τα μοντέλα. Εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007), που οι προβλέψεις για τα κυλινδρικά μοντέλα έχουν τάση να υπερεκτιμούν την τιμή της θλιπτικής αντοχής, κάτι που είναι αναντιστοιχία με την «συμπεριφορά» του μοντέλου στα πρισματικά δοκίμια. Προφανώς, η υπόθεση που έγινε για να εφαρμοστεί το μοντέλο και στα δοκίμια με κυκλική διατομή προκαλεί αυτή την αντιστοιχία στις προβλέψεις. Επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη.

Με βάση τα παραπάνω, παρατηρείται ότι η σειρά κατάταξης των μοντέλων, από το ασφαλέστερο έως το λιγότερο ασφαλές είναι η εξής:

- για τα δοκίμια με κυκλική διατομή:

- 1) *Ευρωκώδικας*
- 2) *S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)*
- 3) *Pellegrino C. and Modena C. (2010)*
- 4) *Roussakis T. and Karabinis A. (2008)*
- 5) *Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)*

- για τα δοκίμια με ορθογωνική διατομή:

- 1) *Pellegrino C. and Modena C. (2010)*
- 2) *S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)*
- 3) *Ευρωκώδικας*
- 4) *Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)*
- 5) *Roussakis T. and Karabinis A. (2008)*

- για τα δοκίμια με τετραγωνική διατομή:

- 1) *Y.-C. Wang, K. Hsu (2007)*
- 2) *Roussakis T. and Karabinis A. (2008)*
- 3) *S. P. Tastani, et al. (2006, 2010)*
- 4) *Ευρωκώδικας*
- 5) *Pellegrino C. and Modena C. (2010)*

## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

### 4.1 Μορφή δοκιμίων

Το πειραματικό πρόγραμμα μελετά την συμπεριφορά δοκιμίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, περισφιγμένων με στρώσεις ΙΟΠ υπό μονοαξονική θλίψη. Περιλαμβάνει 6 δοκίμια τετραγωνικής διατομής, από τα οποία τα 3 με διαστάσεις 150x150 mm και τα υπόλοιπα 3 με διαστάσεις 100x100 mm και 3 δοκίμια κυκλικής διατομής με διάμετρο 150 mm. Οι διατομές επιλέχθηκαν με στόχο να αναπαραστήσουν πραγματικά υποστυλώματα σε κλίμακα 1:3. Όλα τα δοκίμια έχουν ύψος 300 mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν 1 κύλινδρος (διάμετρος 150 mm – ύψος 300 mm) και 5 κύβοι (150x150x150 mm) από άοπλο σκυρόδεμα για την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Το πειραματικό μέρος (κατασκευή και θραύση των δοκιμίων) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Κάθε σειρά δοκιμίων περιλαμβάνει 1 δοκίμιο που έχει οπλιστεί με βάση τις απαιτήσεις του EC8 και 2 δοκίμια που έχουν οπλιστεί με βάση τις διατάξεις του Κανονισμού Σκυροδέματος 1954, *(Κανονισμός δια τη μελέτην και εκτέλεσιν οικοδομικών έργων εξ ωπλισμένου σκυροδέματος (Διάταγμα 18/2/1954), Υπουργείο Δημόσιων Έργων)*, από τα οποία το 1 ενισχύεται με ΙΟΠ.

Οι γωνίες των δοκιμίων τετραγωνικής διατομής που περισφίχθηκαν με στρώσεις ΙΟΠ στρογγυλεύθηκαν έτσι ώστε να αποφευχθεί πρόωγη αστοχία του μανδύα ΙΟΠ λόγω συγκέντρωσης τάσεων στις γωνίες. Οι γωνίες στρογγυλεύθηκαν με ακτίνα 25 mm, χρησιμοποιώντας κοινό σωλήνα PVC διαμέτρου 50 mm, τεμαχισμένο σε 4 τεταρτημόρια. Κάθε κομμάτι σωλήνα τοποθετήθηκε στις γωνίες του ξυλότυπου του δοκιμίου.

Η επικάλυψη εκτιμήθηκε με βάση τις απαιτήσεις του EC2, παράγραφος 4.4.1.2, λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα των δοκιμίων 1:3, επιλέχθηκε  $c = 7 \text{ mm}$ .

Σε κάθε δοκίμιο έγινε διαμόρφωση στα άκρα του (capping) με γύψο υψηλής αντοχής έτσι ώστε να προκύπτουν επίπεδες επιφάνειες, παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου.

### 4.2 Σύμβαση για τον συμβολισμό των δοκιμίων

Όλα τα δοκίμια συμβολίζονται με βάση την γενική μορφή που ακολουθεί:

**απαίτηση για συνδετήρες – διατομή (διάσταση σε mm) – τύπος ΙΟΠ (στρώσεις)**

όπου:

- απαίτηση για συνδετήρες = O (Old) ή M (Modern)
- διατομή = R (κυκλική, Round) ή S (τετραγωνική, Square)
- τύπος ΙΟΠ = C (ίνες άνθρακα)

Για παράδειγμα η ονομασία **M - S(150) - C(1)** συμβολίζει δοκίμιο που έχει οπλιστεί με βάση τις απαιτήσεις του EC8 για τους συνδετήρες, έχει τετραγωνική διατομή με πλευρά 150 mm και είναι περισφιγμένο με 1 στρώση ΙΟΠ άνθρακα.

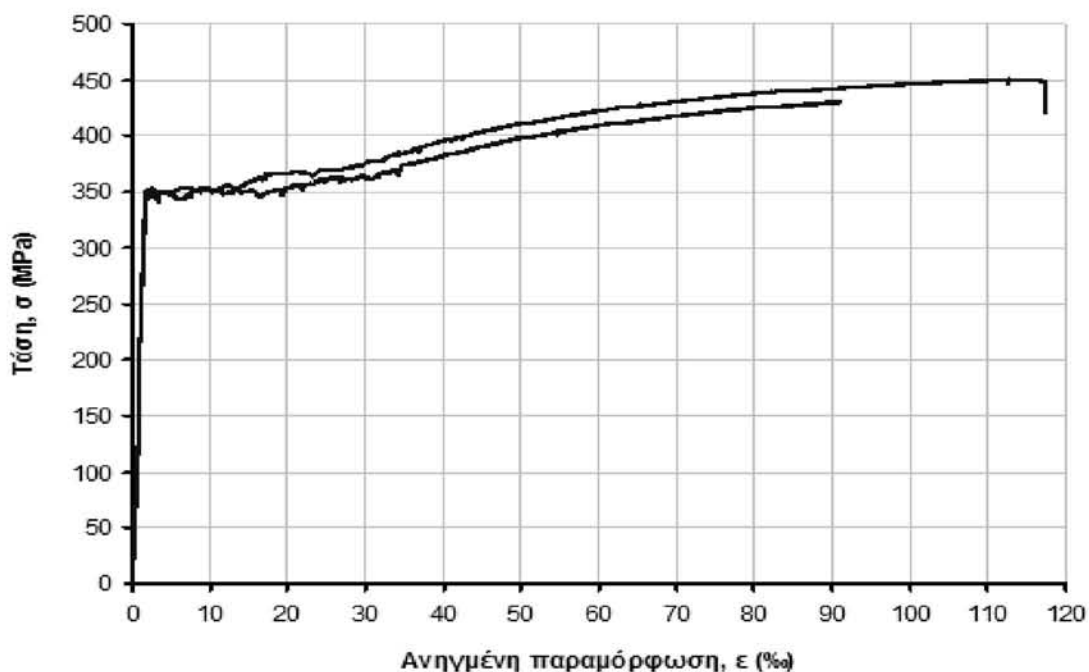
**Πίνακας 4-1** Χαρακτηριστικά δοκιμίων

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΟΠΑΙΣΜΟΣ	ΙΟΠ	$\rho_{long}$	$\rho_{fv}$	$s/D_b$
<b>M - S(150)</b>	150x150x300	8Ø6 διαμήκης και ΣØ3/45,5	-	0,0103	-	7,6
<b>O - S(150)</b>		8Ø6 διαμήκης και ΣØ3/70	-		-	11,7
<b>O - S(150) - C(1)</b>			C(1)		0,0035	
<b>M - S(100)</b>	100x150x300	4Ø6 διαμήκης και ΣØ3/45,5	-	0,012	-	7,6
<b>O - S(100)</b>		8Ø6 διαμήκης και ΣØ3/70	-		-	11,7
<b>O - S(100) - C(1)</b>			C(1)		0,0052	
<b>M - R(150)</b>	D150x300	8Ø6 διαμήκης και ΣØ3/45,5	-	0,0125	-	7,6
<b>O - R(150)</b>		8Ø6 διαμήκης και ΣØ3/70	-		-	11,7
<b>O - R(150) - C(1)</b>			C(1)		0,0034	

### 4.3 Υλικά και διαδικασία κατασκευής των δοκιμών

#### 4.3.1 Οπλισμός

Λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα 1:3, επιλέχτηκε για τον διαμήκη οπλισμό διάμετρος 6 mm ενώ για τους συνδετήρες 3 mm. Η τάση διαρροής του χάλυβα για τον διαμήκη οπλισμό είναι  $f_{y,l} = 350 \text{ MPa}$ , με  $\varepsilon_y = 0,00175$  και  $\varepsilon_u = 0,09$ . Για τους συνδετήρες των υποστυλωμάτων επελέγη να χρησιμοποιηθεί σύρμα Φ3 που έχει υποστεί έλαση με μέση τάση διαρροής  $f_{sy} \approx 560 \text{ MPa}$ , ώστε η διάμετρος να είναι συμβατή με την κλίμακα 1:3, καθόσον αντιστοιχεί σε διάμετρο συνδετήρα Φ8 στο πρωτότυπο.



**Σχήμα 4.1** Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα διαμήκη οπλισμού

Σύμφωνα με τον EC8, παράγραφος 5.4.3.2.2 (1) το συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού  $\rho_l$  δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 0,01 και μικρότερο του 0,04.

Επιλέχτηκε για τα ορθογωνικά δοκίμια με διατομή 150x150 mm και τα δοκίμια με κυκλική διατομή D150 διαμήκης οπλισμός 8Ø6, ενώ για τα δοκίμια με διατομή 100x100 mm διαμήκης οπλισμός 4Ø6. Δηλαδή  $\rho_l = 0,01$ ,  $\rho_l = 0,013$  και  $\rho_l = 0,012$  αντίστοιχα για κάθε τύπο διατομής. Δηλαδή κοντά στο ελάχιστο ποσοστό του κανονισμού. Τα ποσοστά αυτά είναι εντός ορίων και των απαιτήσεων του Κανονισμού σκυροδέματος 1954 σύμφωνα με τον οποίο, σελ.65, πρέπει  $0.008 \leq \rho_l \leq 0.06$ .

Σύμφωνα με τον EC8, παράγραφος 5.4.3.2.2 (11) η απόσταση  $s$  των συνδετήρων δεν πρέπει να υπερβαίνει :

$$s = \min\left\{\frac{b_o}{2}, 175, 8d_{bl}\right\}, \text{ όπου } b_o \text{ η ελάχιστη διάσταση του πυρήνα σκυροδέματος και } d_{bl} \text{ η}$$

διάμετρος του διαμήκη οπλισμού. Δηλαδή

$$s = \min\left\{\frac{133}{2}, \frac{175}{3}, 8 \cdot 6\right\} = \min\{66.5, 58.3, 48\} = 48 \text{ mm. Επιλέχτηκε } s = 45,5 \text{ mm.}$$



Εικόνα 4.1 Οπλισμός M – R (150)



Εικόνα 4.2 Οπλισμός M – S (150)



Εικόνα 4.3 Οπλισμός M – S(150) (αριστερά) και οπλισμός O – S(150) (δεξιά)





Εικόνα 4.4 Οπλισμός M-S (100) Εικόνα 4.5 Οπλισμός M-S(100) (αριστερά) και O-S(100) (δεξιά)

Ενώ σύμφωνα με τον Κανονισμό σκυροδέματος 1954, σελ 65,  $s \leq \min \{d, 12\Phi\}$ , όπου  $d$  το μήκος της μικρότερης πλευράς και  $\Phi$  η μικρότερη διάμετρος του διαμήκη οπλισμού, δηλαδή  $s \leq \min \{150, 12 \cdot 6\} = \min \{150, 72\} = 72 \text{ mm}$ . Επιλέχτηκε  $s = 70 \text{ mm}$ .

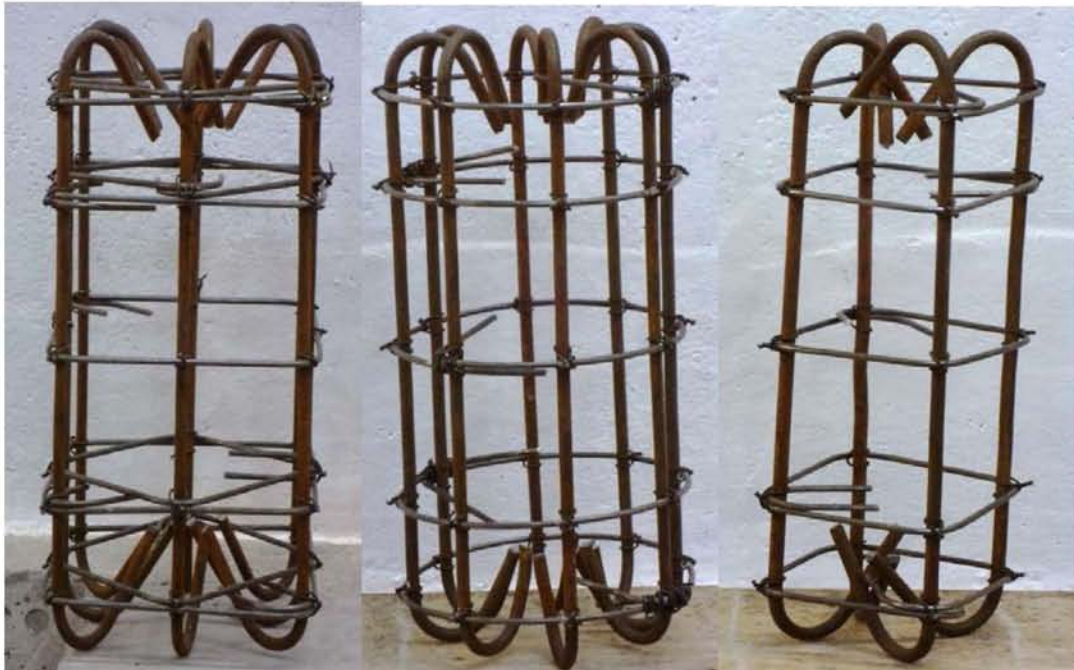
Οι άκρες των ράβδων του διαμήκη οπλισμού κάμφθηκαν μέσα στον πυρήνα της διατομής αφενός για επαρκή αγκύρωση, και αφετέρου για να αποτραπεί πιθανή τοπική ρηγμάτωση του σκυροδέματος λόγω συγκέντρωσης τάσεων (διάμετρος τυμπάνου καμπύλωσης  $5d_t = 5 \cdot 6 = 30 \text{ mm}$ ). Επίσης, για να αποφευχθεί αστοχία των δοκιμίων, που οπλίστηκαν με βάση τις παλαιότερες διατάξεις, κοντά στις επιφάνειες φόρτισης, καθώς και για την ανάληψη των τοπικών εγκάρσιων τάσεων διάσπασης τοποθετήθηκαν πρόσθετοι συνδετήρες στα άκρα των δοκιμίων.



**Εικόνα 4.6** Λεπτομέρεια οπλισμού



**Εικόνα 4.7** Λεπτομέρεια οπλισμού



**Εικόνα 4.8** Οπλισμός O-S(150)

**Οπλισμός O-R(150)**

**Οπλισμός O-S(100)**



**Εικόνα 4.9** Οπλισμός M-R(150) (αριστερά) και οπλισμός O-R(150) (δεξιά)





**Εικόνα 4.10** Λεπτομέρειες οπλισμού



**Εικόνα 4.11** Ξυλότυπος ορθογωνικών (S-150) δοκιμίων



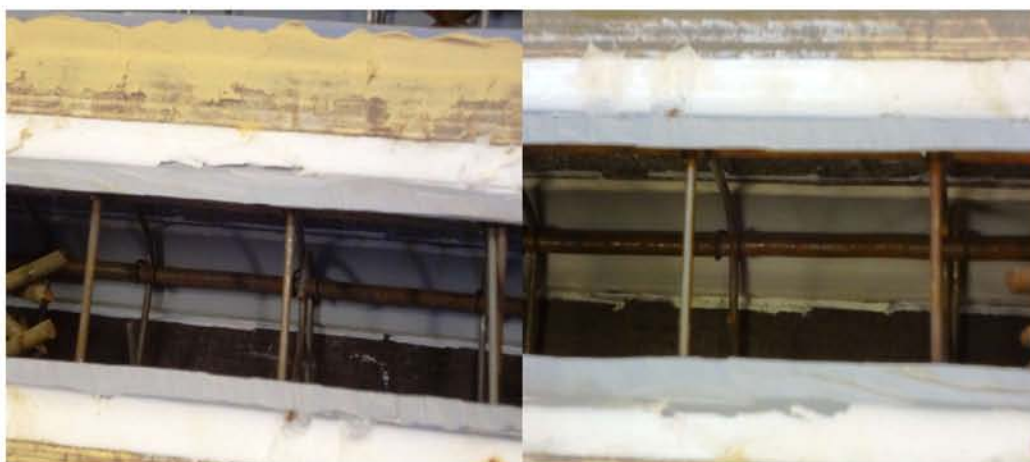
**Εικόνα 4.12** Ξυλότυπος ορθογωνικών (S-100) δοκιμίων



**Εικόνα 4.13** Μεταλλικά καλούπια κυλινδρικών δοκιμίων



**Εικόνα 4.14** Μεταλλικά και πλαστικά καλούπια των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της δοκιμαστικής αντοχής του σκυροδέματος



**Εικόνα 4.15** Εφαρμογή πλαστικών στοιχείων (PVC) με σιλικόνη για το στρογγύλεμα των γωνιών



#### 4.3.2 Σκυροδέμα

Η χαρακτηριστική κυλινδρική αντοχή του σκυροδέματος, 28 ημερών,  $f_c$  ήταν 17,8 MPa. Η σκυροδέτηση έγινε στο εργαστήριο. Για τον απαιτούμενο όγκο σκυροδέματος,  $0,155 \text{ m}^3$ , η αναλογία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κιλά ήταν τσιμέντο- αδρανή - νερό = 43,4 - 296,2 - 31,3 = 1 - 6,8 - 0,72 (kg).

Ο κοκκομετρικός διαχωρισμός των αδρανών έγινε στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας πρότυπα κόσκινα με τετραγωνικές τρύπες. Ο καθορισμός της κοκκομετρικής καμπύλης του μίγματος στηρίχτηκε στον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. (Σχήμα 4.2). Επιλέχτηκε μέγιστος κόκκος αδρανούς 8mm προκειμένου να τηρηθεί η σχέση ομοιότητας για την κλίμακα 1:3 των δοκιμών (scale effects).

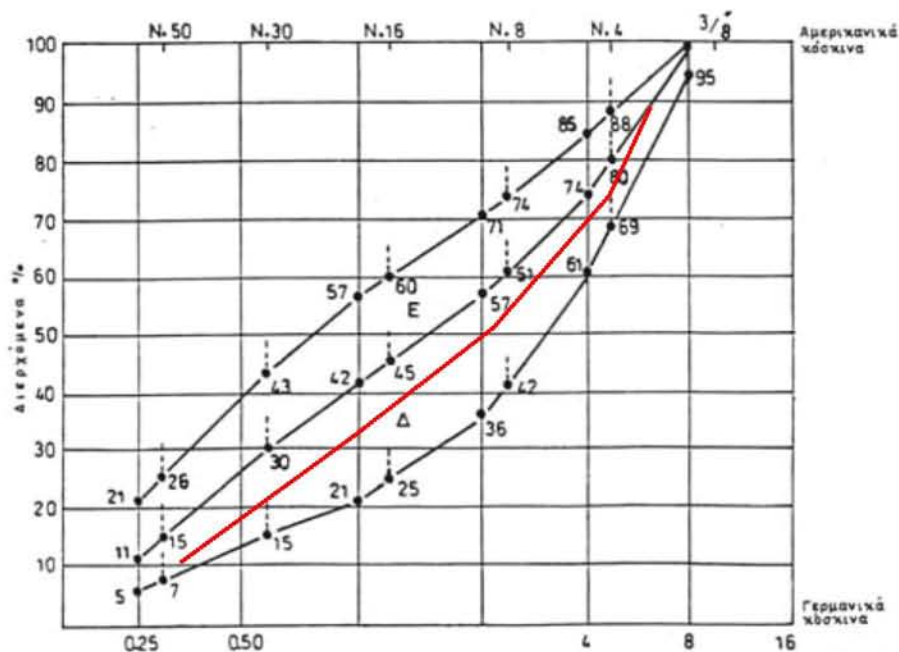
Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών φαίνεται αναλυτικά στον Πίνακα 4-2.



Εικόνα 4.16 Σκυροδέτηση στο εργαστήριο



Εικόνα 4.17 Μέτρηση κάθισης



Σχήμα 4.2 Θεωρούμενη κοκκομετρική καμπύλη

Πίνακας 4-2 Ποσότητες αδρανών

ΥΠΟΖΩΝΗ Δ (μέσες τιμές ορίων προδιαγραφής): <b>ΚΟΣΚΙΝΑ Εργαστηρίου ΠΘ</b>					
Αναλυτικές ποσότητες αδρανών - Δελτίο Κοκκομετρικής Ανάλυσης					
Ονομασία κόσκινου	Όρια προδιαγραφής	Άνοιγμα κόσκινου	Συγκρατούμενο βάρος	Διερχόμενο βάρος	
	%	(mm)	(kg)	kg	%
31,5	100	31,5	0,0	296,2	100
16	100	16	0,0	296,2	100
8	60-85	8	0,0	296,2	100
4	36-63	4	77,0	219,2	74
2	21-42	2	71,1	148,1	50
1	12-32	1	53,3	94,8	32
0,425	5,5-18	0,425	50,4	44,4	15
		<b>Παιτάλη:</b>	<b>44,4</b>		
		<b>Συν. Βάρος</b>	<b>296,2</b>		

Η αντοχή του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε ήταν 32,5 MPa, ενώ για να βελτιωθεί η εργασιμότητα του μίγματος προστέθηκε μικρή ποσότητα ρευστοποιητή.



Εικόνα 4.18 Αδρανή (μεγ. διάμετρος 4–8 mm)



Εικόνα 4.19 Αδρανή (μεγ. διάμετρος 2–4 mm)





Εικόνα 4.20 Αδρανή (μεγ. διάμετρος 1–2 mm)



Εικόνα 4.21 Αδρανή (μεγ. διάμετρος 0,425-1 mm)



Εικόνα 4.22 Παιπάλη



Εικόνα 4.23 Αδρανή



Εικόνα 4.24 Ορθογωνικά δοκίμια S(100) μετά την σκυροδέτηση





**Εικόνα 4.25** Ορθογωνικά δοκίμια S(150) μετά την σκυροδέτηση



**Εικόνα 4.26** Δοκιμαστικοί κύλινδροι και κύβοι

#### **4.3.3 Διαμόρφωση άκρων (capping)**

Η κορυφή και η βάση των δοκιμίων συνήθως δεν είναι λείες εξαιτίας του νερού κατά την παρασκευή του σκυροδέματος. Για να εξασφαλιστεί μία λεία επιφάνεια που θα έρθει σε επαφή με τις πλάκες της πρέσας αλλά και να βρίσκονται η επιφάνεια και η βάση σε παράλληλα επίπεδα, κατακόρυφα στον άξονα της θλίψης, διαμορφώθηκαν κατάλληλα τα άκρα χρησιμοποιώντας γύψο υψηλής αντοχής.



**Εικόνα 4.27** Διαμόρφωση στα άκρα των δοκιμίων με γύψο υψηλής αντοχής(capping)

#### 4.3.4 Ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ)

Τα ΙΟΠ που τοποθετήθηκαν για περίσφιγξη των δοκιμίων μας χορηγήθηκαν από την εταιρία SIKΑ Hellas. Το ύφασμα ινών άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε είναι το SikaWrap®-230C. Το ύφασμα είναι μονής διεύθυνσης με το υφάδι του να απαρτίζεται από μαύρες ίνες άνθρακα μέσης αντοχής (99% του συνολικού βάρους του υφάσματος), ενώ το στημόνι αποτελείται από λευκές θερμοπλαστικές ίνες θερμικά σχηματιζόμενες (1% του συνολικού βάρους του υφάσματος). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υφάσματος όπως δίνονται από τον κατασκευαστή είναι :

- **Βάρος:**  $230 \pm 10 \text{ gr/m}^2$
- **Σχεδιαστικό πάχος:**  $0,131 \text{ mm}$
- **Πυκνότητα ινών:**  $1,76 \text{ gr/cm}^3$

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινών που δίνονται από τον κατασκευαστή και προκύπτουν σύμφωνα με το πρότυπο EN 2561 είναι:

- **Μέτρο ελαστικότητας:**  $E_f = 234 \text{ GPa}$  (ελάχιστη τιμή)
- **Εφελκυστική αντοχή:**  $f_f = 4300 \text{ MPa}$  (ελάχιστη τιμή)
- **Τροπή θραύσης:**  $\varepsilon_{fu} = 1,84\%$  (προκύπτει ως ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το μέτρο ελαστικότητας)

#### 4.3.5 Εποξειδική ρητίνη



Η εποξειδική ρητίνη η οποία χρησιμοποιήθηκε τόσο ως μήτρα για τον εμποτισμό των υφασμάτων όσο και ως κόλλα για την επικόλληση αυτών στα κυλινδρικά δοκίμια είναι η Sikadur®-330 της εταιρείας SIKAHellas. Η Sikadur®-330 είναι θιξοτροπική εποξειδική ρητίνη εμποτισμού/συγκόλλησης δύο συστατικών, χωρίς διαλύτες. Οι κύριες φυσικές ιδιότητες όπως δίνονται από τον κατασκευαστή είναι:

- **Πυκνότητα:**  $1,30 \pm 0,1 \text{ kg/l}$
- **Συντελεστής θερμικής διαστολής:**  $4,5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  ( $-10^\circ\text{C}$  έως  $+40^\circ\text{C}$ )
- **Θερμοκρασία λειτουργίας:**  $-40^\circ\text{C}$  έως  $+45^\circ\text{C}$

Τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά της ρητίνης όπως δίνονται από τον κατασκευαστή είναι:

- **Εφελκυστική αντοχή:** 30 MPa (7 ημέρες στους  $+23^\circ\text{C}$ )
- **Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη:** 3,8 GPa (7 ημέρες στους  $+23^\circ\text{C}$ )
- **Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό:** 4,5 GPa (7 ημέρες στους  $+23^\circ\text{C}$ )
- **Επιμήκυνση θραύσης:** 0,9% (7 ημέρες στους  $+23^\circ\text{C}$ )



Εικόνα 4.28 Ζύγιση συστατικών ρητίνης



Εικόνα 4.29 Ανάμιξη συστατικών ρητίνης

#### 4.3.6 Μέθοδος εφαρμογής των υφασμάτων ΙΟΠ στα δοκίμια

Πριν την εφαρμογή των υφασμάτων ΙΟΠ έγινε προεργασία της επιφάνειας των δοκιμίων στην οποία εφαρμόζονται. Η προεργασία έχει στόχο να απομακρυνθεί η τσιμεντοεπιδερμίδα και να δημιουργηθεί μια ανοιχτών πόρων επιφάνεια όπου τα συστατικά του σκυροδέματος είναι ορατά, έτσι ώστε να δημιουργηθούν ευνοϊκές συνθήκες για την καλύτερη δυνατή εφαρμογή της εποξειδικής ρητίνης. Η προεργασία έγινε με τη χρήση τροχού και κατάλληλου δίσκου.



Για την διαμόρφωση των μανδυνών ΙΟΠ ακολουθήθηκε το σύστημα της ξηρής εφαρμογής με την δια χειρός επικόλληση των υφασμάτων. Αρχικά εφαρμόστηκε ρητίνη στην διαμορφωμένη επιφάνεια του δοκιμίου. Στην συνέχεια εφαρμόζεται επάνω στην ρητίνη το ύφασμα ΙΟΠ. Η επικόλληση έγινε με την βοήθεια ειδικού σκληρού ρολού, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρίας κατασκευής, ώστε να απομακρυνθούν θύλακες αέρα και να εμποτιστεί πλήρως το ύφασμα με ρητίνη.



**Εικόνα 4.30** Εφαρμογή ρητίνης στην επιφάνεια του δοκιμίου



**Εικόνα 4.31** Εφαρμογή υφάσματος ΙΟΠ



**Εικόνα 4.32** Τελική επικάλυψη υφάσματος ΙΟΠ με ρητίνη

Σε όλα τα δοκίμια η ελάχιστη τιμή του μήκους υπερκάλυψης ήταν 100 mm με στόχο την καλή αγκύρωση των στρώσεων και την αποφυγή αστοχίας μέσω αποκόλλησης του μανδύα ΙΟΠ. Για την εκτίμηση του μήκους υπερκάλυψης λήφθηκε υπόψη η σχέση (5.12) που προτείνουν οι Tastani, Pantazopoulou et al. (2006) και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.2.5.

Η σχέση (5.12) είναι η μόνη άμεση μέθοδος προσδιορισμού του μήκους αγκύρωσης που εντοπίστηκε στην βιβλιογραφία. Προκειμένου όμως να διαστασιολογηθεί στην πράξη το μήκος υπερκάλυψης υφάσματος σε ένα στοιχείο οι συγγραφείς προτείνουν την χρήση της (5.12) με συντελεστή ασφάλειας  $\gamma_{L_f} \geq 2$ . Επίσης αναφέρουν την πρακτική οδηγία ότι η αστοχία από αποκόλληση μπορεί να αποφευχθεί, αν η τελευταία στρώση αγκυρωθεί για μήκος ίσο με την πλευρά του δομικού στοιχείου.

Τέλος εφαρμόζεται άλλη μία στρώση ρητίνης στην εξωτερική επιφάνεια του υφάσματος με την βοήθεια του ρολού για πλήρη εμποτισμό του υφάσματος. Αυτή είναι η διαδικασία για την παρασκευή μίας στρώσης μανδύα ΙΟΠ. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την διαμόρφωση του αριθμού των στρώσεων ΙΟΠ που ζητείται για κάθε δοκίμιο. Όλοι οι μανδύες ΙΟΠ διαμορφώθηκαν έτσι ώστε οι ίνες τους να είναι κάθετες στον διαμήκη άξονα των δοκιμών.





**Εικόνα 4.33** Μήκος υπερκάλυψης δοκιμίου O-S(100)-C(1)

#### 4.4 Μετρητική διάταξη

Οι δοκιμές θλίψης έγιναν στην υδραυλική μηχανή θλίψης DMG ικανότητας 3000 kN στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η μηχανή θλίψης μετρούσε την μετατόπιση της κεφαλής και το αξονικό φορτίο.

Για την μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν strain gages και επιπλέον για τα κυλινδρικά δοκίμια βελόμετρα (DCDTs) προσαρμοσμένα σε ειδική συσκευή κατασκευής Hamboldt. **(Εικόνα 4.38)**



**Εικόνα 4.34** Μετρητική διάταξη με προσαρμοσμένα DCDTs

Στα ορθογωνικά δοκίμια τοποθετήθηκαν 4 strain gages σε κάθε δοκίμιο ανά δύο αντιδιαμετρικά. Δηλαδή δύο αντιδιαμετρικά που μετρούσαν την εγκάρσια στον κάθετο άξονα παραμόρφωση και δύο επίσης αντιδιαμετρικά που μετρούσαν την παράλληλη στον κάθετο άξονα των δοκιμίων, παραμόρφωση. Στα κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν 2 strain gages, ένα στην παράλληλη και ένα στην κάθετη κατεύθυνση με τον κατακόρυφο άξονα των δοκιμίων, καθώς υπήρχε και η καταγραφή του βελόμετρου.

Για την εφαρμογή των strain gages έγινε προεργασία στα δοκίμια. Αρχικά καθαρίστηκε τοπικά η επιφάνεια στην οποία τοποθετήθηκαν τα strain gages με λάδι WD-40, και στη συνέχεια επικαλύφθηκε με μία λεπτή στρώση ρητίνης – κόλας για να διασφαλιστεί η λεία επιφάνεια και η βέλτιστη εφαρμογή του μετρητή. Σε δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα οξέος και βάσης για να εξασφαλιστεί η σωστή ηλεκτρική λειτουργία του μετρητή. Τέλος πριν την εφαρμογή των μετρητών γινόταν επάλειψη με ενισχυτικό διάλυμα για την καλύτερη συνάφεια των strain gages με την επιφάνεια κόλλησης.



Εικόνα 4.35 Strain gages (1)



Εικόνα 4.36 Strain gages (2)

## 4.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικού προγράμματος

### 4.5.1 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος ( $f_{ck}^*$ )

Υποβλήθηκαν σε κεντρική θλίψη 5 κύβοι (150x150x150 mm) και ένας κύλινδρος (D150x300 mm). Οι 3 πρώτοι κύβοι δοκιμάστηκαν 28 ημέρες μετά την σκυροδέτηση, ενώ 2 κύβοι και ένας κύλινδρος την ημέρα των πειραμάτων, δηλαδή 57 ημέρες μετά την σκυροδέτηση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4-3**.

**Πίνακας 4-3** Αποτελέσματα δοκιμών άοπλου σκυροδέματος. (Οι τιμές δίνονται σε MPa)

	Κύβων		Κυλίνδρου
	28 ημ	57 ημ	57 ημ
<b>1</b>	21,67	-	23,81
<b>2</b>	23,24	-	
<b>3</b>	22,48	-	
<b>4</b>	-	27,53	
<b>5</b>	-	27,60	
<b>MO</b>	<b>22,46</b>	<b>27,57</b>	<b>23,81</b>

#### Εκτίμηση κυλινδρικής αντοχής από κυβική

Στη συνέχεια γίνεται αναγωγή της αντοχής από τον κύβο στον κύλινδρο και επιλέγεται ως τελική χαρακτηριστική αντοχή ο μέσος όρος των τιμών

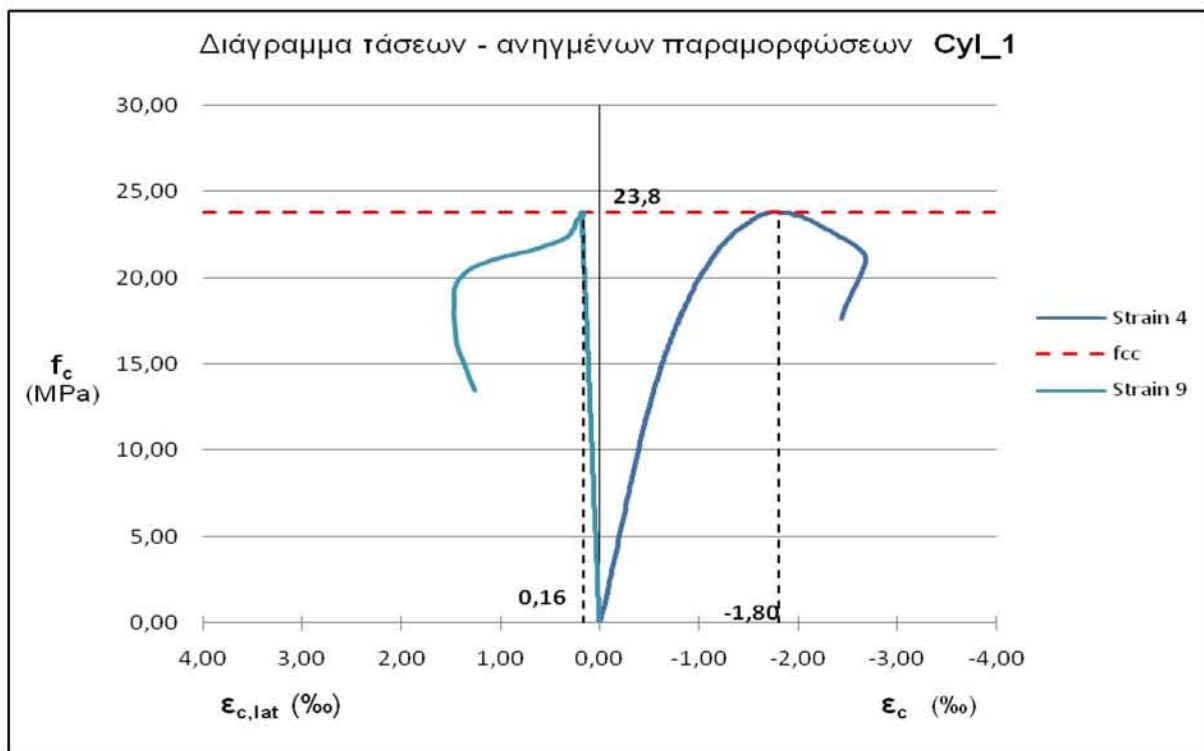
**Αντοχή 28 ημερών από κύβους 1,2,3: 22,46 MPa → 17,97 MPa**

**Αντοχή ημέρας δοκιμών (57 ημ) από κύβους 4,5: 27,57 MPa → 22,57 MPa**

**Αντοχή ημέρας δοκιμών (57 ημ) από κύλινδρο 1: 23,81 MPa**

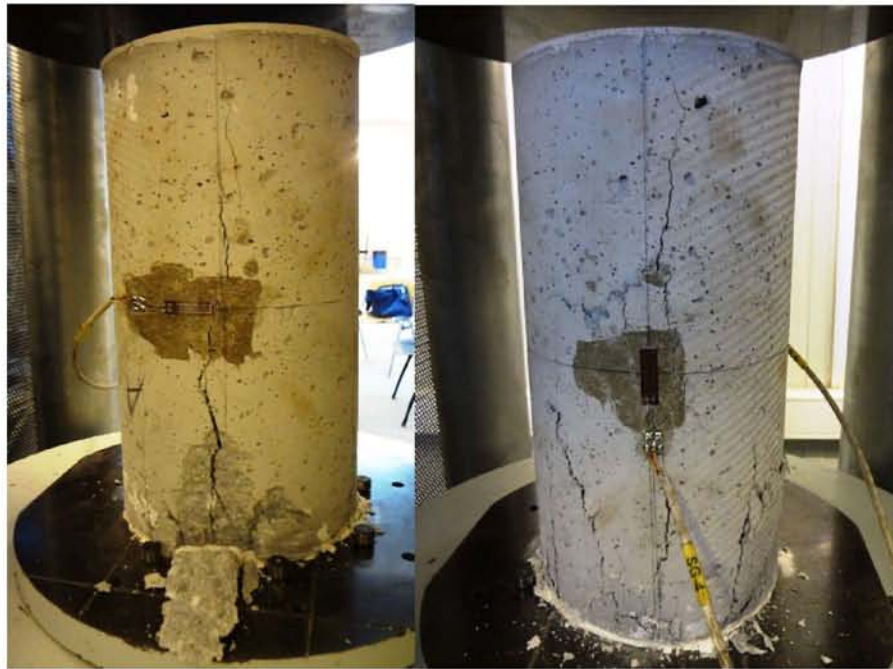
**Αντοχή ημέρας δοκιμών (57 ημ) (MO 22,57-23,81) → 22,98 MPa**

#### 4.5.2 Άοπλος κύλινδρος (Cyl\_1)



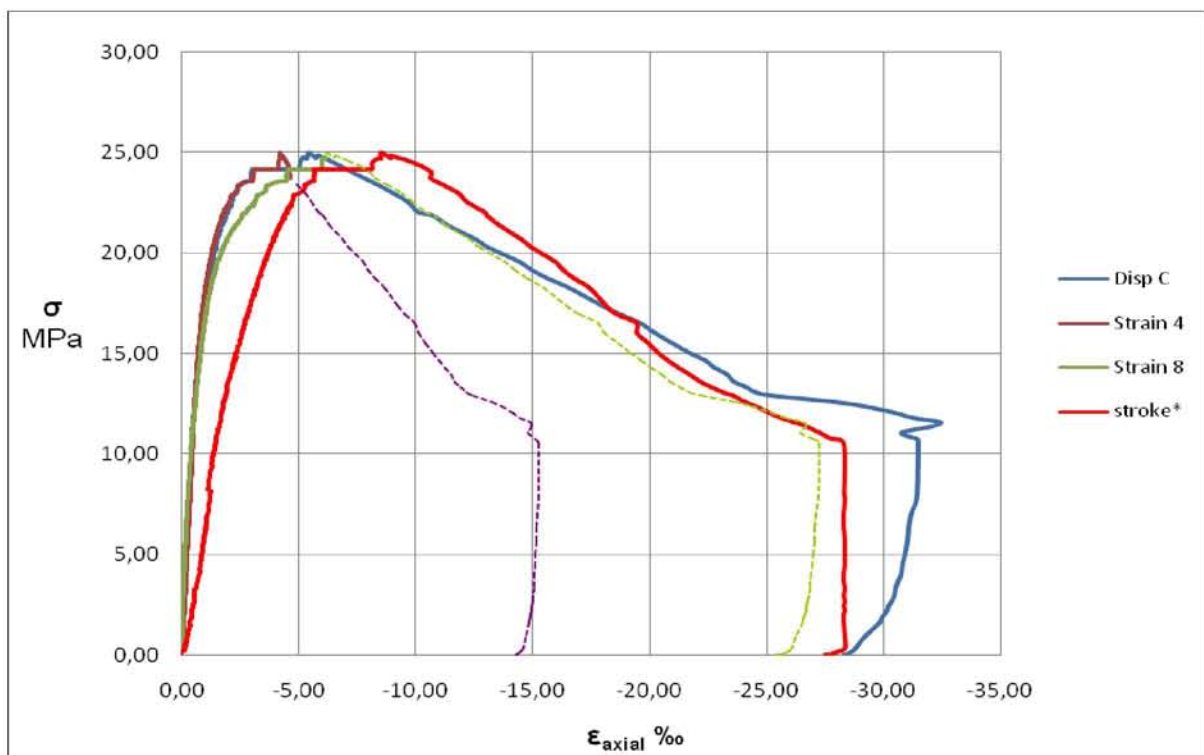
**Σχήμα 4.3** Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων



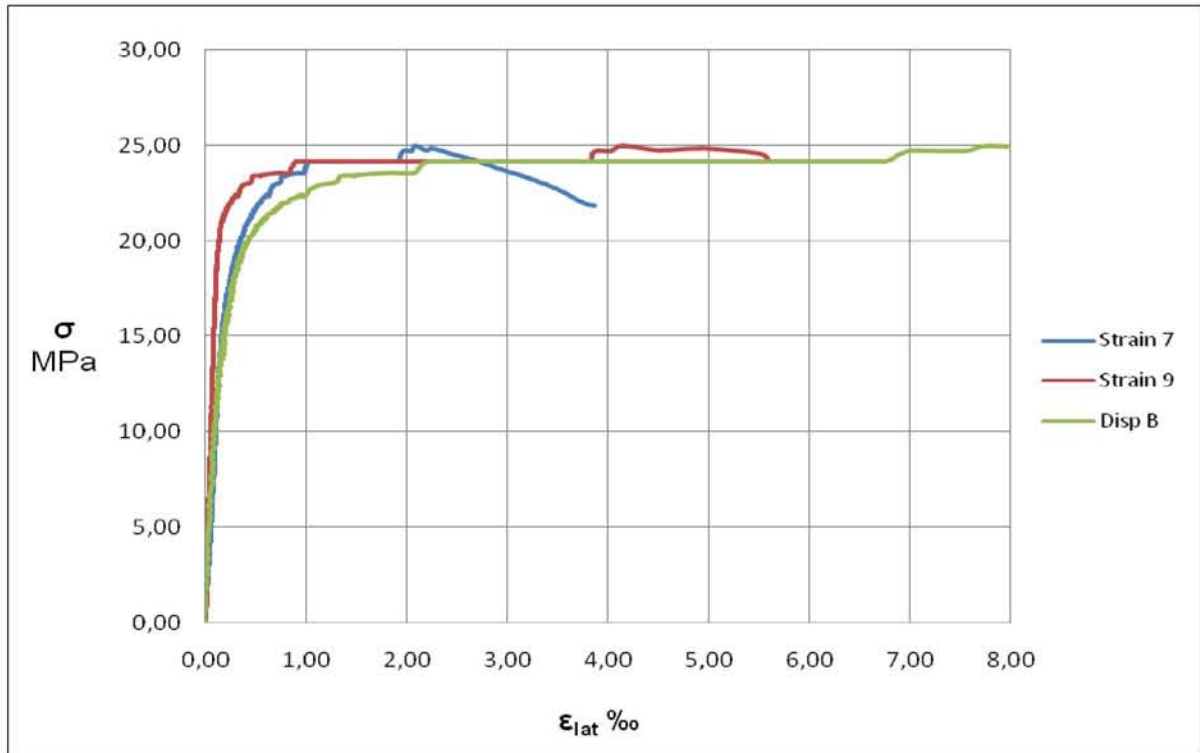


Εικόνα 4.37 Άσπλος κύλινδρος (Cyl\_1) κατά την αστοχία

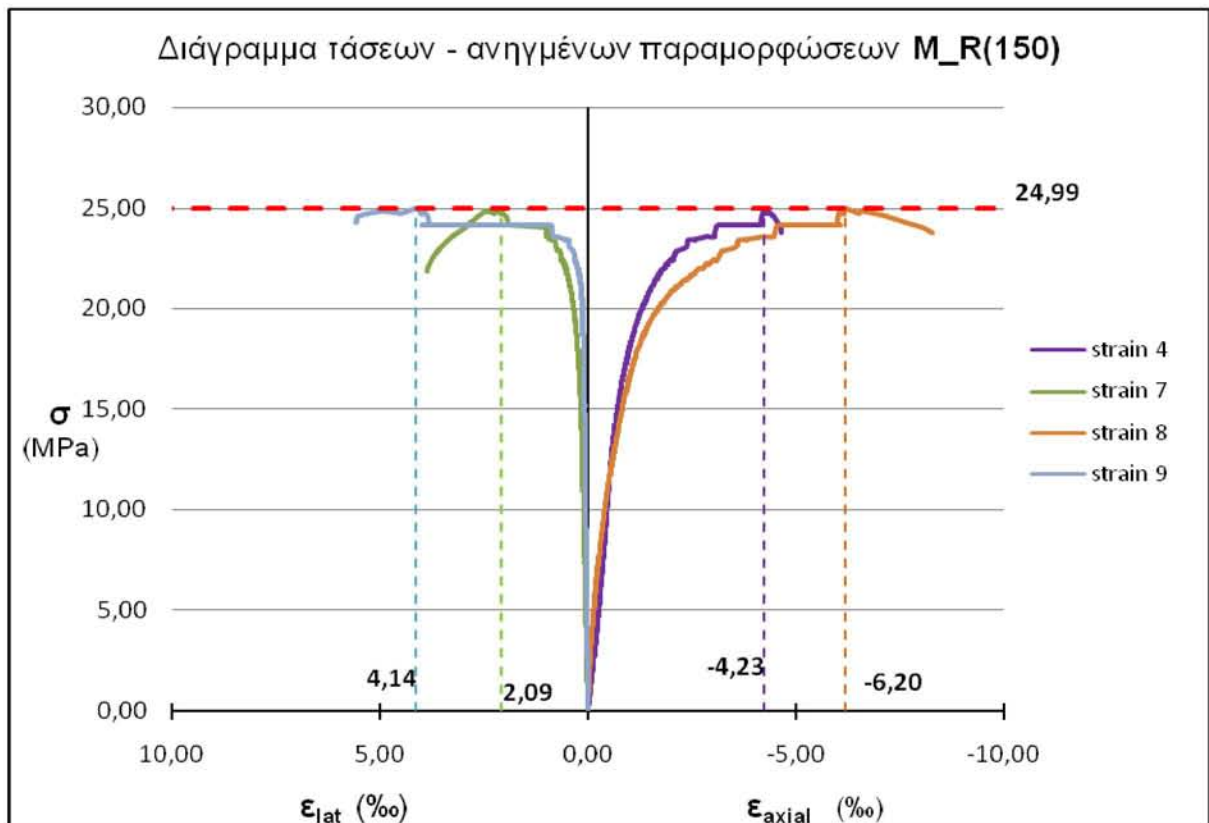
#### 4.5.3 Δοκίμιο $M_R(150)$



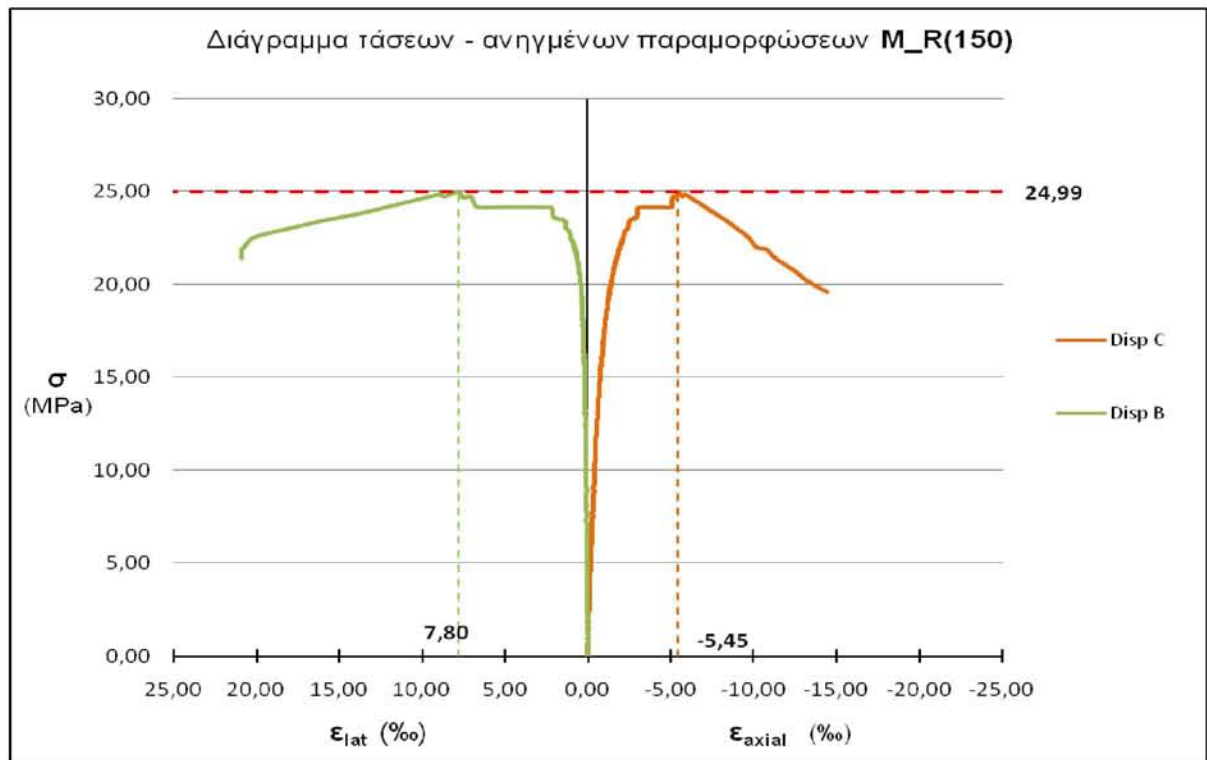
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispC) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8)



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνεται από το DCDT (DispB) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)



Σχήμα 4.6 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης βάση των μετρήσεων των strain gages



Σχήμα 4.7 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης με βάση τις μετρήσεις του βελόμετρου DCDT



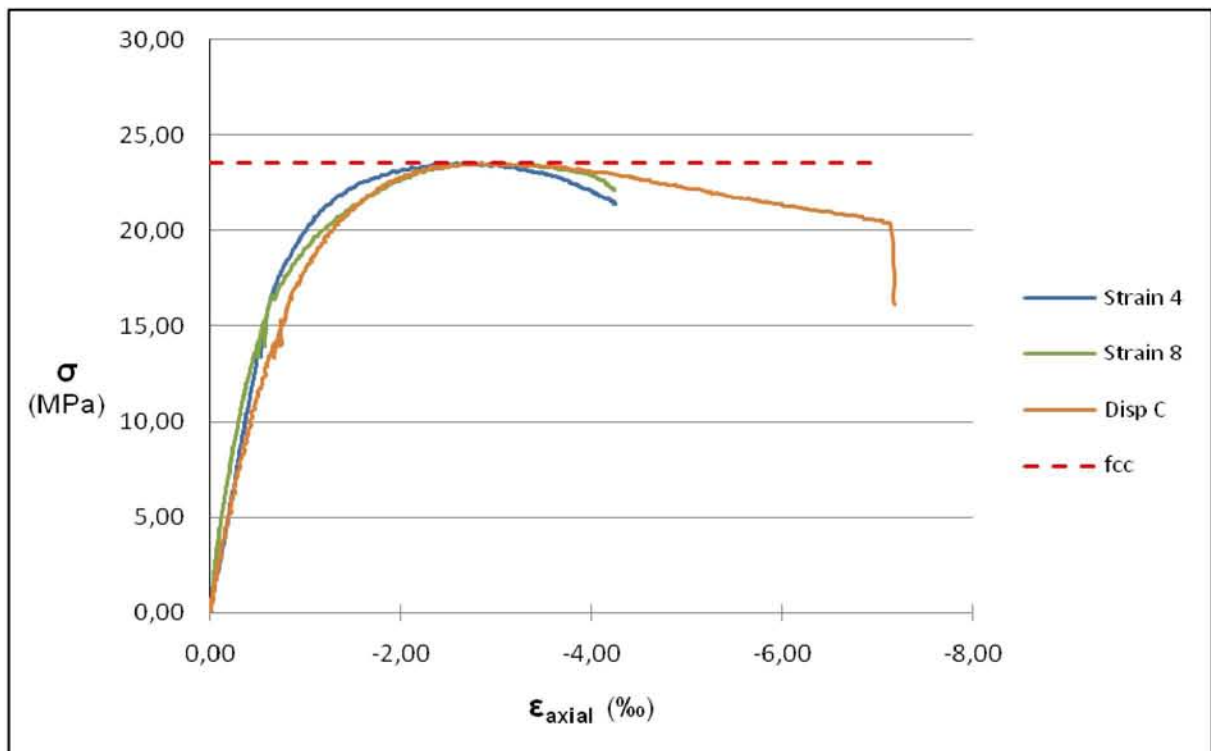
Εικόνα 4.38 Δοκίμιο  $M_R(150)$  μετά την δοκιμή (1)



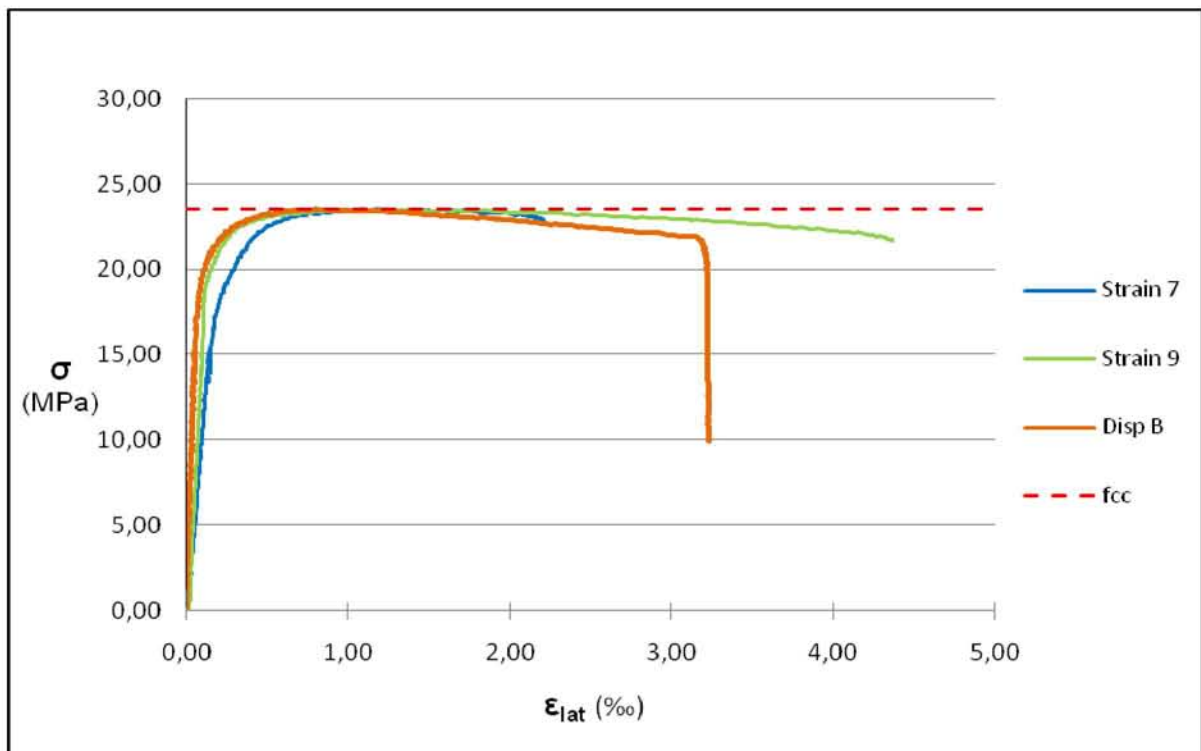


Εικόνα 4.39 Δοκίμιο M\_R(150) μετά την δοκιμή (2)

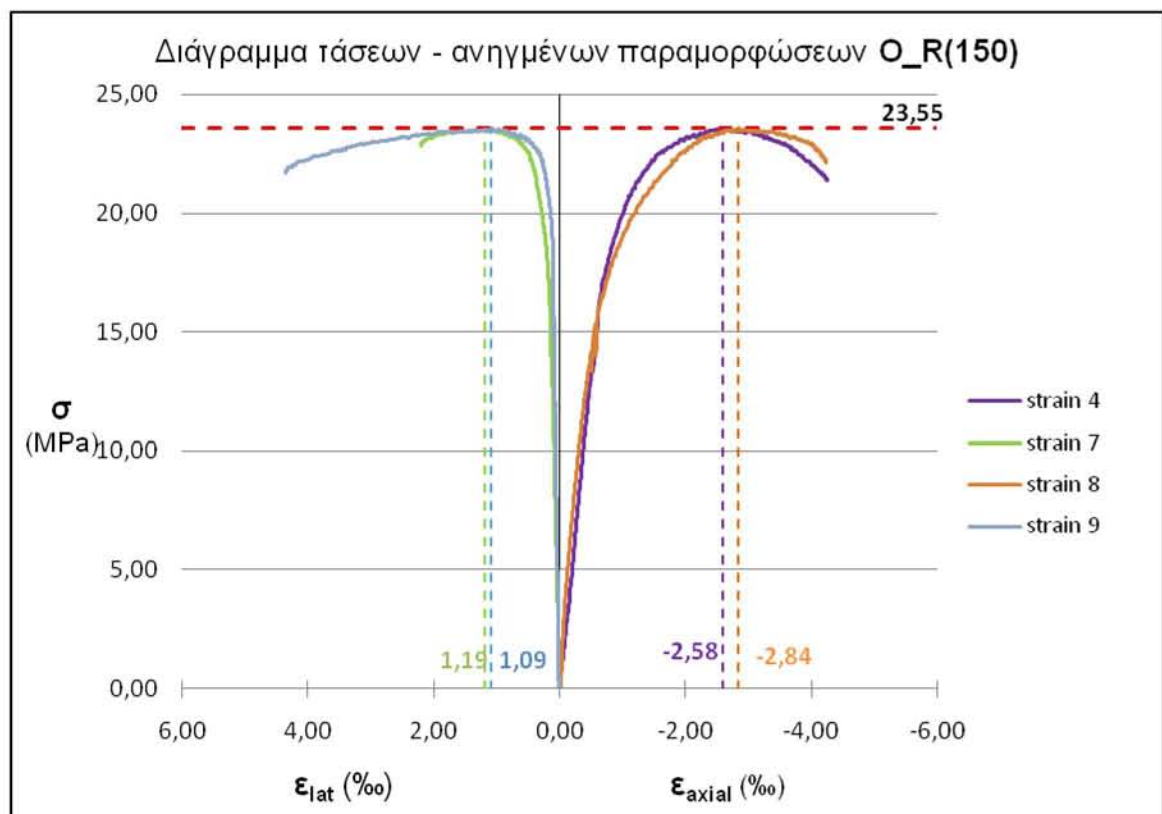
#### 4.5.4 Δοκίμιο O\_R(150)



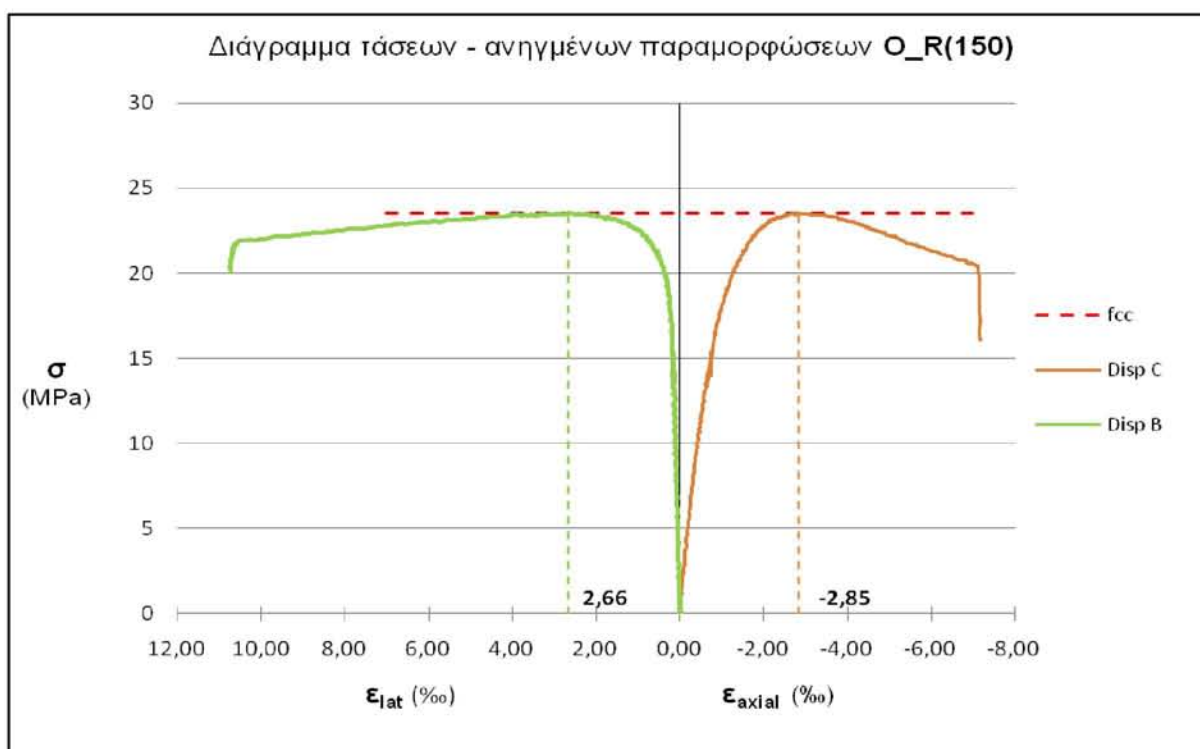
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispC) και από τα δύο αντιδιαμετρικά straingages (strain 4 και strain 8)



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispB) και από τα δύο αντιδιαμετρικά straingages (strain 7 και strain 9)



Σχήμα 4.10 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages



Σχήμα 4.11 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης με βάση τις μετρήσεις του βελόμετρου DCDT



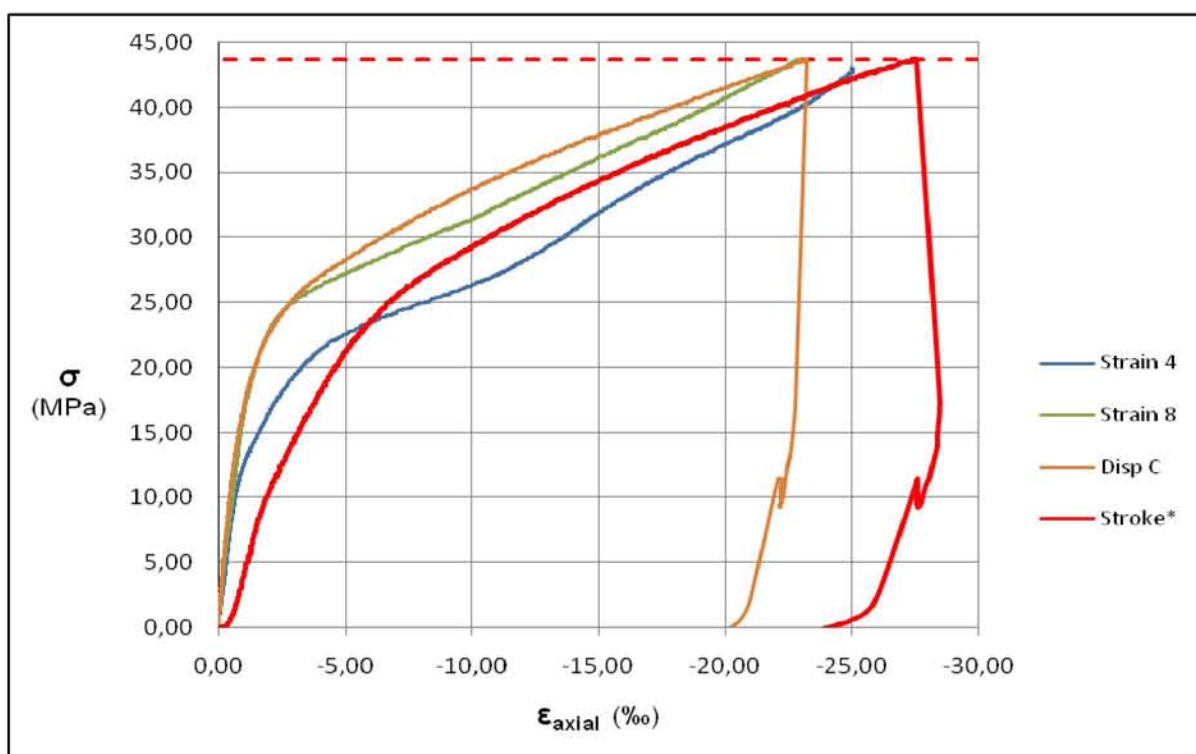
Εικόνα 4.40 Δοκίμιο O\_R(150) μετά την δοκιμή (1)



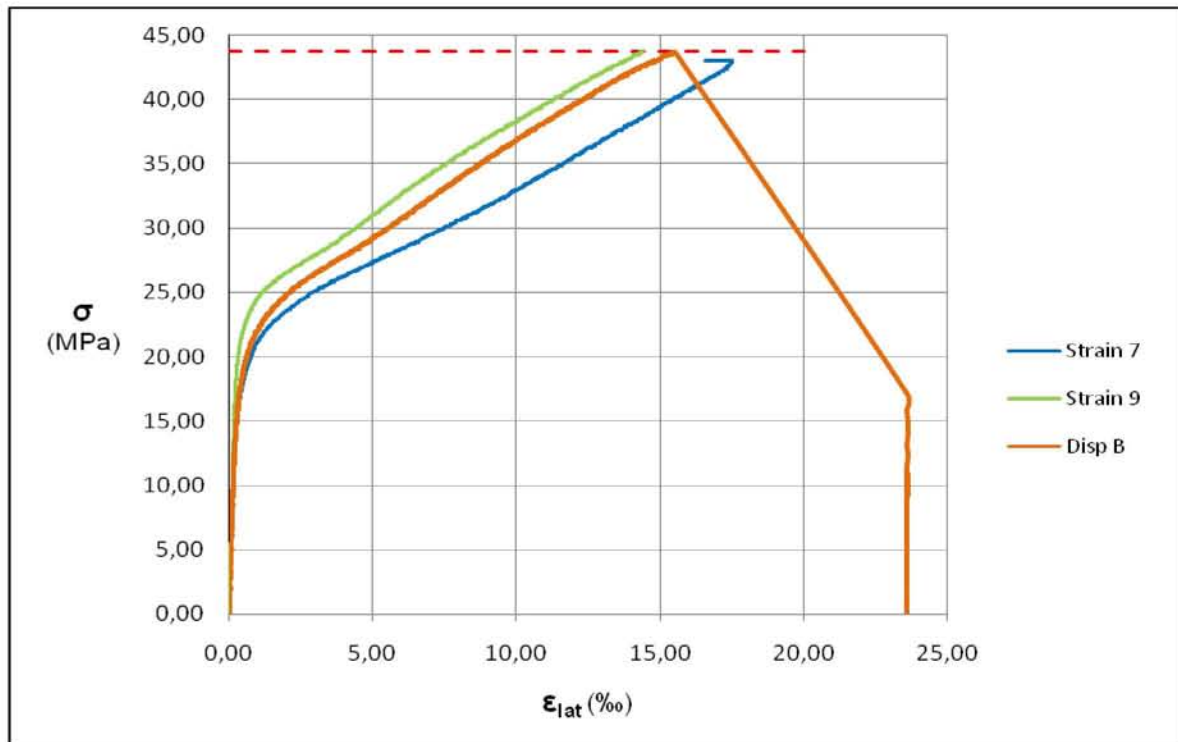


Εικόνα 4.41 Δοκίμιο O\_R(150) μετά την δοκιμή (2)

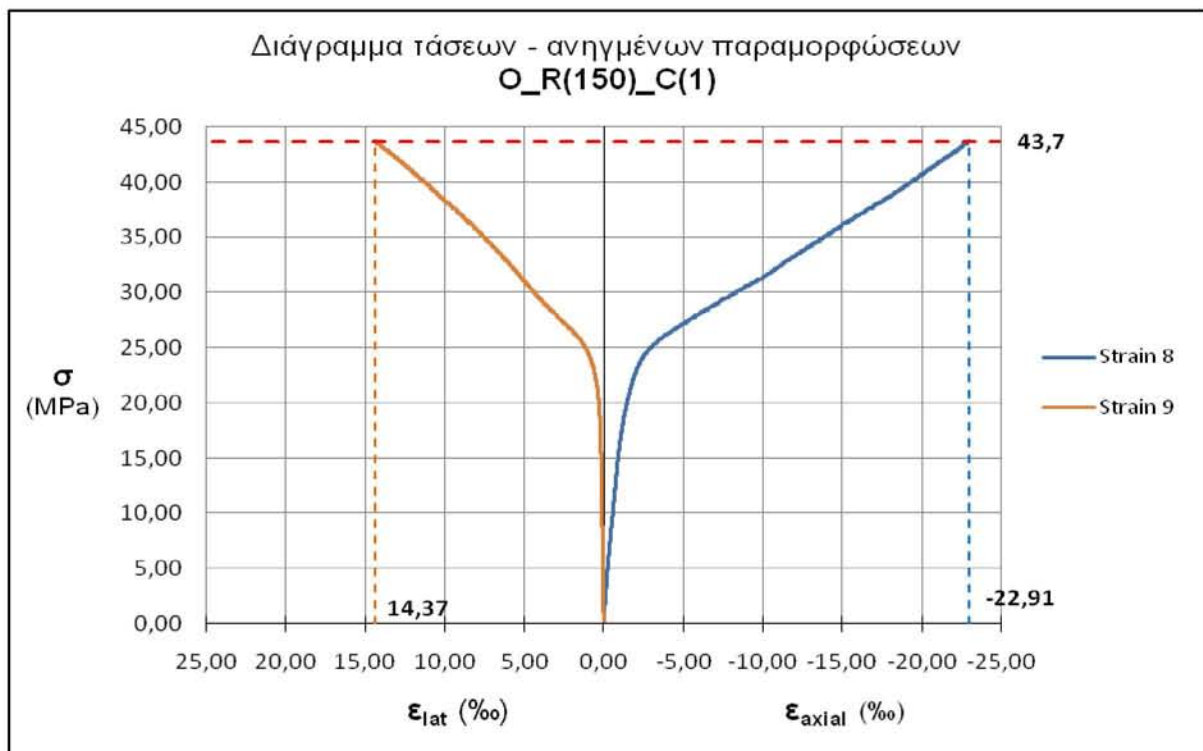
#### 4.5.5 Δοκίμιο O\_R(150)\_C(1)



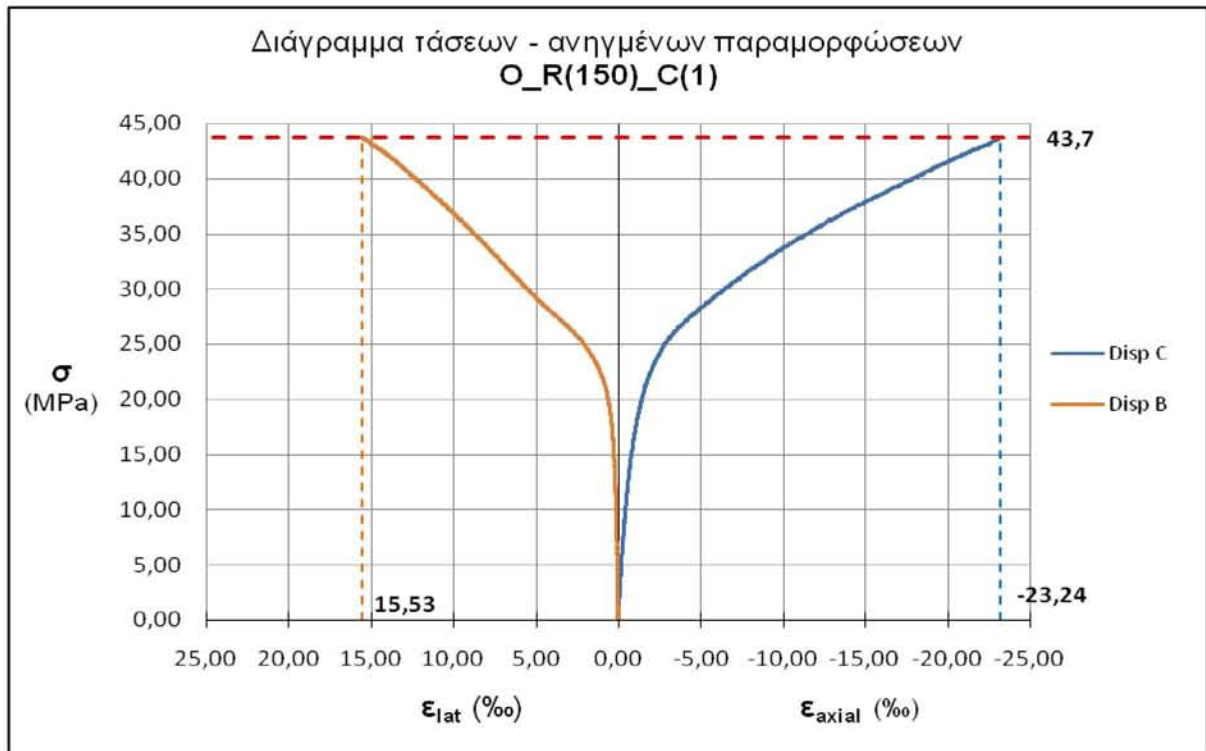
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispC) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strainages (strain 4 και strain 8)



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα τάσης και ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (Disp B) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)



Σχήμα 4.14 Αξονική και εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages



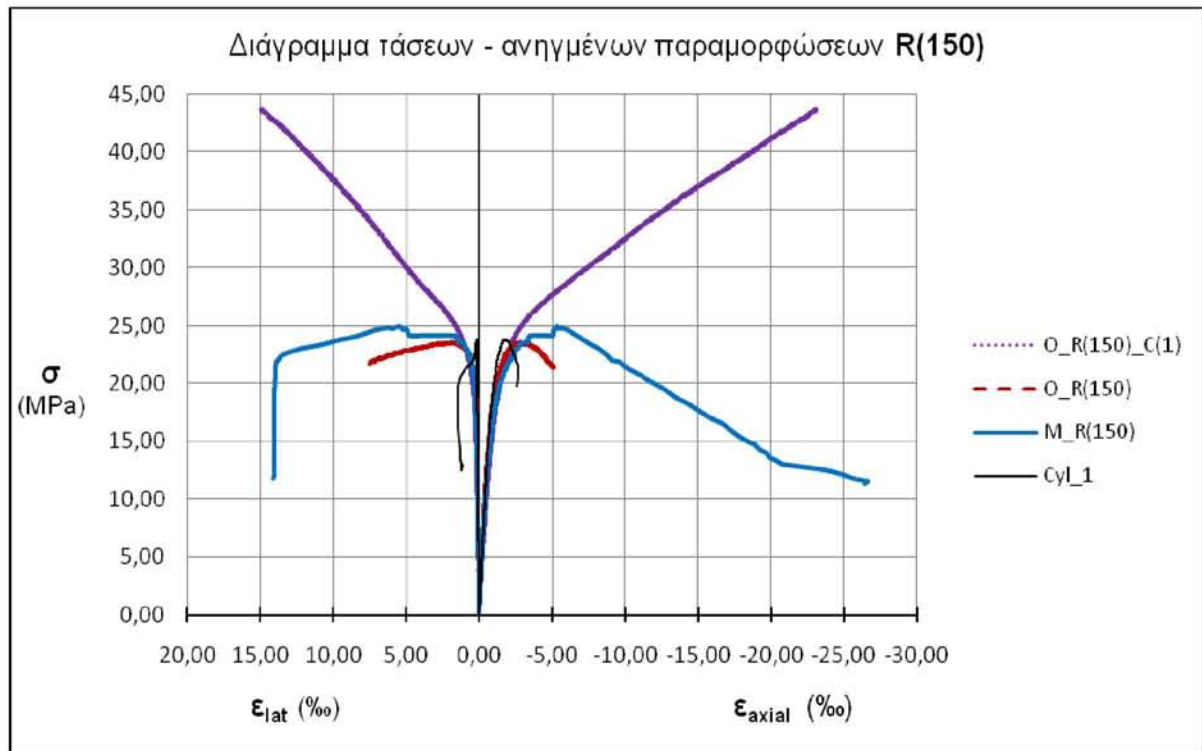
Σχήμα 4.15 Αξονική και εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις του βελόμετρου DCDT



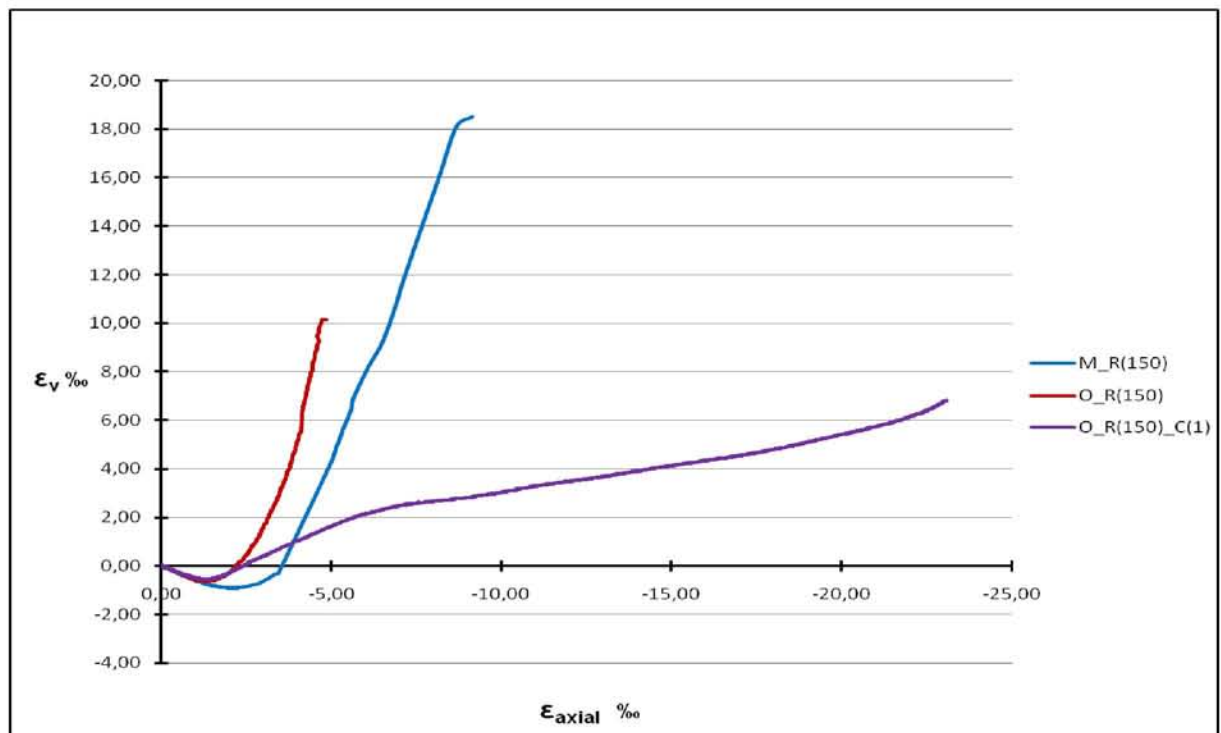
Εικόνα 4.42 Δοκίμιο O\_R(150)\_C(1) μετά την δοκιμή



4.5.6 Υπέρθυση διαγραμμάτων κυλινδρικών δοκιμίων R(150)

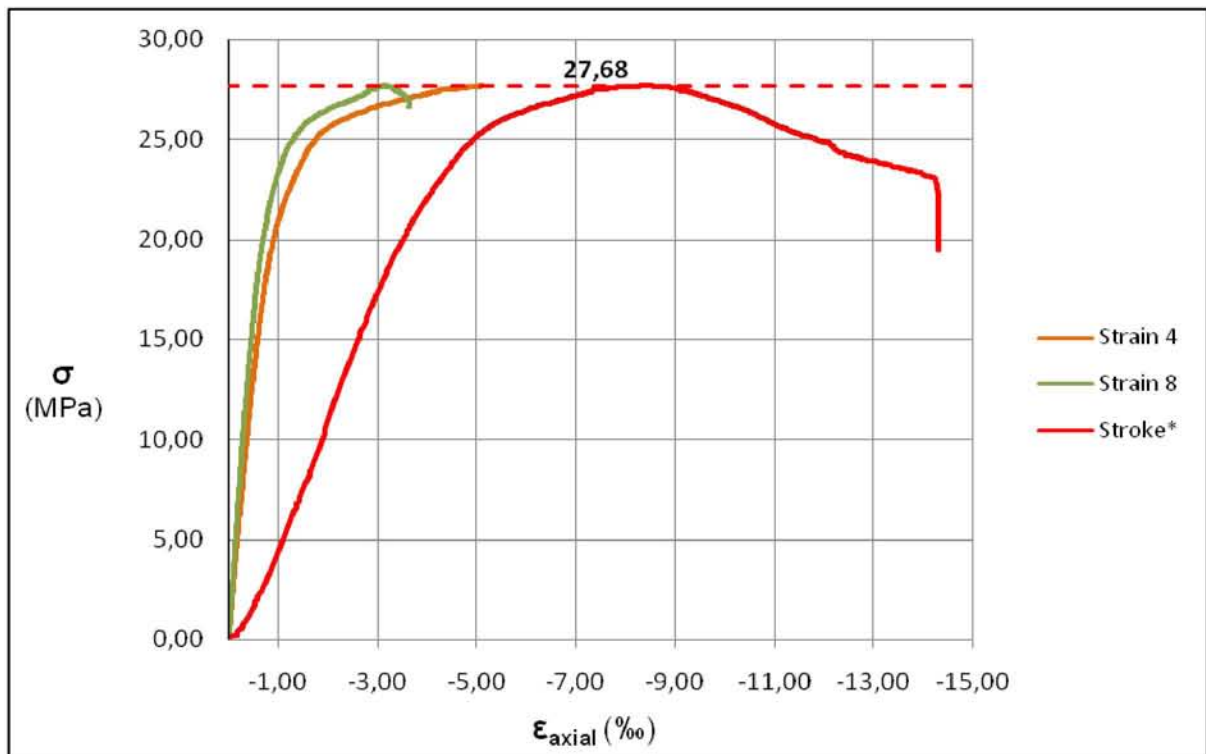


Σχήμα 4.16 Εκτιμώμενες αξονικές και εγκάρσιες ανηγμένες παραμορφώσεις για τα τρία κυλινδρικά δοκίμια

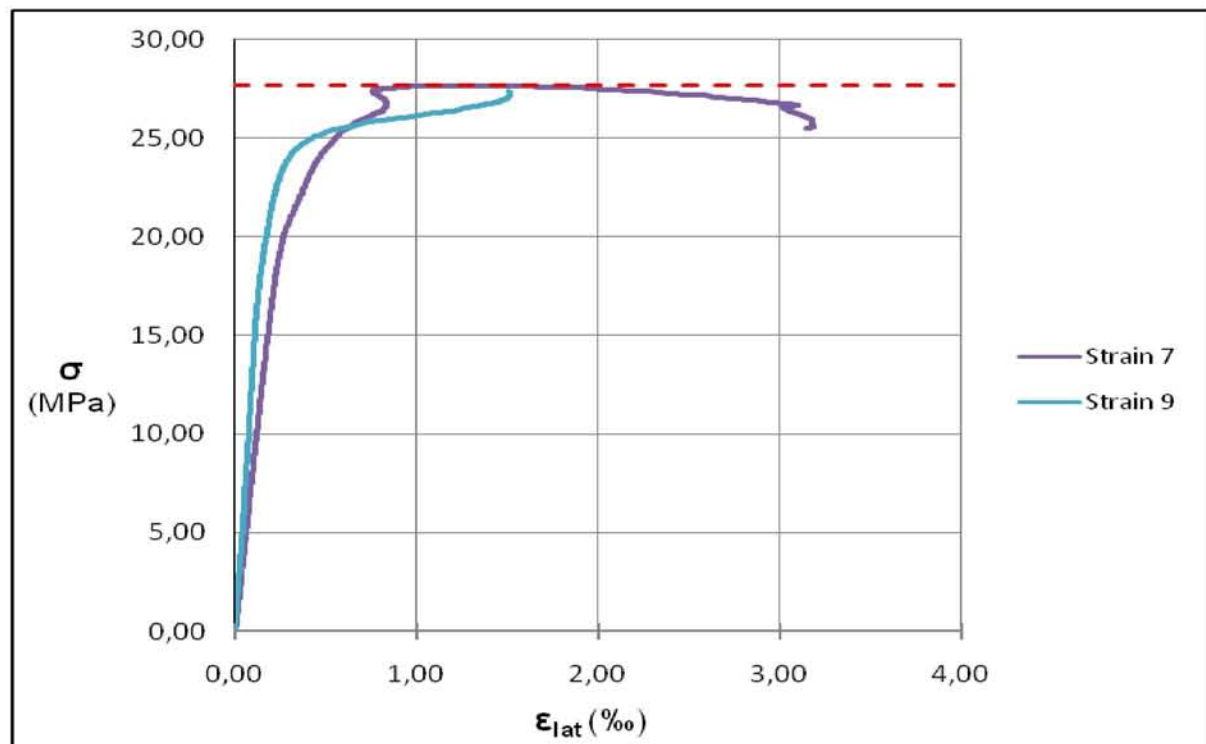


Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ογκομετρικής τροπής – αξονικής τροπής κυλινδρικών δοκιμίων

4.5.7 Δοκίμιο  $M_S(150)$

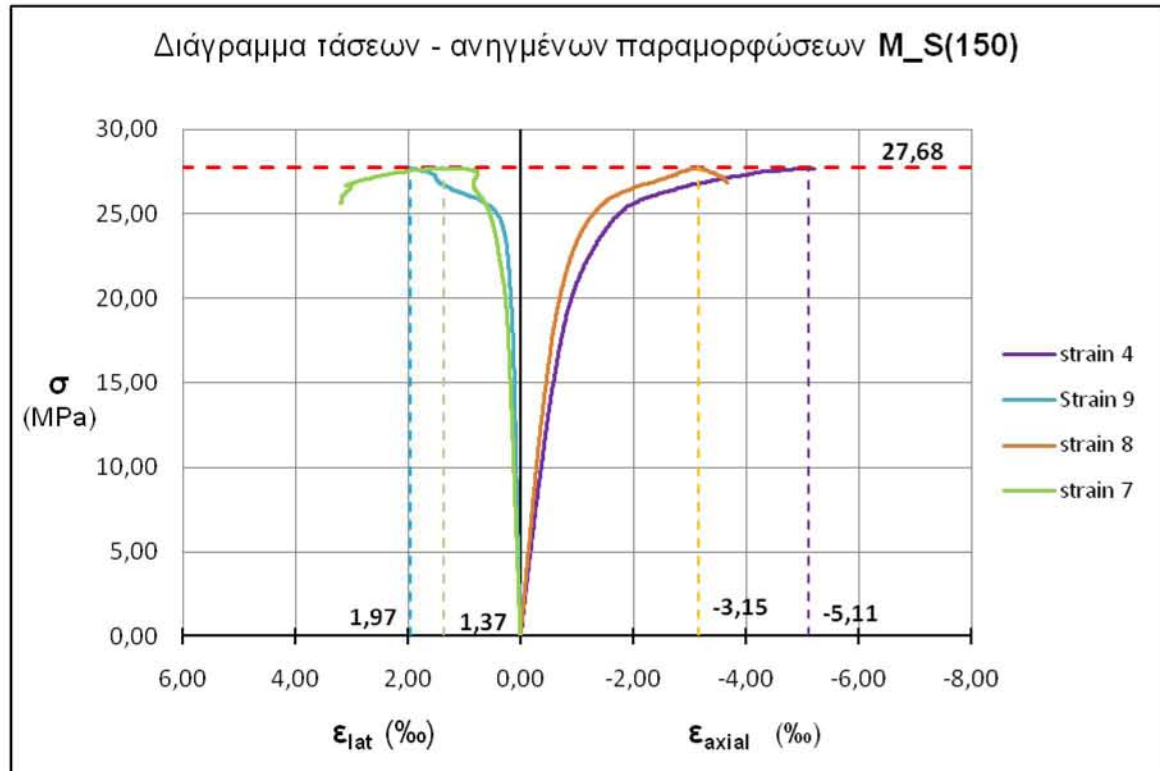


Σχήμα 4.18 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)





**Σχήμα 4.20** Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages

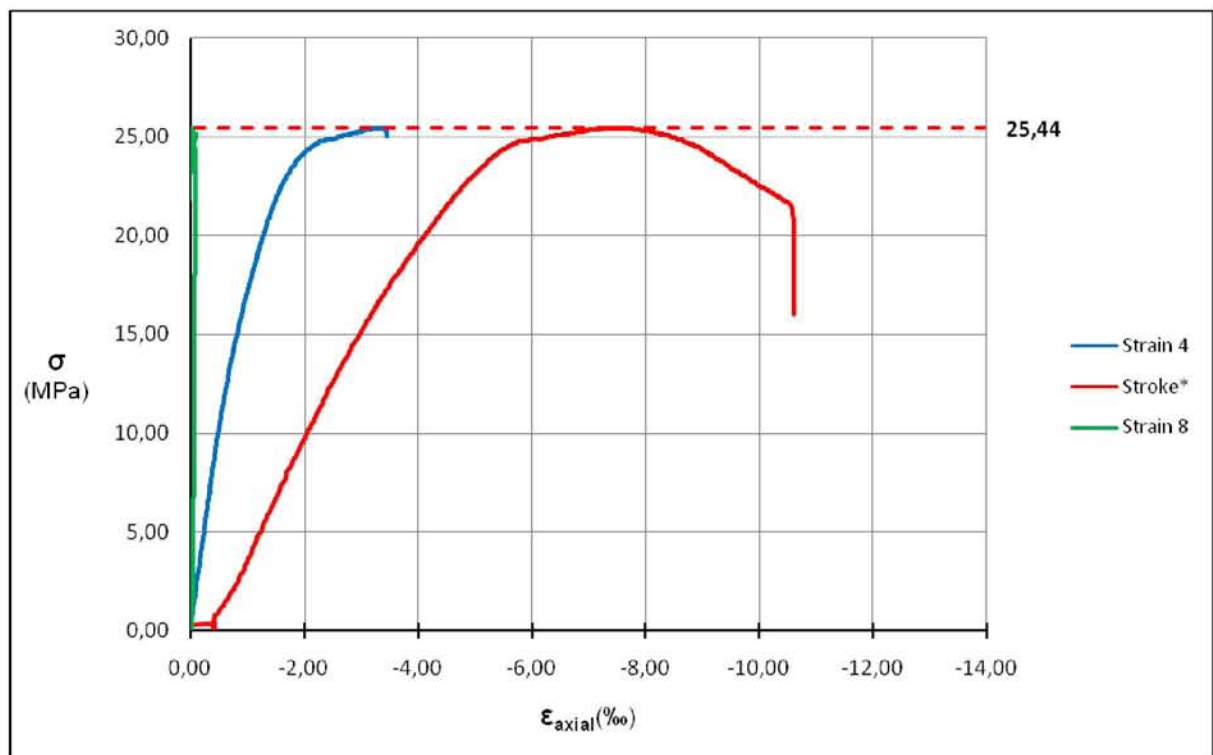


**Εικόνα 4.43** Δοκίμιο  $M_S(150)$  μετά την αστοχία (1)

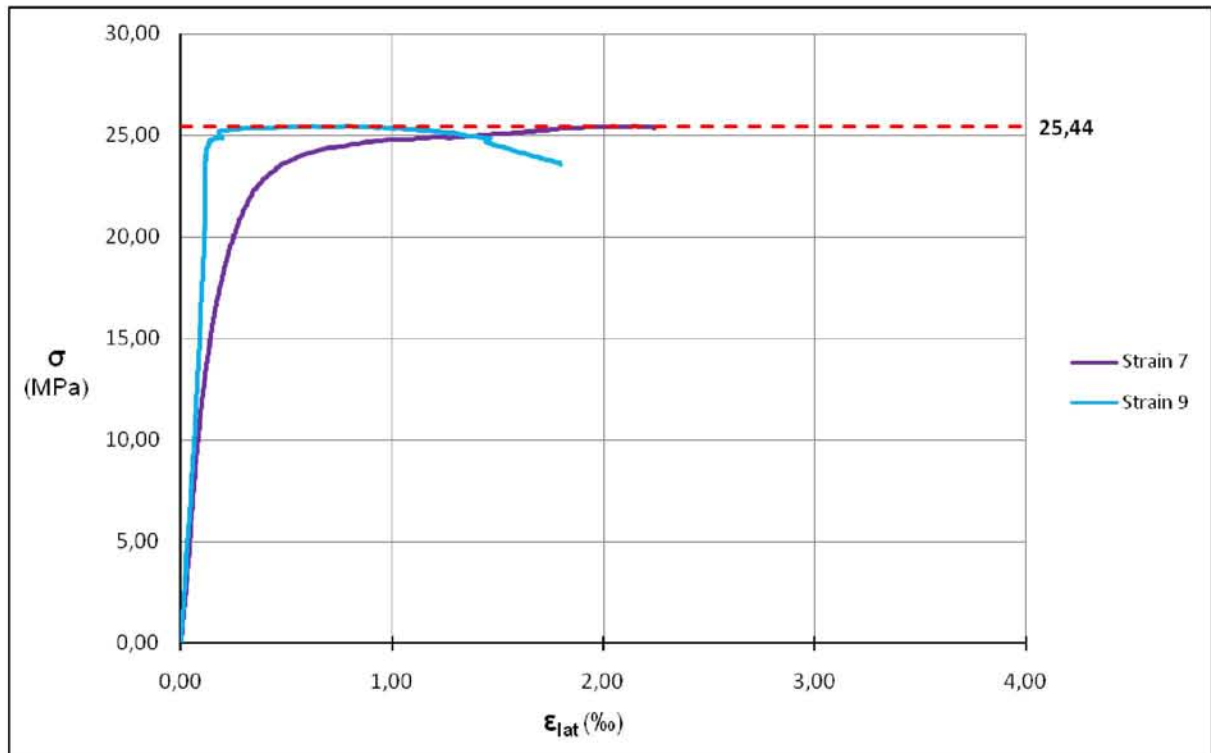


Εικόνα 4.44 Δοκίμιο M\_S(150) μετά την αστοχία

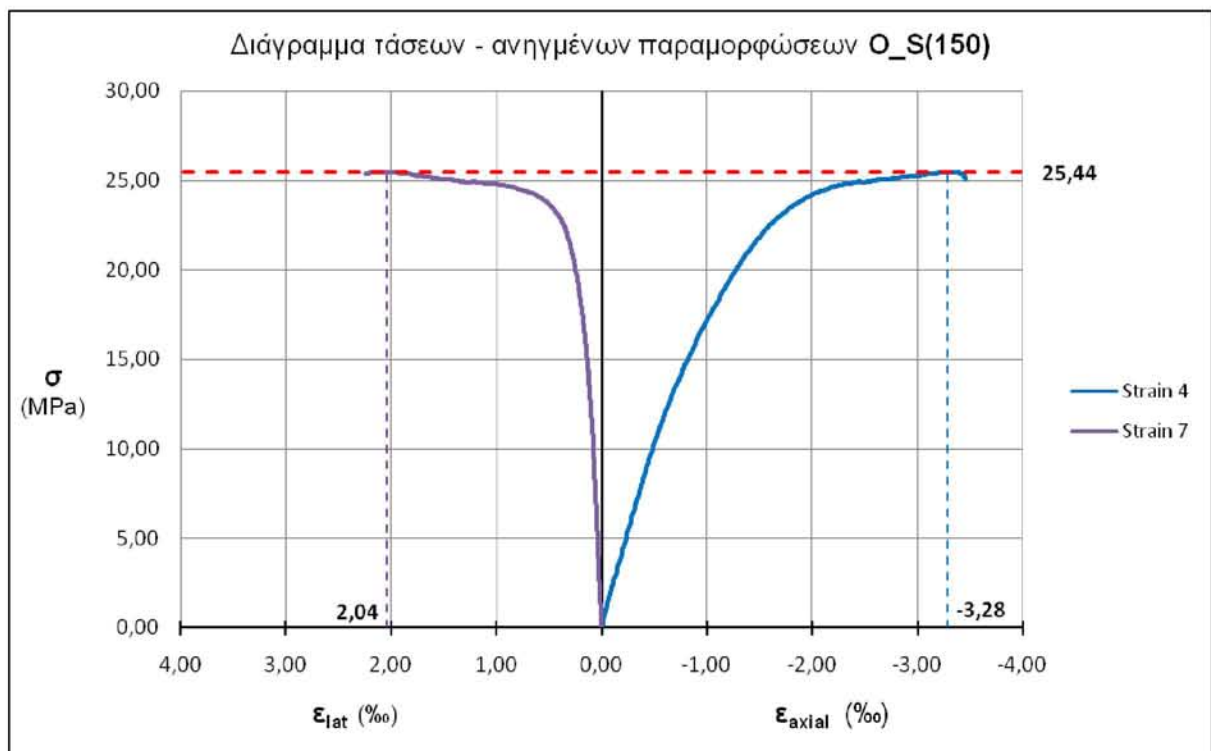
#### 4.5.8 Δοκίμιο O\_S(150)



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)

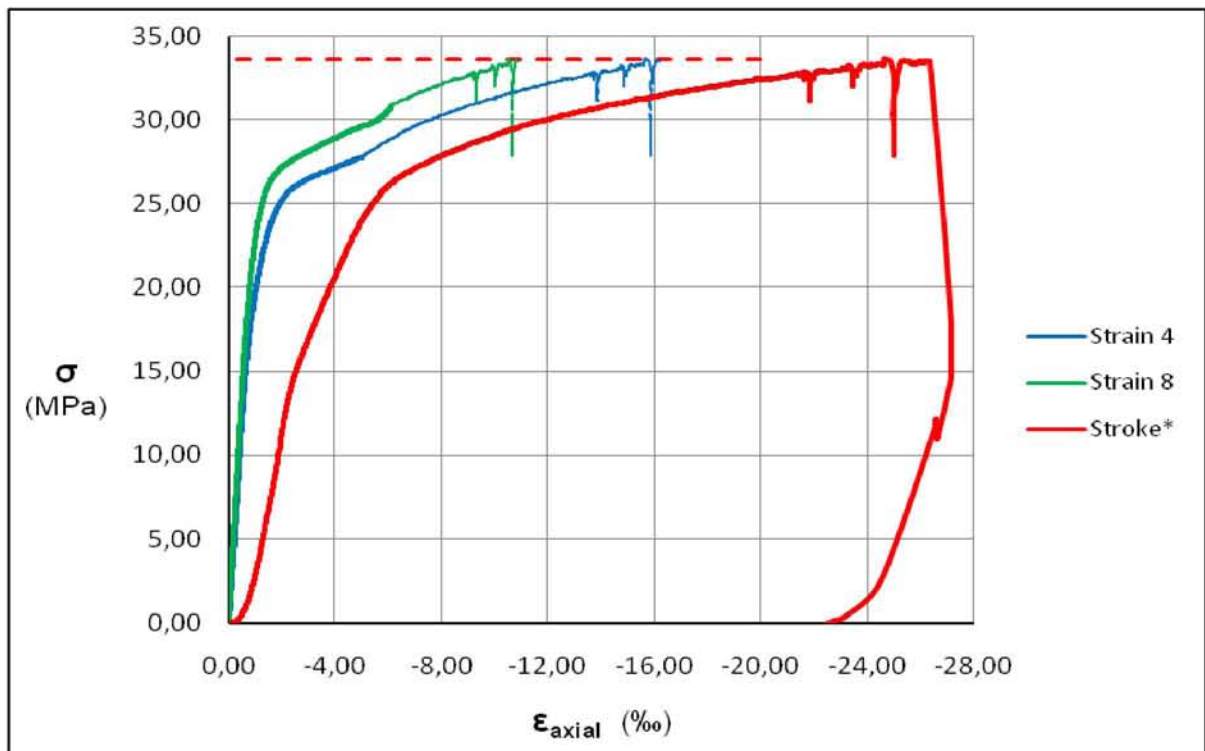


Σχήμα 4.23 Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων με επιλογή των τιμών των strain gages που είναι πιο αξιόπιστες



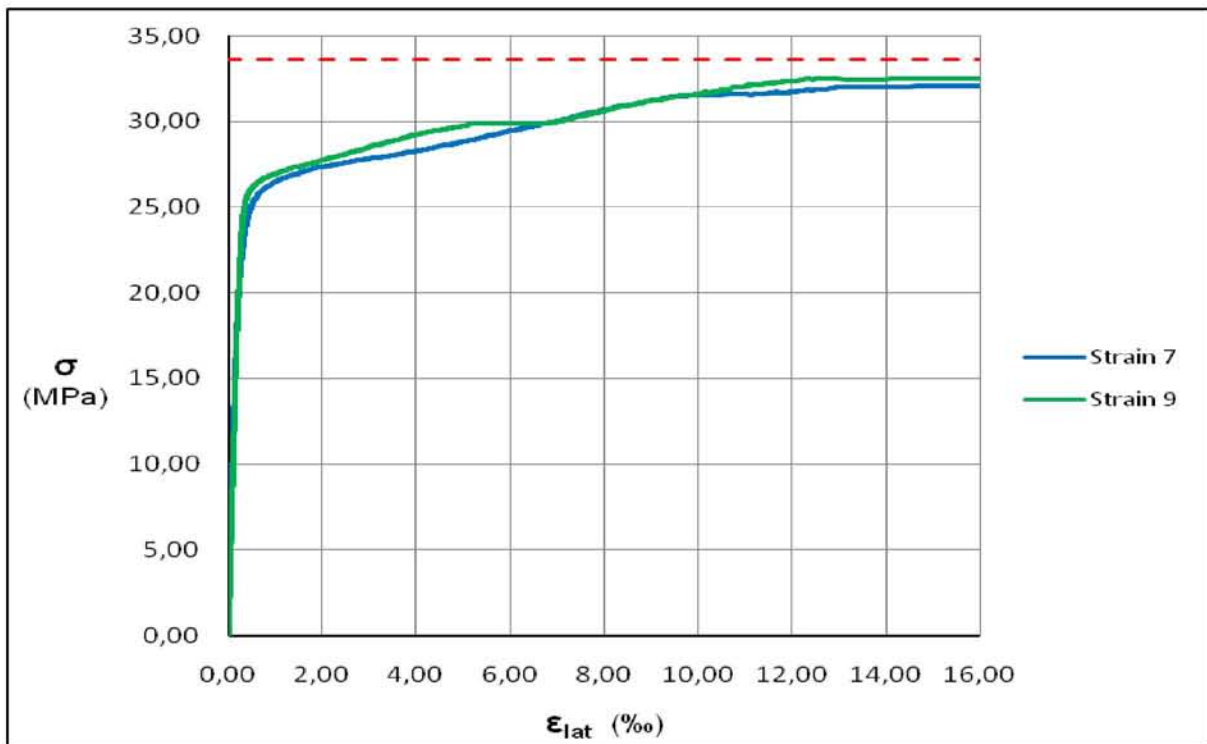
Εικόνα 4.45 Δοκίμιο O\_S(150) μετά την αστοχία

#### 4.5.9 Δοκίμιο O\_S(150)\_C(1)

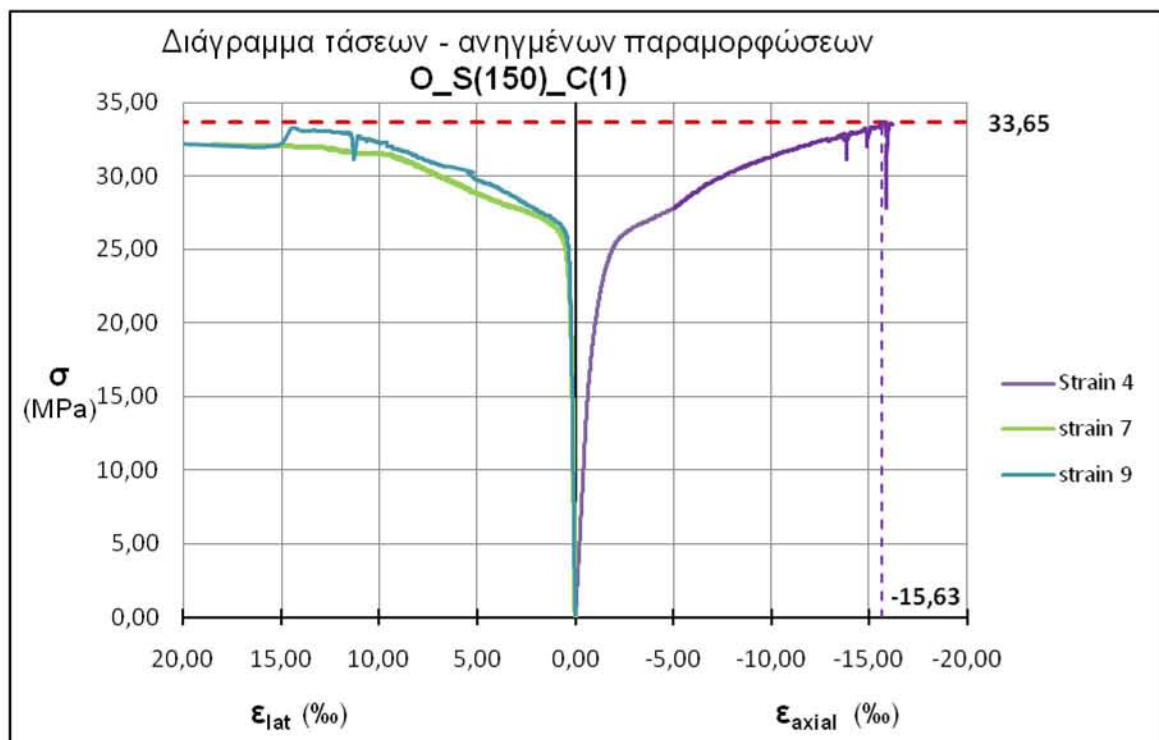


Σχήμα 4.24 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής





Σχήμα 4.25 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)

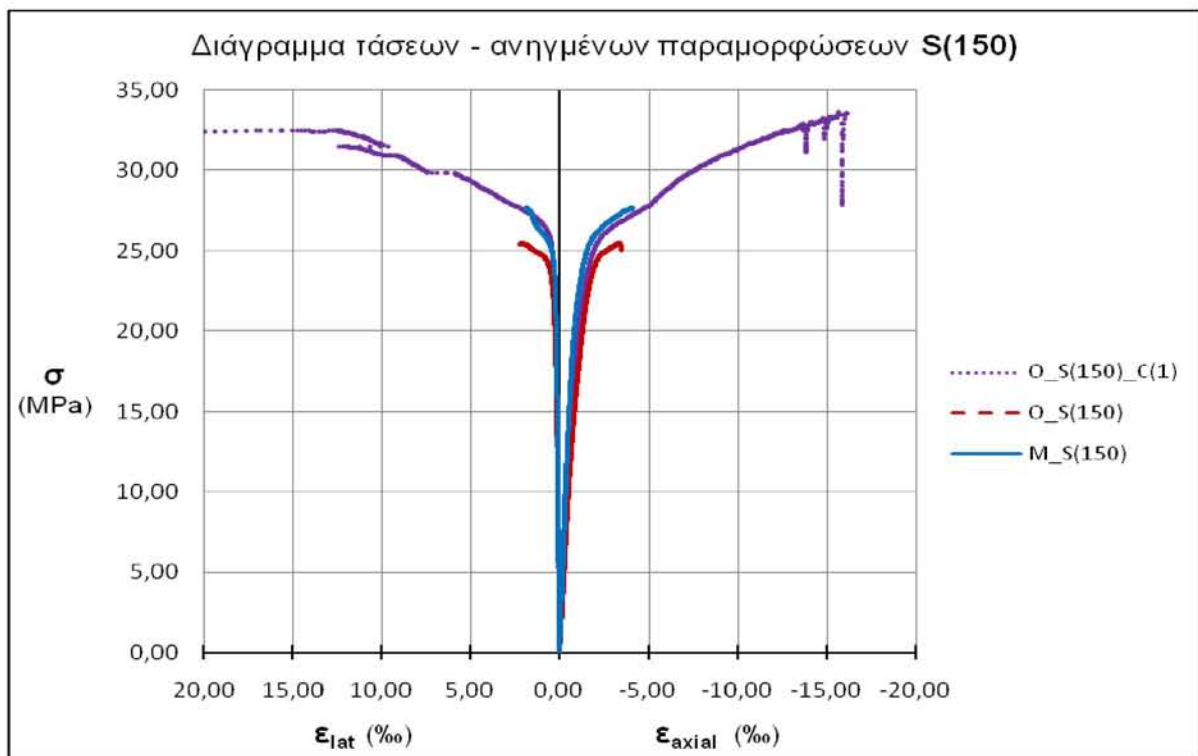


Σχήμα 4.26 Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων βάση των μετρήσεων των strain gages

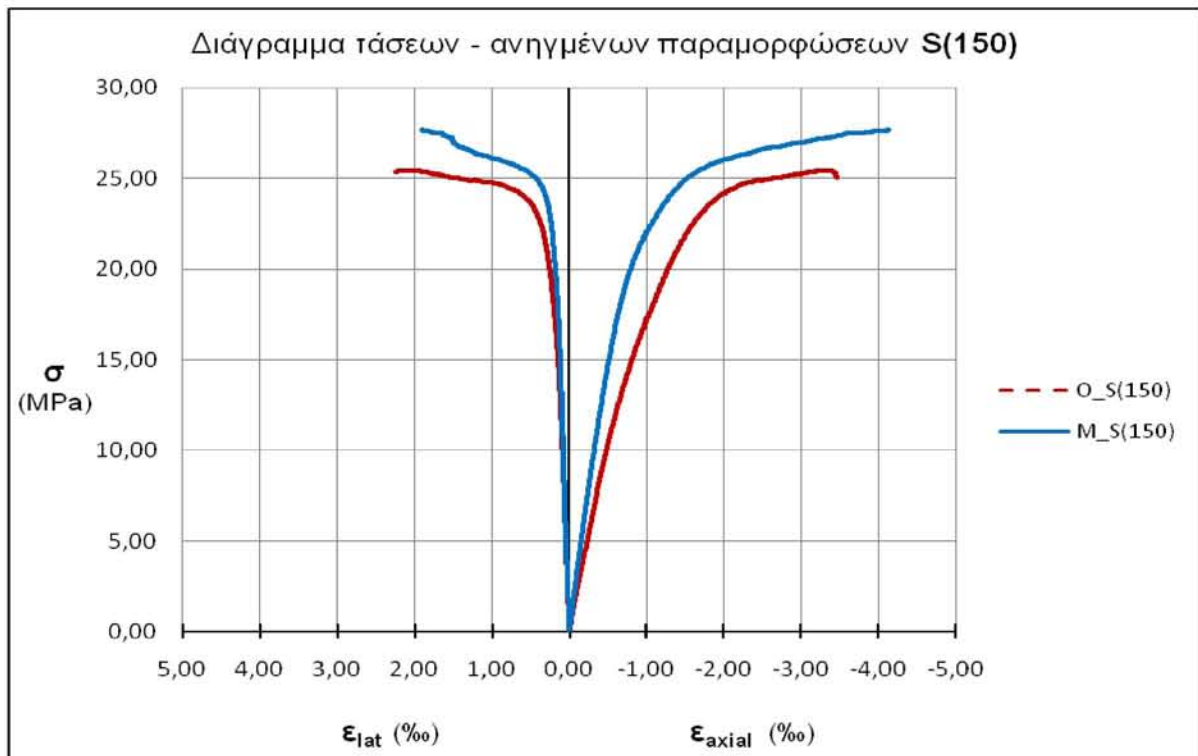


Εικόνα 4.46 Δοκίμιο O\_S(150)\_C(1) μετά την αστοχία

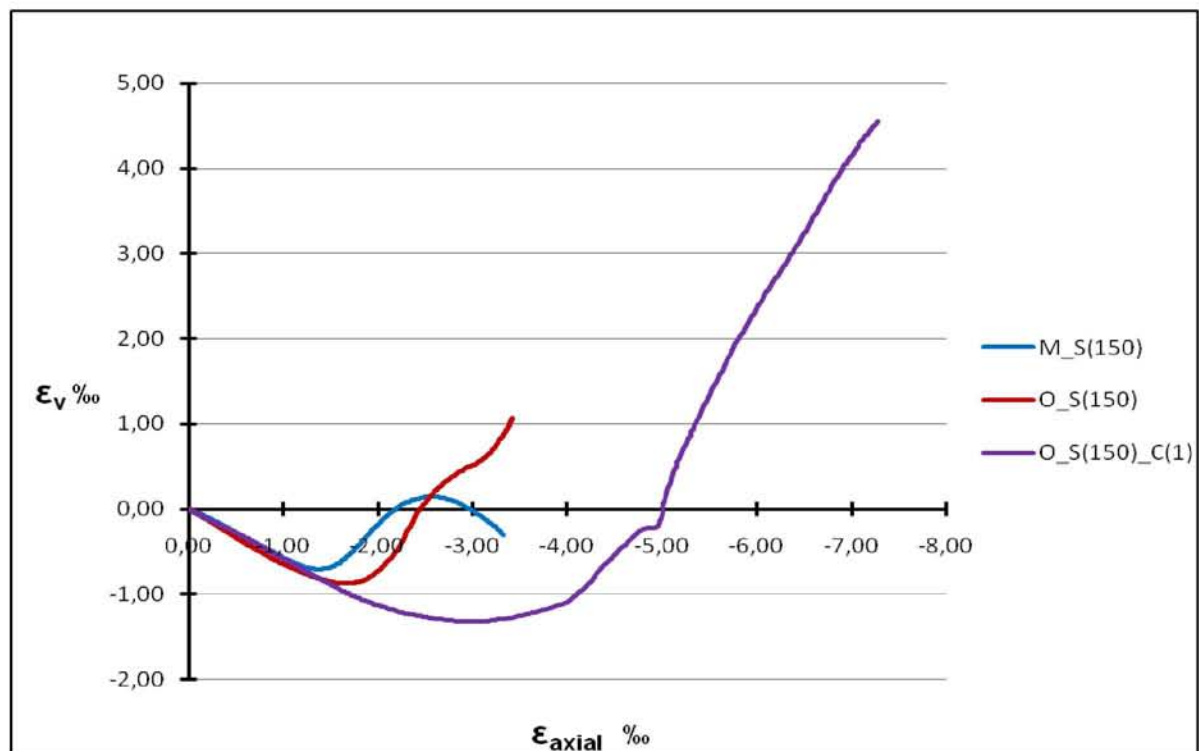
#### 4.5.10 Υπέρθεση διαγραμμάτων δοκιμών S(150)



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμών S(150)

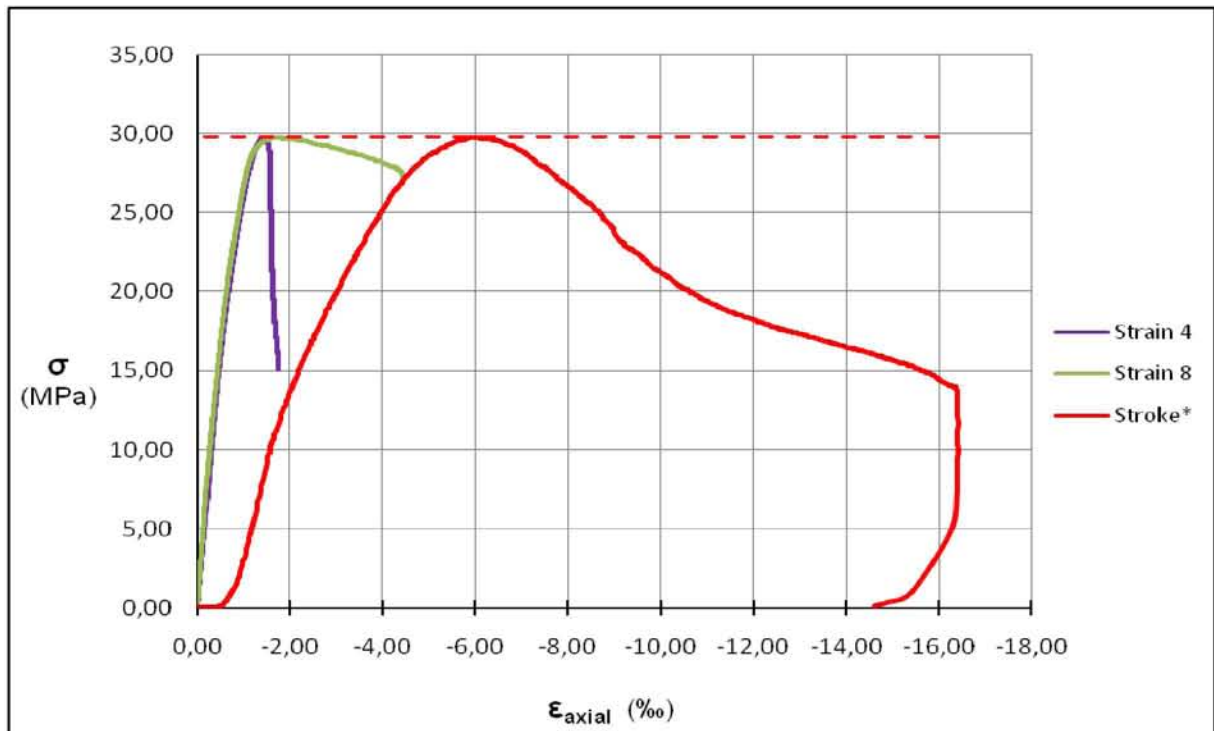


Σχήμα 4.28 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμών S(150) – σύγκριση O – M

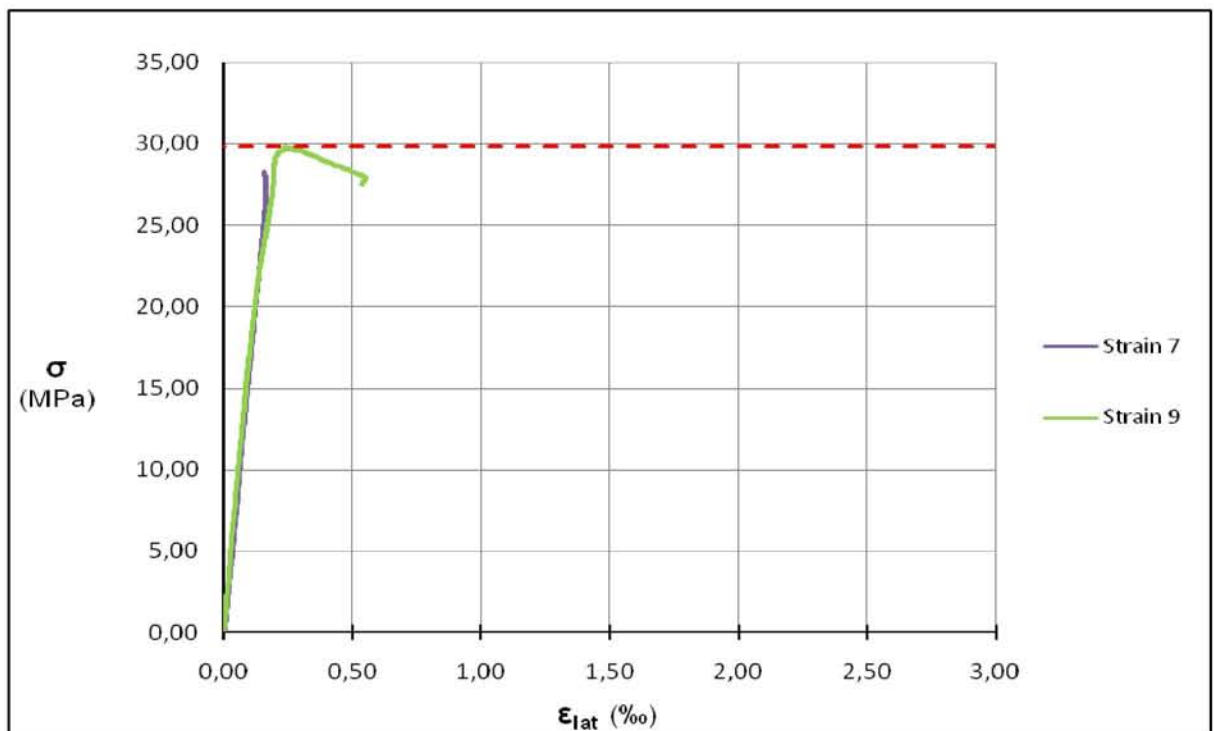


Σχήμα 4.29 Διάγραμμα ογκομετρικής τροπής – αξονικής τροπής δοκιμών S(150)

4.5.11 Δοκίμιο  $M\_S(100)$

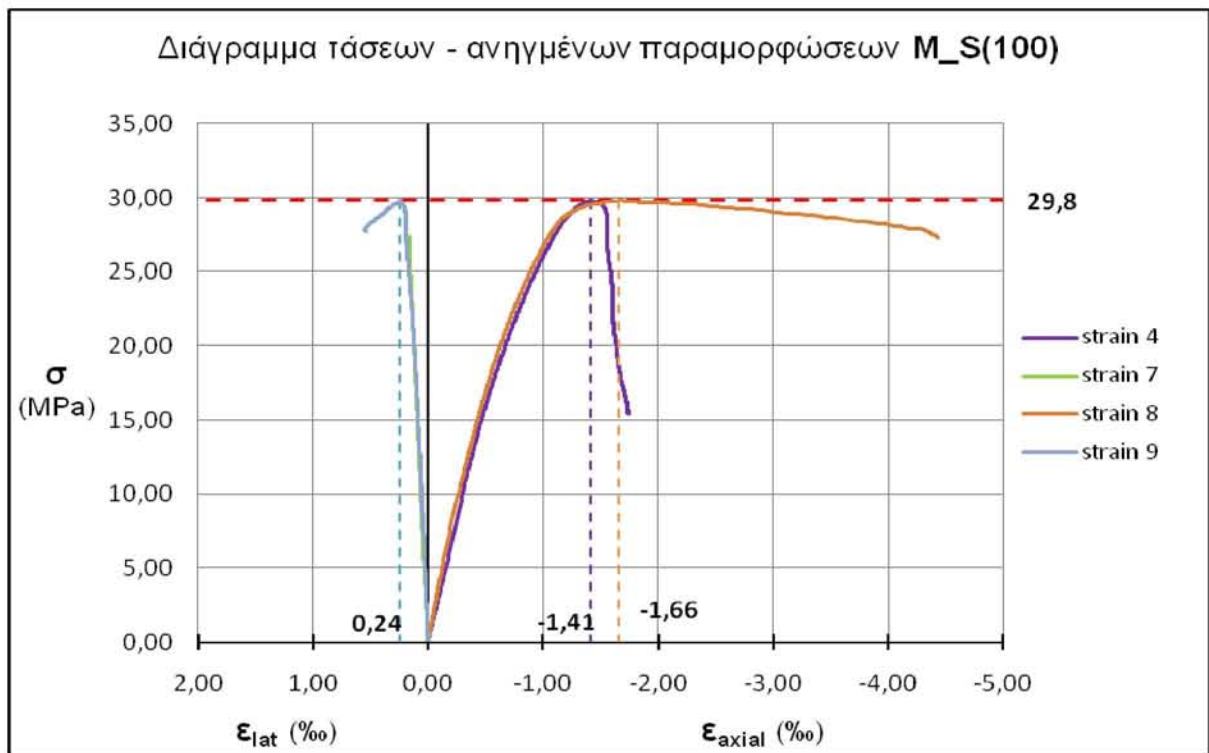


Σχήμα 4.30 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής



Σχήμα 4.31 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)





**Σχήμα 4.32** Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages

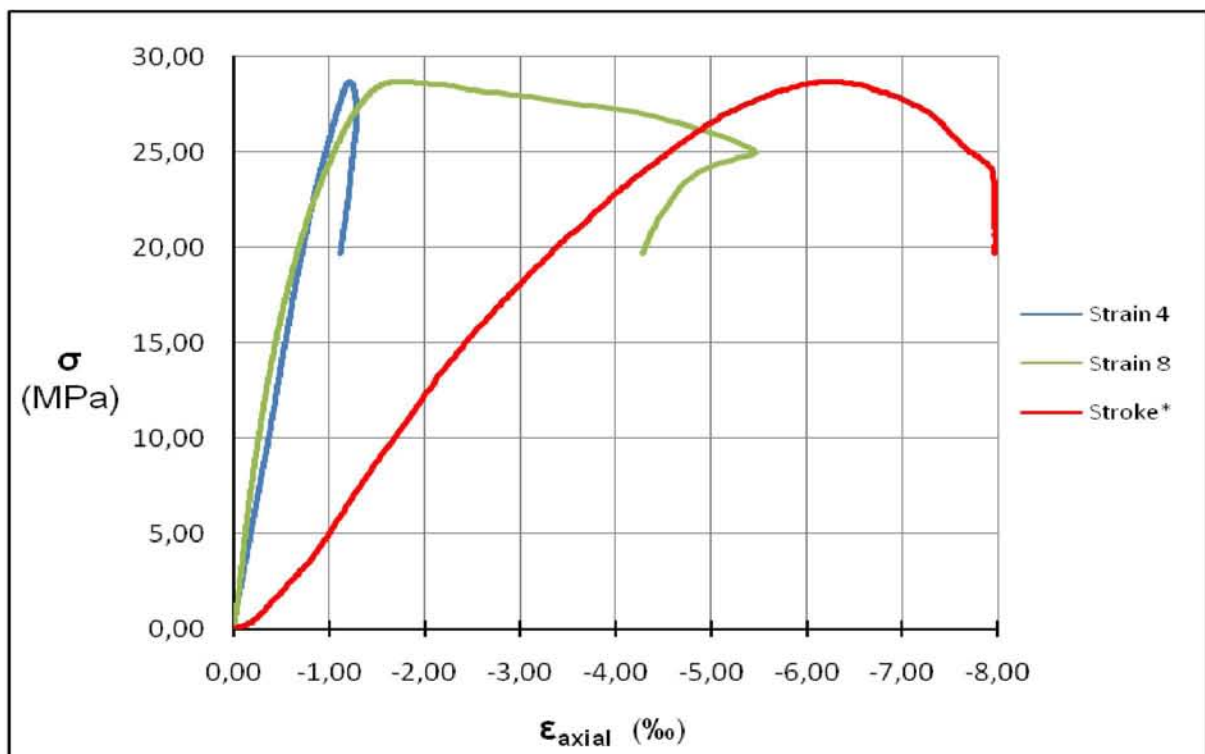


**Εικόνα 4.47** Όψεις δοκιμίου M\_S(100) μετά την αστοχία (1)

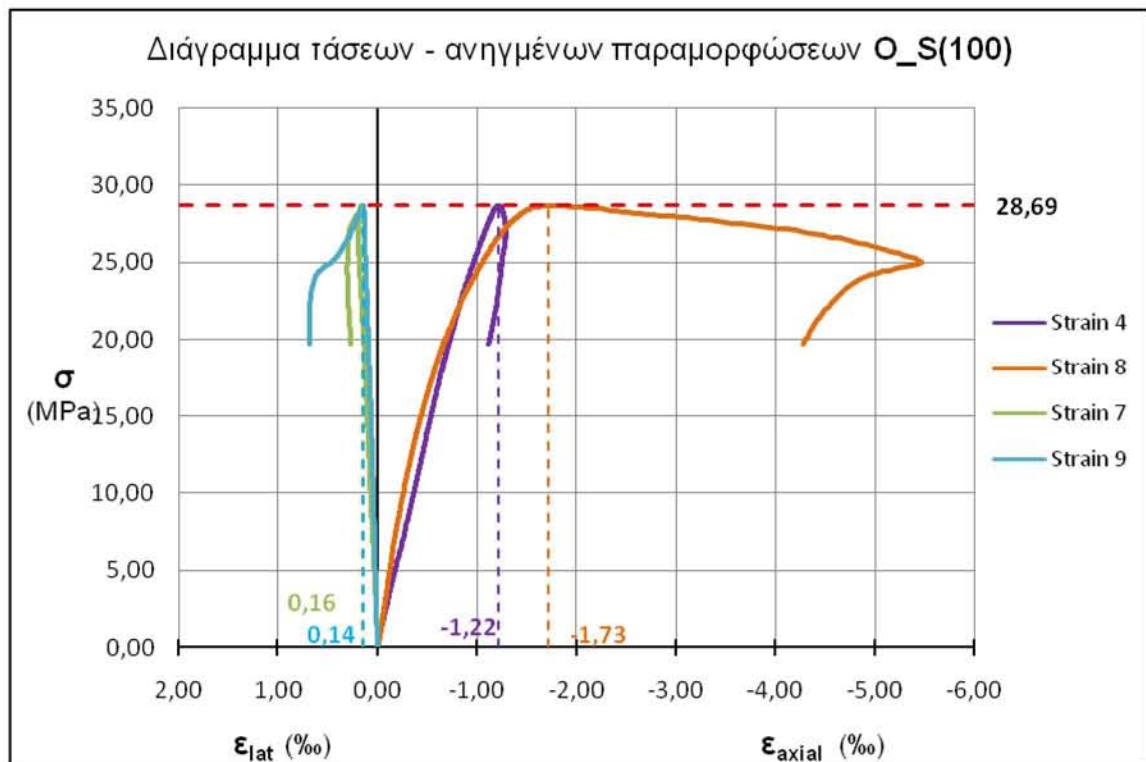


Εικόνα 4.48 Όψεις δοκιμίου M\_S(100) μετά την αστοχία (2)

#### 4.5.12 Δοκίμιο O\_S(100)



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής



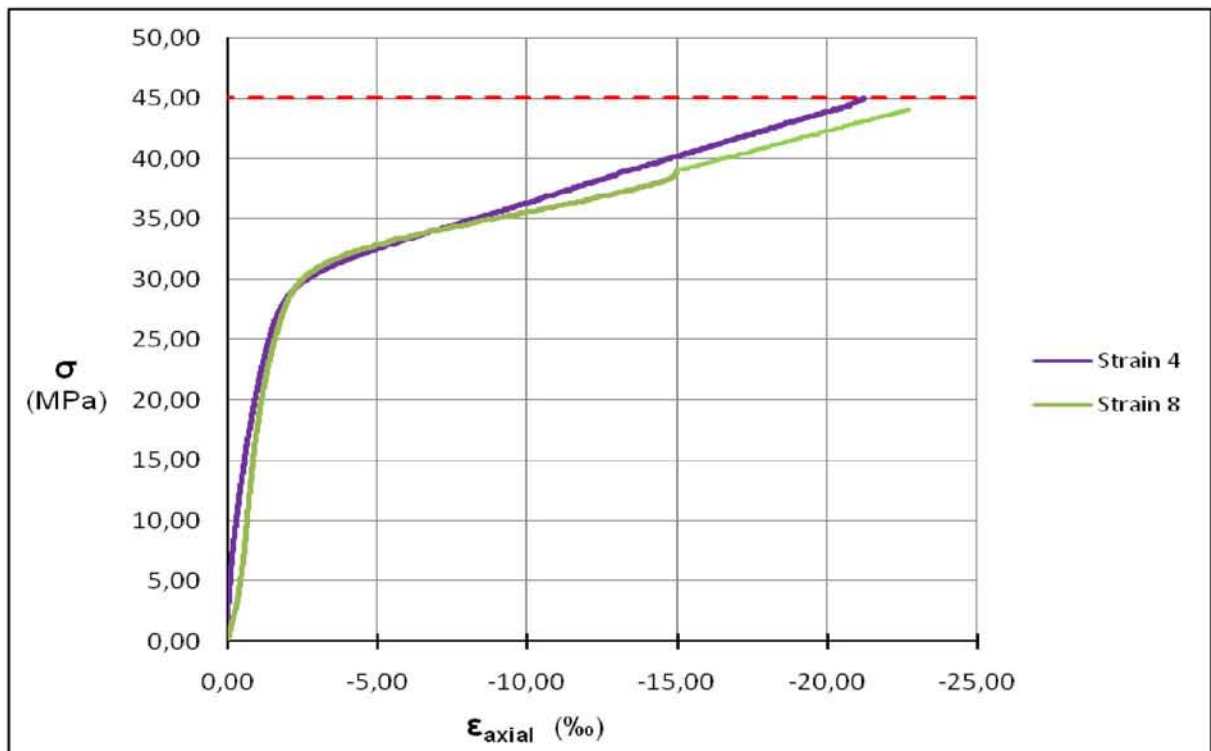
Σχήμα 4.34 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων – με βάση τις μετρήσεις των strain gages



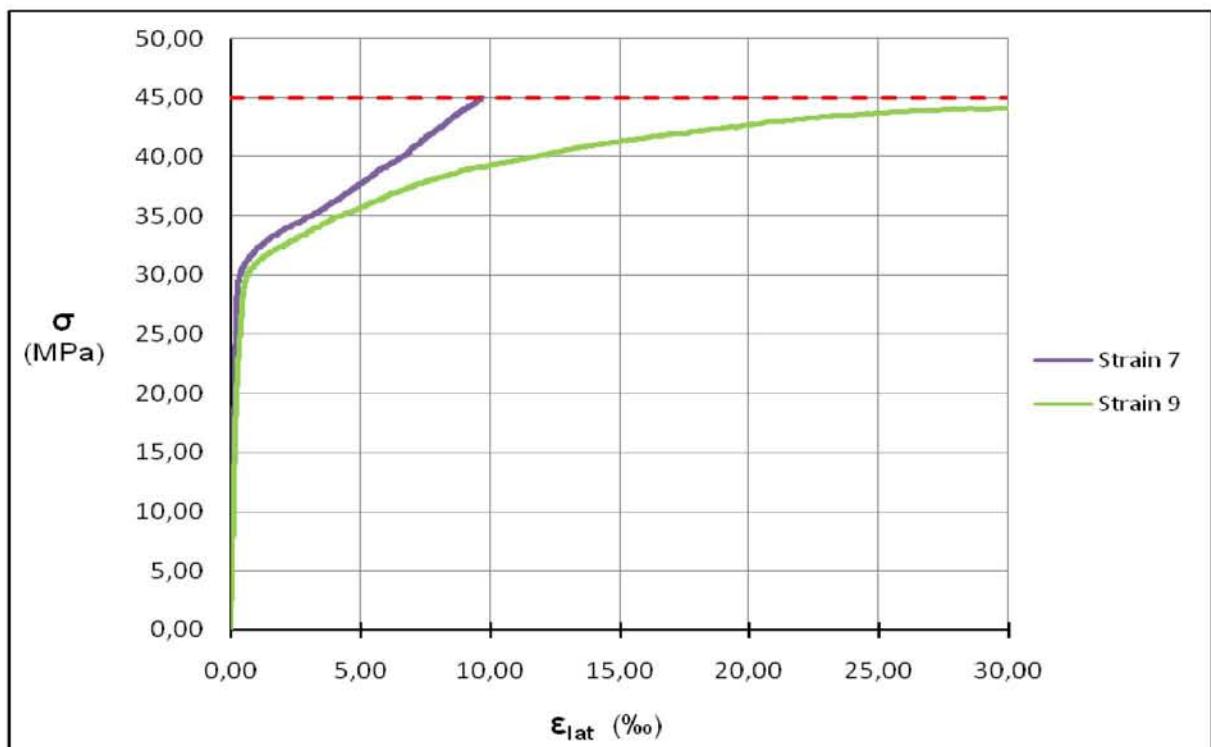
Εικόνα 4.49 Όψεις δοκιμίου O\_S(100) μετά την αστοχία



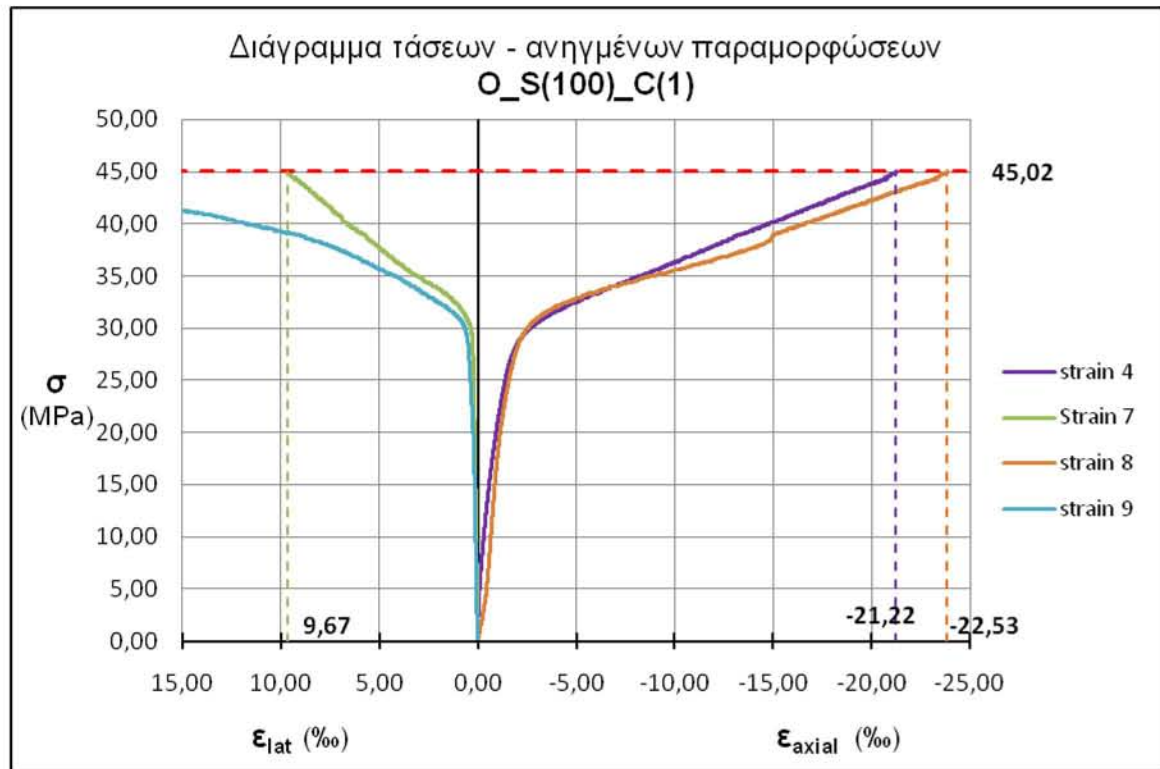
4.5.13 Δοκίμιο O<sub>2</sub>S(100)<sub>2</sub>C(1)



Σχήμα 4.35 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8)



Σχήμα 4.36 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9)

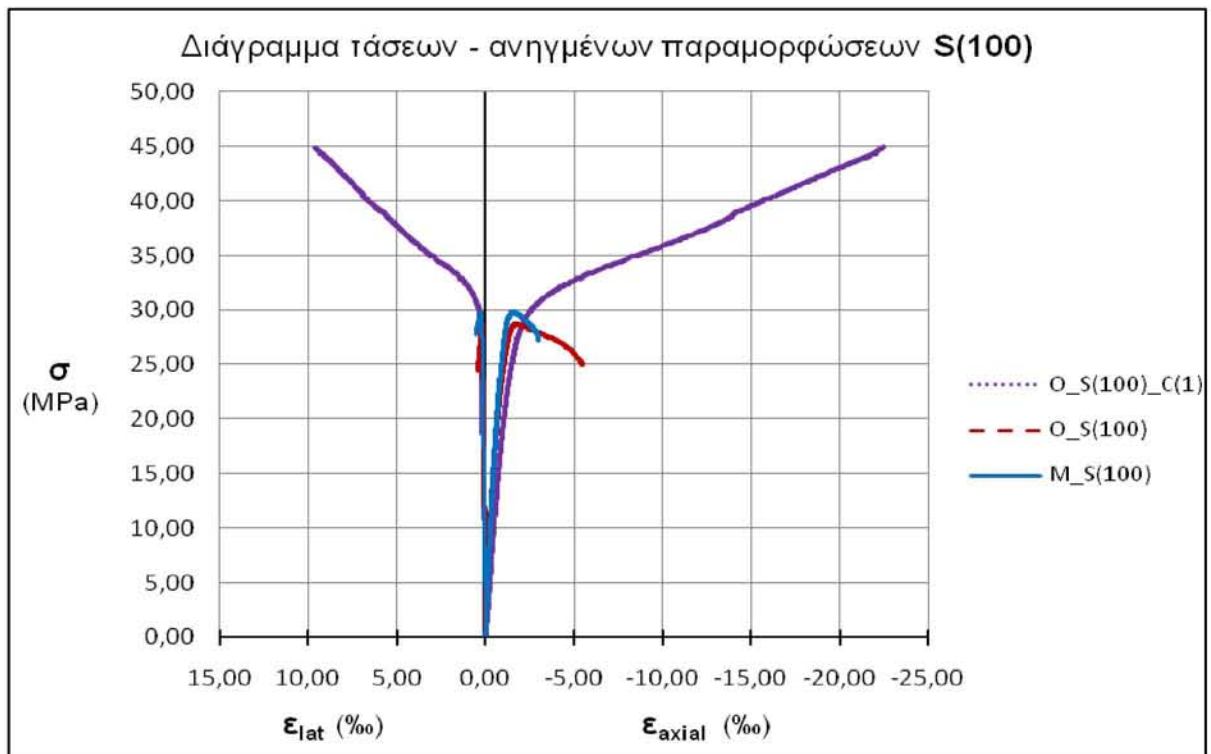


**Σχήμα 4.37** Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων με βάση τις μετρήσεις των strain gages

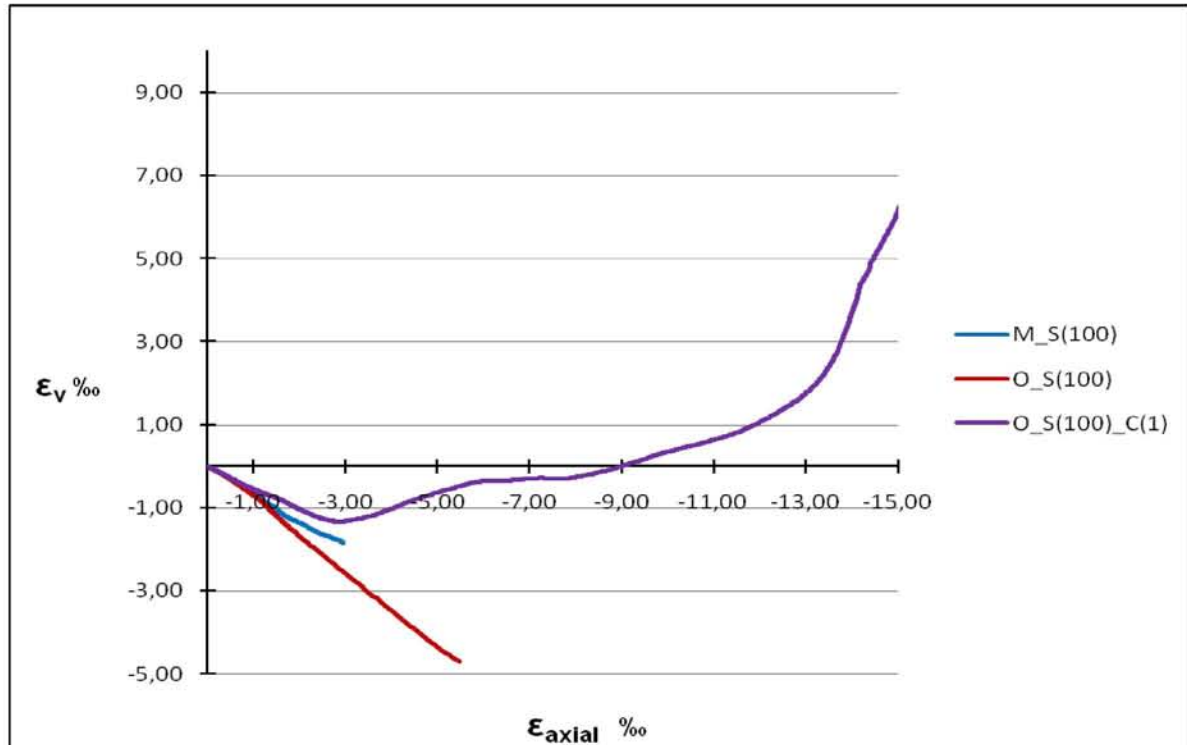


**Εικόνα 4.50** Δοκίμιο O\_S(100)\_C(1) μετά την αστοχία

4.5.14 Υπέρθυση διαγραμμάτων δοκιμών S(100)



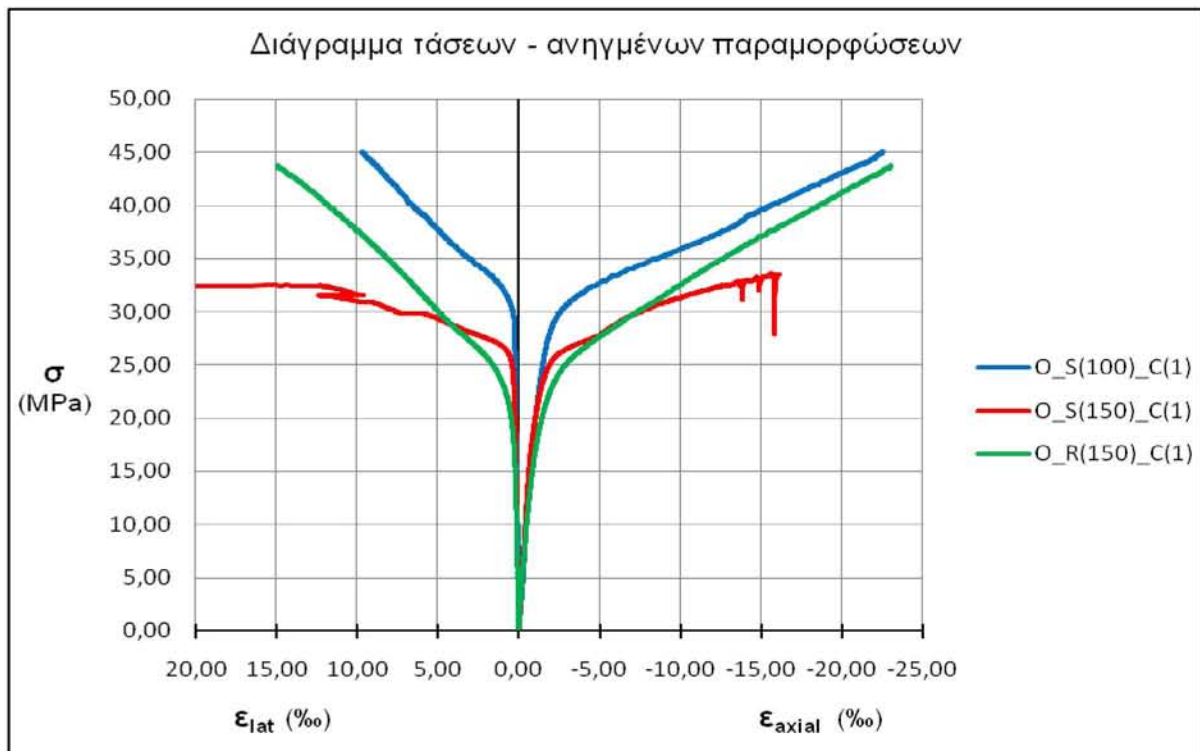
Σχήμα 4.38 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμών S(100)



Σχήμα 4.39 Διάγραμμα ογκομετρικής τροπής – αξονικής τροπής δοκιμών S(100)



4.5.15 Υπέρθυση διαγραμμάτων δοκιμών περισφιγμένων με ΙΟΠ



Σχήμα 4.40 Υπέρθυση διαγραμμάτων τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμών περισφιγμένων με ΙΟΠ

4.6 Συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία

Στον Πίνακα 4-4 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται η μέγιστη αντοχή των οπλισμένων δοκιμών ( $f_{cc}$ ) και οι αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις μετρούνται κατά μήκος του άξονα της θλίψης ( $\epsilon_{cc}$ ) και κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα ( $\epsilon_{cc,lat}$ ).

Πίνακας 4-4 Συγκεντρωτικός Πίνακας μετρήσεων

	$f_{ck}$	$f_{cc}$	$\epsilon_{cc}$ (‰)			$\epsilon_{cc,lat}$ (‰)		
			strain 4	strain 8	Disp C	strain 7	strain 9	Disp B
M_R(150)	22,98	<b>24,99</b>	-4,23	-6,20	-5,45	2,09	4,14	7,80
O_R(150)	22,98	<b>23,55</b>	-2,58	-2,84	-2,85	1,19	1,09	2,66
O_R(150)_C(1)	22,98	<b>43,70</b>		-22,91	-23,24		14,37	15,53
M_S(150)	22,98	<b>27,68</b>	-5,11	-3,15	-	1,37	1,97	-
O_S(150)	22,98	<b>25,44</b>	-3,28		-	2,04	0,62	-
O_S(150)_C(1)	22,98	<b>33,65</b>	-15,63		-			-
M_S(100)	22,98	<b>29,80</b>	-1,41	-1,66	-		0,24	-

<b>O_S(100)</b>	22,98	28,69	-1,22	-1,73	-	0,16	0,14	-
<b>O_S(100)_C(1)</b>	22,98	45,02	-21,22	-22,53	-	9,67		-

Η ενίσχυση με μία στρώση ΙΟΠ άνθρακα ήταν ικανή για να αυξηθεί σημαντικά η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, σχεδόν να διπλασιαστεί. Συνεπώς, τα δοκίμια που είναι οπλισμένα με βάση τον παλαιότερο κανονισμό και ενισχύθηκαν, ξεπέρασαν κατά μεγάλο βαθμό την θλιπτική αντοχή των αντίστοιχων δοκιμίων που είναι οπλισμένα με βάση τον Ευρωκώδικα. Αντίστοιχη ήταν και η αύξηση των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Σχετικά με τον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων παρατηρούνται τα εξής:

- Τα δοκίμια χωρίς ΙΟΠ γενικά εμφάνισαν ρηγματώσεις παρόμοιες με τα άοπλα δοκίμια, δηλαδή κατά την διεύθυνση του άξονά τους
- Το δοκίμιο **O\_S(100)** φαίνεται να αστόχησε πρόωρα: παρατηρήθηκε αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης στα άκρα του, χωρίς αποκάλυψη του διαμήκους οπλισμού, πιθανά λόγω συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων άντυνας στα άκρα, στις θέσεις των αγκίστρων των διαμήκων ράβδων.
- Στα δοκίμια **M\_R(150)** και **O\_R(150)** παρατηρείται σημαντικός λυγισμός των διαμήκων ράβδων. (Επισημαίνεται ότι στα δοκίμια S(100) και S(150) η δοκιμή διακόπηκε όταν σημειώθηκε πτώση απόκρισης κατά 20% της μέγιστου φορτίου  $P_{max}$ , ενώ στα δοκίμια R(150) η δοκιμή συνεχίστηκε και για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις. Αυτός είναι ο λόγος που τα δοκίμια **M\_R(150)** και **O\_R(150)** εμφάνισαν σημαντικά μεγαλύτερο λυγισμό των διαμήκων οπλισμών από τα υπόλοιπα)
- Σε όλα τα δοκίμια με ΙΟΠ, η αστοχία τους συνοδεύτηκε με αποκόλληση του μανδύα ΙΟΠ (debonding). Η αστοχία αυτή ήταν μη αναμενόμενη, καθώς είχε ληφθεί μήκος υπερκάλυψης ίσο με 100mm, το οποίο προτείνεται στην βιβλιογραφία αφενός, αλλά είχε χρησιμοποιηθεί και στο πειραματικό πρόγραμμα του Ε. Καλογεράκη (Καλογεράκης, 2013) χωρίς να εμφανιστεί πρόωρη αστοχία στο μήκος υπερκάλυψης σε κανένα δοκίμιο. Με αφορμή αυτό το παράδοξο, εκπονήθηκε η μεταγενέστερη Διπλωματική εργασία του Αρβανιτόπουλου Ευτύχιου (Αρβανιτόπουλος, 2015) στην οποία διαπιστώθηκε ότι για ξηρή εφαρμογή της ρητίνης το διάστημα των επτά ημερών ωρίμανσης της κόλλας, το οποίο προδιαγράφεται από την εταιρία Sika, δεν επαρκεί για να αναπτύξει η ρητίνη πλήρως τις αντοχές της. Τα περισφιγμένα δοκίμια με μία

στρώση άνθρακα: O\_S(100)\_C(1), O\_S(150)\_C(1) και O\_R(150)\_C(1) υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης 12, 13 και 21 ημέρες, αντιστοίχως, μετά την εφαρμογή του υφάσματος (**Πίνακας 4-5**). Βάσει των προδιαγραφών της Sika, δεν θα έπρεπε να συμβεί αστοχία στην υπερκάλυψη του υφάσματος, αφού το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ήταν σε όλα τα δοκίμια μεγαλύτερο από 7 ημέρες. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο O\_R(150)\_C(1) για το οποίο είχε μεσολαβήσει διάστημα 21 ημερών μεταξύ δοκιμής και εφαρμογής υφάσματος παρουσίασε την μεγαλύτερη έκταση αστοχίας συνάφειας (debonding): (**Εικόνα 4-42**). Επομένως ούτε το διάστημα των 21 ημερών φαίνεται ότι ήταν επαρκές για την ωρίμανση της ρητίνης. Από δοκιμές που έγιναν σε τρία από τα ανέπαφα δοκίμια που είχαν κατασκευαστεί χωρίς να δοκιμαστούν, έναν χρόνο μετά (διπλωματική εργασία Ε. Μηλιώκα, 2016) φαίνεται ότι η πρόωρη αστοχία συνάφειας του υφάσματος (debonding) δεν οδήγησε σε σημαντική μείωση της θλιπτικής αντοχής, όπως αναλύεται στην παράγραφο 5.2.

**Πίνακας 4-5** Χρονοδιάγραμμα πειραματικού προγράμματος

<b>Ημ/νία σκυροδέτησης</b>		17/12/2015
<b>Ημ/νία εφαρμογής ΙΟΠ</b>		4/2/2015
<b>Ημ/νία δοκιμών</b>	S (100)	16/2/2015
	S (150)	17/2/2015
	R (150)	25/2/2015

## 5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

### 5.1 Προβλέψεις μοντέλων

Πίνακας 5-1 Βασικά χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

ΔΟΚΙΜΙΑ	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ								EXP
	διαστάσεις	$f_c$	$\rho_{long}$	$s/D_b$	$P_{st,v}$	FRP	$\eta_f$	$P_{vf}$	$f_{cc}^*$
M -R(150)	D150	22,98	0,013	7,58	0,0047	-	0	-	24,99
O -R(150)	D150	22,98	0,013	11,67	0,0030	-	0	-	23,55
O - R(150) - C(1)	D150	22,98	0,013	11,67	0,0033	C	1	0,0034	43,70
M -S(150)	150X150	22,98	0,010	7,58	0,0080	-	0	-	27,68
O -S(150)	150X150	22,98	0,010	11,67	0,0030	-	0	-	25,44
O - S(150) - C(1)	150X150	22,98	0,010	11,67	0,0033	C	1	0,0035	33,65
M -S(100)	100X100	22,98	0,012	7,58	0,0075	-	0	-	29,80
O -S(100)	100X100	22,98	0,012	11,67	0,0049	-	0	-	28,69
O - S(100) - C(1)	100X100	22,98	0,012	11,67	0,0054	C	1	0,0052	45,02

Πίνακας 5-2 Προβλέψεις μοντέλων για τα πειραματικά δοκίμια με μία στρώση άνθρακα

ΔΟΚΙΜΙΑ	EXP	ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ				
	$f_{cc}^*$	EC8	Wang_Hsu	Pellegrino	Tastani	Roussakis
O - R(150) - C(1)	43,70	44,65	47,33	41,93	40,09	42,12
O - S(150) - C(1)	33,65	32,12	30,43	32,43	30,65	35,83
O - S(100) - C(1)	45,02	39,95	38,21	36,63	42,74	46,81

Πίνακας 5-3 Αξιοπιστία μοντέλων για την περισφιγμένη αντοχή των δοκιμίων με ΙΟΠ

ΔΟΚΙΜΙΑ	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$				
	<i>EC8</i>	<i>Wang_Hsu</i>	<i>Pellegrino</i>	<i>Tastani</i>	<i>Roussakis</i>
<b>O - R(150) - C(1)</b>	0,98	0,92	1,04	1,09	1,04
<b>O - S(150) - C(1)</b>	1,05	1,11	1,04	1,10	0,94
<b>O - S(100) - C(1)</b>	1,13	1,18	1,23	1,05	0,96

Οι προβλέψεις των μοντέλων για την τιμή της θλιπτικής αντοχής των περισφιγμένων με ΙΟΠ δοκιμίων επιβεβαιώνουν την εκτίμηση που γίνεται για την αξιοπιστία τους στην ενότητα 3.5, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους σε πειραματικά προγράμματα από την βιβλιογραφία.

Συγκεκριμένα, όλα τα μοντέλα υποεκτιμούν την τιμή της θλιπτικής αντοχής, με εξαίρεση το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008), το οποίο προβλέπει τιμές μεγαλύτερες από τις πειραματικές. Επιπλέον, είναι φανερό και εδώ η αναντιστοιχία που εμφανίζει η εφαρμογή του μοντέλου των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007) μεταξύ του κυλινδρικού και των πρισματικών δοκιμίων.

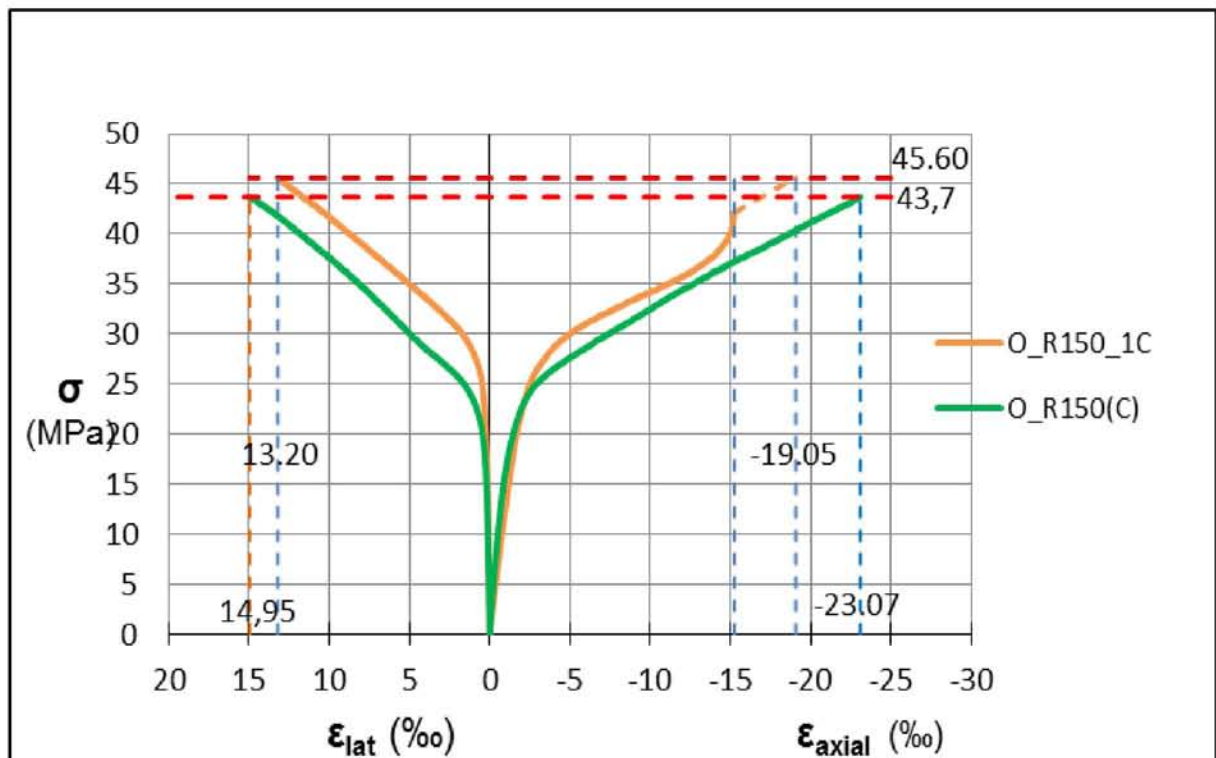
Επίσης, τα μοντέλα των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007) και των Pellegrino C. and Modena C. (2010), αλλά και οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα – 8 υποτιμούν σημαντικά την τιμή της θλιπτικής αντοχής στο δοκίμιο **O – S(100) – C(1)**.



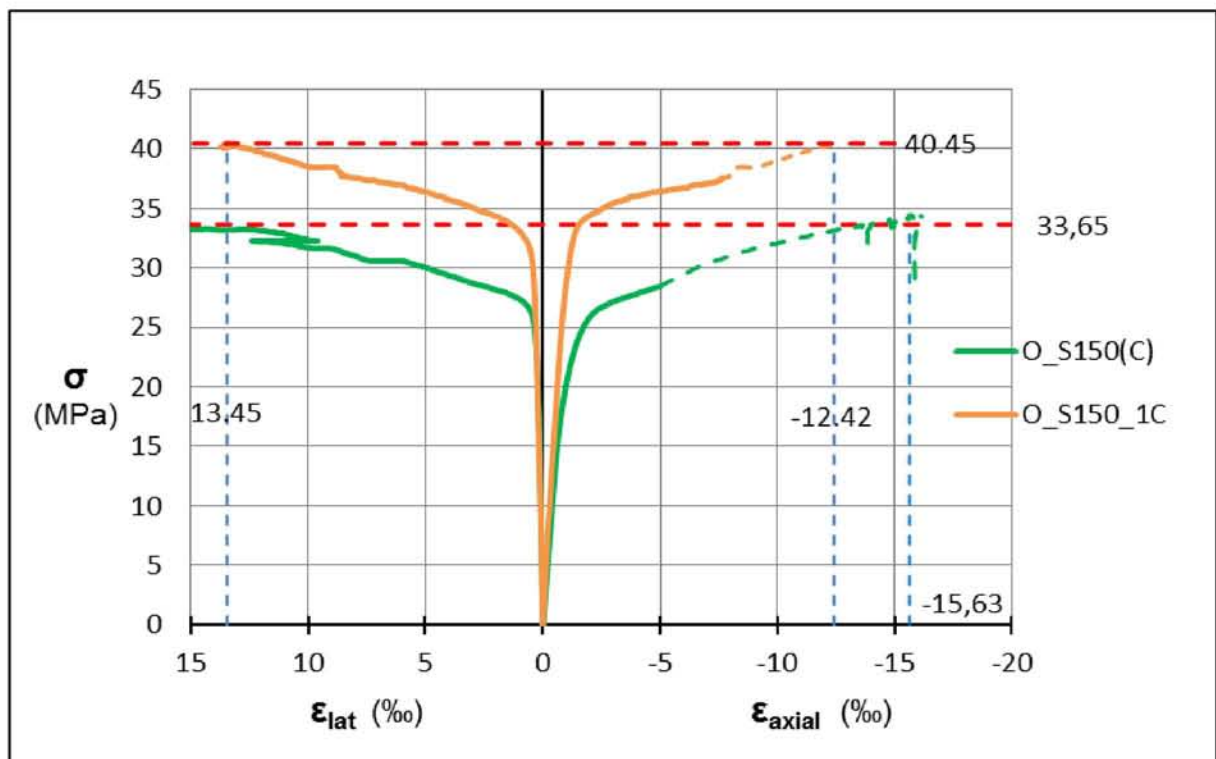
## 5.2 Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα *Ε. Μηλιώκα, (2016)*

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δοκίμια του πειραματικού προγράμματος, τα οποία περισφίχθηκαν με ΙΟΠ άνθρακα, αστόχησαν πρόωρα λόγω αποκόλλησης στο μήκος υπερκάλυψης και με στόχο να διερευνηθεί καλύτερα η συμπεριφορά των περισφισμένων με ΙΟΠ δοκιμίων, αξιοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα της Διπλωματικής εργασίας του *Ε. Μηλιώκα (Μηλιώκας, 2016)*.

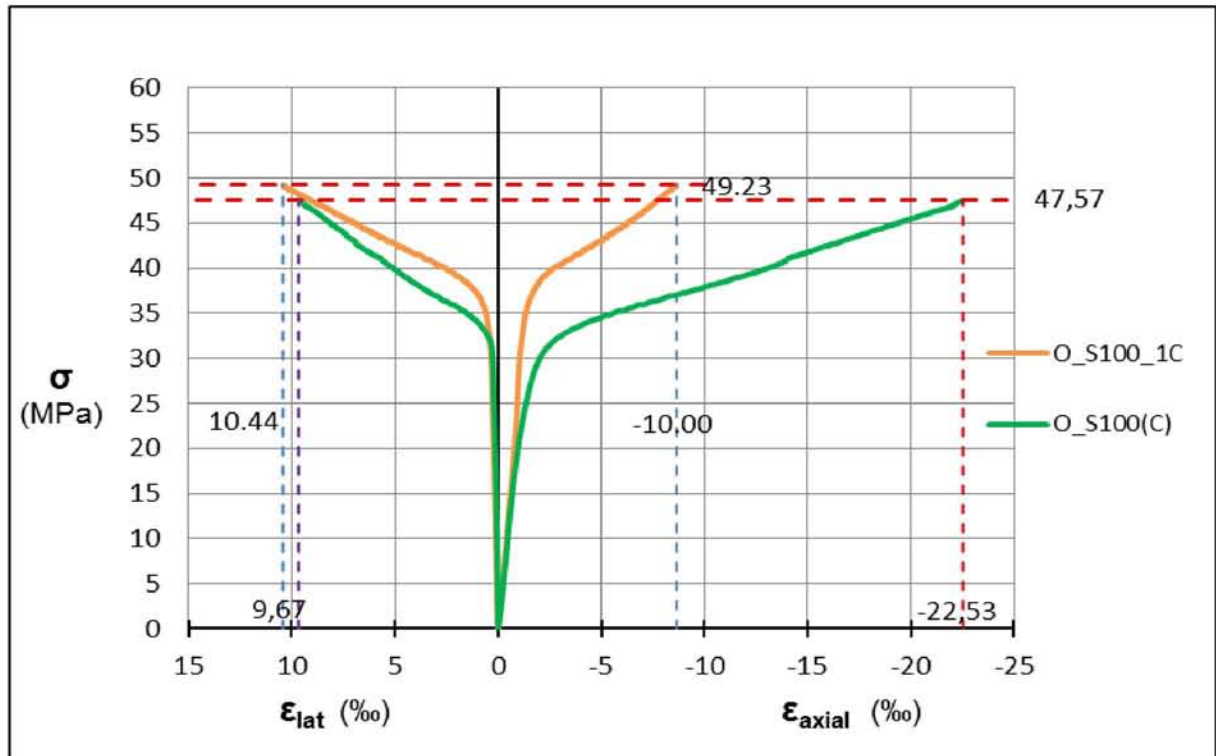
Στο πειραματικό πρόγραμμα της παραπάνω εργασίας δοκιμάστηκαν τρία από τα δοκίμια που είχαν κατασκευαστεί για αυτήν την Διπλωματική, αλλά τα οποία τελικώς δεν δοκιμάστηκαν, με μία στρώση ΙΟΠ άνθρακα. Δεδομένου ότι οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν περίπου 12 μήνες μετά από τις δοκιμές της παρούσας διπλωματικής, η χαρακτηριστική αντοχή  $f_{ck}$  του σκυροδέματος ήταν αυξημένη κατά 4MPa, δηλαδή **27,28 MPa** από **22,98 MPa** του παρόντος πειραματικού προγράμματος. Επίσης εφαρμόστηκε μεγαλύτερο μήκος υπερκάλυψης ( $L_b = 140 \text{ mm}$ ) έτσι ώστε να αποκλειστεί πλήρως το ενδεχόμενο πρόωρης αστοχίας. Τέλος έγινε υγρή μέθοδος εφαρμογής της ρητίνης, η οποία αποδείχθηκε ότι πετυχαίνει την επιδιωκόμενη ωρίμανση της ρητίνης μέσα στο διάστημα των 7 ημερών από την εφαρμογή της (*Αρβανιτόπουλος, 2015*). Πράγματι, στις δοκιμές του *Ε. Μηλιώκα (2016)* δεν παρατηρήθηκε σε καμία περίπτωση αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του υφάσματος. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν λόγω εφελκυστικής αστοχίας του υφάσματος. Παρόλα αυτά δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της αντοχής στην περίπτωση των δοκιμών του *Ε. Μηλιώκα* όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3.



**Σχήμα 5.1** Συγκριτικό Διάγραμμα [σ-ε] δοκιμών με κυκλική διατομή 150mm. Στο O-R150(C) συνέβη αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του ΙΟΠ, ενώ στο O\_R150\_1C δεν συνέβη (Μηλιώκας, 2016)



**Σχήμα 5.2** Συγκριτικό Διάγραμμα [σ-ε] δοκιμών με τετραγωνική διατομή 150mm. Στο O-S150(C) συνέβη αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του ΙΟΠ, ενώ στο O\_S150\_1C δεν συνέβη (Μηλιώκας, 2016)



**Σχήμα 5.3** Συγκριτικό Διάγραμμα  $[\sigma-\epsilon]$  δοκιμών με τετραγωνική διατομή 100mm. Στο O-S100(C) συνέβη αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του ΙΟΠ, ενώ στο O\_S100\_1C δεν συνέβη (Μηλιώκας, 2016)

**Πίνακας 5-4** Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών

ΔΟΚΙΜΙΑ	$f_{cc}^*$ (MPa)	
	(Ι. Παπαρίζος, 2016)	(Ε. Μηλιώκας, 2016)
O - R(150) - C(1)	43,70	45,60
O - S(150) - C(1)	33,65	40,45
O - S(100) - C(1)	45,02	49,23

Με βάση τα παραπάνω, παρατηρείται ότι η αποκόλληση του μανδύα ΙΟΠ στα δοκίμια του πειραματικού προγράμματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν φαίνεται να οδήγησε σε μείωση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών. Η μικρή διαφορά στις τιμές της θλιπτικής αντοχής, αποδίδεται στην αύξηση της χαρακτηριστικής αντοχής του σκυροδέματος στο πειραματικό πρόγραμμα (Μηλιώκας, 2016) με το οποίο γίνεται η σύγκριση, λόγω παλαίωσης του σκυροδέματος.

Επιπλέον, τα θεωρητικά μοντέλα του Κεφαλαίου 2 εφαρμόστηκαν στα δοκίμια της πειραματικής έρευνας του Ε. Μηλιώκα (2016) με την χαρακτηριστική αντοχή του

σκυροδέματος που μετρήθηκε  $f_{ck} = 27,28 \text{ MPa}$ . Συγκρίνοντας τους Πίνακες 5-3 και 5-6 παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις των τιμών που προβλέπουν τα μοντέλα είναι σχεδόν της ίδιας τάξης μεγέθους, γεγονός που επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η αστοχία συνάφειας του υφάσματος πρέπει να συνέβη κοντά στο φορτίο στο οποίο ούτως ή άλλως θα αστοχούσε το ύφασμα του άνθρακα.

Πίνακας 5-5 Προβλέψεις μοντέλων για τα πειραματικά δοκίμια του Ε. Μηλιώκα (2016)

ΔΟΚΙΜΙΑ	EXP	ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ				
	$f_{cc}^*$	EC8	Wang_Hsu	Pellegrino	Tastani	Roussakis
O - R(150) - C(1)	45,60	49,49	52,41	47,58	42,12	46,42
O - S(150) - C(1)	40,45	36,96	34,03	37,58	33,68	40,13
O - S(100) - C(1)	49,23	44,79	42,45	42,15	47,04	51,11

Πίνακας 5-6 Αξιοπιστία προβλέψεων για τα πειραματικά δοκίμια του Ε. Μηλιώκα (2016)

ΔΟΚΙΜΙΑ	$f_{cc,exp} / f_{cc,anal}$				
	EC8	Wang_Hsu	Pellegrino	Tastani	Roussakis
O - R(150) - C(1)	0,92	0,87	0,96	1,08	0,98
O - S(150) - C(1)	1,09	1,19	1,08	1,20	1,01
O - S(100) - C(1)	1,10	1,16	1,17	1,05	0,96

## **6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

### **6.1 Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων**

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο η ικανότητα θεωρητικών μοντέλων από την βιβλιογραφία να προβλέψουν την συμπεριφορά οπλισμένων στοιχείων με περίσφιγξη από ΙΟΠ, όταν αυτά υποβάλλονται σε κεντρική θλίψη.

Η εφαρμογή των μοντέλων έγινε σε 78 δοκίμια από 18 πειραματικές δοκιμές. Αξιολογώντας τη σύγκριση των τιμών και τα στατιστικά στοιχεία παρατηρείται ότι όλα τα μοντέλα, με εξαίρεση το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008), στην πλειοψηφία των δοκιμίων, υποεκτιμούν την τιμή της θλιπτικής αντοχής. Ωστόσο, για όλα τα μοντέλα, ο συντελεστής μεταβλητότητας λαμβάνει τιμές ( $>0,10$ ) που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ομοιογένεια στο δείγμα των τιμών.

Οι προβλέψεις των μοντέλων για την τιμή της θλιπτικής αντοχής των περισφιγμένων με ΙΟΠ δοκιμίων της παρούσας πειραματικής έρευνας επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εφαρμογή τους σε δοκίμια πειραματικών προγραμμάτων από την βιβλιογραφία.

Επιπλέον, προέκυψε ότι η ενίσχυση με μία στρώση ΙΟΠ άνθρακα ήταν ικανή για να αυξηθεί σημαντικά η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, σχεδόν διπλασιάζεται. Συνεπώς, τα δοκίμια που είναι οπλισμένα με βάση τον παλαιότερο κανονισμό και ενισχύθηκαν με μία στρώση άνθρακα, ξεπέρασαν κατά μεγάλο βαθμό την θλιπτική αντοχή των αντίστοιχων δοκιμίου που είναι οπλισμένα με βάση τον Ευρωκώδικα. Αντίστοιχη ήταν και η αύξηση των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Τέλος, δεν ήταν δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή του λυγισμού των διαμήκων ράβδων του οπλισμού. Λόγω επέκτασης της έρευνας στα αναλυτικά μοντέλα, δεν ήταν αρκετός ο διαθέσιμος χρόνος για την δοκιμή επιπλέον δοκιμίων που είχαν κατασκευαστεί για τον σκοπό αυτό.



## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- ACI-318. Building code requirements for reinforced concrete, American Concrete Institute, Committee 318, (2005)
- Bournas D., Lontou P., Papanicolaou C. G., Triantafillou T. C., (2007). “Textile-reinforced mortar versus Fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns.” *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 6, November-December 2007.
- Carey, S. A., and Harries, K. A. (2005). “Axial behaviour and modeling of confined small, medium, and large-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets.” *ACI Struct. J.*, 102(4), 596– 604.
- CEB – FIP Model Code 1990
- Chaallal, O., Shahawy, M., and Hassa, M. (2003). “Performance of axially loaded short rectangular columns strengthened with carbon FRP wrapping.” *J. Compos. Constr.*, 7(3), 200–208.
- Chastre C., Silva M. (2010). “Monotonic axial behavior and modelling of RC circular columns confined with CFRP.” *Engineering Structures* 32 (2010) 2268-2277
- Cole, C., and Belarbi, A. (2001). “Confinement characteristics of rectangular FRP-jacketed RC columns.” *Proc., Fifth Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5)*.
- De Luca A., Nardone F., Matta F., Nanni A. , Lignola G. P., Prota A. (2011). “Structural evaluation of full-scale FRP-confined reinforced concrete columns.” *J. Compos. Constr.* 2011.15:112-123
- De Paula, R. F., and Da Silva, M. G. (2002). “Sharp edge effects on FRP confinement of RC square columns.” *Proc., 3rd Int. Conf. on Composites in Infrastructure (ICCI’02)*, Hardback, Netherlands.
- Esfahani, M. R., and Kianoush, M. R.(2004). “Axial compressive strength of reinforced concrete columns wrapped with FRP.” *Proc. 1st Conf. on Application of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures*, Building and Housing Research Center, Tehran.
- Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1: 2004

- Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, EN 1998-3: 2005
- Feng, P., Lu, X. Z., and Ye, L. P. (2002). “Experimental research and finite element analysis of square concrete columns confined by FRP sheets under uniaxial compression.” *Proc., 17th Australian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM17)*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 71–76.
- H. J. Lin and C. T. Chen (2001). "Strength of Concrete Cylinder" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(18)/2001, pp. 1577-1600
- H. Toutanji and Y. Deng (2002). "Strength and Durability Performance of Concrete Axially Loaded Members Confined with AFRP Composite Sheets" *Composite: Part B 33 (2002)*, Elsevier Science Ltd, pp. 255-261
- Harajli, M. H. (2006). “Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns.” *Cem. Concr. Compos.*, 28, 938–948.
- Harajli, M. H., Hantouche, E., and Soudki, K. (2006). “Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns.” *ACI Struct. J.*, 103(5), 672–680.
- Hollaway L.C. and Teng J.G. (editors) (2008). “Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites”. *Woodhead Publishing Limited, Cambridge England*, p. 398.
- Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., and Kumbasar, N. (2008). “FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns.” *J. Mater. Civ. Eng.*, 20(2), 169–188.
- Lam, L., and Teng, J. G. (2003). “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete.” *Constr. Build. Mater.*, 17, 471–489
- Li, Y., Fang, T., and Chern, C. (2003). “A constitutive model for concrete cylinder confined by steel reinforcement and carbon fibre sheet.” *Proc., Pacific Conf. on Earthquake Engineering*, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Mander J.B., Priestley M.J.N, and Park R. (1984). “Seismic design of bridge piers”. Report No. 84-2, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, 483 pp.

- Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K., and Taerwe, L. (2005). "Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites." *ACI Struct. J.*, 102(2), 258–267.
- Monti, G., and Nuti, C. (1992). "Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling." *J. Struct. Eng.*, 118(12), 3268–3284.
- Pantazopoulou, S. (1998). "Detailing for reinforcement stability in RC members." *J. Struct. Eng.*, 124(6), 623–632.
- Papia, M., Russo, G., and Zingone, G. (1988). "Instability of longitudinal bars in RC columns." *J. Struct. Eng.*, 114(2), 445–461.
- Pellegrino C., and Modena C. (2010). "Analytical Model for FRP Confinement of Concrete Columns with and without Internal Steel Reinforcement". *J. Compos. Constr.*, 2010, 14:693-705
- Pellegrino C., Tinazzi D. , and Modena C. (2004). "Sul confinamento di elementi in c.a. soggetti a compressione." *Proc., AICAP National Congress*, Patron, Bologna, Italy, 26–29
- Richard, R. M., and Abbott, B. J. (1975). "Versatile elastic-plastic stress-strain formula." *J. Engrg. Mech. Div.*, 101(4), 511–515.
- Richart, F., Brandtzaeg, A., and Brown, R. (1928). "Study of failure of concrete under combined compressive stresses." *Engineering Experiment Station Bull. No. 185*, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Rodrigues, C. C., and Silva, M. (2001). "Experimental investigation of CFRP reinforced concrete columns under uniaxial cyclic compression." *Proc., Fifth Symp. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete structures (FRPRCS5)*, Telford, London, 783–791.
- Roussakis T. C. and Karabinis A. I. (2008). "Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects". *Materials and Structures* (2008) 41:1595–1611
- Sika Hellas S.A.: Φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος, έκδοση 27/2/2014
- Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., Zdoumba, D., Plakantaras, V., and Akritidis, E. (2006). "Limitations of FRP jacketing in confining old type reinforced concrete members in axial compression." *J. Compos. Constr.*, 10(1), 13–25.

- Tinazzi D., Pellegrino C., Cadelli G., Barbato M., Modena C., and Gottardo R. (2003). "An experimental study of RC columns confined with FRP sheets." *Proc., Structural Faults and Repair, 10th Int. Conf.*, Engineering Technics Press, Edinburgh, Scotland.
- Wang L. M., and Wu Y. F. (2008). "Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test." *Eng. Struct.*, 30(2), 493–505.
- Wang YC, and Hsu K. (2007). "Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity". *Composite Structures* 82 (2008) 132–139
- Wang, Y., and Restrepo, J. (2001). "Investigation of concentrically loaded RC columns confined with glass FRP jackets." *ACI Struct. J.*, 98(3), 377–385.
- Xiao Y., and Wu H. (2000). "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets." *J. Mater. Civ. Eng.*, 12(2), 139–146.
- Yu-Lei Bai, Jian-Guo Dai, and J. G. Teng (2012), "Experimental Study on the Buckling Behaviour of Reinforcing Bars in FRP-confined RC Columns." 15 WCCE Lisboa 2012.
- Αρβανιτόπουλος Ευτύχιος (2015) «Μελέτη του μήκους αγκύρωσης ινοπλισμένων πολυμερών σε δοκίμια άοπλου σκυροδέματος». Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Καλογεράκης Εμμανουήλ (2013) «Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην περίσφιγξη κυλίνδρων σκυροδέματος» Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Κανονισμός δια τη μελέτην και εκτέλεσιν οικοδομικών έργων εξ ωπλισμένου σκυροδέματος (Διάταγμα 18/2/1954), Υπουργείο Δημόσιων Έργων.
- Μηλιώκας Ευάγγελος (2016) «Ενίσχυση υποστυλωμάτων Ω.Σ. με λυγισμό του διαμήκη οπλισμού μέσω περίσφιγξης με ινοπλισμένα πολυμερή». Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Ταστάνη Σ.Π., Δερβίσης Α., Πανταζοπούλου Σ.Ι. (2010). «Οπλισμένο σκυρόδεμα υπό θλίψη με ΙΟΠ μανδύες: Αναλυτική προσέγγιση κονιορτοποίησης του σκυροδέματος και λυγισμού του διαμήκους οπλισμού». *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Τευχος 3, Νο.3, σελ. 61-76.*

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Εγκάρσια πίεση $f_{cr}$ που παράγεται λόγω περίσφιγξης σε κύλινδρο παρουσία υφάσματος πάχους $t_j$ (H. Toutanji and Y. Deng, 2002) .....	1
Σχήμα 1.2 Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης περισφιγμένου και απερίσφικτου κυλίνδρου σκυροδέματος υπό κεντρική θλίψη (Li, Fang and Chern, 2003).....	3
Σχήμα 2.1 Περισφιγμένες περιοχές σε ορθογωνική διατομή λόγω συνδετήρων και μανδύα ΙΟΠ (Y.-C. Wang, K. Hsu, 2007).....	10
Σχήμα 2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες όπλισης των δοκιμίων (Wang and Hsu, 2007) .....	14
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα $k_{\varepsilon} - C$ (Pellegrino C. and Modena C., 2010).....	20
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης για υποστυλώματα με συνδετήρες. NWR= χωρίς εξωτερικό ΙΟΠ, C1R= περίσφιγξη με μία στρώση ΙΟΠ άνθρακα, C3R= περίσφιγξη με τρεις στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα, G2R= περίσφιγξη με δύο στρώσεις ΙΟΠ γυαλιού, G5R= περίσφιγξη με πέντε στρώσεις ΙΟΠ γυαλιού. (Pellegrino C., Modena C., 2010) .....	21
Σχήμα 2.5 Ανηγμένες παραμορφώσεις κατά μήκος της περιμέτρου ( $\varepsilon_{lat}$ = lateral strain) στην αρηγμάτωση φάση ( $f_c=22.4$ MPa) και στην ρηγματωμένη ( $f_c= 44.6$ MPa) για περίσφιγξη με ΙΟΠ άνθρακα (Pellegrino C., Modena C., 2010).....	22
Σχήμα 2.6 Ανηγμένες παραμορφώσεις κατά μήκος της περιμέτρου ( $\varepsilon_{lat}$ = lateral strain) στην αρηγμάτωση φάση ( $f_c=23.8$ MPa) και στην ρηγματωμένη ( $f_c= 45.6$ MPa) για περίσφιγξη με ΙΟΠ γυαλιού. (Pellegrino C., Modena C., 2010) .....	22
Σχήμα 2.7 Ιδεατό διάγραμμα $\sigma$ - $\varepsilon$ για υποστυλώματα με $2r/b \geq 0.3$ (Pellegrino C., Modena C., 2010) .....	23
Σχήμα 2.8 Ιδεατό διάγραμμα $\sigma$ - $\varepsilon$ για υποστυλώματα με $2r/b < 0.3$ (Pellegrino C., Modena C., 2010).....	23
Σχήμα 2.9 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων (Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., et al., 2006).....	30
Σχήμα 2.10 (b) συμμετρικός λυγισμός των ράβδων (c) ορισμός της μέσης πλευρικής τροπής στο μέσο του δοκιμίου όταν οι γωνιακές ράβδοι λυγίζουν προς τα έξω κατά $w$ (Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., et al., 2006).....	31
Σχήμα 2.11 Διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συγκολλητική ρητίνη στο μήκος υπερκάλυψης της στρώσης (Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., et al., 2006).....	33
Σχήμα 2.12 Διαγράμματα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων στοιχείου υπό κεντρική θλίψη (Ταστάνη, Δερβίσης, Πανταζοπούλου. 2010) .....	35

Σχήμα 2.13 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης και διάγραμμα προσδιορισμού κρίσιμης αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{s,crit}$ συναρτήσει του λόγου $s/D_b$ (Ταστάνη Σ.Π., Δερβίσης Α., Πανταζοπούλου Σ.Ι., 2010).....	36
Σχήμα 3.1 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007).....	58
Σχήμα 3.2 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των Pellegrino C. and Modena C. (2010).....	58
Σχήμα 3.3 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008).....	59
Σχήμα 3.4 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο των S. P. Tastani, etal. (2006, 2010) .....	59
Σχήμα 3.5 Συσχέτιση πειραματικών – θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα (EC8 - EN 1998-3: 2005) .....	60
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα διαμήκη οπλισμού.....	67
Σχήμα 4.2 Θεωρούμενη κοκκομετρική καμπύλη.....	73
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων .....	83
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispC) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8).....	84
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνεται από το DCDT (DispB) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	85
Σχήμα 4.6 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης βάση των μετρήσεων των strain gages .....	85
Σχήμα 4.7 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης με βάση τις μετρήσεις του βελομέτρου DCDT .....	86
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispC) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8).....	87
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispB) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	88
Σχήμα 4.10 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages .....	88
Σχήμα 4.11 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης με βάση τις μετρήσεις του βελομέτρου DCDT .....	89
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (DispC) και από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8).....	90



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα τάσης και ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από το DCDT (Disp B) και από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	91
Σχήμα 4.14 Αξονική και εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages .....	91
Σχήμα 4.15 Αξονική και εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις του βελομέτρου DCDT .....	92
Σχήμα 4.16 Εκτιμώμενες αξονικές και εγκάρσιες ανηγμένες παραμορφώσεις για τα τρία κυλινδρικά δοκίμια .....	93
Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ογκομετρικής τροπής – αξονικής τροπής κυλινδρικών δοκιμίων .....	93
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής .....	94
Σχήμα 4.19 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	94
Σχήμα 4.20 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages .....	95
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής .....	96
Σχήμα 4.22 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	97
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων με επιλογή των τιμών των strain gages που είναι πιο αξιόπιστες .....	97
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής .....	98
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντισταθμιστικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	99
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων βάση των μετρήσεων των strain gages .....	99
Σχήμα 4.27 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων S(150).....	100
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων S(150) – σύγκριση Ο – Μ.....	101
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα ογκομετρικής τροπής – αξονικής τροπής δοκιμίων S(150) .....	101

Σχήμα 4.30 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής .....	102
Σχήμα 4.31 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	102
Σχήμα 4.32 Εκτίμηση αξονικής και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης με βάση τις μετρήσεις των strain gages .....	103
Σχήμα 4.33 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) σε παράθεση με την μετατόπιση κεφαλής .....	104
Σχήμα 4.34 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων – με βάση τις μετρήσεις των strain gages .....	105
Σχήμα 4.35 Διάγραμμα τάσης και αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 4 και strain 8) .....	106
Σχήμα 4.36 Διάγραμμα τάσης και εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης όπως δίνονται από τα δύο αντιδιαμετρικά strain gages (strain 7 και strain 9).....	106
Σχήμα 4.37 Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων με βάση τις μετρήσεις των strain gages .....	107
Σχήμα 4.38 Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμών S(100).....	108
Σχήμα 4.39 Διάγραμμα ογκομετρικής τροπής – αξονικής τροπής δοκιμών S(100) .....	108
Σχήμα 4.40 Υπέρθηση διαγραμμάτων τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμών περισφιγμένων με ΙΟΠ .....	109
Σχήμα 5.1 Συγκριτικό Διάγραμμα $[\sigma-\epsilon]$ δοκιμών με κυκλική διατομή 150mm. Στο O-R150(C) συνέβη αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του ΙΟΠ, ενώ στο O_R150_1C δεν συνέβη (Μηλιώκας, 2016) .....	115
Σχήμα 5.2 Συγκριτικό Διάγραμμα $[\sigma-\epsilon]$ δοκιμών με τετραγωνική διατομή 150mm. Στο O-S150(C) συνέβη αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του ΙΟΠ, ενώ στο O_S150_1C δεν συνέβη (Μηλιώκας, 2016) .....	115
Σχήμα 5.3 Συγκριτικό Διάγραμμα $[\sigma-\epsilon]$ δοκιμών με τετραγωνική διατομή 100mm. Στο O-S100(C) συνέβη αστοχία συνάφειας στο μήκος υπερκάλυψης του ΙΟΠ, ενώ στο O_S100_1C δεν συνέβη (Μηλιώκας, 2016) .....	116

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 Ιδιότητες των υλικών Wang and Hsu (2007) .....	14
Πίνακας 2-2 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας (Wang and Hsu, 2007) .....	15
Πίνακας 2-3 Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών A και α στην εξ. (3.28) .....	25
Πίνακας 2-4 Προτεινόμενες τιμές του συντελεστή B για την εξ. (3.32).....	26
Πίνακας 3-1 Ενιαίος συμβολισμός χαρακτηριστικών δοκιμών βιβλιογραφίας .....	38
Πίνακας 3-2 Χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμών και αποτελέσματα βιβλιογραφίας ....	40
Πίνακας 3-3 Χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμών και αποτελέσματα βιβλιογραφίας .....	41
Πίνακας 3-4 Χαρακτηριστικά δοκιμών παραδείγματος υπολογισμού.....	42
Πίνακας 3-5 Θεωρητικά αποτελέσματα με βάση τα μοντέλα και τον Ευρωκώδικα 8 (α).....	56
Πίνακας 3-6 Θεωρητικά αποτελέσματα με βάση τα μοντέλα και τον Ευρωκώδικα 8 (β).....	57
Πίνακας 3-7 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των Y.-C. Wang, K. Hsu (2007).....	60
Πίνακας 3-8 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των Pellegrino C. and Modena C. (2010) ..	60
Πίνακας 3-9 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των S. P. Tastani, et al. (2006, 2010).....	61
Πίνακας 3-10 Στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο των Roussakis T. and Karabinis A. (2008) .....	61
Πίνακας 3-11 Στατιστικά στοιχεία για τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 8 .....	61
Πίνακας 3-12 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΣΥΝΟΛΙΚΑ).....	61
Πίνακας 3-13 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ) .....	62
Πίνακας 3-14 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ) .....	62
Πίνακας 3-15 Στατιστικά στοιχεία για όλα τα μοντέλα (ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ).....	62
Πίνακας 4-1 Χαρακτηριστικά δοκιμών.....	66
Πίνακας 4-2 Ποσότητες αδρανών .....	74
<b>Πίνακας 4-3 Αποτελέσματα δοκιμών άοπλου σκυροδέματος. (Οι τιμές δίνονται σε MPa) ..</b>	<b>83</b>
Πίνακας 4-4 Συγκεντρωτικός Πίνακας μετρήσεων.....	109
Πίνακας 4-5 Χρονοδιάγραμμα πειραματικού προγράμματος.....	111
Πίνακας 5-1 Βασικά χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών. ....	112

Πίνακας 5-2 Προβλέψεις μοντέλων για τα πειραματικά δοκίμια με μία στρώση άνθρακα...	112
Πίνακας 5-3 Αξιοπιστία μοντέλων για την περισφιγμένη αντοχή των δοκιμίων με ΙΟΠ.....	113
Πίνακας 5-4 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών.....	116
Πίνακας 5-5 Προβλέψεις μοντέλων για τα πειραματικά δοκίμια του Ε. Μηλιώκα (2016) ...	117
Πίνακας 5-6 Αξιοπιστία προβλέψεων για τα πειραματικά δοκίμια του Ε. Μηλιώκα (2016)	117

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 4.1</b> Οπλισμός M – R (150)	<b>Εικόνα 4.2</b> Οπλισμός M – S (150).....	68
<b>Εικόνα 4.3</b> Οπλισμός M – S(150) (αριστερά) και οπλισμός O – S(150) (δεξιά) .....		68
<b>Εικόνα 4.4</b> Οπλισμός M–S (100)	<b>Εικόνα 4.5</b> Οπλισμός M–S(100) (αριστερά) και O–S(100) (δεξιά) .....	69
<b>Εικόνα 4.6</b> Λεπτομέρεια οπλισμού	<b>Εικόνα 4.7</b> Λεπτομέρεια οπλισμού .....	70
<b>Εικόνα 4.8</b> Οπλισμός O-S(150)	Οπλισμός O –R(150)	Οπλισμός O-S(100) .... 70
<b>Εικόνα 4.9</b> Οπλισμός M – R(150) (αριστερά) και οπλισμός O – R(150) (δεξιά) .....		70
<b>Εικόνα 4.10</b> Λεπτομέρειες οπλισμού.....		71
<b>Εικόνα 4.11</b> Ξυλότυπος ορθογωνικών (S-150) δοκιμίων .....		71
<b>Εικόνα 4.12</b> Ξυλότυπος ορθογωνικών (S-100) δοκιμίων .....		71
<b>Εικόνα 4.13</b> Μεταλλικά καλούπια κυλινδρικών δοκιμίων .....		72
<b>Εικόνα 4.14</b> Μεταλλικά και πλαστικά καλούπια των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της δοκιμαστικής αντοχής του σκυροδέματος.....		72
<b>Εικόνα 4.15</b> Εφαρμογή πλαστικών στοιχείων (PVC) με σιλικόνη για το στρογγύλεμα των γωνιών .....		72
<b>Εικόνα 4.16</b> Σκυροδέτηση στο εργαστήριο	<b>Εικόνα 4.17</b> Μέτρηση κάθισης.....	73
<b>Εικόνα 4.18</b> Αδρανή (μεγ. διάμετρος 4–8 mm)	<b>Εικόνα 4.19</b> Αδρανή (μεγ. διάμετρος 2–4 mm).....	74
<b>Εικόνα 4.20</b> Αδρανή (μεγ. διάμετρος 1–2 mm)	<b>Εικόνα 4.21</b> Αδρανή (μεγ. διάμετρος 0,425-1 mm).....	75
<b>Εικόνα 4.22</b> Παιπάλη	<b>Εικόνα 4.23</b> Αδρανή .....	75
<b>Εικόνα 4.24</b> Ορθογωνικά δοκίμια S(100) μετά την σκυροδέτηση .....		75
<b>Εικόνα 4.25</b> Ορθογωνικά δοκίμια S(150) μετά την σκυροδέτηση .....		76
<b>Εικόνα 4.26</b> Δοκιμαστικοί κύλινδροι και κύβοι .....		76
<b>Εικόνα 4.27</b> Διαμόρφωση στα άκρα των δοκιμίων με γύψο υψηλής αντοχής(capping).....		77
<b>Εικόνα 4.28</b> Ζύγιση συστατικών ρητίνης	<b>Εικόνα 4.29</b> Ανάμιξη συστατικών ρητίνης.....	78
<b>Εικόνα 4.30</b> Εφαρμογή ρητίνης στην επιφάνεια του δοκιμίου.....		79
<b>Εικόνα 4.31</b> Εφαρμογή υφάσματος ΙΟΠ .....		79

<b>Εικόνα 4.32</b> Τελική επικάλυψη υφάσματος ΙΟΠ με ρητίνη .....	80
<b>Εικόνα 4.33</b> Μήκος υπερκάλυψης δοκιμίου O-S(100)-C(1) .....	81
<b>Εικόνα 4.34</b> Μετρητική διάταξη με προσαρμοσμένα DCDTs .....	81
<b>Εικόνα 4.35</b> Strain gages (1) <b>Εικόνα 4.36</b> Strain gages (2) .....	82
<b>Εικόνα 4.37</b> Άοπλος κύλινδρος (Cyl_1) κατά την αστοχία .....	84
<b>Εικόνα 4.38</b> Δοκίμιο M_R(150) μετά την δοκιμή (1) .....	86
<b>Εικόνα 4.39</b> Δοκίμιο M_R(150) μετά την δοκιμή (2) .....	87
<b>Εικόνα 4.40</b> Δοκίμιο O_R(150) μετά την δοκιμή (1) .....	89
<b>Εικόνα 4.41</b> Δοκίμιο O_R(150) μετά την δοκιμή (2) .....	90
<b>Εικόνα 4.42</b> Δοκίμιο O_R(150)_C(1) μετά την δοκιμή .....	92
<b>Εικόνα 4.43</b> Δοκίμιο M_S(150) μετά την αστοχία (1) .....	95
<b>Εικόνα 4.44</b> Δοκίμιο M_S(150) μετά την αστοχία .....	96
<b>Εικόνα 4.45</b> Δοκίμιο O_S(150) μετά την αστοχία .....	98
<b>Εικόνα 4.46</b> Δοκίμιο O_S(150)_C(1) μετά την αστοχία .....	100
<b>Εικόνα 4.47</b> Όψεις δοκιμίου M_S(100) μετά την αστοχία (1) .....	103
<b>Εικόνα 4.48</b> Όψεις δοκιμίου M_S(100) μετά την αστοχία (2) .....	104
<b>Εικόνα 4.49</b> Όψεις δοκιμίου O_S(100) μετά την αστοχία .....	105
<b>Εικόνα 4.50</b> Δοκίμιο O_S(100)_C(1) μετά την αστοχία .....	107



