



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ  
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Δημήτριος – Νικόλαος Κονιόρδος

Επιβλέπων: Χρήστος Ζέρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2021

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Ζέρη για την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής, αλλά και για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εν λόγω εργασίας.

## **Περίληψη**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναζήτηση ενός μοντέλου τάσεων - παραμορφώσεων για το ινοπλισμένο – με ίνες χάλυβα – σκυρόδεμα που να επιβεβαιώνει πειραματικά αποτελέσματα συγκεκριμένων πειραμάτων που διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π. Τα πειράματα αφορούν σε κάμψη τεσσάρων σημείων δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος μικρού διατμητικού μήκους, χωρίς οπλισμό διάτμησης.

## **Abstract**

The main purpose of the current thesis is the research of a stress-strain constitutive law for steel fiber-reinforced concrete, in order to approach pleasantly experimental results of experiments held at the N.T.U.A. Reinforced Concrete Laboratory. These experiments relate to 4-point bending tests of SFRC beams without stir-ups.



## Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1	Γενικά .....	1
1.2	Περιγραφή του προβλήματος .....	1
1.3	Δομή της διπλωματικής εργασίας .....	1
2.	Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	2
2.1	Εισαγωγή .....	2
2.2	Βιβλιογραφική Διερεύνηση .....	4
2.2.1	Ιταλικός Κανονισμός CNR DT204 SFRC .....	4
2.2.2	RILEM TC 162-TDF.....	17
3.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .....	26
3.1	Εισαγωγή .....	26
3.2	Γενική Περιγραφή.....	26
3.3	Σύνθεση Ινοπλισμένου Σκυροδέματος Δοκιμίων .....	26
3.4	Οπλισμός Δοκών.....	28
3.5	Πειραματική Διάταξη.....	28
3.6	Ενοργάνωση Δοκιμίων .....	29
3.7	Αποτελέσματα Πειράματος .....	30
4.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .	33
4.1	Εισαγωγή .....	33
4.2	Προσδιορισμός Καμπύλης Θλίψης Ινοπλισμένου Σκυροδέματος .....	34
4.2.1	Πείραμα .....	34
4.2.2	Υλικά και αναλογίες .....	34
4.2.3	Διαδικασία Κατασκευής Δοκιμίων.....	34
4.2.4	Δοκιμή Θλίψης.....	35
4.2.5	Αποτελέσματα .....	36
4.2.6	Διαμόρφωση Εξισώσεων .....	37
4.3	Προσδιορισμός Καμπύλης Εφελκυσμού Ινοπλισμένου Σκυροδέματος .....	38
4.3.1	Στάδιο πριν την ρηγμάτωση .....	39
4.3.2	Στάδιο μετά την ρηγμάτωση.....	40
4.4	Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεων Δοκιμίων .....	45
4.4.1	Σκυρόδεμα.....	45
4.4.2	Χαλύβδινες Ίνες .....	45
4.4.3	Δοκίμιο D100 .....	46
4.4.4	Δοκίμιο D150 .....	47
4.4.5	Δοκίμιο D200 .....	48

4.4.6	Δοκίμιο M100 .....	50
4.4.7	Δοκίμιο M150 .....	51
4.4.8	Δοκίμιο M200 .....	53
5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	54
5.1	Γεωμετρία φορέα και συνοριακές συνθήκες .....	54
5.2	Υλικά.....	56
5.3	Φόρτιση.....	61
5.4	Ανάλυση .....	62
5.5	Εξαγωγή αποτελεσμάτων .....	62
6.	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	63
6.1	Εισαγωγή.....	63
6.2	Δοκίμιο D100.....	64
6.3	Δοκίμιο D150.....	70
6.4	Δοκίμιο D200.....	75
6.5	Δοκίμιο M100.....	80
6.6	Δοκίμιο M150.....	85
6.7	Δοκίμιο M200.....	89
6.8	Συμπεράσματα .....	94
7.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....	94
7.1	Εισαγωγή.....	94
7.2	Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής $f'_{cf}$ .....	94
7.2.1	Δοκίμιο D100.....	95
7.2.2	Δοκίμιο D150.....	96
7.2.3	Δοκίμιο D200.....	97
7.2.4	Δοκίμιο M100.....	98
7.2.5	Δοκίμιο M150.....	99
7.2.6	Δοκίμιο M200.....	100
7.3	Ανάλυση ευαισθησίας της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό $\sigma_{02}$ .....	101
7.3.1	Δοκίμιο D100.....	102
7.3.2	Δοκίμιο D150.....	103
7.3.3	Δοκίμιο D200.....	104
7.3.4	Δοκίμιο M100.....	105
7.3.5	Δοκίμιο M150.....	106
7.3.6	Δοκίμιο M200.....	107
7.4	Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης $\epsilon_{2*}$ .....	108
7.4.1	Δοκίμιο D100.....	109

7.4.2	Δοκίμιο D150 .....	110
7.4.3	Δοκίμιο D200 .....	111
7.4.4	Δοκίμιο M100 .....	112
7.4.5	Δοκίμιο M150 .....	113
7.4.6	Δοκίμιο M200 .....	114
7.5	Συμπεράσματα .....	115
8.	ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	116
8.1	Εισαγωγή.....	116
8.2	Αποτελέσματα – αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου μετατόπισης .....	117
8.2.1	Δοκίμιο D100 .....	117
8.2.2	Δοκίμιο D150 .....	118
8.2.3	Δοκίμιο D200 .....	119
8.2.4	Δοκίμιο M100 .....	120
8.2.5	Δοκίμιο M150 .....	121
8.2.6	Δοκίμιο M200 .....	122
8.3	Συμπεράσματα .....	123
9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	123
	Βιβλιογραφία .....	125

# **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Γενικά**

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που έχει ευρεία εφαρμογή σε ποικίλα τεχνικά έργα όπως δάπεδα δρόμων, βιομηχανικά δάπεδα, τοιχία αντιστήριξης και γενικότερα σε περιπτώσεις που επιδιώκεται περιορισμός του εύρους ρωγμών, παραλαβή εναλλασσόμενων φορτίσεων, η μείωση του πάχους και κατ' επέκταση του κόστους επιφανειακών και άλλων φορέων. Σαν υλικό έχει μία πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι του συμβατικού άοπλου σκυροδέματος, όπως η αυξημένη πλαστιμότητα, η αντοχή και η περιορισμένη ρηγμάτωση.

## **1.2 Περιγραφή του προβλήματος**

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται διερεύνηση για την εύρεση ενός αξιόπιστου μοντέλου για τον νόμο τάσεων – παραμορφώσεων του ινοπλισμένου – με ίνες χάλυβα – σκυροδέματος με βάση την διαθέσιμη βιβλιογραφία, με σκοπό την προσομοίωση του με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπροσθέτως, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειράματα που διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ από τους Χρήστος Ζέρης κ.α. Τα πειράματα αυτά αποσκοπούν στην διερεύνηση της καμπτο-διατμητικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος και εδώ χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για τον έλεγχο των σχέσεων που προκύπτουν από την βιβλιογραφία αλλά και την τροποποίηση αυτών με σκοπό την επίτευξη μιας αξιόπιστης προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία.

## **1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από τα παρακάτω κεφάλαια:

**Κεφάλαιο 1:** Όπου περιγράφεται το αντικείμενο και οι στόχοι της διαπλωματικής.

**Κεφάλαιο 2:** Όπου περιγράφεται η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος και παρατίθενται σύγχρονοι κανονισμοί που χρησιμοποιούνται.

**Κεφάλαιο 3:** Περιγράφονται τα πειράματα που θα προσομοιώθηκαν.

**Κεφάλαιο 4:** Γίνεται η εξαγωγή ενός νόμου για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, με βάση την βιβλιογραφία, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις.



**Κεφάλαιο 5:** Περιγράφεται ο τρόπος της προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και η εισαγωγή των σχέσεων στο λογισμικό.

**Κεφάλαιο 6:** Αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το αρχικό μοντέλο.

**Κεφάλαιο 7:** Γίνονται αναλύσεις ευαισθησίας του νόμου που χρησιμοποιήθηκε για το υλικό.

**Κεφάλαιο 8:** Γίνεται τροποποίηση του αρχικού μοντέλου, με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πειραμάτων

**Κεφάλαιο 9:** Εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις συνολικές αναλύσεις που έγιναν.

Στο τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## **2. Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Ως ινοπλισμένο ορίζεται το σκυρόδεμα που απαρτίζεται από υδραυλικά τσιμέντα, λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες υλικών όπως χάλυβα, πολυπροπυλένιο, σύνθετα πολυμερή, άνθρακα ή γυαλί. Οι ίνες αυτές έχουν διάφορα σχήματα, ώστε να διευκολύνεται η καλύτερη αγκύρωση στη μάζα του σκυροδέματος. Οι ίνες χάλυβα συνήθως είναι ευθύγραμμες, με διάμετρο μικρότερη του χιλιοστού και μήκος μερικών εκατοστών και τις περισσότερες φορές έχουν κυρτωμένα άκρα για την διαμόρφωση καλύτερων συνθηκών αγκύρωσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η λειτουργία των ινών ως ένα είδος τρισδιάστατου οπλισμού με ποικίλα οφέλη στην συνολική συμπεριφορά του υλικού. Η περιεκτικότητα στην οποία τείνουν να χρησιμοποιούνται είναι της τάξης του 1-3% κατ' όγκο. Κατά την παρασκευή, οι ίνες χάλυβα συνήθως είναι σε δέσμες και αποκολλώνται κατά την ανάμειξη του σκυροδέματος.

Όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, το βασικό πλεονέκτημα έναντι του συμβατικού είναι η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής, που προσδίδουν οι ίνες, αλλά και η γενικότερη μεταβολή της συμπεριφοράς του

σκυροδέματος από ψαθυρή σε πλάστιμη, λόγω της πλάστιμης συμπεριφοράς και του χάλυβα ή των λοιπών υλικών που χρησιμοποιούνται για τις ίνες. Η αύξηση αυτή της αντοχής αλλά και της πλαστιμότητας του εφελκυσμού έχει θετικό αντίκτυπο και στην θλίψη, καθώς οι ίνες σε αυτήν την περίπτωση συμβάλλουν στην παραλαβή του εγκάρσιου εφελκυσμού που αναπτύσσεται, με αποτέλεσμα την διαμόρφωση μιας πλαστιμότερης συμπεριφοράς σε θλίψη, αναλογικά και με το ποσοστό των ινών. Οι ιδιότητες αυτές, κατ' επέκταση, συντελούν στον περιορισμό της εμφάνισης ρωγμών, αλλά και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την παραμόρφωση, αφού αστοχεί σε μεγαλύτερη παραμόρφωση. Η απορρόφηση ενέργειας κατά την παραμόρφωση γραφικά αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου παραμόρφωσης, το οποίο είναι 10-40 φορές μεγαλύτερο από αυτό του άοπλου σκυροδέματος.

Η χρήση του ινοπλισμένου – με ίνες χάλυβα – σκυροδέματος είναι ποικίλες στα σύγχρονα τεχνικά έργα. Μία ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή του είναι στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε υπόγεια έργα, όπως, π.χ. σήραγγες, λόγω της άμεσης στήριξης που παρέχει και του ομοιόμορφου πάχους στρώσης. Επίσης, βελτιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους. Μία άλλη χρήση του είναι σε έργα οδοποιίας. Χρησιμοποιείται τόσο για την κατασκευή νέων δρόμων κυκλοφορίας, όσο και για την επιστροφή παλαιών δρόμων που έχουν υποστεί φθορές και έχουν αυλακώσεις, για τον λόγο ότι παρουσιάζει πολύ μικρότερη ρηγμάτωση και λόγω της πλαστιμότητας έχει μεγάλη αντοχή σε κόπωση και ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Επιπροσθέτως, η αυξημένη αντοχή του επιτρέπει την κατασκευή πλακών μικρότερου πάχους και μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των αρμών διαστολής, κάτι που μειώνει σημαντικά το κόστος των κατασκευών. Πέρα από τα δάπεδα δρόμων, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται και για την κατασκευή και ενίσχυση βιομηχανικών δαπέδων και σε περιπτώσεις που υπάρχουν φορτία βαρύ μηχανικού εξοπλισμού ή δυναμικές φορτίσεις. Άλλες περιπτώσεις είναι δάπεδα λιμενικών έργων, αεροδιάδρομοι, εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, τοιχία αντιστήριξης, πυρηνικοί αντιδραστήρες. Ένα παράδειγμα χρήσης ινοπλισμένου σκυροδέματος στην Ελλάδα είναι τα λιμάνια του Αστακού και της Θίβης.

## 2.2 Βιβλιογραφική Διερεύνηση

### 2.2.1 Ιταλικός Κανονισμός CNR DT204 SFRC

(Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures, CNR-DT 204, 2006)

#### 2.2.1.1 Κατάταξη Ινών Χάλυβα

Οι ίνες χάλυβα έχουν μήκος  $l_f$  που κυμαίνεται από 6 mm έως 70 mm και ισοδύναμη διάμετρο  $d_f$  από 0.15 mm έως 1.20 mm και με βάση αυτές τις διαστάσεις υπολογίζεται ο λόγος μορφής της ίνας ως  $l_f / d_f$ . Με βάση την διαδικασία παραγωγής τους, το σχήμα και το υλικό γίνονται οι παρακάτω διακρίσεις:

1. Διαδικασία παραγωγής:

- Ψυχρής έλασης (Τύπος Α)
- Κοπής χαλυβδόφυλλων (Τύπος Β)
- Άλλες μέθοδοι (Τύπος C)

2. Σχήμα:

- Ίσιες
- Παραμορφωμένες (με αγκύρια στα άκρα, αυλακωτές, κ.λ.π)

3. Υλικό:

- Χάλυβας με μικρή περιεκτικότητα άνθρακα ( $C \leq 0.2$ , Τύπος 1)
- Χάλυβας με μεγάλη περιεκτικότητα άνθρακα ( $C > 0.2$ , Τύπος 2)
- Ανοξειδωτος χάλυβας (Τύπος 3)

Με βάση τις μηχανικές του ιδιότητες και την εφελκυστική αντοχή τους κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον πίνακα 2.1:

Equivalent diameter [mm]	Minimum tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]												Alternated bending test
	R1				R2				R3				
	1)		2)		1)		2)		1)		2)		Not failure
$0.15 \leq d_f < 0.50$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m$	$R_{p0.2}$	
$0.50 \leq d_f < 0.80$	400	320	480	400	800	720	1080	900	1700	1360	2040	1700	
$0.80 \leq d_f \leq 1.20$	350	280	450	350	800	640	1040	800	1550	1240	2015	1550	
	300	240	390	300	700	560	910	700	1400	1120	1820	1400	

1) For straight fibers  
2) For shaped fibers

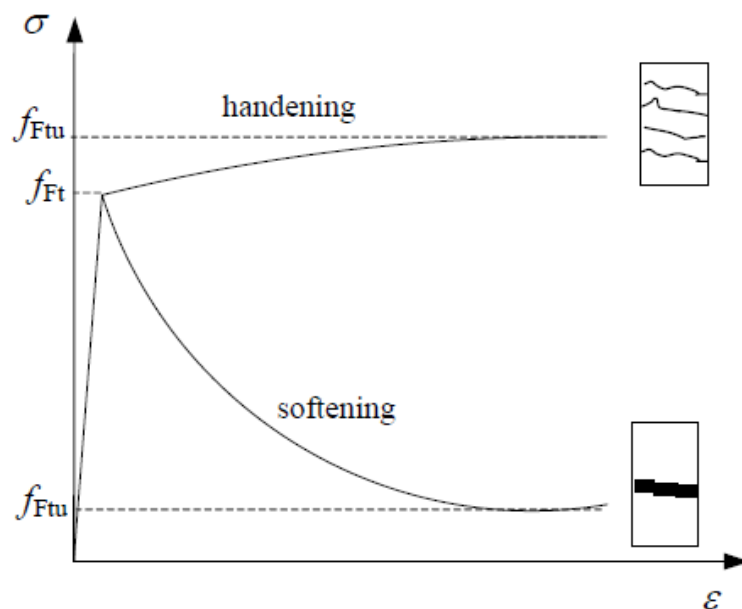
Πίνακας 2.1 Κατάταξη ινών κατά CNR DT204 SFRC

Όπου  $R_m$  η μέγιστη εφελκυστική αντοχή και  $R_{p0.2}$  η εφελκυστική αντοχή μετά από μόνομη ανηγμένη παραμόρφωση ίση με 0.2%.

Το μέτρο ελαστικότητας για χαλύβδινες ίνες μικρής αλλά και μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα λαμβάνεται 200 GPa, ενώ για ανοξείδωτες ίνες 170 GPa.

### 2.2.1.2 Εφελκυστική αντοχή

Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα την παρακάτω εφελκυστική συμπεριφορά που φαίνεται ποιοτικά στο Σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1 Μορφές καμπυλών εφελκυσμού

Για ογκομετρικό ποσοστό ινών κάτω του 2% έχουμε μη κρατυνόμενη συμπεριφορά καμπύλης με διάνοιξη λιγότερων ρωγμών αλλά μεγαλύτερου εύρους. Για ογκομετρικό ποσοστό ινών άνω του 2% έχουμε κρατυνόμενη συμπεριφορά με διάνοιξη περισσότερων ρωγμών μικρότερου εύρους. Η τιμή της  $f_{Ft}$  θεωρείται ίση με την εφελκυστική αντοχή του άοπλου σκυροδέματος. Η απομένουσα εφελκυστική αντοχή  $f_{Ftu}$  εξαρτάται από το ογκομετρικό ποσοστό ινών  $V_f$ , από τον λόγο μορφής των ινών  $l_f/d_f$  αλλά και από την συνάφεια μεταξύ ίνας και σκυροδέματος. Η δύναμη εξόλκευσης των ινών – θεωρώντας ότι είναι κάθετες στην επιφάνεια αστοχίας – υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot l_b \cdot \tau_m = \omega \cdot \frac{V_f}{A_f} \cdot \pi \cdot l_b \cdot \tau_m = \omega \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \tau_m \quad (2.1)$$

Όπου:

$n_f$ : Ο αριθμός των ινών που διασχίζουν μια μοναδιαία επιφάνεια θραύσης

$d_f$  : Η ισοδύναμη διάμετρος της ίνας

$l_b = l_f/4$  : Το ισοδύναμο μήκος που αναπτύσσεται η τάση συνάφειας για κάθε ίνα

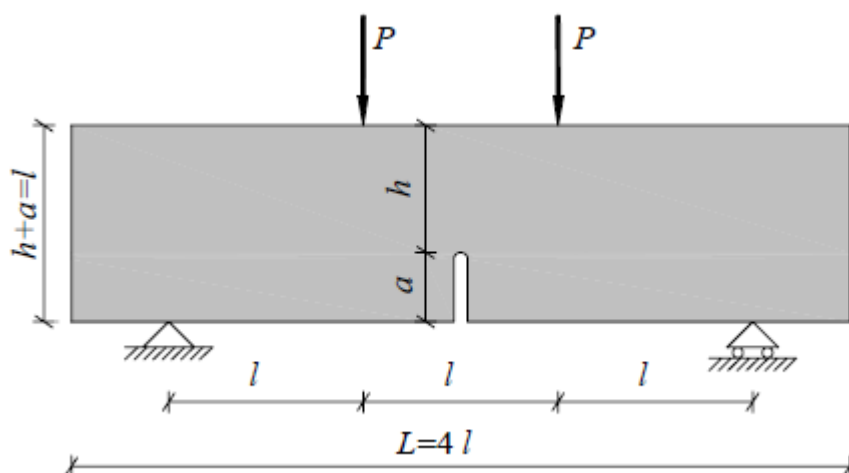
$\tau_m$  : Η μέση εφαπτομενική τάση συνάφειας

$\omega$  : Συντελεστής που λαμβάνει υπ' όψιν τον πραγματικό προσανατολισμό των ινών

$V_f$  : Το ογκομετρικό ποσοστό ινών

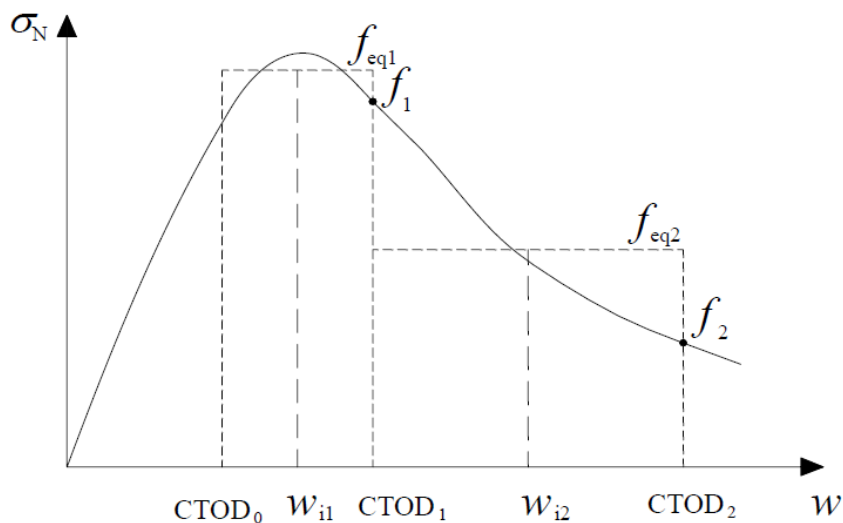
$A_f$  : Το εμβαδό της διατομής μιας ίνας

Ο παραπάνω τύπος αποτελεί μία προσέγγιση, καθώς αμελεί σημαντικούς παράγοντες, όπως το σχήμα της ίνας, την διεπιφάνεια ίνας-σκυροδέματος την διεύθυνση σκυροδέτησης, την μέθοδο ανάμιξης και συμπύκνωσης που επηρεάζουν την κατανομή και τον προσανατολισμό των ινών. Έτσι, προτείνεται μία πειραματική μέθοδος για τον προσδιορισμό του καταστατικού νόμου για τον εφελκυσμό του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε όρους τάσης-εύρους ρωγμών,  $\sigma_N$ - $w$ , μέσω μονο-αξονικού εφελκυσμού με ή χωρίς εγκοπή σύμφωνα με τα πρότυπα (UNI 11039: Steel Fibre Reinforced Concrete - Test Method for Determination of First Crack Strength and Ductility Indexes, 2003) ή δοκιμής σε κάμψη τεσσάρων σημείων σε δοκό με ή χωρίς εγκοπή στο μέσον κατά (UNI 11188: Structural elements of steel fibre reinforced concrete, execution and control, 2007), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου η τάση υπολογίζεται από τον τύπο  $\sigma_N = 6 \cdot P \cdot l / (b \cdot h^2)$ , θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά. Για μέλη που δοκιμάζονται σε απλό εφελκυσμό η αντοχή που προκύπτει απομειώνεται κατά 30%. Όταν ένα δοκίμιο με εγκοπή παρουσιάζει συμπεριφορά που προσομοιάζει στην πάνω καμπύλη του παραπάνω σχήματος, τότε το πείραμα διενεργείται εκ νέου σε δοκίμιο χωρίς εγκοπή, για να προσδιοριστεί η πραγματική πλαστιμότητα.



Σχήμα 2.2 Κάμψη τεσσάρων σημείων κατά UNI 11039

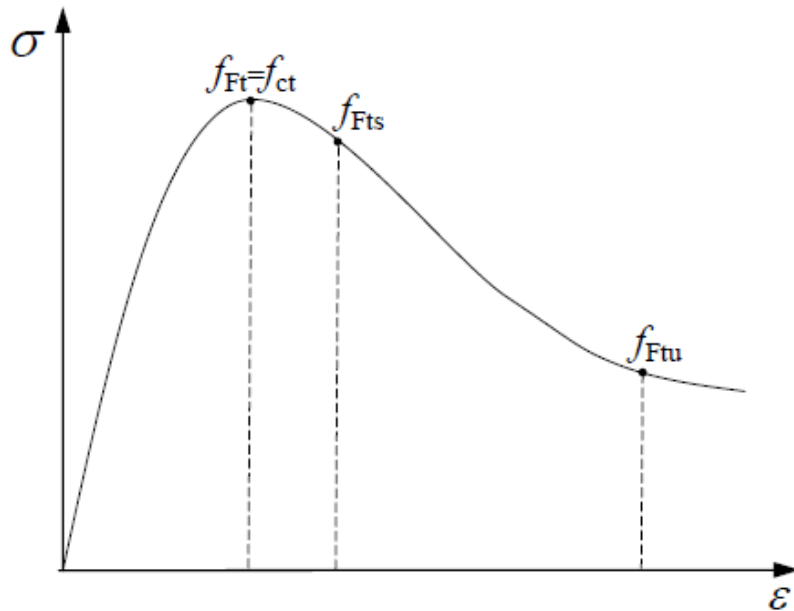
Παρακάτω παρουσιάζεται ποιοτικά το διάγραμμα τάσης-εύρους ρωγμής που προκύπτει από αυτά τα πειράματα.



Σχήμα 2.3 Ορισμός μέγιστης και απομένουσας αντοχής

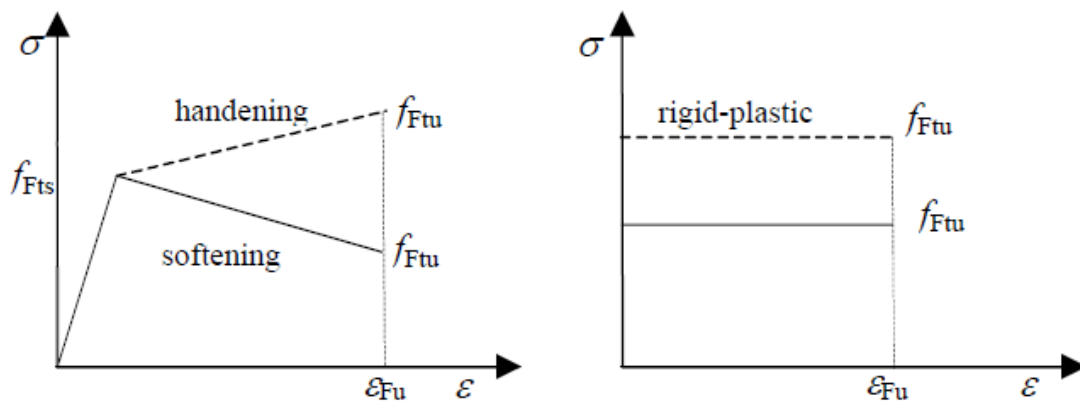
Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να καθοριστεί από τις τιμές  $f_i$  που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές ανοίγματος ρωγμής ή από τις τιμές  $f_{eq1}$  που προκύπτουν ως η μέση τιμή τάσης για για καθορισμένα διαστήματα ανοίγματος ρωγμής. Για δοκίμια που έχουν εγκοπή, το άνοιγμα ρωγμής μπορεί να θεωρηθεί ίσο με την μετακίνηση μεταξύ των άκρων της εγκοπής (CTOD = Crack Tip Opening Displacement).

## Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων



Σχήμα 2.4 Νόμος τάσεων-παραμορφώσεων εφελκυσμού

Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω απλοποιητικά μοντέλα:



Σχήμα 2.5 Απλοποιητικοί καταστατικοί νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων

## Γραμμικό – ελαστικό μοντέλο

Οι τιμές  $f_{Fts}$  και  $f_{tu}$  που αντιστοιχούν στην συμπεριφορά της ΟΚΛ (Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας) και ΟΚΑ (Οριακή Κατάσταση Αστοχίας) αντίστοιχα, υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_{Fts} = 0.45 \cdot f_{eq1} \quad (2.2)$$

$$f_{Ftu} = k \cdot \left[ f_{Fts} - \frac{w_u}{w_{i2}} \cdot (f_{Fts} - 0.5 \cdot f_{eq2} + 0.2 \cdot f_{eq1}) \right] \quad (2.3)$$

Όπου:

$f_{eq1}$  και  $f_{eq2}$ : οι ισοδύναμες αντοχές στο στάδιο μετά την ρηγμάτωση που χρησιμοποιούνται για τις καταστάσεις ΟΚΛ και ΟΚΑ αντίστοιχα.

$k$ : Σταθερά ίση με 0.7 για διατομές που εφελκούνται σε όλη την επιφάνειά τους και ίση με 1 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

$w_{i2}$ : Η μέση τιμή του ανοίγματος ρωγμής μεταξύ του διαστήματος που αντιστοιχεί η  $f_{eq2}$ .

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν και για τις τιμές  $f_1$  και  $f_2$  αντί των  $f_{eq1}$  και  $f_{eq2}$ , με την προϋπόθεση ότι η τιμή  $w_{i2}$  λαμβάνεται ίση με την μεγαλύτερη τιμή του αντίστοιχου διαστήματος που έχει θεωρηθεί (CTOD<sub>2</sub>).

Οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων  $\varepsilon$  στα παραπάνω διαγράμματα, έχοντας ως δεδομένο το εύρος ρωγμής  $w$  ή CTOD μπορούν να υπολογιστούν από την ακόλουθη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{w}{l_{cs}} \quad (2.4)$$

Όπου το χαρακτηριστικό μήκος  $l_{cs}$ , συμπεριλαμβανομένης και της περίπτωσης που υπάρχει και συμβατικός οπλισμός ράβδων χάλυβα, από τις σχέσεις:

$$l_{cs} = \min\{s_{rm}, y\} \quad (2.5)$$

$$s_{rm} = \xi \cdot \left( 50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\varphi}{\rho} \right) \quad (2.6)$$

Όπου:

$s_{rm}$ : Η μέση απόσταση σε mm μεταξύ των ρωγμών

$y$ : Η απόσταση σε mm μεταξύ του ουδέτερου άξονα και της πλέον εφελκόμενης παρειάς της διατομής στη φάση της ελαστικής ρηγμάτωσης, χωρίς να έχει αναπτυχθεί η εφελκυστική αντοχή της ίνας

$\xi$ : Αδιάσταση σταθερά ίση με 1.0 για  $l_f/d_f < 50$ , ίση με  $50 \cdot l_f/d_f$  όταν  $50 \leq l_f/d_f \leq 100$  και ίση με 0.5 όταν  $l_f/d_f > 100$

$\varphi$ : Η διάμετρος των ράβδων οπλισμού. Αν χρησιμοποιούνται ράβδοι διαφορετικών διαμέτρων, τότε λαμβάνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος αυτών.



$k_1$  : Σταθερά ίση με 0.8 για ράβδους υψηλής πρόσφυσης και 1.6 για ράβδους χαμηλής πρόσφυσης

$k_2$  : Σταθερά ίση με 0.5 για καθαρή ή μη κάμψη με  $y < h$  και 1.0 για εφελκυσμό ή όταν  $y > h$

$h$  : Το ύψος της διατομής

$\rho$  : Το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού εντός εφελκυσμένης περιοχής που ορίζεται από την τιμή  $y$ .

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει συμβατικός οπλισμός λαμβάνεται  $y = h$ .

Οι παραπάνω σχέσεις προσδιορισμού του χαρακτηριστικού μήκους  $l_{cs}$  ισχύουν με την υπόθεση της επιπεδότητας της διατομής και όχι για άλλα κινηματικά μοντέλα π.χ. πεπερασμένα στοιχεία.

Στην περίπτωση της κρατυνόμενης συμπεριφοράς πολλαπλή ρηγμάτωση μπορεί να ληφθεί μια μέση παραμόρφωση από τα πειράματα που είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό των καταστατικών παραμέτρων. Η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας θεωρείται ίση με 1%.

## Πλαστικό μοντέλο

Σε αυτό το μοντέλο η τιμή της αντοχής στην αστοχία υπολογίζεται ως:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{eq2}}{3} \quad (2.7)$$

Η ροπή αστοχίας υπολογίζεται ως:

$$M_u = \frac{f_{eq2} \cdot b \cdot h^2}{6} = \frac{f_{Ftu} \cdot b \cdot h^2}{2} \quad (2.8)$$

### 2.2.1.3 Προσδιορισμός εφελκυστικής συμπεριφοράς πειραματικά κατά UNI 11180

#### Δοκίμια με εγκοπή

Όσον αφορά στο πρότυπο UNI 11188 για δοκίμια με εγκοπή που υπόκεινται σε κάμψη οι χαρακτηριστικές τιμές των ισοδύναμων αντοχών  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  υπολογίζονται για τα

διαστήματα  $0 \leq w \leq 0.6 \text{ mm}$  και  $0.6 \leq w \leq 3.0 \text{ mm}$  αντίστοιχα. Έτσι οι ισοδύναμες αντοχές  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  αντιστοιχούν σε εύρος ρωγμής  $w_{i1} = 0.3 \text{ mm}$  και  $w_{i2} = 1.8 \text{ mm}$  αντίστοιχα, που προκύπτουν ως μέσος όρος των αντίστοιχων διαστημάτων. Επίσης, για να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση της εγκοπής, η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής  $f_{Ft}$  λαμβάνεται ίση με το 90% της τιμής που προκύπτει για την πρώτη ρηγμάτωση στο πείραμα.

## Δοκίμια χωρίς εγκοπή

Τα δοκίμια που υπόκεινται σε κάμψη χωρίς εγκοπή, κατά UNI 11188, έχουν διατομές πλάτους μικρότερου από 150 mm ή κρατυνόμενη συμπεριφορά. Σε αυτή την περίπτωση οι χαρακτηριστικές τιμές  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  υπολογίζονται για τα διαστήματα  $3 \cdot w_I \leq w \leq 5 \cdot w_I$  και  $0.8 \cdot w_u \leq w \leq 1.2 \cdot w_u$ , όπου  $w_I$  το εύρος ρωγμής για το μέγιστο φορτίο στο διάστημα  $0 \leq w \leq 0.1 \text{ mm}$ . Το εύρος ρωγμής στην αστοχία λαμβάνεται  $w_u = 3 \text{ mm}$ . Έτσι οι τιμές των  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  αντιστοιχούν σε εύρος ρωγμής  $w_{i1} = 4 \cdot w_I$  και  $w_{i2} = w_u$ . Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή  $f_{Ft}$  στο σημείο που εμφανίζεται η πρώτη ρηγμάτωση,  $f_{ctf}$ , στο το πείραμα ως:

$$f_{Ft} = \frac{f_{ct,exp}}{\beta(h)} \quad (2.9)$$

$$\beta(h) = \frac{25 + 2 \cdot h^{0.7}}{2 \cdot h^{0.7}} \quad (mm) \quad (2.10)$$

### 2.2.1.4 Προσδιορισμός εφελκυστικής συμπεριφοράς πειραματικά κατά UNI 11039

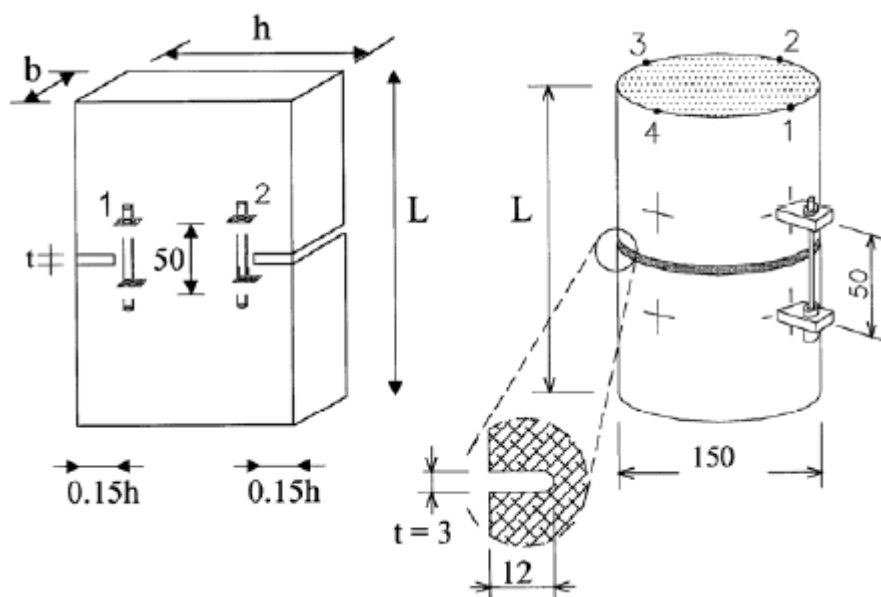
Οι παράμετροι του γραμμικού – ελαστικού μοντέλου αλλά και του πλαστικού μπορούν να προσδιοριστούν με δοκιμές σε μονο-αξονικό εφελκυσμό, όπου οι τάσεις υπολογίζονται απ' ευθείας από τον λόγο του επιβαλλόμενου φορτίου προς την επιφάνεια της διατομής του δοκιμίου. Οι τιμές  $f_{Fts}$  και  $f_{Ftu}$  υπολογίζονται ως:

$$f_{Fts} = f_{eq1} \quad (2.11)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{w_{i2}} \cdot (f_{eq1} - f_{eq2}) \quad (2.12)$$

## Δοκίμια με εγκοπή

Η μη κρατυνόμενη συμπεριφορά μπορεί να προσδιοριστεί από δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό σε δοκίμια με εγκοπή, όπως και στο πρότυπο UNI 11188. Οι χαρακτηριστικές τιμές των ισοδύναμων αντοχών  $f_{eq1}$  και  $f_{eq2}$  υπολογίζονται στα διαστήματα  $3 \cdot w_I \leq w \leq 5 \cdot w_I$  και  $0.8 \cdot w_u \leq w \leq 1.2 \cdot w_u$ , όπου  $w_I$  το εύρος ρωγμής για το μέγιστο φορτίο στο διάστημα  $0 \leq w \leq 0.05$  mm. Το εύρος ρωγμής στην αστοχία λαμβάνεται  $w_u = 1.5$  mm. Έτσι οι τιμές των  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  αντιστοιχούν σε εύρος ρωγμής  $w_{i1} = 4 \cdot w_I$  και  $w_{i2} = w_u$ . Η τιμή  $f_{Fi}$  υπολογίζεται στην πρώτη ρωγμή που αντιστοιχεί σε εύρος  $w_I$ .



Σχήμα 2.6 Δοκιμή εφελκυσμού δοκιμίων με εγκοπή

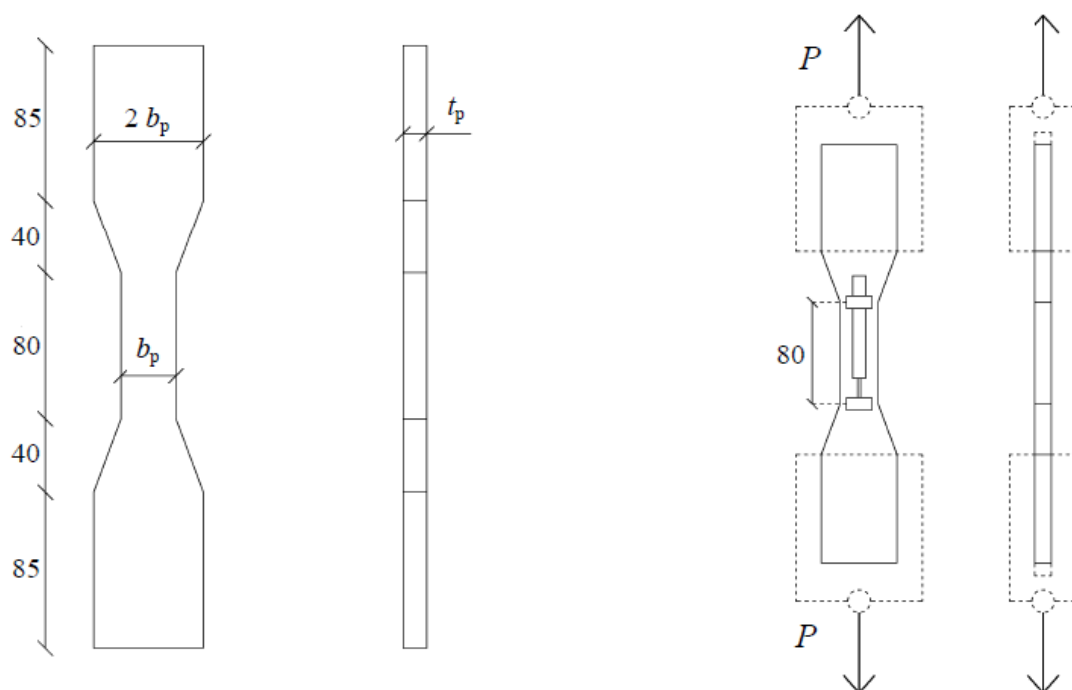
## Δοκίμια χωρίς εγκοπή

Η κρατυνόμενη συμπεριφορά μπορεί να προσδιοριστεί από δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό σε δοκίμια με εγκοπή. Οι χαρακτηριστικές τιμές  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  υπολογίζονται για τα διαστήματα  $3 \cdot w_I \leq w \leq 5 \cdot w_I$  και  $0.8 \cdot w_u \leq w \leq 1.2 \cdot w_u$ , όπου  $w_I$  το εύρος ρωγμής για το μέγιστο φορτίο στο διάστημα  $0 \leq w \leq 0.05$  mm. Η τιμή του εύρους ρωγμής αστοχίας  $w_u$  αντιστοιχεί σε μέση παραμόρφωση ίση με 1% και έτσι είναι ίση με το 1% του μήκους μέτρησης. Οι τιμές των  $f_{eq1k}$  και  $f_{eq2k}$  αντιστοιχούν σε εύρος ρωγμής  $w_{i1} = 4 \cdot w_I$  και  $w_{i2} = w_u$  αντίστοιχα.

Τα δοκίμια χωρίς εγκοπή που υπόκεινται σε μονοαξονικό εφελκυσμό έχουν την γεωμετρία που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, με συνολικό μήκος 330 mm. Το πάχος  $t_p$  πρέπει να είναι 5 φορές μεγαλύτερο από την μέγιστη διάσταση αδρανούς και όχι

μικρότερο από 13 mm. Το πλάτος  $b_p$  πρέπει να είναι 5 φορές μεγαλύτερο από την μέγιστη διάσταση αδρανούς και όχι μικρότερο από 30 mm.

Όσον αφορά στην κατασκευή των δοκιμίων, αυτά μπορούν να είτε να αποκοπούν από ένα δομικό στοιχείο ως δείγματα είτε να κατασκευαστούν ξεχωριστά. Στην περίπτωση που κατασκευαστούν ξεχωριστά πρέπει μέχρι την ημέρα της δοκιμής να βρίσκονται στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος με την κατασκευή που αφορούν και προφανώς να έχουν την ίδια ηλικία.



Σχήμα 2.7 Δοκιμή εφελκυσμού δοκιμίων χωρίς εγκοπή

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για το πείραμα πρέπει να συμφωνεί με το πρότυπο CEN-EN-12390-4 στα εξής:

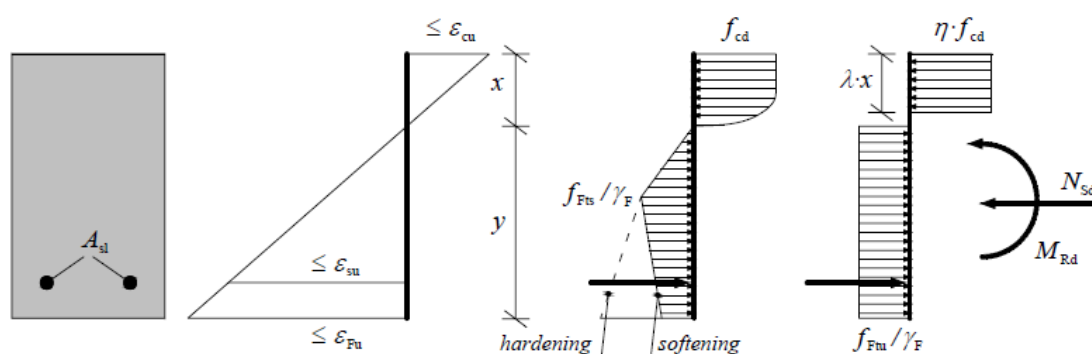
- Μέτρηση δύναμης
- Ακρίβεια στην ένδειξη δύναμης
- Συχνότητα βαθμονόμησης
- Ασφάλεια

Η μηχανή δοκιμής πρέπει να διαθέτει συσκευή που να επιτρέπει τον έλεγχο παραμορφώσεων. Το δοκίμιο είναι ασφαλισμένο σε σφιγκτήρες σε επαρκές μήκος που να επιτρέπει την διάχυση των τάσεων. Ο σφιγκτήρες πρέπει να είναι ελεύθερες στροφικά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Η μέτρηση του φορτίου πρέπει να έχει

σφάλμα όχι μεγαλύτερο από  $\pm 1\%$ . Η συσκευή μέτρησης μετακινήσεων μετράει την μετατόπιση μεταξύ δύο σημείων που απέχουν 80 mm, σε τουλάχιστον δύο αντιδιαμετρικές θέσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα.

### 2.2.1.5 Κάμψη με αξονική δύναμη

Έχοντας ως δεδομένη την αξονική δύναμη σχεδιασμού  $N_{Sd}$ , ροπή αντοχής  $M_{Rd}$  μπορεί να υπολογιστεί με τις εξισώσεις ισοδυναμίας αξονικών δυνάμεων ακριβώς όπως και στον Ευροκώδικα 2 (EN 1992) και για τους απλοποιητικούς νόμους εφελκυσμού και θλίψης με σταθερή τάση.



Σχήμα 2.8 Κάμψη με αξονική δύναμη σε Ο.Κ.Α. με τη χρήση του απλοποιητικού μοντέλου τάσεων-παραμορφώσεων, με του συντελεστές  $\eta$  και  $\lambda$  όπως στον EN1992

Οι συντελεστές  $\lambda$  και  $\eta$  είναι οι αντίστοιχοι του EN1992.

### 2.2.1.6 Διάτμηση

#### Μέλη χωρίς συμβατικό οπλισμό διάτμησης ή κάμψης

Για μέλη ινοπλισμένου σκυροδέματος με κρατυνόμενη εφελκυστική συμπεριφορά χωρίς συμβατικό οπλισμό είτε διάτμησης είτε κάμψης η κύρια εφελκυστική τάση  $\sigma_1$  δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F} \quad (2.13)$$

Μέλη με μη κρατυνόμενη εφελκυστική συμπεριφορά δεν χρησιμοποιούνται χωρίς συμβατικό οπλισμό.

#### Μέλη χωρίς οπλισμό διάτμησης, με οπλισμό κάμψης

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k \left[ 100\rho_l \left( 1 + 7.5 \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} + 0.15\sigma_{cp} \right\} b_w d \quad (\text{τάσεις σε MPa}) \quad (2.14)$$

Όπου:

$\gamma_c$  : Ο συντελεστής ασφαλείας του σκυροδέματος χωρίς ίνες

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (2.15)$$

$d$  : Το στατικό ύψος της διατομής

$\rho_l$  : Το γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού και είναι ίσο με  $\rho_l = A_{s1}/b_w d \leq 0.02$

$A_{s1}$  : Το εμβαδό διατομής του οπλισμού που εκτείνεται σε επαρκές μήκος αγκύρωσης πέρα από την διατομή ελέγχου

$f_{Ftuk}$  : Η χαρακτηριστική τιμή της απομένουσας εφελκυστικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος, για εύρος ρωγμής  $w_u = 1.5 \text{ mm}$

$f_{ctk}$  : Η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$  : Η μέση ορθή τάση που προκαλείται στην διατομή σκυροδέματος με εμβαδό  $A_c$  από την δρώσα αξονική δύναμη  $N_{Ed}$ , με θετικό πρόσημο για θλίψη.

$b_w$  : Το ελάχιστο πλάτος της διατομής εντός της εφελκυσόμενης περιοχής.

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της διατμητικής αντοχής δίνεται από τον εξής τύπο:

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15\sigma_{cp})b_w d \quad (2.16)$$

Όπου:

$$v_{min} = 0.035k^{3/2}f_{ck}^{1/2} \quad (2.17)$$

Για μέλη στα οποία τα φορτία εφαρμόζονται στην πάνω παρειά, σε απόσταση  $a$  από την στήριξη, με  $0.5d \leq a \leq 2d$ , η δρώσα τέμνουσα απομειώνεται κατά  $\beta = a/2d$ . Αυτό με την προϋπόθεση ότι ο διαμήκης οπλισμός είναι καλά αγκυρωμένος στην στήριξη. Για  $a \leq 0.5d$  λαμβάνεται  $a = 0.5d$ .

## Μέλη με οπλισμό διάτμησης και οπλισμό κάμψης

Η διατμητική αντοχή μελών ινοπλισμένου σκυροδέματος με εγκάρσιο και διαμήκη οπλισμό μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα της συνεισφορά του του οπλισμού του κορμού,  $V_{Rd,s}$  και της συνεισφοράς των ιών χάλυβα,  $V_{Rd,F}$ :

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,F} \quad (2.18)$$

Όπου:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot\psi + \cot\theta) \sin\psi \quad (2.19)$$

$\theta$  : Η γωνία που σχηματίζουν οι θλιπτήρες σκυροδέματος με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου, ο οποίος είναι κάθετος στην διεύθυνση της τέμνουσας δύναμης. Συνήθως λαμβάνεται ίση με  $45^\circ$ .

$\psi$  : Η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτμησης με τον άξονα που είναι κάθετος στη διεύθυνση της τέμνουσας δύναμης.

$z$  : Ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων που προκαλούνται από την ροπή σχεδιασμού στη διατομή ελέγχου, μέλους με σταθερό στατικό ύψος. Όταν η αξονική δύναμη της διατομής ισούται με μηδέν, η τιμή αυτή εκτιμάται  $z = 0.9d$ .

$A_{sw}$  : Το εμβαδό του οπλισμού διάτμησης, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή:

$$A_{sw,max} = \frac{0.5v f_{cd} \sin\psi}{1 - \cos\psi} \cdot \frac{b_{ws}}{f_{ywd}} \quad (2.20)$$

Όπου  $v$  μειωτικός συντελεστής του ρηγματωμένου σκυροδέματος:

$$v = 0.6 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right), \quad f_{ck} \text{ σε } MPa \quad (2.21)$$

$s$  : Η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων

$f_{ywd}$  : Η τάση διαρροής σχεδιασμού του οπλισμού διάτμησης.

Σε κάθε περίπτωση η διατμητική αντοχή δεν μπορεί να ξεπεράσει την μέγιστη θλιπτική αντοχή των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w z v f_{cd} (\cot\psi + \cot\theta)}{(1 + \cot^2\theta)} \quad (2.22)$$

## 2.2.2 RILEM TC 162-TDF

(RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, 2003)

### 2.2.2.1 Θλιπτική αντοχή

Η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα προσδιορίζεται με δοκιμές μονοτονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15 mm και ύψους 300 mm και σε κυβικά δοκίμια πλευράς 150 mm. Το πρότυπο σχεδιασμού βασίζεται στην χαρακτηριστική αντοχή των 28 ημερών από την σκυροδέτηση, που ορίζεται ως η τιμή που δεν ξεπερνά το χειρότερο 5% των δοκιμίων. Το σκληρυμένο ινοπλισμένο σκυρόδεμα κατηγοριοποιείται ανάλογα με την χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του και σε κάθε κατηγορία αναφέρεται η αντοχή κυλίνδρου  $f_{ck}$  και η αντοχή κύβου  $f_{ck,cube}$ . Οι κατηγορίες αυτές είναι ίδιες με του άοπλου σκυροδέματος κατά EN1992 και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπου  $f_{fck}$  η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κύβου,  $f_{fctm,fl}$  η μέση εφελκυστική αντοχή,  $f_{fctk,fl}$  η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σε MPa και  $E_{fcm}$  το τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε GPa. Ίνες χάλυβα χρησιμοποιούνται και σκυροδέματα υψηλής αντοχής με  $f_{ck} \geq 50$  MPa. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι ίνες δεν αστοχούν ψαθυρά πριν την εξόλκευσή τους.

Strength class of SFR-concrete	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{fck}$	20	25	30	35	40	45	50
$f_{fctm,fl}$	3.7	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8
$f_{fctk,fl}$	2.9	3.4	3.9	4.3	4.7	5.1	5.5
$E_{fcm}$	29	30.5	32	33.5	35	36	37

Πίνακας 2.2 Κατηγορίες αντοχή ινοπλισμένου – με ίνες χάλυβα – σκυροδέματος

### 2.2.2.2 Εφελκυστική αντοχή

Στην περίπτωση που είναι γνωστή μόνο η θλιπτική αντοχή  $f_{ck}$  μπορούν να εκτιμηθούν με τους παρακάτω τύπους μέση και χαρακτηριστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

$$f_{ctm,ax} = 0.3(f_{fck})^{2/3} \text{ (MPa)} \quad (2.23)$$



$$f_{fckt,ax} = 0.7f_{fct,fl} \text{ (MPa)} \quad (2.24)$$

$$f_{fct,ax} = 0.6f_{fct,fl} \text{ (MPa)} \quad (2.25)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.7f_{fctm,fl} \text{ (MPa)} \quad (2.26)$$

Σε περίπτωση διενέργειας πειραμάτων, με την ακόλουθη μέθοδο προσδιορίζεται η τιμή του ορίου αναλογικότητας:

$$f_{fctk,fl} = f_{fctms,fl} - \frac{s_p t_{10}}{\sqrt{n}} - 1.645s_p \left( 1 + \frac{s_p t_{10}}{f_{fctms,fl} \sqrt{n}} \right) \quad (2.27)$$

Όπου:

$f_{fctk,fl}$  : Η χαρακτηριστική τιμή του ορίου αναλογικότητας (MPa)

$f_{fctms,fl}$  : Η μέση τιμή των πειραματικών δεδομένων του ορίου αναλογικότητας (MPa)

$f_{fctm,fl}$  : Η μέση τιμή του ορίου αναλογικότητας (MPa)

$$f_{fctm,fl} = f_{fctms,fl} - \frac{s_p t_{10}}{\sqrt{n}} \quad (2.28)$$

$s_p$  : Τυπική απόκλιση (MPa):

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctms,fl} - f_{fct,fl})^2}{(n - 1)}} \quad (2.29)$$

$n$  : Το πλήθος των δειγμάτων

$t_{10}$  : Η τιμή της κατανομής student για 10% ανάλογα με το πλήθος των δοκιμίων. Μερικές τιμές του  $t_{10}$  δίνονται στον πίνακα 2.3.

n	3	4	5	6	8	10	12	15
$t_{10}$	1.89	1.64	1.53	1.48	1.42	1.38	1.36	1.34

Πίνακας 2.3

Η μέγιστη τιμή  $f_{fctk,fl}$  που προκύπτει από τις δύο εξισώσεις μπορεί να ληφθεί ως η εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

## Ισοδύναμη εφελκυστική αντοχή

Η ισοδύναμη εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος προσδιορίζεται μέσω δοκιμής σε κάμψη με έλεγχο παραμορφώσεων. Εδώ υπολογίζονται οι δύο παρακάτω τιμές:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (2.30)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (2.31)$$

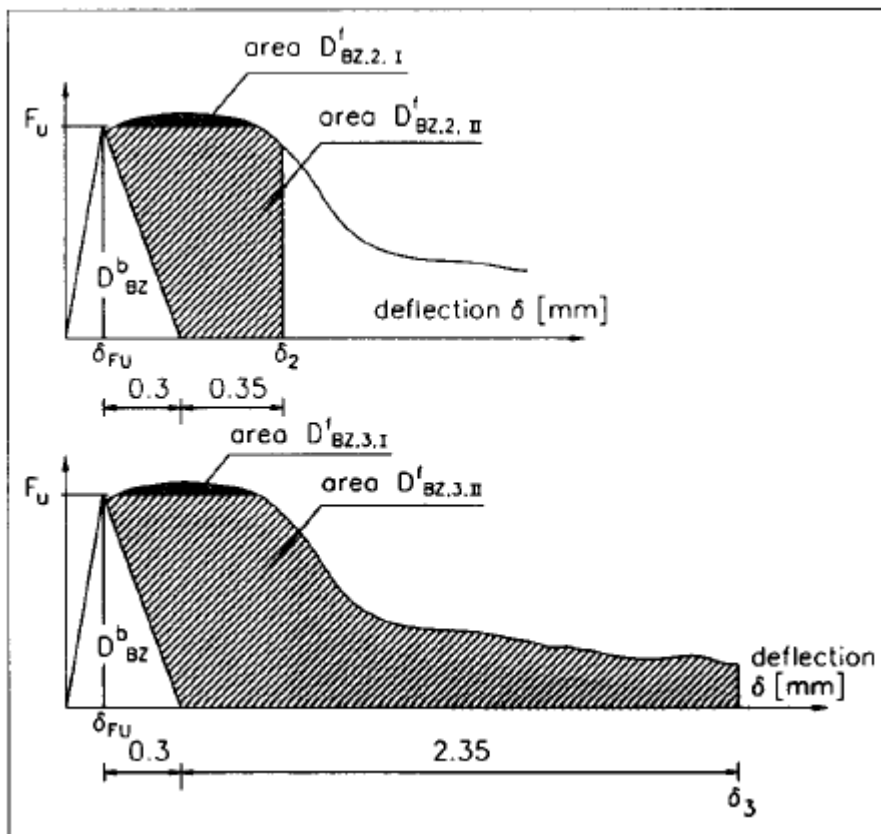
Όπου:

$b$  : Το πλάτος του δοκιμίου σε mm.

$h_{sp}$  : Η απόσταση από την εγκοπή στο κέντρο του δοκιμίου μέχρι την κορυφή της διατομής σε mm.

$D_{BZ}^b$  : Η συνεισφορά του άοπλου σκυροδέματος στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

$D_{BZ,2,I}^f$ ,  $D_{BZ,2,II}^f$ ,  $D_{BZ,3,I}^f$ ,  $D_{BZ,3,II}^f$  : Η συνεισφορά των ινών στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε Nmm που ορίζεται από τα αντίστοιχα εμβαδά που φαίνονται στην καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης.



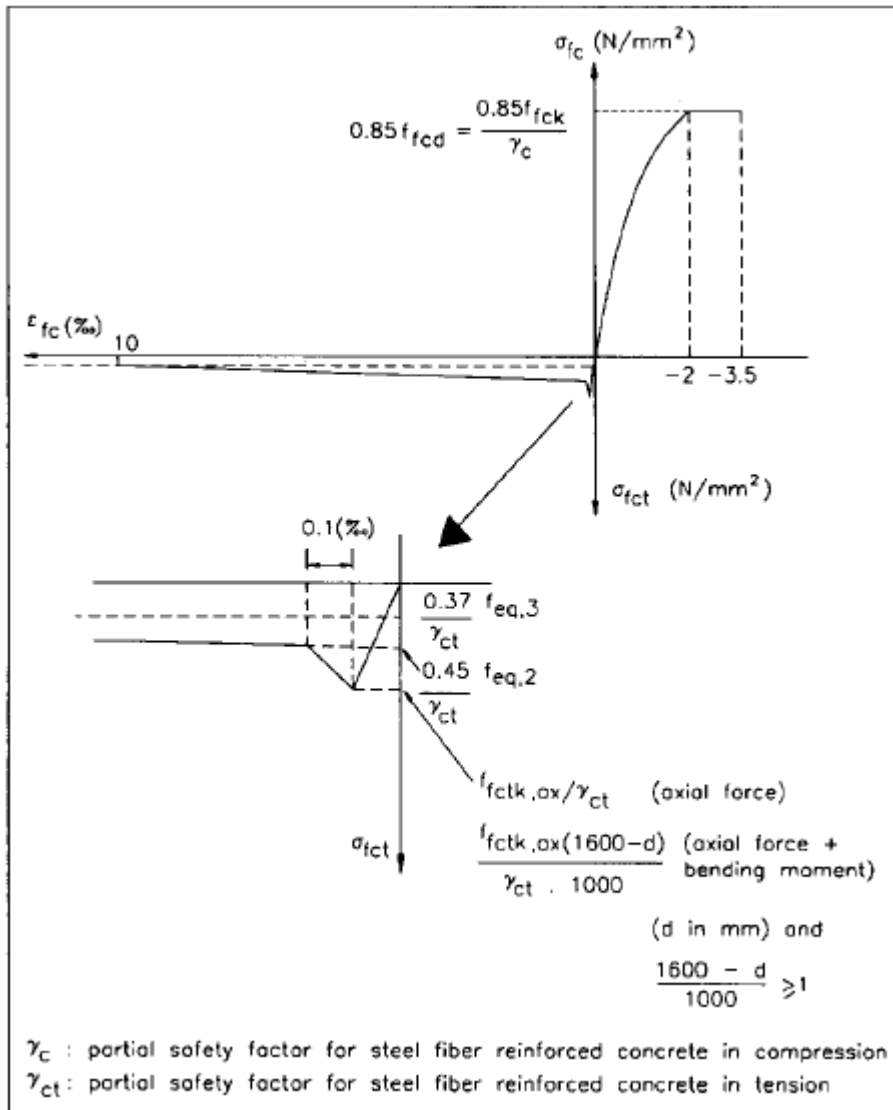
Σχήμα 2.9 Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης

### 2.2.2.3 Κάμψη και αξονική δύναμη

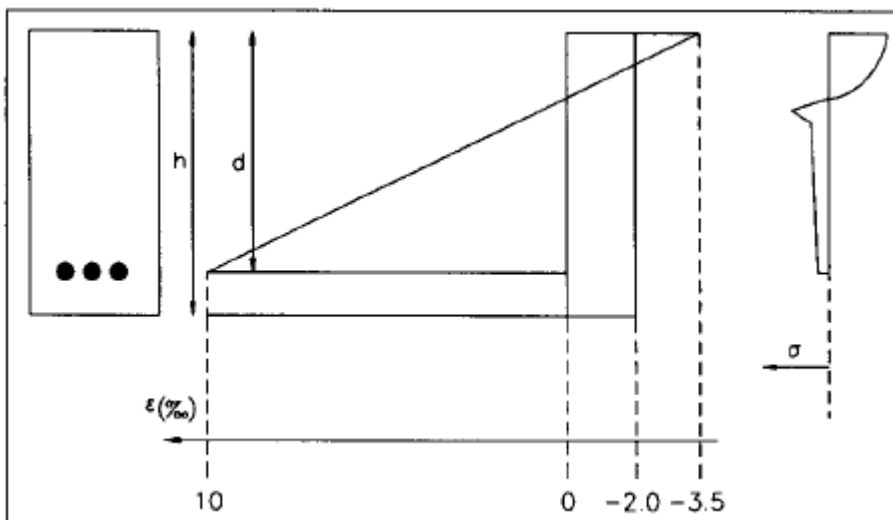
Για τον καθορισμό της αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε ΟΚΑ γίνονται οι εξής υποθέσεις:

- Οι διατομές παραμένουν επίπεδες σύμφωνα με την θεωρία Bernoulli.
- Οι τάσεις του ινοπλισμένου σκυροδέματος τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό λαμβάνονται από τα παρακάτω διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.
- Για τις τάσεις των ράβδων οπλισμού γίνεται θεώρηση διγραμμικού διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων.
- Για διατομές που υπόκεινται σε καθαρή θλίψη η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος λαμβάνεται -0.002. Για διατομές που υπόκεινται ταυτοχρόνως σε θλίψη και κάμψη ή απλή κάμψη η οριακή θλιπτική παραμόρφωση λαμβάνεται -0.0035. Σε ειδικές περιπτώσεις γίνεται η θεώρηση ότι η παραμόρφωση είναι -0.002 στα 3/7 του ύψους της διατομής από την πλέον θλιβόμενη παρειά.

- Για ινοπλισμένο σκυρόδεμα που φέρει επιπλέον και ράβδους οπλισμού, η παραμόρφωση στην στάθμη του οπλισμού περιορίζεται στο 0.010.
- Για την εξασφάλιση καλύτερης αγκύρωσης, η μέγιστη παραμόρφωση ΟΚΑ περιορίζεται σε 1.5 mm. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε δύναμη:  $F_3 = \left( \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right)$  από την οποία υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή  $f_{eq,3}$ . Αν τιμές του εύρους ρωγμής μεγαλύτερες του  $w = 1.5$  mm είναι αποδεκτές, οι τιμές των τάσεων που αντιστοιχούν σε αυτά τα εύρη ρωγμών και μετρήθηκαν σε δοκιμές κάμψης πρέπει να ενταχθούν στους υπολογισμούς. Επιπλέον, συνίσταται αυτή η τιμή που θα αντικαταστήσει, σε αυτή την περίπτωση, την  $f_{eq,3}$ , να μην είναι μικρότερη από  $1 \text{ N/mm}^2$ .
- Σε κάποιες περιπτώσεις η συνεισφορά των ινών κοντά στις παρειές των δομικών στοιχείων είναι μειωμένη. Έτσι οι ίνες μέχρι μία ορισμένη απόσταση από την επιφάνεια δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη. Συγκεκριμένα, για κατηγορία έκθεσης 2, αν το εύρος ρωγμών είναι μεγαλύτερο από 0.2 mm, το ύψος τη ρηγματωμένης ζώνης πρέπει να απομειωθεί κατά 15 mm. Αυτός ο κανόνας εφαρμόζεται μόνο σε ΟΚΑ. Για κατηγορίες έκθεσης 3 και άνω εφαρμόζονται ειδικές διατάξεις.



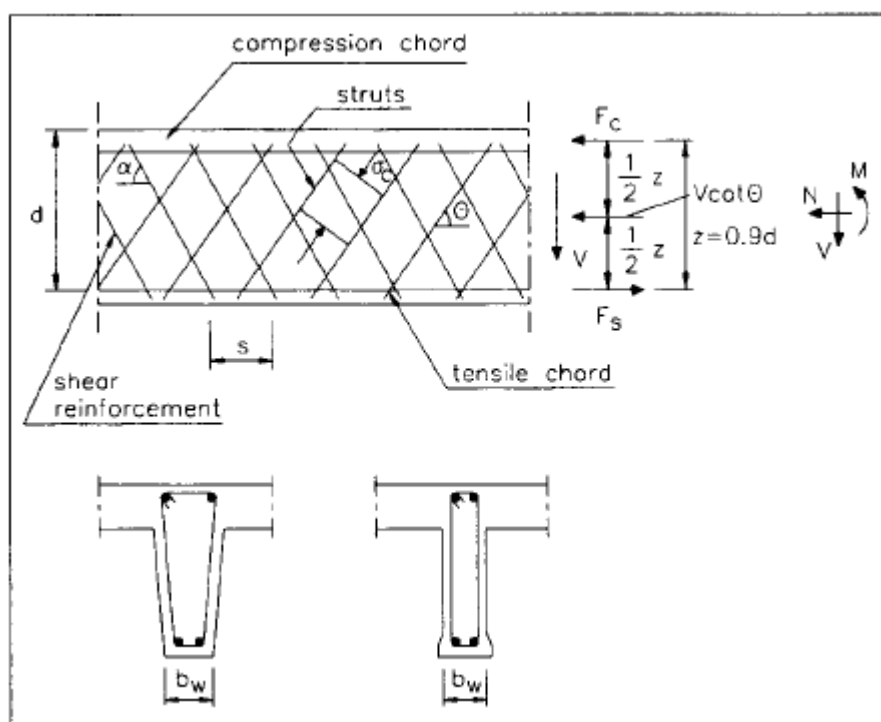
Σχήμα 2.10 Καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων



Σχήμα 2.11 Κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής

### 2.2.2.4 Διάτμηση

Οι υπολογισμοί που θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν σε δοκούς, υποστυλώματα και σε δίσκους που διαθέτουν οπλισμό έναντι κάμψης και υπόκεινται σε διάτμηση. Σε περίπτωση μη ύπαρξης διαμήκους οπλισμού ή θλιβόμενης ζώνης δεν μπορεί να υπάρξει μία γενικώς αποδεκτή υπολογιστική μέθοδος για την συμβολή των ινών χάλυβα στην διατμητική αντοχή. Για τον σχεδιασμό έναντι τέμνουσας μελών με σταθερό ύψος, το μέλος θεωρείται ότι αποτελείται από θλιβόμενες και εφελκυστικές ζώνες, τα κέντρα των οποίων απέχουν κατά απόσταση ίση με τον μοχλοβραχίονα  $z$  των εσωτερικών δυνάμεων. Η διατμητική ζώνη έχει ύψος ίσο με  $z$  και πλάτος  $b_w$ . Οι θεωρήσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.12.2 Μοντέλο θλιπτήρα – ελκυστήρα

Όπου:

$\alpha$  : Η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτμησης σε σχέση με τον διαμήκη άξονα ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )

$\theta$  : Η γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέματος με τον διαμήκη άξονα

$F_s$  : Η εφελκυστική δύναμη του διαμήκους οπλισμού (N)

$F_c$  : Η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος κατά τη διεύθυνση του διαμήκους άξονα (N)

$b_w$  : Το ελάχιστο πλάτος κορμού (mm)

$d$  : Το στατικό ύψος της διατομής (mm)

$s$  : Η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων (mm)

$z$  : Ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (mm) , που αντιστοιχεί στη μέγιστη καμπτική ροπή ενός μέλους με σταθερό ύψος διατομής. Η τιμή του μπορεί να εκτιμηθεί ως  $z = 0.9 d$ .

Η διατμητική αντοχή σχεδιασμού μίας δοκού που φέρει διατμητικό οπλισμό και ίνες χάλυβα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (2.32)$$

Όπου:

$V_{cd}$  : Η διατμητική αντοχή του μέλους χωρίς οπλισμό διάτμησης, η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{cd} = \left[ 0.12k(100\rho_l f_{fck})^{\frac{1}{3}} + 0.15\sigma_{cp} \right] b_w d \quad (N) \quad (2.33)$$

Όπου:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, k \leq 2 \quad (d \text{ σε } mm) \quad (2.34)$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_w d} \leq 2\% \quad (2.35)$$

$A_s$  : Το εμβαδό του εφελκόμενου οπλισμού που δεν εκτείνεται – πέρα από την διατομή ελέγχου – λιγότερο από « $d$  + μήκος αγκύρωσης» ( $mm^2$ )

$b_w$  : Το ελάχιστο πλάτος της διατομής εντός του στατικού ύψους  $d$  (mm)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (2.36)$$

$N_{sd}$  : Η αξονική δύναμη της διατομής, με θετικό πρόσημο για θλίψη (N)

$V_{fd}$  : Η συμβολή των ινών χάλυβα στην διατμητική αντοχή, που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{fd} = k_f k_l \tau_{fd} b_w d \quad (N) \quad (2.37)$$

Όπου:

$k_f$  : Συντελεστής που λαμβάνει υπ' όψη την συμβολή των πελμάτων διατομών σχήματος «Τ».

$$k_f = 1 + n \left( \frac{b_f}{b_w} \right) \left( \frac{h_f}{d} \right) \leq 1.5 \quad (2.38)$$

Όπου:

$h_f$  : Το ύψος των πελμάτων (mm)

$b_f$  : Το πλάτος των πελμάτων (mm)

$b_w$  : Το πλάτος του κορμού (mm)

$$n = \frac{b_f - b_w}{h_f}, \text{ με } n \leq 3 \text{ και } n \leq \frac{3b_w}{h_f} \quad (2.39)$$

$$k_l = \frac{1600 - d}{1000} \geq 1, d \text{ σε } (mm) \quad (2.40)$$

$\tau_{fd}$  : Η τιμή σχεδιασμού της αύξησης της διατμητικής αντοχής, λόγω των ιών χάλυβα

$$\tau_{fd} = 0.12 f_{eqk,3} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (2.41)$$

$V_{wd}$  : Η συνεισφορά των διατμητικού οπλισμού συνδετήρων, που δίνεται από τον τύπο:

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9 d f_{ywd} (1 + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2.42)$$

Όπου:

$s$  : Η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων (mm)

$\alpha$  : Η γωνία που σχηματίζουν οι συνδετήρες με τον διαμήκη άξονα

$f_{ywd}$  : Η διατμητική αντοχή σχεδιασμού των συνδετήρων (N/mm<sup>2</sup>)

Για τον έλεγχο των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος, η  $V_{Rd2}$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{Rd2} = \left( \frac{1}{2} v f_{cd} \right) b_w 0.9 d (1 + \cot \alpha) \quad (N) \quad (2.43)$$



Όπου:

$$v = 0.7 - \frac{f_{fck}}{200} \geq 0.5, \quad f_{ck} \sigma \varepsilon \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (2.44)$$

### **3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η περιγραφή πειράματος που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ και αναλύεται στο paper «Πειραματική Διερεύνηση Δοκών Από Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα Χωρίς Οπλισμό Διάτμησης», (Ζέρης, Βιτάλης, & Κοντογιάννης) και στην διπλωματική εργασία «Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονοτονική φόρτιση», (Ζέρης & Βιτάλης, 2008). Στο εν λόγω πείραμα διερευνάται η καμπτική και διατμητική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος χωρίς οπλισμό διάτμησης σε αμφιέριστες δοκούς με διαφορετική πυκνότητα ινών, που υπόκεινται σε κάμψη τεσσάρων σημείων.

#### **3.2 Γενική Περιγραφή**

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκοί ινοπλισμένου σκυροδέματος με εφελκόμενο οπλισμό κάμψης αλλά χωρίς οπλισμό διάτμησης, με διαφορετική περιεκτικότητα και είδος ινών, για να καταδειχθεί η απόκριση του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση, χωρίς την συμβολή συνδετήρων. Η διατομή είχε πλάτος 15 cm και ύψος 30 cm, ενώ το μήκος των δοκών ήταν 2.31 m και το σχήμα τους διαμορφώθηκε σε σιδηροτύπους του εργαστηρίου με κατάλληλες διαστάσεις. Η δοκιμή στην οποία υποβλήθηκαν ήταν κάμψη τεσσάρων σημείων. Το θεωρητικό άνοιγμα από ακραία στήριξη σε ακραία στήριξη ήταν 1.96 m. Η επιβολή του φορτίου έγινε στο μέσον μιας δοκού IPE 240, η οποία μεταβίβαζε το φορτίο στα δοκίμια μέσω δύο στηρίξεων στα άκρα της IPE 240 που απείχαν 0.88 m. Συνεπώς το διατμητικό μήκος στα άκρα ήταν 0.54 m και το μήκος καθαρής κάμψης ήταν 0.88 m.

#### **3.3 Σύνθεση Ινοπλισμένου Σκυροδέματος Δοκιμίων**

Τα 6 δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιείχε 3 δοκίμια με ίνες DRAMIX RC65/35BN, (L = 35 mm, L/D = 65) σε περιεκτικότητες κατ' όγκο  $V_f = 1.2$

%,  $V_f = 1.8\%$  και  $V_f = 2.4\%$  αντίστοιχα, οι οποίες αντιστοιχούν σε  $100 \text{ kg/m}^3$ ,  $150 \text{ kg/m}^3$  και  $200 \text{ kg/m}^3$ . Τα δοκίμια αυτά από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως D100, D150 και D200 αντίστοιχα, όπου D=Dramix και ο εκάστοτε αριθμός υποδηλώνει την περιεκτικότητα των ινών σε  $\text{kg/m}^3$ . Στα δοκίμια της δεύτερης ομάδας χρησιμοποιήθηκε μείγμα τριών ινών της ΕΤΑΛ σε αναλογία 1:1:2 : μεγάλη ίνα ( $L = 80 \text{ mm}$ ,  $L/D = 80$ ) χωρίς κωδική ονομασία, μεσαία ίνα ( $L = 60 \text{ mm}$ ,  $L/D = 60$ ) 600 023, μικρή ίνα ( $L = 31 \text{ mm}$ ,  $L/D = 40$ ) 600 002, με τις ίδιες περιεκτικότητες που τέθηκαν στην πρώτη ομάδα. Τα δοκίμια αυτής της ομάδας από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως M100, M150 και M200 αντίστοιχα, όπου M=Μείγμα και ο εκάστοτε αριθμός υποδηλώνει την περιεκτικότητα των ινών σε  $\text{kg/m}^3$ . Όλες οι ίνες που αναφέρθηκαν έχουν μια κύρτωση στα άκρα τους για καλύτερη αγκύρωση.

Για την παρασκευή του σκυροδέματος όλων των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά στις εξής δΟΣΟΛΟΓΙΕΣ:

Τσιμέντο τύπου ΙΙ:  $280 \text{ kg/m}^3$

Άμμος:  $819 \text{ kg/m}^3$

Γαρμπίλι:  $700 \text{ kg/m}^3$

Χαλίκι:  $350 \text{ kg/m}^3$

Νερό:  $171 \text{ kg/m}^3$

Επιπλέον, για την καλύτερη εργασιμότητα χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής τύπου SIKA VISCOCRETE 4000, ανάλογα με την περιεκτικότητα ινών, ως εξής:

Για τα δοκίμια με ίνες Dramix:

- $V_f = 1.2\%$  :  $3.99 \text{ kg/m}^3$  ρευστοποιητή

- $V_f = 1.8\%$  :  $5.985 \text{ kg/m}^3$  ρευστοποιητή

- $V_f = 2.4\%$  :  $5.985 \text{ kg/m}^3$  ρευστοποιητή

Για τα δοκίμια με μείγμα ινών της ΕΤΑΛ:

- $V_f = 1.2\%$  :  $4.988 \text{ kg/m}^3$  ρευστοποιητή

- $V_f = 1.8\%$  :  $6.983 \text{ kg/m}^3$  ρευστοποιητή

- $V_f = 2.4\%$  :  $7.98 \text{ kg/m}^3$  ρευστοποιητή

Κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, πέρα από τα δοκίμια των δοκών, κατασκευάστηκαν επιπροσθέτως κυλινδρικά δοκίμια ύψους 30 cm και διαμέτρου 15 cm για δοκιμή θλίψης. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε μετά την παρέλευση περισσότερων από 28 ημερών για κάθε δοκίμιο. Κάτα την διαδικασία αυτή προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος  $f_{cm}$  και με βάση αυτή υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας ως:  $E_c = 9500 \cdot (f_{cm})^{1/3}$  κατά RILEM TC 162 – TDF.

Δοκίμιο	Φορτίο Αστοχίας (kN)	$f_{cm}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
D100	614	34.66	30.97
D150	568	32.1	30.19
D200	630	35.6	31.25
M100	583	32.93	30.45
M150	579	32.73	30.39
M200	468	26.4	30

Πίνακας 3.0.1 Αποτελέσματα δοκιμής σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων

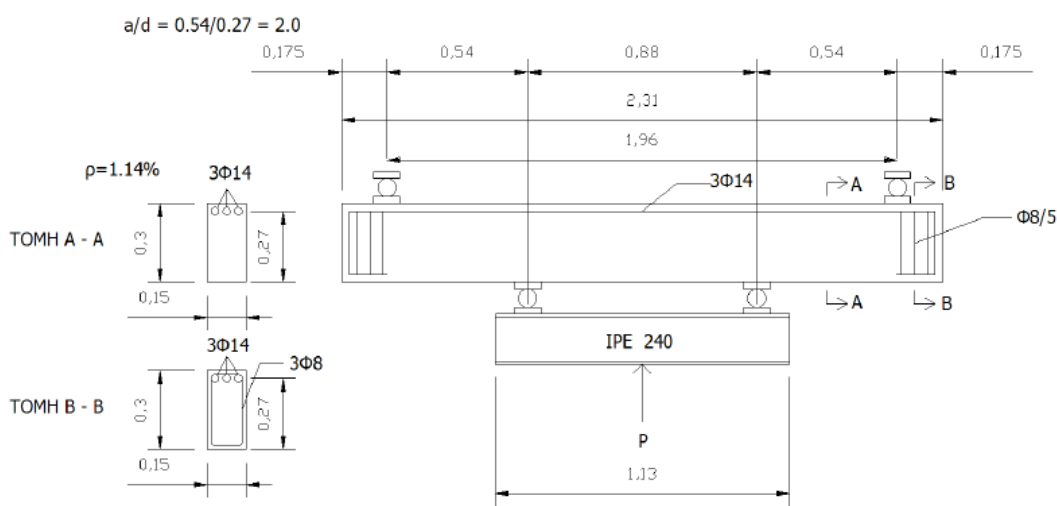
### 3.4 Οπλισμός Δοκών

Για την όπλιση των δοκών χρησιμοποιήθηκε χάλυβας κατηγορίας S500. Ο διαμήκης οπλισμός που τέθηκε έναντι κάμψης ήταν στην εφελκόμενη μόνο ζώνη: 3 ράβδοι ονομαστικής διαμέτρου 14 mm ( $\Phi 14$ ) με νευρώσεις, οι οποίες αγκυρώθηκαν στα άκρα καμπτόμενες προς τα άνω. Ο οπλισμός αυτός αντιστοιχεί σε γεωμετρικό ποσοστό  $\rho = 1.14\%$ . Επιπλέον τοποθετήθηκαν 3 συνδετήρες ονομαστική διαμέτρου 8 mm ( $\Phi 8$ ) σε απόσταση 50 mm μεταξύ τους για την στήριξη των διαμήκων ράβδων, στο άτονο τμήμα μεταξύ της ακραίας στήριξης και του άκρου της δοκού. Η επικάλυψη των διαμήκων οπλισμών ήταν τέτοια ώστε να προκύπτει στατικό ύψος  $d = 27$  cm, ίσο με το μισό του διατμητικού μήκους 0.54 m.

### 3.5 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε τις αμφιέριστες δοκούς, οι στηρίξεις των οποίων υλοποιήθηκαν με κυλίσεις χαλύβδινων κυλίνδρων και μεταλλικές πλάκες οι οποίες στερεώθηκαν με ντίτζες σε μεταλλικά πλαίσια με διατομές HEA 320 που πακτώθηκαν στο έδαφος. Το θεωρητικό άνοιγμα μεταξύ αυτών των ακραίων στηρίξεων ήταν 1.96 m. Η φόρτιση έγινε με τη βοήθεια ενός υδραυλικού εμβόλου κατασκευής MTS, το οποίο ήταν πακτωμένο στο έδαφος. Συγκεκριμένα πάνω στο έμβολο ήταν

τοποθετημένη μία δύσκαμπτη δοκός IPE 240 μήκους 1.13 m, έτσι ώστε το έμβολο να ισαπέχει από τα άκρα της, στα οποία υπήρχαν στηρίξεις χαλύβδινων κυλινδρικών κυλίσεων και πλακών που συνέδεαν την IPE 240 με την δοκό ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η μεταξύ τους απόσταση ήταν 0.88 m από κέντρο σε κέντρο στήριξης. Με αυτόν τον τρόπο η κάθε στήριξη μετέφερε στο δοκίμιο στα δύο αυτά σημεία το μισό φορτίο που επέβαλε το έμβολο και πρόκυπτε κάψη τεσσάρων σημείων με μήκος καθαρής κάμψης 0.88 m και διατμητικό μήκος  $0.54 \text{ m} = 2 \cdot d = 2 \cdot 0.27$  εκατέρωθεν.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη

### 3.6 Ενοργάνωση Δοκιμίων

Στη δοκό τοποθετήθηκαν συνολικά 10 επαγωγικά βαλόμετρα. Κατ' αρχάς τοποθετήθηκε ένα βαλόμετρο κατακόρυφα στο μέσον της δοκού που μετρούσε την κατακόρυφη μετακίνηση. Η μετακίνηση αυτή μετρούνταν επίσης ψηφιακά από το δυναμόμετρο του εμβόλου. Δύο ακόμη επαγωγικά βλόμετρα τοποθετήθηκαν στις ακραίες στηρίξεις της δοκού για την καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων σε αυτές. Επιπλέον, εντός του τμήματος σταθερής ροπής και μηδενικής τέμνουσας, στο μέσον της δοκού τοποθετήθηκαν 5 βαλόμετρα οριζόντια καθ' ύψος της διατομής για την μέτρηση των διαμήκων παραμορφώσεων και τον προσδιορισμό του ουδέτερου άξονα, με μήκος μέτρησης περίπου 25 cm. Τέλος, εντός του διατμητικού μήκους, στην περιοχή σταθερής τέμνουσας, σε κάθε άκρο τοποθετήθηκαν βαλόμετρα διαγώνια, κάθετα στην αναμενόμενη διατμητική ρωγμή, με σκοπό την καταγραφή των διατμητικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 3.2 Φωτογραφία πειραματικής διάταξης από το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ

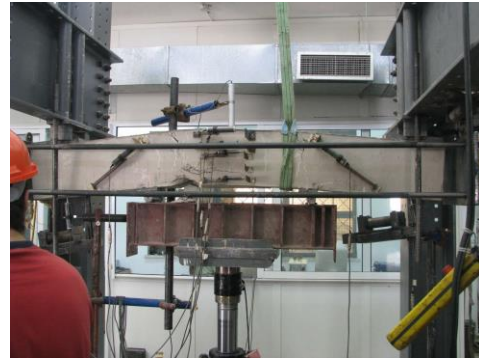
### **3.7 Αποτελέσματα Πειράματος**

Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας στα δοκίμια ήταν η διατμητική με την εμφάνιση ευδιάκριτης διαγώνιας διατμητικής ρωγμής εντός ενός εκ των δύο διατμητικών ανοιγμάτων, πέραν των αρχικών – μικρού εύρους – ρωγμών που εμφανίστηκαν αλλά δεν επεκτάθηκαν στην αστοχία. Τα δοκίμια που παρουσίασαν την εν λόγω μορφή αστοχίας ήταν τα: D100, D150, M150. Διατμητική ήταν επίσης και η αστοχία του M200, το οποίο δεν παρουσίασε μία ευδιάκριτη ρωγμή αλλά δύο διαδοχικές, εντός του ίδιου διατμητικού ανοίγματος. Τέλος, τα δοκίμια D200 και M100 ήταν τα μόνα που αστόχησαν καμπτικά, με την εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών εντός της περιοχής σταθερής ροπής και μηδενικής τέμνουσας. Στο D200 η ρωγμή ήταν ευδιάκριτη και εμφανίστηκε εντός του μήκους μέτρησης των οριζόντιων βαλομέτρων, εν αντιθέσει με το M100 που η ρωγμή ήταν εκτός του οριζοντίου μήκους μέτρησης.

D100



M100



D150



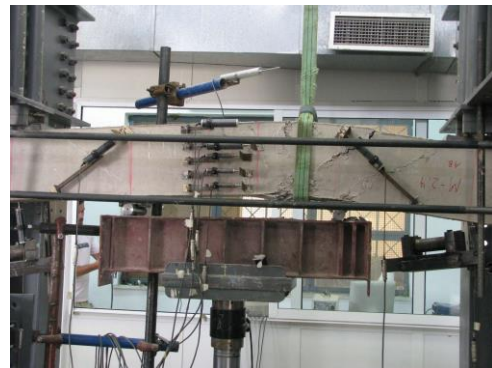
M150



D200



M200



Σχήμα 3.3 Εικόνες των δοκιμίων κατά την αστοχία

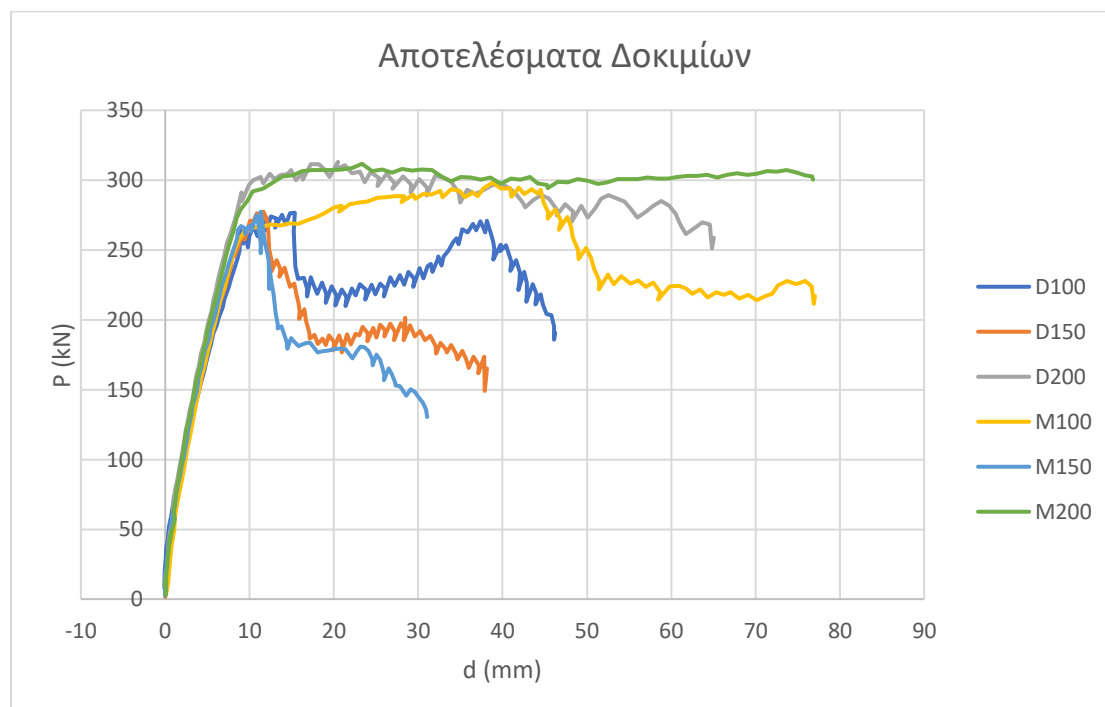
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου  $P$  (kN) από το υδραυλικό έμβολο και η αντίστοιχη κατακόρυφη μετακίνηση  $d$  (mm) στο μέσον της δοκού, στις φάσεις ρηγμάτωσης, διαρροής και μέγιστης αντοχής.

Δοκίμιο	Ρηγμάτωση		Διαρροή		Μέγιστη Αντοχή	
	$P_{cr}$ (kN)	$d_{cr}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$d_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$d_u$ (mm)
D100	41.6	0.3	261.8	9.61	276.2	14.72
D150	71.8	1.5	272.2	9.9	277.9	10.75
D200	75.8	1.2	299.7	10.15	310.8	20.91
M100	50.7	0.96	263.9	9.16	299.8	38.61
M150	62.8	0.97	266.5	8.70	277	10.69
M200	25	0.23	289.4	10.23	310.8	23.36

Πίνακας 3.2 Τιμές φορτίου – παραμόρφωσης στα χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών .



Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες συνολικού φορτίου  $P$  – παραμόρφωσης  $\delta$ . Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια στην πλειοψηφία τους, μετά τη διαρροή, παρουσιάζουν ανοδικό κλάδο που στη συνέχεια γίνεται καθοδικός και σε κάποιες περιπτώσεις γίνεται και πάλι ανοδικός. Το εύρος του μετελαστικού κλάδου ποικίλει και φαίνεται να είναι ανάλογο της περιεκτικότητας των ινών.



Σχήμα 3.4 Αποτελέσματα πειράματος – Καμπύλε φορτίου – μετακίνησης

Τα παραπάνω αποτελέσματα στη συνέχεια θα αποτελέσουν σημεία αναφοράς και θα συγκριθούν με αυτά που θα προκύψουν για τα συγκεκριμένα δοκίμια από την προσομοίωση τους με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της βιβλιογραφίας.

## 4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση των καμπυλών θλίψης και εφελκυσμού του ινοπλισμένου σκυροδέματος με βάση τα paper “Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression”, (Nataraja, Dhang, & Gupta, 1999) και “FLEXURAL BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE” (Lok & Pei, 1998), αλλά και το μέτρον ελαστικότητας κατά RILEM TC 162 – TDF.



## **4.2 Προσδιορισμός Καμπύλης Θλίψης Ινοπλισμένου Σκυροδέματος**

Η καμπύλη θλίψης θα προκύψει με βάση τις εξισώσεις των (M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gurta), που βασίστηκαν σε πειραματικά δεδομένα και από αυτά εξήχθησαν οι τελικές εξισώσεις με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και της γραμμικής παλινδρόμησης.

### **4.2.1 Πείραμα**

Σκοπός του πειράματος ήταν να εξετάσει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και να μελετήσει την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του ινοπλισμένου σκυροδέματος ίνες χάλυβα κυρτωμένα άκρα.

### **4.2.2 Υλικά και αναλογίες**

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας 53 σύμφωνα με το (IS: 12269-198), με θλιπτική αντοχή 28 ημερών 57 MPa. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε φυσική άμμος ποταμού και όσον αφορά στα αδρανή, ήταν θραυστά με μέγιστη διάσταση 20 mm. Νερό χρησιμοποιήθηκε για την ανάμειξη, αλλά και για την διατήρηση των δοκιμίων μέχρι την δοκιμή. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυρτωμένες με εφελκυστική αντοχή 550 MPa. Το μήκος τους ήταν είτε 27.5 mm με λόγο μήκους προς διάμετρο  $l/d = 55$ , είτε 41 mm με  $l/d = 82$ .

Συνολικά κατασκευάστηκαν 14 δοκίμια. Από αυτά τα 7 δοκίμια (M1-M7) αποτελούνταν από σκυρόδεμα κατηγορίας M20 με τις απαιτούμενες αναλογίες κατά (IS:10262-1982):  $397 \text{ kg/m}^3$  τσιμέντο,  $562 \text{ kg/m}^3$  άμμος,  $1152 \text{ kg/m}^3$  χαλίκι και λόγο νερό/τσιμέντο = 0.49. Το δοκίμιο M1 δεν περιείχε ίνες, ενώ τα δοκίμια M2-M4 περιείχαν ίνες μήκους 27.5mm σε αναλογία 39, 58 και  $57 \text{ kg/m}^3$  αντίστοιχα. Τα δοκίμια M5-M7 περιείχαν ίνες μήκους 41 mm σε αναλογίες αντίστοιχες με αυτές των M2-M4. Τα υπόλοιπα 7 δοκίμια (M8-M14) αποτελούνταν από σκυρόδεμα κατηγορίας M30 κατά (IS:10262-1982) με αναλογίες:  $517 \text{ kg/m}^3$  τσιμέντο,  $493 \text{ kg/m}^3$  άμμος,  $1122 \text{ kg/m}^3$  χαλίκι και λόγο νερό/τσιμέντο = 0.38 και οι περιεκτικότητες τους και το είδος των ινών ήταν ανάλογα με των δοκιμίων M1-M7. Οι κατηγορίες σκυροδέματος M20 και M30 έχουν μέση θλιπτική αντοχή 28 ημερών 28 MPa και 40 MPa αντίστοιχα.

### **4.2.3 Διαδικασία Κατασκευής Δοκιμίων**

Αρχικά τα αδρανή αναμείχθηκαν με το τσιμέντο χωρίς την παρουσία νερού για 1 λεπτό σε αναμεικτήρα χωρητικότητας  $0.06 \text{ m}^3$ . Έπειτα η ανάμειξη συνεχίστηκε για άλλο 1

λεπτό, κατά τη διάρκεια του οποίου προστέθηκε περίπου το 80% του νερού. Μετά από άλλο 1 λεπτό ανάμειξης άρχισε η διαδικασία προσθήκης των ινών, η οποία διήρκεσε άλλα 2 έως 3 λεπτά. Τέλος, προστέθηκε το υπόλοιπο νερό μαζί με υπερπλαστικοποιητή και συνεχίστηκε για 2 λεπτά η ανάμιξη.

Για κάθε μείγμα κατασκευάστηκαν 5 κυλινδρικά δοκίμια, διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm. Με το πέρας 24<sup>ωv</sup> ωρών τα δοκίμια βγήκαν από το καλούπι και παρέμειναν σε νερό μέχρι την ημέρα της δοκιμής κατά (IS:516-1959. Method of test for strength of concrete, 1959).

#### **4.2.4 Δοκιμή Θλίψης**

Η δοκιμή έγινε μετά από 28 ημέρες από την σκυροδέτηση, σύμφωνα με τα πρότυπα (ASTM C39 / C39M-14, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2014), με ένα έμβολο μεγίστου φορτίου 3000 kN. Ακόμη χρησιμοποιήθηκαν τρεις ψηφιακοί μετρητές παραμορφώσεων. Μετρήσεις λαμβάνονταν με βήμα 50 kN.

## 4.2.5 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τις εξισώσεις που θα αναλυθούν παρακάτω.

Δοκίμιο	Πειράματα				Εξισώσεις			
	$f'_{cf}$	$\epsilon_{of}$	TR	RI	$f'_{cf}$	$\epsilon_{of}$	TR1	TR2
M1	29.42	0.0025	-	0	29.42	0.0025	0.6	-
M2	36.03	0.003	0.73	0.9	31.36	0.003	0.69	0.48
M3	33.48	0.0033	0.76	1.33	32.29	0.0033	0.73	0.6
M4	38.48	0.0035	0.72	1.79	33.29	0.0036	0.78	0.68
M5	32.83	0.0032	0.77	1.34	32.31	0.0033	0.73	0.6
M6	36.31	0.0039	0.78	1.98	33.7	0.0037	0.79	0.71
M7	34.7	0.0044	0.79	2.67	35.19	0.0041	0.86	0.78
M8	43.01	0.0027	-	0	43.01	0.0027	0.55	-
M9	45.84	0.0031	0.66	0.9	44.95	0.0032	0.64	0.54
M10	41.59	0.0033	0.69	1.33	45.88	0.0035	0.68	0.64
M11	46.97	0.0034	0.75	1.79	46.88	0.0038	0.73	0.7
M12	45.65	0.0035	0.71	1.34	45.9	0.0035	0.68	0.64
M13	46.12	0.0035	0.72	1.98	47.29	0.0039	0.74	0.72
M14	49.23	0.0039	0.77	2.67	48.78	0.0043	0.81	0.77

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα πειραμάτων (M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta)

$f'_{cf}$  : Η μέγιστη θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος

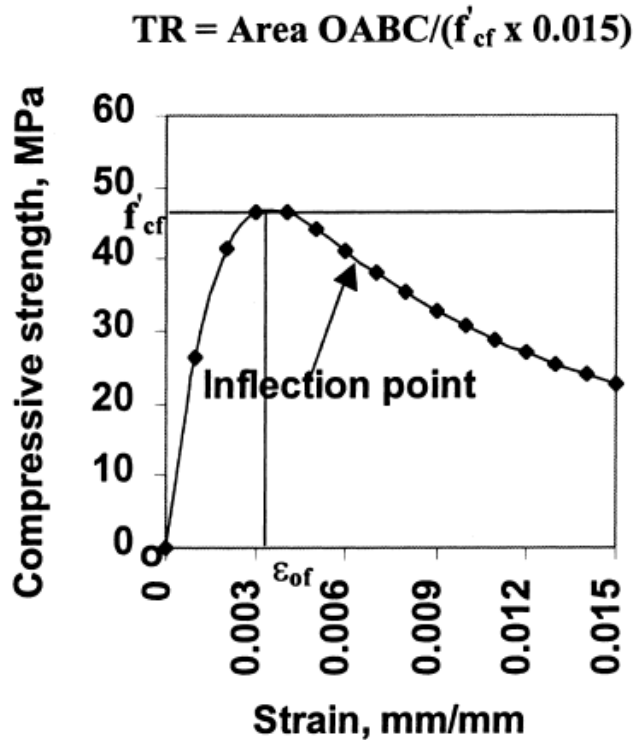
$\epsilon_{of}$  : Η θλιπτική παραμόρφωση στη μέγιστη θλιπτική αντοχή

TR: (Toughness Ratio) Ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού του καθοδικού κλάδου της καμπύλης θλίψης προς το εμβαδό του ανοδικού κλάδου.

RI: (Reinforcing Index) Ορίζεται ως  $RI = w_f \cdot l/d$ , όπου  $w_f$  η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες.

TR1: TR με βάση την εξίσωση

TR2: TR με βάση τις αναλυτικές καμπύλες



Σχήμα 4.1 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων – παραμορφώσεων (M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta)

#### 4.2.6 Διαμόρφωση Εξισώσεων

Με βάση τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα με τη μέθοδο της παλινδρόμησης και των ελαχίστων τετραγώνων προέκυψαν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$f'_{cf} = f_c + 2.1604 RI \quad (4.1)$$

Όπου  $f'_{cf}$  η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος και  $f_c$  η αντίστοιχη του απλού σκυροδέματος.

$$\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.0006 RI \quad (4.2)$$

Όπου  $\epsilon_{of}$  η ανηγμένη παραμόρφωση στην μέγιστη τάση του ινοπλισμένου σκυροδέματος και  $\epsilon_o$  η αντίστοιχη του απλού σκυροδέματος. Η ποσότητα  $\epsilon_o$  μπορεί να ληφθεί ίση με 0.002 που είναι μία τιμή ευρέως αποδεκτή για το άοπλο η οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως στον (EN1992 - Eurocode 2: Design of concrete structures, 2004) ή στον (CEB-FIP MODEL CODE 1990: DESIGN CODE, 1993).

$$TR_{cf} = TR_c + 0.0978 RI \quad (4.3)$$

Όπου  $TR_{cf}$  ο λόγος TR του ινοπλισμένου σκυροδέματος και  $TR_c$  του απλού.

Με βάση την καμπύλη των (Carreira & Chu, 1985) για μονοαξονική θλίψη απλού σκυροδέματος για την δημιουργία μιας έκφρασης τάσεων-παραμορφώσεων για την θλίψη του ινοπλισμένου σκυροδέματος ( $f_c - \varepsilon_c$ ) προέκυψε η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{f_c}{f'_{cf}} = \frac{\beta(\varepsilon_c/\varepsilon_{of})}{\beta - 1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_{of})^\beta} \quad (4.4)$$

Εδώ η μέγιστη τιμή της  $\varepsilon_c$  μπορεί να ληφθεί 0.015, όπου μέχρι αυτήν την τιμή έχει υπολογιστεί και ο λόγος TR παραπάνω. Όσον αφορά στην παράμετρο  $\beta$ , αυτή καθορίζει το σχήμα της καμπύλης. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η περιεκτικότητα και η γεωμετρία των ινών επιδρούν σημαντικά στην διαμόρφωση του καθοδικού κλάδου της θλιπτικής καμπύλης του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Έτσι έγινε στατιστική ανάλυση για να καθοριστεί η σχέση της παραμέτρου  $\beta$  με τον δείκτη RI, βασιζόμενη στην ιδιότητα της καμπύλης να παρουσιάζει σημείο καμπής στον καθοδικό κλάδο. Η κλίση στο σημείο αυτό συμβολίζεται με  $E_i$ . Οι εξισώσεις που προκύπτουν για τη σχέση  $\beta - RI$  είναι οι εξής:

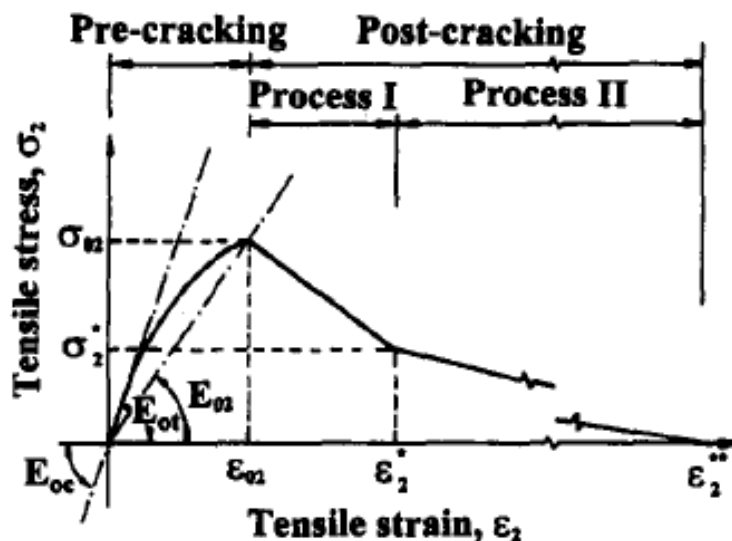
$$\beta = 0.001E_i + 0.5811 \quad (4.5)$$

$$E_i = 1930 RI^{-0.7406} \quad (4.6)$$

$$\beta = 0.5811 + 1.93 RI^{-0.7406} \quad (4.7)$$

### **4.3 Προσδιορισμός Καμπύλης Εφελκυσμού Ινοπλισμένου Σκυροδέματος**

Η καμπύλη εφελκυσμού θα προκύψει με βάση το προτεινόμενο μοντέλο στο paper “FLEXURAL BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE” (Lok & Pei, 1998).



Σχήμα 4.2 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων (Lok T., Pei J.)

#### 4.3.1 Στάδιο πριν την ρηγμάτωση

Η καμπύλη εφελκυσμού χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι πριν τη ρηγμάτωση ενώ το δεύτερο στάδιο μετά τη ρηγμάτωση. Η ρηγμάτωση γίνεται στο σημείο  $(\epsilon_{02}, \sigma_{02})$ , όπου η τάση  $\sigma_{02}$  είναι ίση με την εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος, που λαμβάνεται ως το 10% της θλιπτικής. Στο πρώτο στάδιο γίνεται η θεώρηση ότι οι χαλύβδινες ίνες ταυτίζονται πλήρως με το σκυρόδεμα και δεν υπάρχει καθόλου ολίσθηση στη διεπιφάνεια μεταξύ ίνας και σκυροδέματος. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας  $E_{0t}$  θεωρείται ίσο με αυτό της καμπύλης θλίψης και το τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{02}$  στο σημείο  $(\epsilon_{02}, \sigma_{02})$  και θεωρείται:

$$E_{0t} = 2 E_{02} \quad (4.8)$$

Η παραπάνω σχέση προτάθηκε από τους (Zhuang, Jiang, Y., & Ye, 1990) για απλό σκυρόδεμυπό μονοτονικό εφελκυσμό. Συνεπώς, οι ποσότητες  $E_{0t}$  και  $E_{02}$  μπορούν να υπολογιστούν έχοντας γνωστό το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας  $E_{0c}$  της καμπύλης θλίψης του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Για το τμήμα πριν τη ρηγμάτωση προτείνεται μία παραβολική καμπύλη, που ορίζεται από την εφαπτόμενη με κλίση  $E_{0t}$  στην αρχή των αξόνων και από το σημείο  $(\epsilon_{02}, \sigma_{02})$  της μέγιστης θλιπτικής αντοχής, το οποίο προκύπτει από την ευθεία από την αρχή των αξόνων με κλίση  $E_{02}$  για τεταγμένη  $\sigma_{02}$ . Προηγούμενες μελέτες, όπως αυτές των (Swamy, Mangat, & Rao, "The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices.", 1974) και (Ghalib, 1980) έχουν δείξει τα χαρακτηριστικά της μη γραμμικής

συμπεριφοράς του απλού αλλά και του ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά το στάδιο του εφελκυσμού πριν τη ρηγμάτωση. Η παραβολική καμπύλη που επιλέχθηκε εδώ είναι ένας τρόπος να αποτυπωθεί η μη γραμμική κατανομή τάσεων πριν τη ρηγμάτωση. Επιπλέον, η φύση αυτής της καμπύλης ικανοποιεί αυτόματα την παραπάνω σχέση.

Το παραπάνω κριτήριο προσδιορισμού του σημείου  $(\varepsilon_{02}, \sigma_{02})$  με βάση τις τάσεις είναι πιο εύχρηστο σε σχέση με άλλα που βασίζονται στην ανηγμένη παραμόρφωση όπως αυτά των (Lim, Paramasivam, & Lee, Analytical model for tensile behavior of steel-fiber concrete, 1987a) και (Soroushian & Lee, 1989), ακριβώς επειδή αποφεύγει την δυσκολία της μέτρησης της παραμόρφωσης. Εδώ η παραμόρφωση  $\varepsilon_{02}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{02} = \frac{\varepsilon_{01}}{\sigma_{01}} \sigma_{02} \quad (4.9)$$

Όπου:  $\sigma_{01}$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και  $\varepsilon_{01}$  η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση.

Η εξίσωση που περιγράφει την παραβολική καμπύλη στο στάδιο του εφελκυσμού πριν τη ρηγμάτωση είναι η εξής:

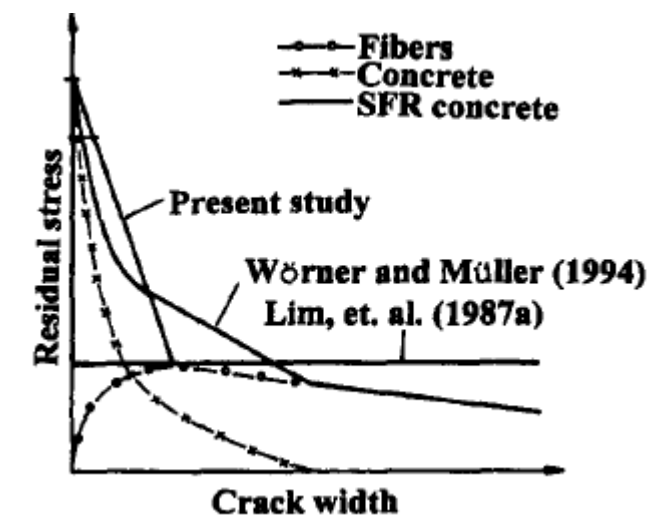
$$\sigma_2 = \sigma_{02} - \frac{\sigma_{02}}{(\varepsilon_{02})^2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_{02})^2 \quad (4.10)$$

Όπου:  $\sigma_2$  η εφελκυστική τάση και  $\varepsilon_2$  η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση.

### 4.3.2 Στάδιο μετά την ρηγμάτωση

Στο στάδιο αυτό το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένη πλαστιμότητα, εν αντιθέσει με το απλό σκυρόδεμα που αστοχεί ψαθυρά. Στο παρόν μοντέλο η απομένουσα τάση προκύπτει από τις ίνες που γεφυρώνουν την ανοιγμένη ρωγμή και από το σκυρόδεμα, αν και η απομένουσα τάση του σκυροδέματος ελαχιστοποιείται πολύ σύντομα συγκριτικά με αυτή που δίνει η διεπιφάνεια ίνας-σκυροδέματος κατά την εξόλκευση της ίνας. Η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος αλλά και η συνεισφορά των ινών και του σκυροδέματος ξεχωριστά

απεικονίζονται ποιοτικά στο παρακάτω διάγραμμα και συγκρίνεται το παρόν μοντέλο με αυτό των (Worner & Muller, 1994) και (Lim et al., 1987a).



Σχήμα 4.3 Σύγκριση του κλάδου της καμπύλης εφελκυσμού μετά την ρηγμάτωση με αντίστοιχα μοντέλα των (Worner and Muller, 1994) και (Lim et al., 1987a)

Στην παρούσα καμπύλη εφελκυσμού, για την διευκόλυνση των υπολογισμών, απλοποιητικά εφαρμόζεται ένα διγραμμικό μοντέλο. Η συνεισφορά του σκυροδέματος περιλαμβάνεται στο τμήμα (Process I) από το σημείο  $(\epsilon_{02}, \sigma_{02})$  στο σημείο  $(\epsilon_2^*, \sigma_2^*)$ . Σε αυτό το σημείο αρχίζει να αναπτύσσεται η τάση συνάφειας (bond stress) μεταξύ ίνας και σκυροδέματος, καθώς οι ίνες παραμορφώνονται. Στο τέλος αυτού του σταδίου, ήτοι στο σημείο  $(\epsilon_2^*, \sigma_2^*)$ , η δυναμική τάση συνάφειας ( $\tau_d =$  dynamic bond stress) έχει αναπτυχθεί πλήρως.

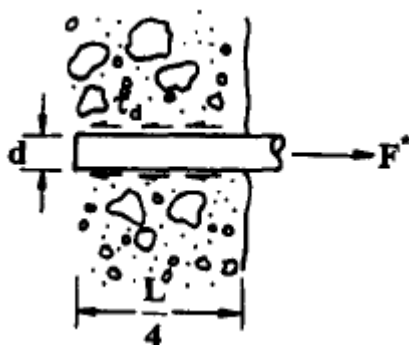
Εδώ, σε αντίθεση με το μοντέλο των (Lim et al., 1987a) η απομένουσα αντοχή του σκυροδέματος δεν αμελείται. Το μοντέλο των (Lim et al., 1987a) βασίστηκε σε ένα μοντέλο πριν τη ρηγμάτωση. Έτσι, σε αυτό υπάρχει μία απότομη πτώση μόλις αρχίζει η ρηγμάτωση και αυτό υποτιμάει την συνεισφορά του σκυροδέματος αμέσως μετά την ρηγμάτωση.

Η απομένουσα τάση  $\sigma_2^*$  ορίζεται ως:

$$\sigma_2^* = F^* \cdot N \quad (4.11)$$



Όπου  $N$  το πλήθος των ινών που διασχίζουν μια στοιχειώδη επιφάνεια ρωγμής και  $F^*$  η μέση δύναμη εξόλκευσης της μίας ίνας. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η απεικόνιση μιας εξολκευόμενης ίνας:



Σχήμα 4.4 Εξόλκευση ίνας χάλυβα από την μήτρα του σκυροδέματος

Το μέσο μήκος εξόλκευσης μιας ίνας ισούται με  $L/4$ , όπου  $L$  το μήκος της ίνας.

Η μέση δύναμη εξόλκευσης της ίνας  $F^*$  υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο, όπου ολοκληρώνονται οι τάσεις της διεπιφάνειας ίνας σκυροδέματος:

$$F^* = \tau_d \pi d \frac{L}{4} \quad (4.12)$$

Όπου  $d$  η διάμετρος της ίνας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τιμές από πειράματα που έγιναν κατά καιρούς για την τάση συνάφειας  $\tau_d$  από πειράματα των (Swamy, Mangat, & Rao, "The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices.", 1974), (Swamy & Al-Ta'an, Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete, 1981), (Henagar, 1977), (Hannant, 1978), (Lim, Paramasivam, & Lee, Analytical model for tensile behavior of steel-fiber concrete, 1987a), (Lim, Paramasivam, & Lee, Bending behavior of steel-fiber concrete beams., 1987b), (Soroushian & Lee, 1989):

Reference (1)	Notation/bond stress as defined (2)	Values or formula (3)	Origin (4)
Swamy et al. (1974)	$\tau$ = average bond stress at the first crack	3.57 N/mm <sup>2</sup>	Modulus of rupture test
	$\tau_u$ = ultimate bond stress	4.15 N/mm <sup>2</sup>	Modulus of rupture test
Swamy and Al-Ta'an (1981)	$\tau$ = interfacial bond stress between fiber and matrix	2.58 N/mm <sup>2</sup>	Modulus of rupture test
Henagar (1977)	$\tau_d$ = dynamic bond stress	2.297 N/mm <sup>2</sup> (For deformed fibers, multiplied by 1.1–1.2)	Pullout test
Hannant (1978)	$\tau_d$ = average sliding friction bond strength	3.5 N/mm <sup>2</sup>	Unspecified
Lim et al. (1987a,b)	$\tau_u$ = ultimate bond stress	For straight fibers: 2.71–3.05 N/mm <sup>2</sup> ; for hooked-end fibers: 6.72–7.10 N/mm <sup>2</sup>	Pullout test
Soroushian and Lee (1989)	$\tau_u$ = ultimate bond stress	2.62–0.0036 $N_i$ ( $N_i$ is defined as number of fibers per unit cross-sectional area)	Pullout test

Πίνακας 4.2 Τιμές που προτάθηκαν για την τάση συνάφειας  $\tau_d$

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα υπάρχει μεγάλη απόκλιση στις τιμές που προέκυψαν από τα διάφορα πειράματα που διενεργήθηκαν. Αυτό δείχνει την δυσκολία εύρεσης μιας εύλογης τιμής που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές. Αυτό που επιβεβαιώνουν όμως αυτή η απόκλιση είναι ότι τα διάφορα είδη ινών μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά την απόκριση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Soroushian and Bayasi, 1991). Η τιμή της  $\tau_d$  που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση – που αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο – των δοκιμίων του πειράματος που περιγράφεται στο paper (Πειραματική Διερεύνηση Δοκών Από Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα Χωρίς Οπλισμό Διάτμησης, Χρήστος ΖΕΡΗΣ, Σαρής ΒΙΤΑΛΗΣ, Παρασκευάς ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ) είναι αυτή που προτείνει ο (Henagar, 1977):  $\tau_d = 2.297 \text{ N/mm}^2$  και πολλαπλασιάζεται επί 1.2, επειδή αφορά σε ίνες με κυρτωμένα άκρα για καλύτερη αγκύρωση. Οπότε η τελική τιμή που λαμβάνεται είναι  $\tau_d = 1.2 \cdot 2.297 = 2.7564 \text{ N/mm}^2$ .

Ο ισοδύναμος αριθμός ινών που διασχίζουν μία ρωγμή εκτιμάται από τον παρακάτω τύπο, ως:

$$N = \frac{1}{2} \frac{V_f}{\pi r^2} \quad (4.13)$$

Όπου:  $V_f$  το ογκομετρικό ποσοστό ινών και  $r$  η ακτίνα της ίνας. Ο συντελεστής  $1/2$  εκφράζει την τυχαιότητα της κατανομής των ινών και συμφωνεί με τις τιμές που δίνουν οι (Hannant, 1978) και (Sakai & Nakamura, 1986).

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις η  $\sigma_2^*$  μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των  $V_f$ ,  $\tau_d$  και  $L/d$  ως:

$$\sigma_2^* = \frac{1}{2} V_f \tau_d \frac{L}{d} \quad (4.14)$$

Η παραμόρφωση  $\varepsilon_2^*$  για την τάση  $\sigma_2^*$  κατά (Henagar, 1997) ισούται με:

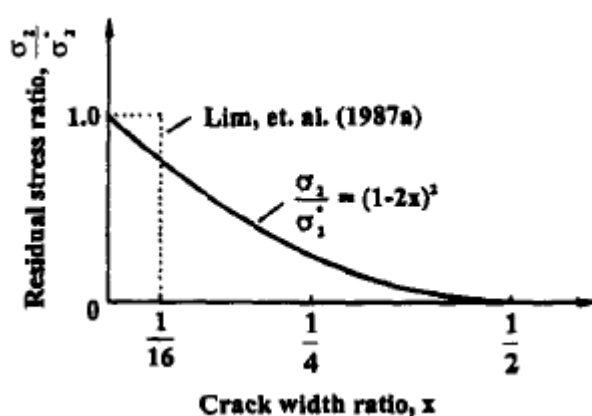
$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_{fp}}{E_{fp}} \quad (4.15)$$

Όπου  $E_{fp}$  το μέτρο ελαστικότητας της χαλύβδινης ίνας και  $\sigma_{fp}$  η τάση της ίνας.

Οπότε η  $\varepsilon_2^*$  μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$\varepsilon_2^* = \tau_d \frac{L}{d} \frac{1}{E_{fp}} \quad (4.16)$$

Στο δεύτερο στάδιο (Process II) του κλάδου της εφελκυστικής καμπύλης μετά την ρηγμάτωση, έχουμε πλέον συνεισφορά μόνο των ινών, ενώ το σκυρόδεμα δεν συμμετέχει καθόλου. Το στάδιο αυτό ξεκινάει από το σημείο  $(\epsilon_2^*, \sigma_2^*)$  και καταλήγει στο σημείο  $(\epsilon_2^{**}, 0)$ , όπου πλέον όλες οι ίνες έχουν εξολκευθεί πλήρως. Εδώ γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχει εφελκυστική αστοχία της ίνας. Αυτός είναι και ο λόγος του δεν εμφανίζεται στις εξισώσεις η εφελκυστική αντοχή της ίνας σαν μεταβλητή. Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται μια απεικόνιση του λόγου της απομένουσας τάσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος ως προς την τάση  $\sigma_2^*$ , συναρτήσει του λόγου  $x$  του εύρους ρωγμής ως προς το μήκος της ίνας.



Σχήμα 4.5 Η σχέση του λόγου  $\sigma_2/\sigma_2^*$  με το λόγο  $x$  του εύρους ρωγμής ως προς το μήκος της ίνας

Η σχέση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών είναι η εξής:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_2^*} = (1 - 2x)^2 \quad (4.17)$$

Το παραπάνω μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι στην αρχή της διαδικασίας της εξόλκευσης ( $x = 0$ ) η τάση συνάφειας  $\tau_d$  έχει αναπτυχθεί πλήρως, παρ' όλο που το εύρος ρωγμής είναι ακόμα αμελητέο σε σχέση με το μήκος της ίνας.

Όσον αφορά στον καθορισμό της ανηγμένης παραμόρφωσης  $\epsilon_2^{**}$ , αυτή ήταν πάντα δύσκολο να καθοριστεί με ακρίβεια. Ένα σημείο στο οποίο έγκειται αυτή η δυσκολία είναι η μετατροπή του λόγου  $x$  ανηγμένη παραμόρφωση. Για τη μόνωση μιας πλήρους καμπύλης εφελκυσμού στο παρόν μοντέλο η  $\epsilon_2^{**}$  λαμβάνεται ίση με 0.020, τιμή που προτάθηκε από τους (Craig, Decker, Dombrowski, Laurencelle, & Federovich, 1987). Άλλες τιμές που προτάθηκαν για την  $\epsilon_2^{**}$  από τους (Chuang & Mai, 1987) και (Sakai

& Nakamura, 1986) είναι 0.0145 και 0.100 για τις περιπτώσεις που αναλύονται στα συγκεκριμένα paper.

#### **4.4 Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεων Δοκιμίων**

Παρακάτω παρατίθενται οι καμπύλες θλίψης και εφελκυσμού των δοκιμίων που ελέγχθηκαν στο πείραμα όπως προέκυψαν από τις εξισώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω.

##### **4.4.1 Σκυρόδεμα**

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε με βάση τις αναλογίες των συστατικών του, όπως αναλύθηκε παραπάνω, είναι ανάλογο της κατηγορίας C25/30 κατά EN 1992. Έτσι η μέση θλιπτική αντοχή του άοπλου σκυροδέματος λαμβάνεται  $f_{cm} = 33$  MPa. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπολογίζεται κατά (RILEM TC 162 – TDF) :  $E_c = 9500 \cdot (f_c)^{1/3} = 9500 \cdot (33)^{1/3} = 30472$  MPa = 30.47 GPa και είναι κοινό για όλα τα δοκίμια, αφού εξαρτάται μόνο από την θλιπτική τιμή του άοπλου σκυροδέματος που είναι ίδιο για όλα.

##### **4.4.2 Χαλύβδινες Ίνες**

Το μέτρο ελαστικότητας των ινών είναι  $E = 210$  GPa.

##### **Ίνες DRAMIX**

Οι ίνες DRAMIX RC 65/35BN έχουν μήκος  $L = 35$  mm και λόγο  $L/d = 65$ .

##### **Ίνες INOMIX της ΕΤΑΛ**

Μείγμα ινών INOMIX της ΕΤΑΛ με τις παρακάτω ίνες σε αναλογία 1:1:2 :

- 1) Ίνες INOMIX χωρίς κωδική ονομασία με μήκος  $L = 80$  mm και λόγο  $L/d = 80$ .
- 2) Ίνες INOMIX 600 023 με μήκος  $L = 60$  mm και λόγο  $L/d = 60$ .
- 3) Ίνες INOMIX 600 002 με μήκος  $L = 31$  mm και λόγο  $L/d = 40$ .

Για τα δοκίμια που περιέχουν το παραπάνω μείγμα ινών, στους υπολογισμούς ο λόγος μορφής λαμβάνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των παραπάνω ινών με τα αντίστοιχα ποσοστά:

$$L/d = 0.25 \cdot 80 + 0.25 \cdot 60 + 0.5 \cdot 40 = 55$$

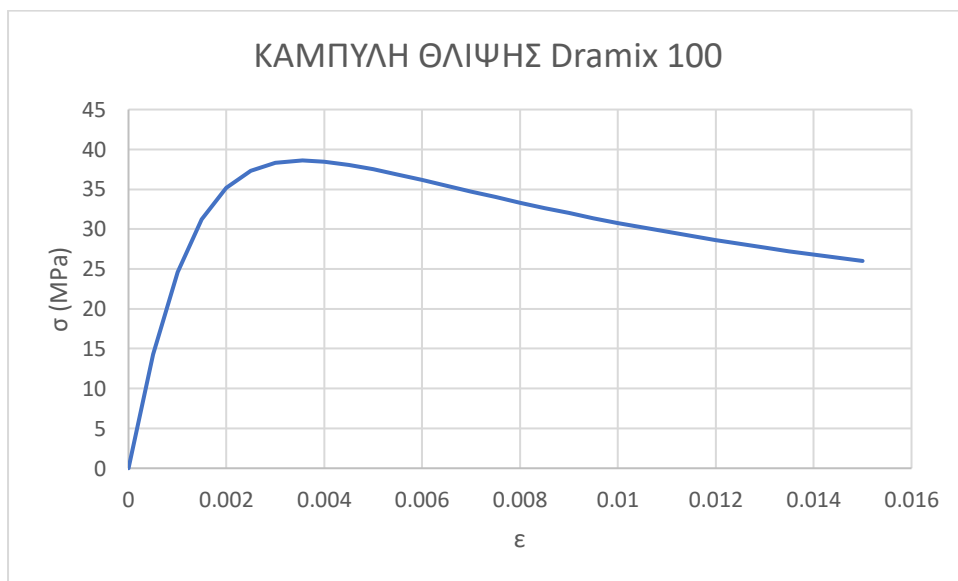
### 4.4.3 Δοκίμιο D100

Το δοκίμιο D100 περιέχει ίνες DRAMIX RC 65/35BN σε περιεκτικότητα  $100 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί σε αναλογία κατ' όγκο  $V_f = 1.2\%$  και σε αναλογία κατά βάρος  $w_f = 4\%$ .

### Καμπύλη Θλίψης

RI	$f_{cf}'$ (MPa)	$\epsilon_{0f}$	$E_i$	$\beta$
2.6	38.62	0.00356	951.1041	1.532204

Πίνακας 4.3 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης θλίψης D100

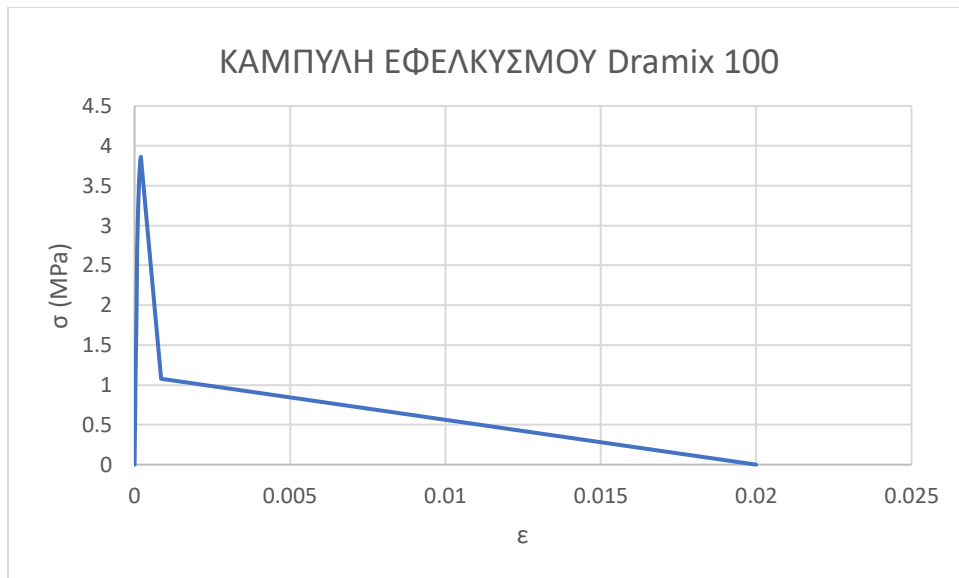


Σχήμα 4.6 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων – παραμορφώσεων D100

### Καμπύλη Εφελκυσμού

$\tau_d$ (MPa)	$\sigma_{02}$ (MPa)	$\epsilon_{02}$	$\sigma_2^*$ (MPa)	$\epsilon_2^*$	$\epsilon_2^{**}$
2.756	3.862	0.0002	1.075	0.000853	0.020

Πίνακας 4.4 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης εφελκυσμού D100



Σχήμα 4.7 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων D100

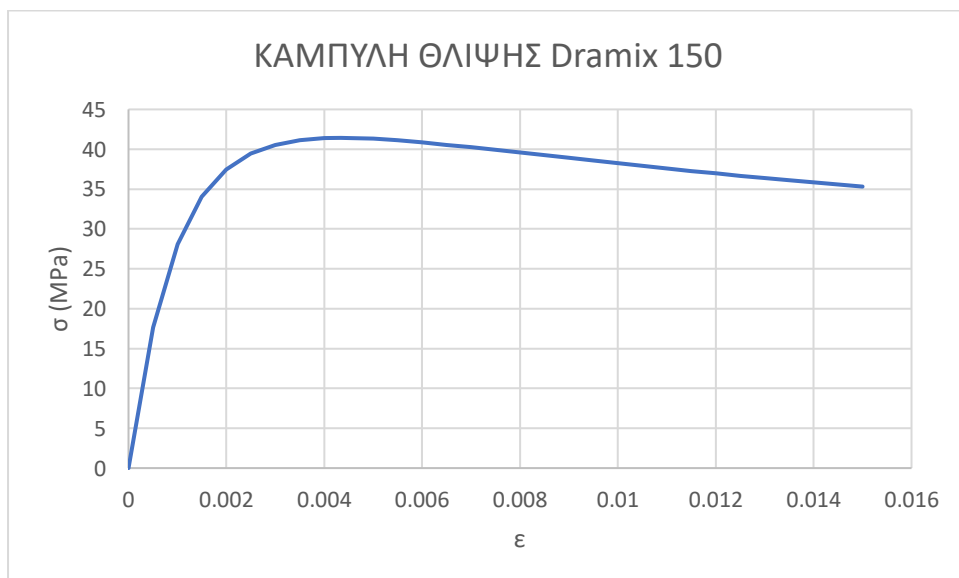
#### 4.4.4 Δοκίμιο D150

Το δοκίμιο D150 περιέχει ίνες DRAMIX RC 65/35BN σε περιεκτικότητα  $150 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί σε αναλογία κατ' όγκο  $V_f = 1.8\%$  και σε αναλογία κατά βάρος  $w_f = 6\%$ .

#### Καμπύλη Θλίψης

RI	$f_{cf}'$ (MPa)	$\epsilon_{of}$	$E_i$	$\beta$
3.9	41.43	0.00434	704.3927	1.285493

Πίνακας 4.5 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης θλίψης D150

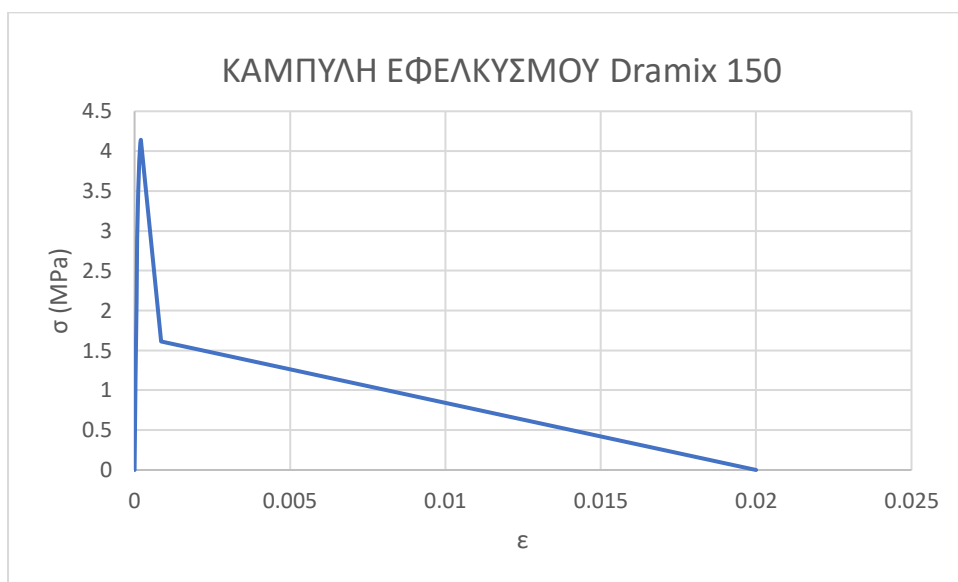


Σχήμα 4.8 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων D150

## Καμπύλη Εφελκυσμού

$\tau_d$ (MPa)	$\sigma_{02}$ (MPa)	$\epsilon_{02}$	$\sigma_2^*$ (MPa)	$\epsilon_2^*$	$\epsilon_2^{**}$
2.756	4.143	0.0002	1.612	0.000853	0.020

Πίνακας 4.6 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης εφελκυσμού D150



Σχήμα 4.9 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων D150

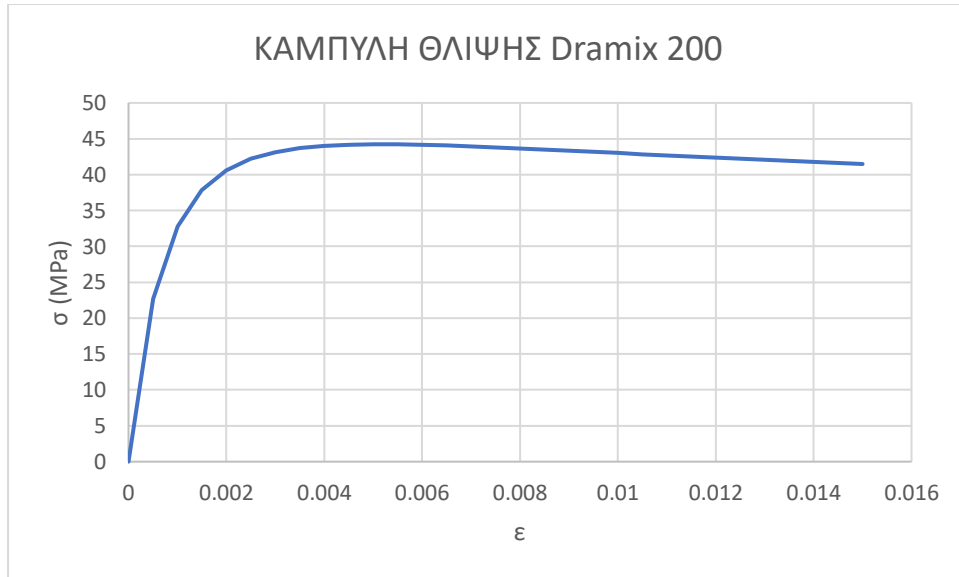
### 4.4.5 Δοκίμιο D200

Το δοκίμιο D200 περιέχει ίνες DRAMIX RC 65/35BN σε περιεκτικότητα  $200 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί σε αναλογία κατ' όγκο  $V_f = 2.4\%$  και σε αναλογία κατά βάρος  $w_f = 8\%$ .

## Καμπύλη Θλίψης

RI	$f_{cf}'$ (MPa)	$\epsilon_{of}$	$E_i$	$\beta$
5.2	44.23	0.00512	569.2267	1.150327

Πίνακας 4.7 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης θλίψης D200

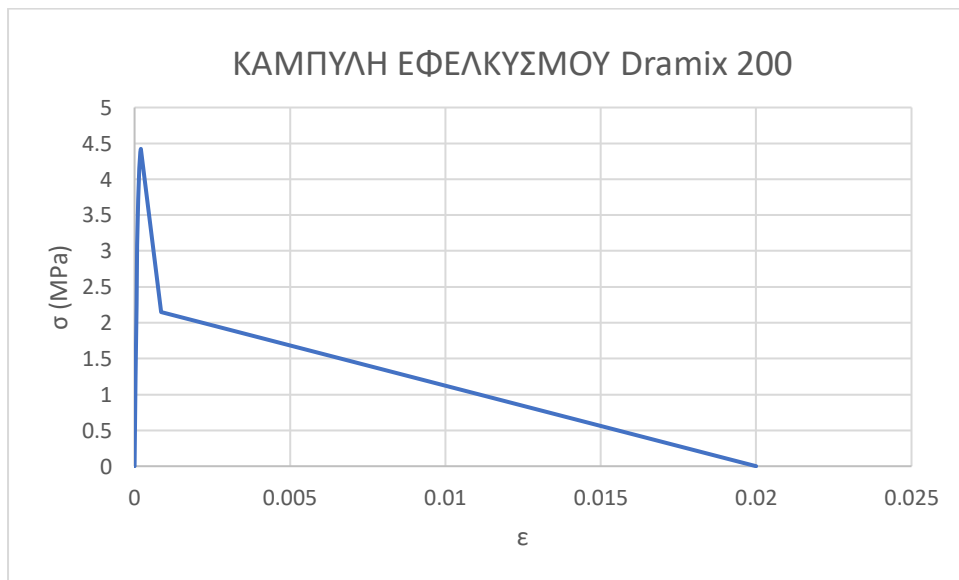


Σχήμα 4.10 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων D200

### Καμπύλη Εφελκυσμού

$\tau_d$ (MPa)	$\sigma_{02}$ (MPa)	$\epsilon_{02}$	$\sigma_2^*$ (MPa)	$\epsilon_2^*$	$\epsilon_2^{**}$
2.756	4.423	0.0002	2.150	0.000853	0.020

Πίνακας 4.8 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης εφελκυσμού D200



Σχήμα 4.11 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων D200



#### 4.4.6 Δοκίμιο M100

Το δοκίμιο M100 περιέχει το μείγμα ινών INOMIX της ΕΤΑΛ που περιγράφεται παραπάνω, σε περιεκτικότητα  $100 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί σε αναλογία κατ' όγκο  $V_f = 1.2\%$  και σε αναλογία κατά βάρος  $w_f = 4\%$ .

#### Καμπύλη Θλίψης

RI	$f_{cf}'$ (MPa)	$\epsilon_{of}$	$E_i$	$\beta$
2.2	37.75	0.00332	1076.364	1.657464

Πίνακας 4.9 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης θλίψης M100

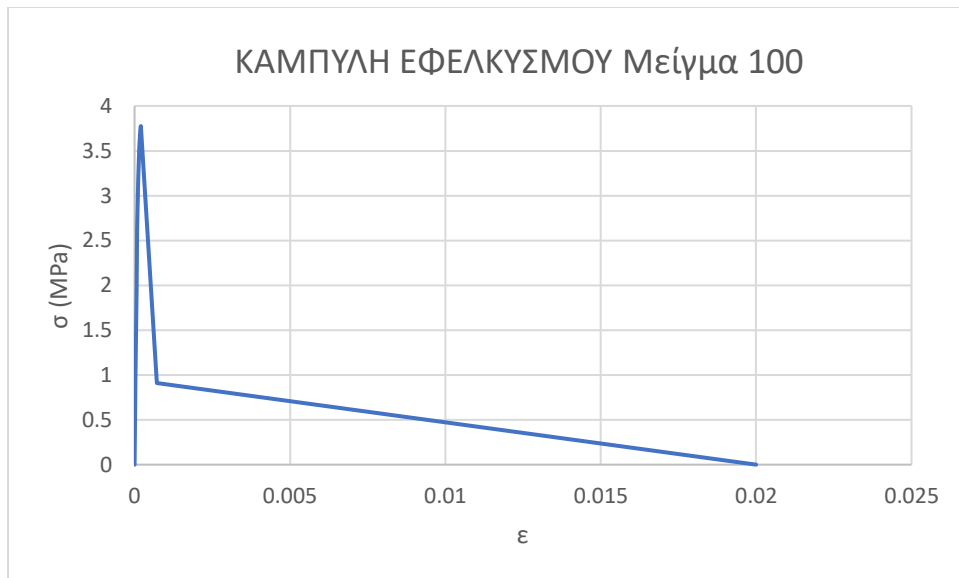


Σχήμα 4.12 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων M100

#### Καμπύλη Εφελκυσμού

$\tau_d$ (MPa)	$\sigma_{02}$ (MPa)	$\epsilon_{02}$	$\sigma_2^*$ (MPa)	$\epsilon_2^*$	$\epsilon_2^{**}$
2.756	3.775	0.0002	0.910	0.000722	0.020

Πίνακας 4.10 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης εφελκυσμού M100



Σχήμα 4.13 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων M100

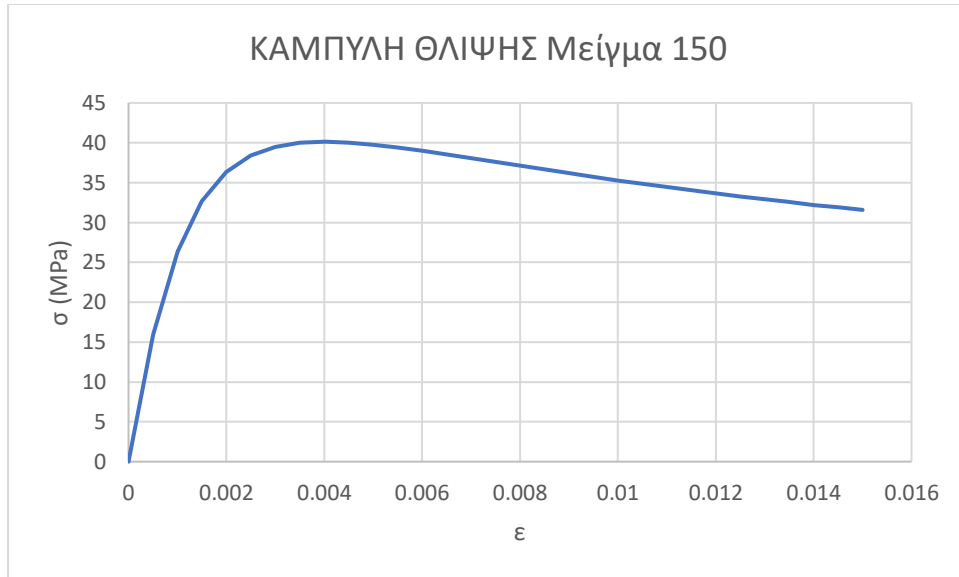
#### 4.4.7 Δοκίμιο M150

Το δοκίμιο M150 περιέχει το μείγμα ιών INOMIX της ΕΤΑΛ που περιγράφεται παραπάνω, σε περιεκτικότητα  $150 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί σε αναλογία κατ' όγκο  $V_f = 1.8\%$  και σε αναλογία κατά βάρος  $w_f = 6\%$ .

#### Καμπύλη Θλίψης

RI	$f_{cf}'$ (MPa)	$\epsilon_{of}$	$E_i$	$\beta$
3.3	40.13	0.00398	797.1607	1.378261

Πίνακας 4.11 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης θλίψης M150

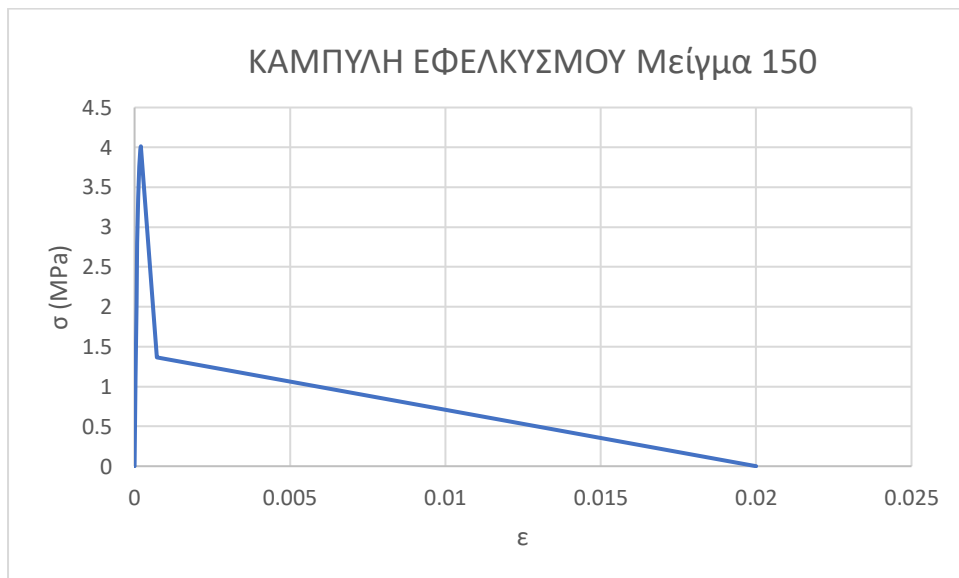


Σχήμα 4.14 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων M150

### Καμπύλη Εφελκυσμού

$\tau_d$ (MPa)	$\sigma_{02}$ (MPa)	$\epsilon_{02}$	$\sigma_2^*$ (MPa)	$\epsilon_2^*$	$\epsilon_2^{**}$
2.756	4.013	0.0002	1.364	0.000722	0.020

Πίνακας 4.12 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης εφελκυσμού M150



Σχήμα 4.15 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων M150

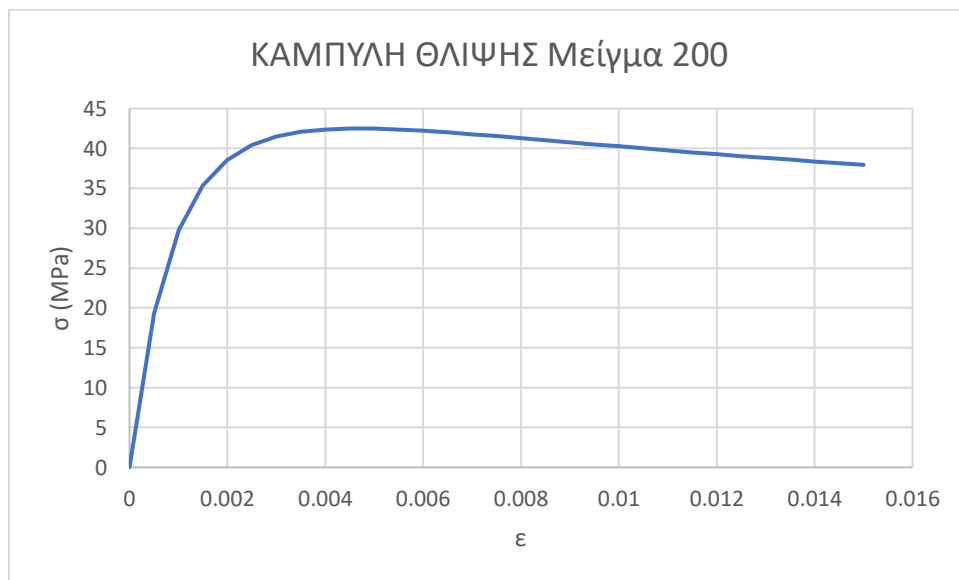
#### 4.4.8 Δοκίμιο M200

Το δοκίμιο M200 περιέχει το μείγμα ινών INOMIX της ΕΤΑΛ που περιγράφεται παραπάνω, σε περιεκτικότητα  $200 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί σε αναλογία κατ' όγκο  $V_f = 2.4\%$  και σε αναλογία κατά βάρος  $w_f = 8\%$ .

#### Καμπύλη Θλίψης

RI	$f_{cf}'$ (MPa)	$\epsilon_{of}$	$E_i$	$\beta$
4.4	42.51	0.00464	644.1934	1.225293

Πίνακας 4.13 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης θλίψης M200

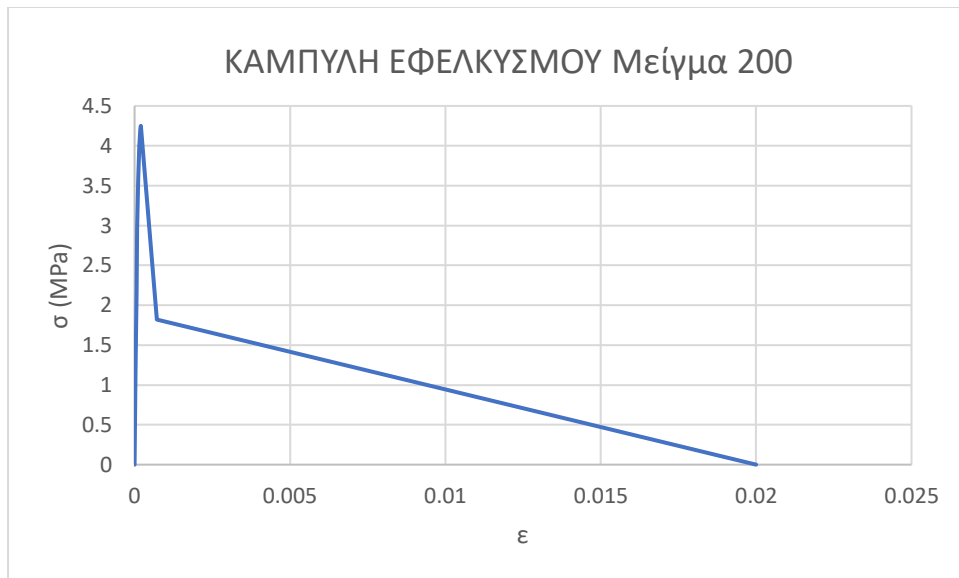


Σχήμα 4.16 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων M200

#### Καμπύλη Εφελκυσμού

$\tau_d$ (MPa)	$\sigma_{02}$ (MPa)	$\epsilon_{02}$	$\sigma_2^*$ (MPa)	$\epsilon_2^*$	$\epsilon_2^{**}$
2.756	4.251	0.0002	1.819	0.000722	0.020

Πίνακας 4.14 Παραμετρικά μεγέθη καμπύλης εφελκυσμού M200

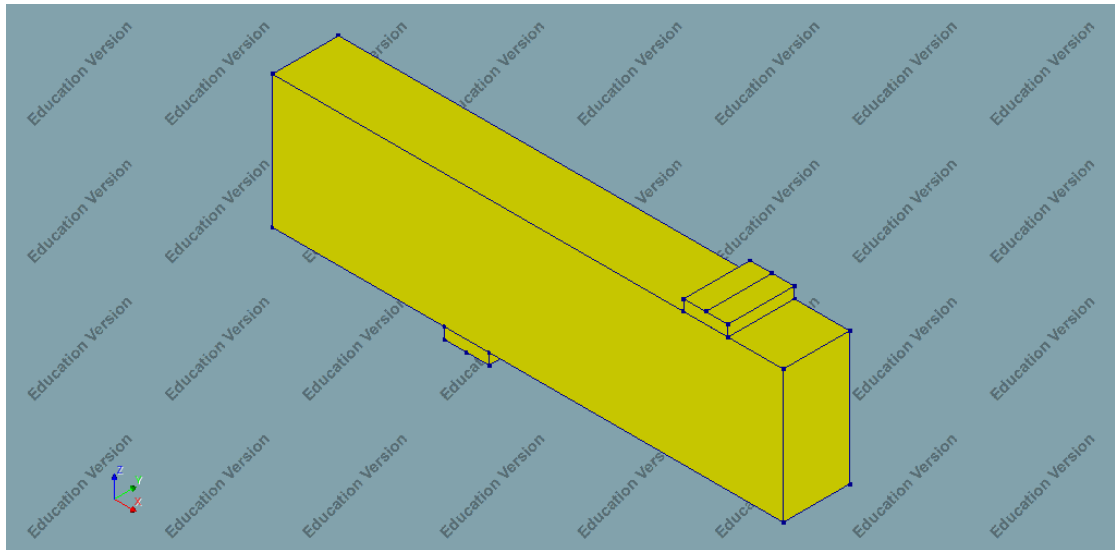


Σχήμα 4.17 Καμπύλη εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων M200

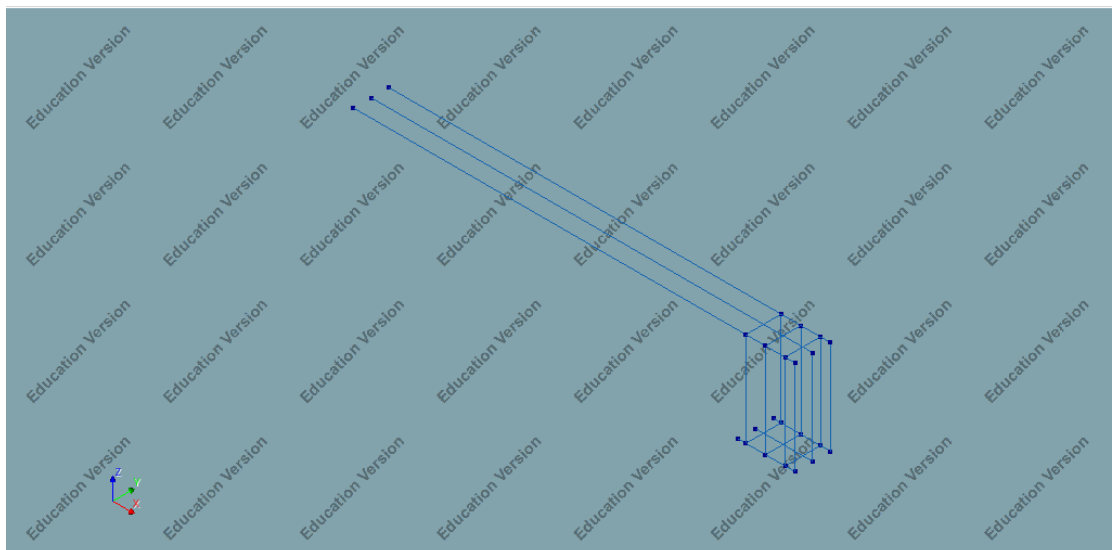
## 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### 5.1 Γεωμετρία φορέα και συνοριακές συνθήκες

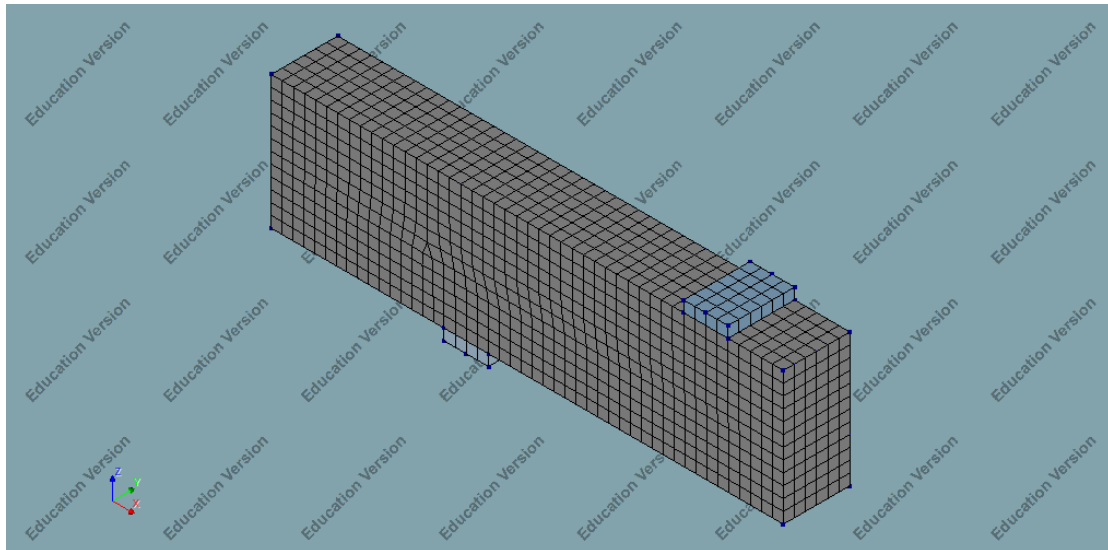
Η προσομοίωση των δοκιμίων έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό DIANA και κατά το ( DIANA FEA User's Manual -- Release 10.2, 2017). Στο προσομοίωμα εντάχθηκαν και οι μεταλλικές πλάκες έδρασης, για να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό. Η δοκός ινοπλισμένου σκυροδέματος και οι μεταλλικές πλάκες έδρασης προσομοιώνονται ως τρισδιάστατα στερεά στοιχεία και εντός της δοκού βρίσκονται οι οπλισμοί ως ραβδωτά στοιχεία ενσωματωμένα στο σκυρόδεμα. Η διακριτοποίηση έγινε ανά 25 mm. Για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φόρτου και εφόσον ο φορέας είναι συμμετρικός με συμμετρική φόρτιση, προσομοιώνεται η μισή δοκός και στο μέσον της, από όπου διέρχεται το επίπεδο συμμετρίας, τοποθετείται κυλιόμενη πάκτωση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση για αποκατάσταση της συμμετρίας. Οι βαθμοί ελευθερίας που δεσμεύονται εδώ είναι οι οριζόντιες μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση της δοκού και κάθετα στη δοκό, ενώ δεσμεύονται και οι στροφές στους τρεις άξονες. Η κατακόρυφη μετακίνηση παραμένει ελεύθερη. Όσον αφορά στη στήριξη έδρασης της μεταλλικής πλάκας, αυτή υλοποιείται σε μία ευθεία γραμμή στο μέσον της πλάκας που είναι το σημείο έδρασης της μεταλλικής πλάκας στον κύλινδρο. Οι βαθμοί ελευθερίας που δεσμεύονται είναι η εγκάρσια και η κατακόρυφη μετακίνηση, ενώ κατά τον διαμήκη άξονα δεν υπάρχει καμία δέσμευση.



Σχήμα 5.1 Προσομοίωμα – Δοκός και μεταλλικές πλάκες έδρασης



Σχήμα 5.2 Οπλισμοί

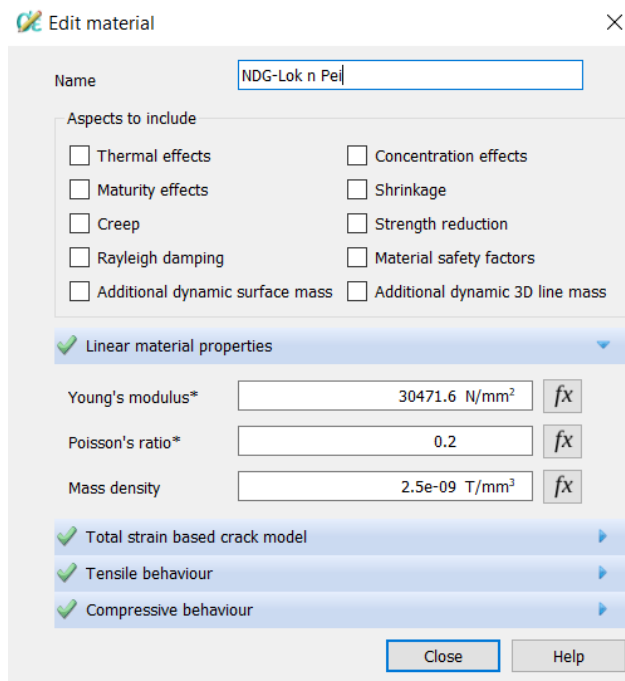


Σχήμα 5.3 Διακριτοποίηση

## 5.2 Υλικά

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Τα υλικά που εισάγονται είναι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ο χάλυβας των μεταλλικών πλακών και ο χάλυβας οπλισμού.

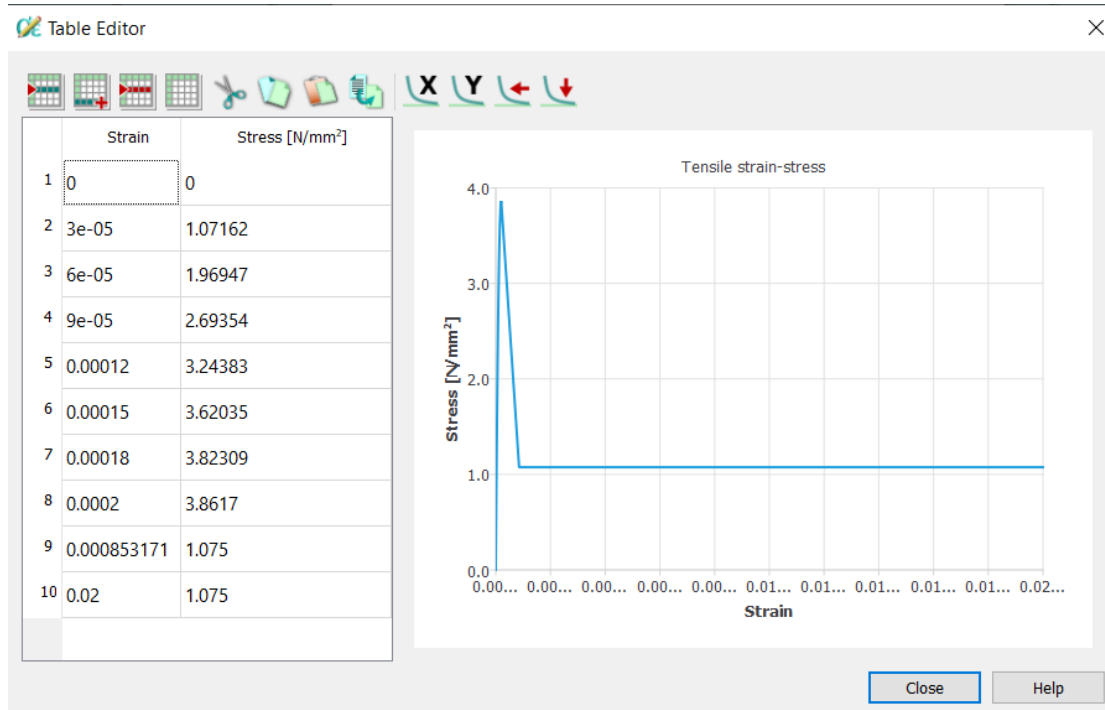
Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, τα μεγέθη που χρειάζεται να οριστούν είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, η πυκνότητα και οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για θλίψη και εφέλκυσμό. Ο λόγος Poisson ορίζεται  $\nu = 0.2$ , όπως και στο άοπλο σκυρόδεμα και η πυκνότητα  $2.5 \text{ Mg/m}^3$  για όλα τα δοκίμια. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται για κάθε δοκίμιο κατά RILEM TC 162-TDF, όπως περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.4 Εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων ινοπλισμένου σκυροδέματος στο DIANA FEA

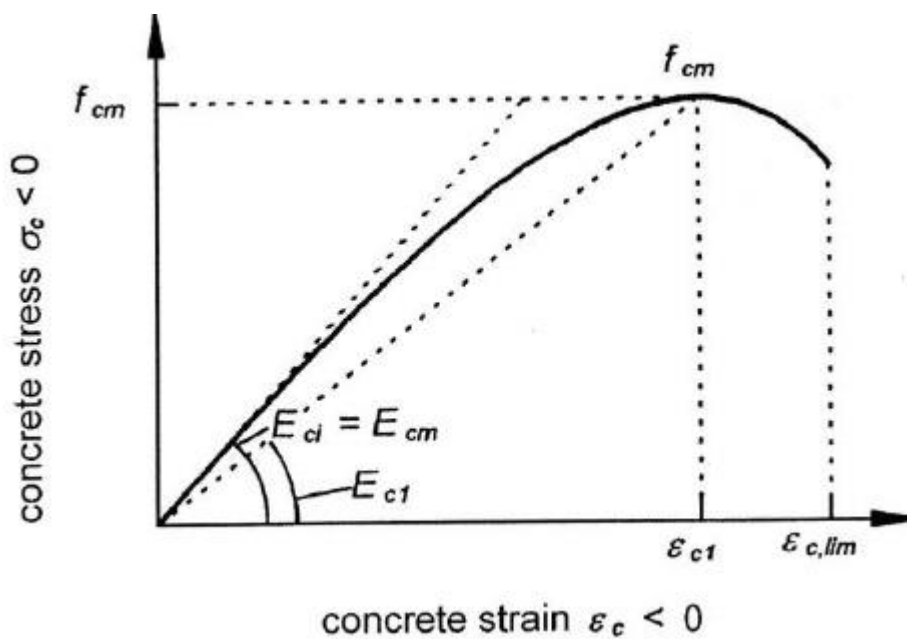
Η καμπύλη εφελκυσμού επιλέγεται να είναι μία πολυγραμμική καμπύλη με σημεία ανά ανηγμένη παραμόρφωση  $3 \cdot 10^{-5}$  για το παραβολικό τμήμα και άλλα δύο σημεία για τον ορισμό του δεύτερου δι-γραμμικού τμήματος μετά την διαρροή, όπως προκύπτει από το paper (FLEXURAL BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE By Tat-Seng Lok, Member, ASCE, and Jin-Song Pei) που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.





Σχήμα 5.5 Εισαγωγή καμπύλης εφελκυσμού στο DIANA FEA

Για την καμπύλη θλίψης χρησιμοποιείται το μοντέλο του (fib Model Code for Concrete Structures, 2010), η οποία έχει την παραβολική μορφή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 5.6 Καμπύλη θλιπτικών τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος FIB 2010

Η εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω καμπύλη είναι η εξής:

$$\sigma_c = -f_{cm} \left( \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \right) \quad (5.1)$$

Όπου:

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

$$k = E_{ci} / E_{c1}$$

$\varepsilon_{c1}$  : Η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης στη μέγιστη θλιπτική τάση

$E_{c1}$  : Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας στην μέγιστη θλιπτική τάση

$E_{ci} = E_{cm}$  : Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας

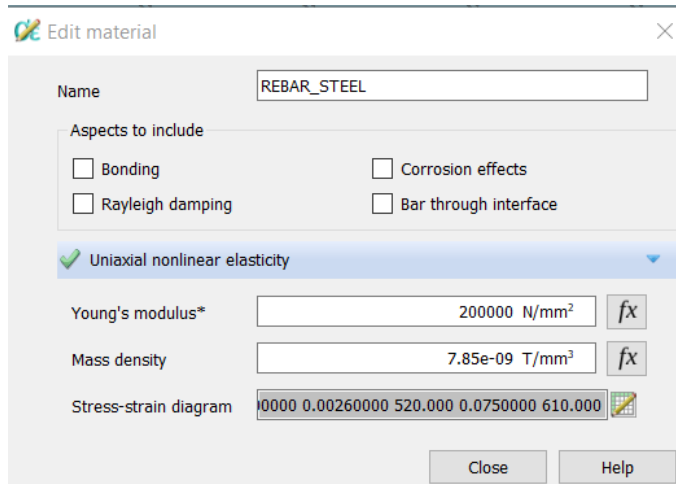
Έτσι οι απαιτούμενες τιμές για την μόρφωση της καμπύλης θλίψης του FIB 2010 είναι η μέγιστη θλιπτική τάση, η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση και η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας, οι οποίες προκύπτουν από το paper (Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta) που αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

The screenshot shows the 'Edit material' dialog box with the following details:

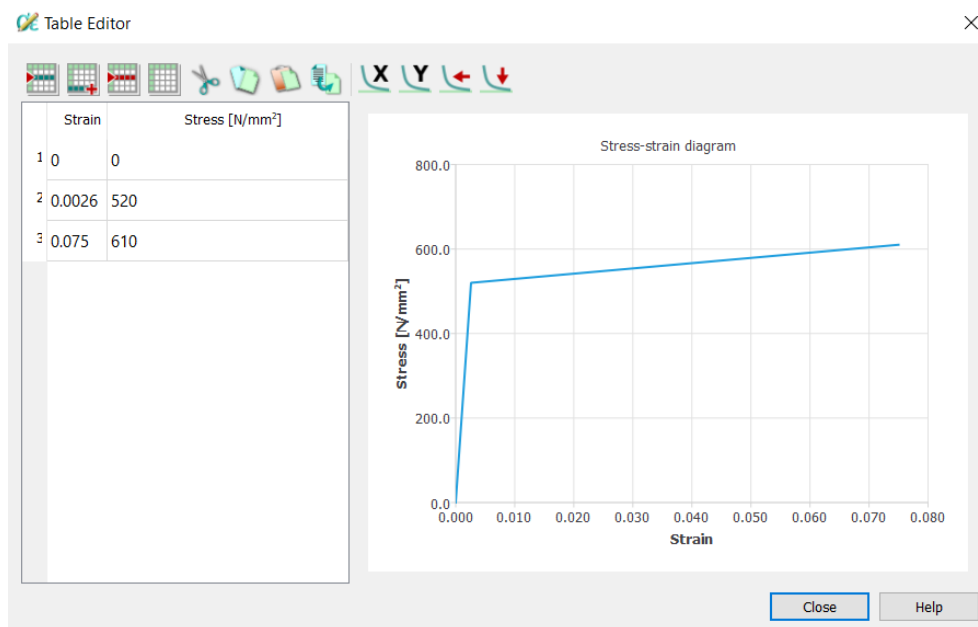
- Name:** NDG-Lok n Pei
- Aspects to include:**
  - Thermal effects
  - Maturity effects
  - Creep
  - Rayleigh damping
  - Additional dynamic surface mass
  - Concentration effects
  - Shrinkage
  - Strength reduction
  - Material safety factors
  - Additional dynamic 3D line mass
- Material Properties (all checked):**
  - Linear material properties
  - Total strain based crack model
  - Tensile behaviour
  - Compressive behaviour
- Compression curve\*:** fib Model Code for Concrete Structures 2010
- Compressive strength\*:** 38.617 N/mm<sup>2</sup> (with  $f_x$  button)
- Strain at maximum stress\*:** 0.00356
- Strain at ultimate stress\*:** 0.015
- Stress confinement:**
  - Confinement model: No increase

Σχήμα 5.7 Εισαγωγή στοιχείων καμπύλης θλίψης ινοπλισμένου σκυροδέματος στο DIANA FEA

Στη συνέχεια για τον χάλυβα οπλισμού κατηγορίας S500 ορίζεται το μέτρο ελαστικότητας  $E = 200 \text{ GPa}$ , η πυκνότητα  $7.85 \text{ Mg/m}^3$  και η καμπύλη εφελκυσμού με κράτυνση. Η τάση διαρροής για την συγκεκριμένη κατηγορία είναι  $520 \text{ MPa}$  με την αντίστοιχη παραμόρφωση  $0.0026$  και αστοχεί σε τάση  $610 \text{ MPa}$  σε παραμόρφωση  $0.075$ .



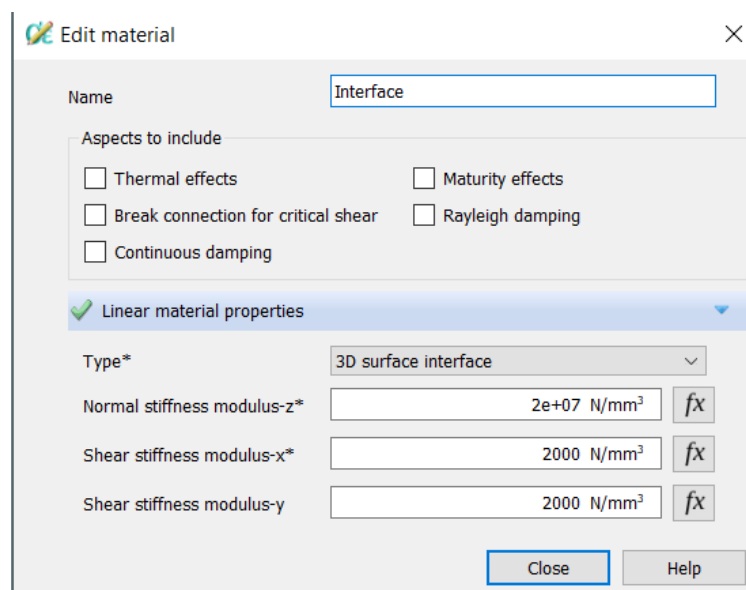
Σχήμα 5.8 Εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα οπλισμού στο DIANA FEA



Σχήμα 5.9 Εισαγωγή καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού στο DIANA FEA

Τέλος, στη διεπιφάνεια της μεταλλικής πλάκας και του σκυροδέματος, εισάγεται ένα μοντελικό υλικό με τις τιμές δυσκαμψίας για τις σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των δύο σωμάτων. Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ , που ουσιαστικά δεν είναι επιθυμητό να υπάρχει κάποια σχετική μετακίνηση, ορίζεται μία μεγάλη τιμή, ώστε να αποτρέπεται

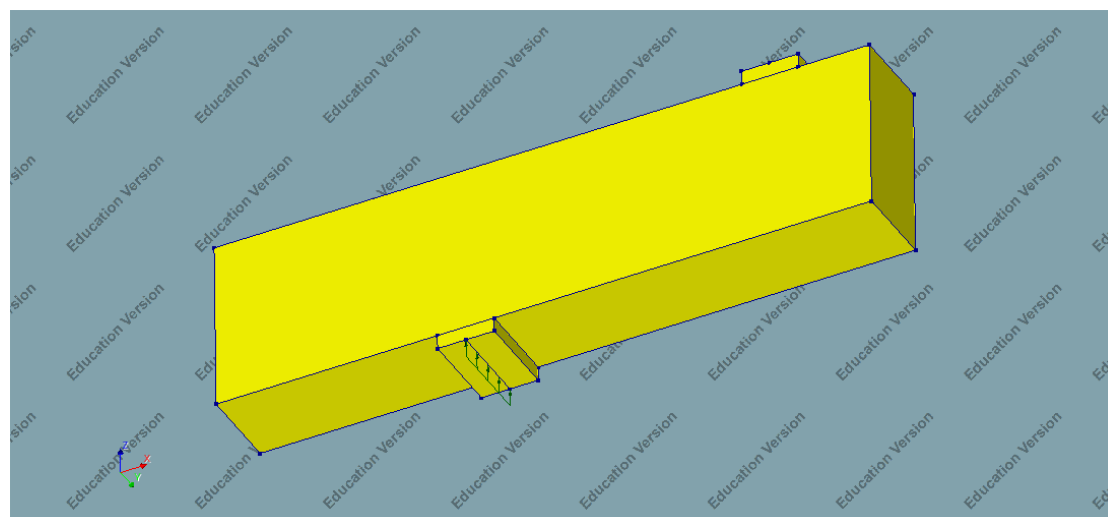
αυτή η μετακίνηση. Στην προκειμένη περίπτωση λήφθηκε η τιμή  $2 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$ . Κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις x και y λαμβάνεται η τιμή  $2000 \text{ N/mm}^2$ .



Σχήμα 5.10 Εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων μοντελικού υλικού διεπιφάνειας σκυροδέματος – μεταλλικής πλάκας έδρασης στο DIANA FEA

### 5.3 Φόρτιση

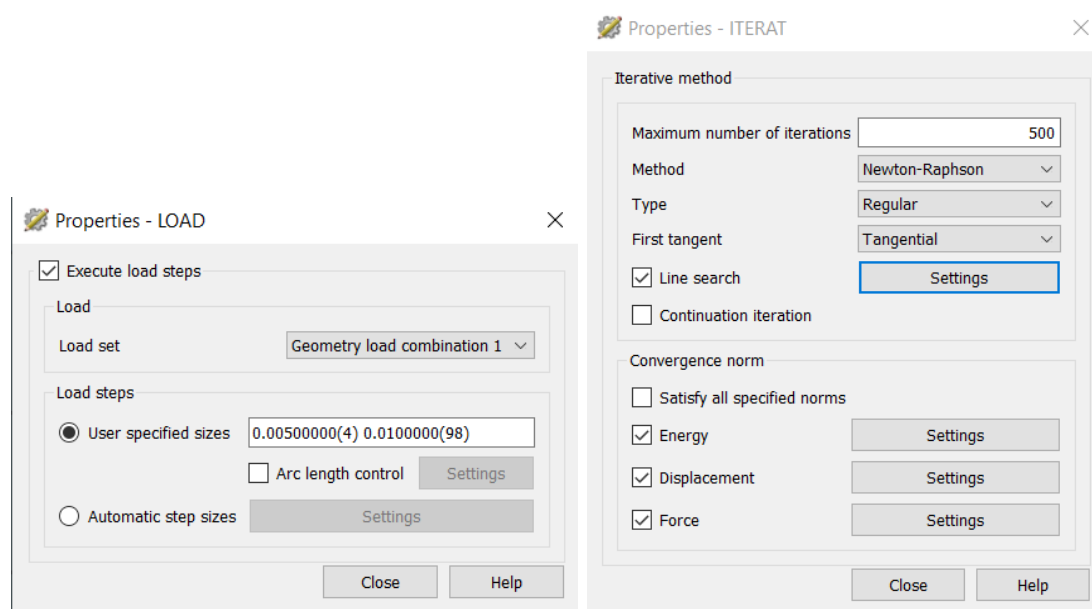
Η φόρτιση εφαρμόζεται σε μία ευθεία γραμμή στο μέσον της μεταλλικής πλάκας που είναι το σημείο εφαρμογής της αντίδρασης της IPE 240, όπως φαίνεται στην εικόνα, σαν επιβαλλόμενη μετακίνηση. Η μετακίνηση που επιβάλλεται, όπως εκτιμάται και από τα πειράματα, είναι 40 mm για τα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 100 και 150  $\text{kg/m}^3$  και 60 mm σε αυτά με περιεκτικότητα 200  $\text{kg/m}^3$ , που αναμένεται να αναπτύξουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα.



Σχήμα 5.11 Φόρτιση δοκιμίου – DIANA FEA

## 5.4 Ανάλυση

Η μέθοδος ανάλυσης που επιλέγεται είναι η μη γραμμική (Structural non linear). Η επιβολή του φορτίου γίνεται σε 102 βήματα με επιβολή του 0.005 του φορτίου στα πρώτα 4 βήματα και 0.01 του φορτίου στα υπόλοιπα 98. Η πυκνωση αυτή στα πρώτα βήματα γίνεται για να καταγραφούν τα αρχικά στάδια ρηγμάτωσης. Επιπλέον, επιλέγεται η επίλυση με την επαναληπτική μέθοδο Newton – Raphson και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για κάθε βήμα. Ακόμη τα κριτήρια σύγκλισης που χρησιμοποιούνται είναι της ενέργειας, των μετακινήσεων και των δυνάμεων ταυτόχρονα.

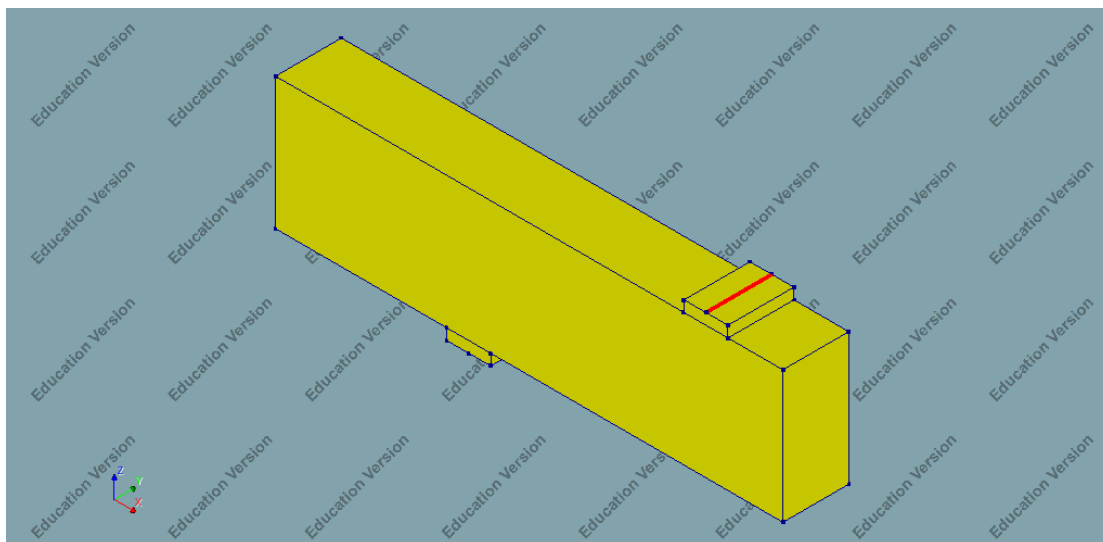


Σχήμα 5.12 Εισαγωγή παραμέτρων ανάλυσης στο DIANA FEA

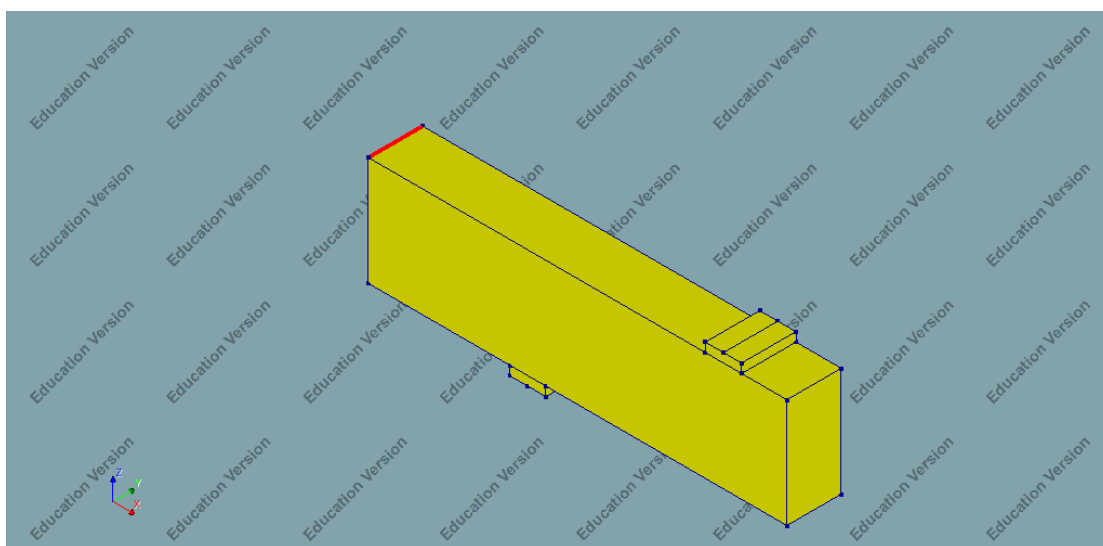
## 5.5 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης pushover χρειάζεται σε κάθε βήμα να πάρουμε την τιμή του συνολικού φορτίου  $P$ , που επιβάλλεται στο μέσον της IPE 240 και της μετακίνησης  $\delta$  στο μέσον της δοκού κατά τη διεύθυνση του φορτίου  $P$ . Η αντίδραση στην πάνω ή κάτω μεταλλική πλάκα, λόγω συμμετρίας είναι ίση με το μισό του φορτίου  $P$ . Αθροίζοντας τις επικόμβιες αντιδράσεις, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ , των κόμβων του ευθυγράμμου τμήματος που βρίσκεται στο μέσον της μεταλλικής πλάκας, στο οποίο γίνεται η εφαρμογή των αντιδράσεων, προκύπτει το μισό του φορτίου  $P$ . Έτσι αυτή η τιμή πολλαπλασιαζόμενη επί 2 δίνει την τιμή του συνολικού φορτίου  $P$ . Η μετακίνηση  $\delta$  στο μέσον της δοκού προκύπτει ως ο μέσος όρος των επικόμβιων

μετακινήσεων κατά z των κόμβων που ανήκουν στην πλέον εφελκόμενη ίνα της μεσαίας διατομής, όπως φαίνεται στην εικόνα.



Σχήμα 5.13 Κόμβοι (κόκκινο) που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου P σε κάθε βήμα



Σχήμα 5.14 Κόμβοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της παραμόρφωσης στο μέσον σε κάθε βήμα

## 6. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

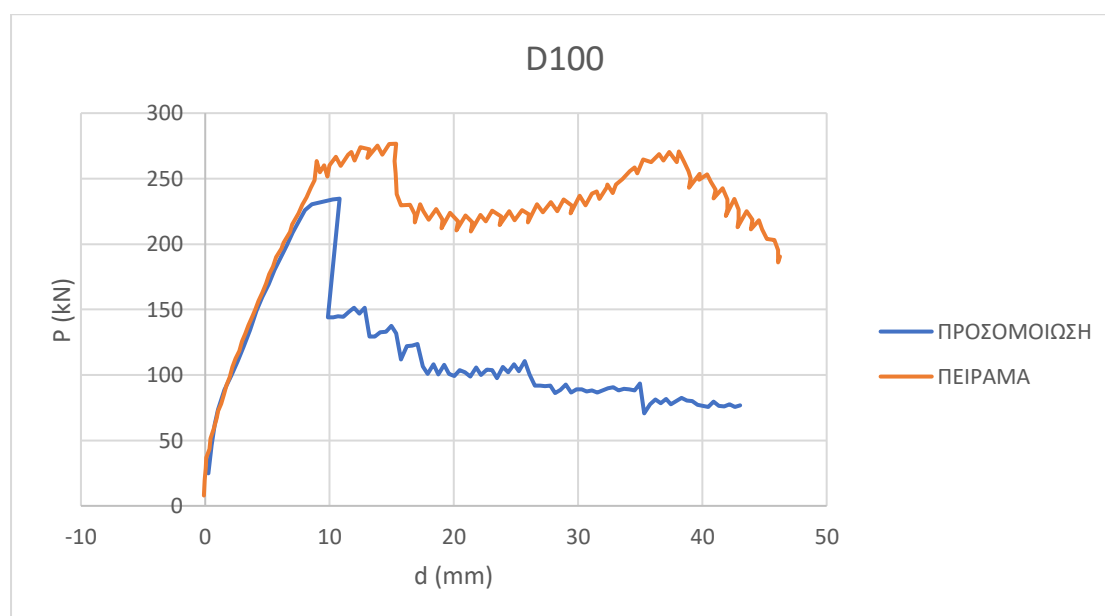
### 6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις στο DIANA FEA, με βάση τις εξισώσεις που προέκυψαν από τα paper (Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta) και (FLEXURAL BEHAVIOR

OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE By Tat-Seng Lok, Member, ASCE, and Jin-Song Pei), αλλά και από τον κανονισμό RILEM TC 162 – TDF. Ακόμη, γίνεται ανάλυση και σχολιασμός των καμπυλών pushover και συγκρίνονται με αυτές του πειράματος. Επίσης, ελέγχονται οι τάσεις σε πιθανές επιφάνειες αστοχίας σε κρίσιμα στάδια των pushover.

## 6.2 Δοκίμιο D100

### Καμπύλη φορτίου - μετακίνησης



Σχήμα 6.1 Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης D100

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	Φορτίου	Μετακίνησης
Ρηγμάτωση	62.47	0.768	43.1	0.264	+44.94%	+190.91%
Διαρροή	225.87	8.018	264.18	9.521	-14.50%	-15.79%
Μέγιστο	234.68	10.813	278.56	13.845	-15.75%	-21.90%
Πτώση	143.84	9.881	229.4	17.324	-37.30%	-42.96%

Πίνακας 6.1 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων καμπύλης φορτίου – παραμόρφωσης D100

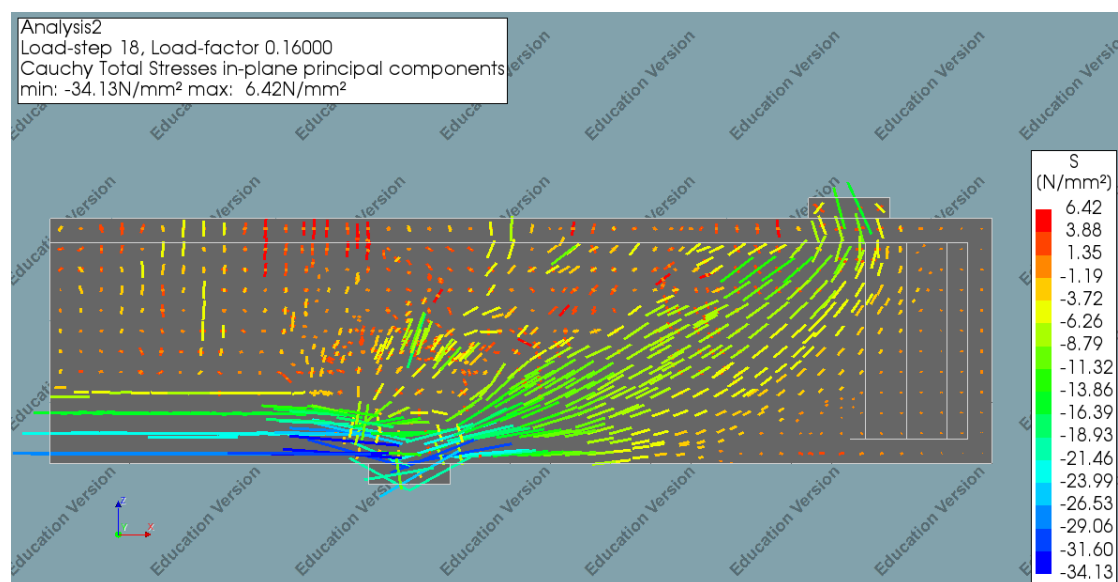
Όπως φαίνεται από την σύγκριση των δύο καμπυλών, το μοντέλο που εξετάζεται προσεγγίζει ικανοποιητικά την ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Αυτό στο οποίο υστερεί είναι η επίτευξη της αντοχής που έχει μετρηθεί στο πείραμα, καθώς διαρρέει

σε μικρότερη παραμόρφωση. Αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω στις τροχιές κυρίων τάσεων, οφείλεται σε τοπικές αστοχίες.

Όσον αφορά στις καμπτικές ροπές στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο για το τμήμα σταθερής ροπής της δοκού, στο πείραμα αυτές υπολογίζονται ως  $M = P/2 \cdot a$  από την στατική επίλυση, όπου  $a = 0.54$  m το διατμητικό μήκος και  $P$  το συνολικό φορτίο το οποίο ισομοιράζεται σε κάθε στήριξη. Από το πείραμα υπολογίζονται στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο αντίστοιχα,  $M_y = 71.32$  kNm και  $M_u = 75.21$  kNm. Στο προσομοίωμα υπολογίζονται από τις επικόμβιες αντιδράσεις της κυλιόμενης πάκτωσης, που αντιπροσωπεύουν τις εσωτερικές αξονικές δυνάμεις της πραγματικής δοκού στη μεσαία διατομή, επί τον μοχλοβραχίονα κάθε κόμβου μετρούμενο από ένα επίπεδο αναφοράς. Οι τιμές που προκύπτουν είναι  $M_y = 61.09$  kNm και  $M_u = 63.51$  kNm.

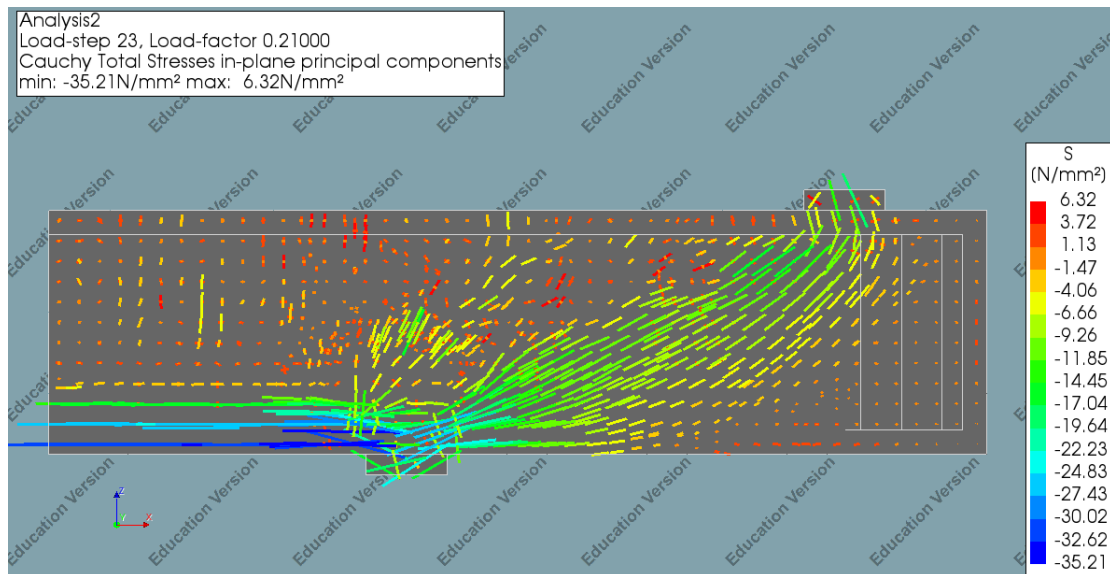
## Τροχιές κυρίων τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των συνιστωσών των κυρίων τάσεων σε κατακόρυφο διαμήκες επίπεδο που διέρχεται από το μέσον την δοκού με σκοπό την διερεύνηση των τοπικών αστοχιών που οδηγούν σε πτώση της pushover.



Σχήμα 6.2 Τροχιές κυρίων τάσεων στη διαρροή – D100

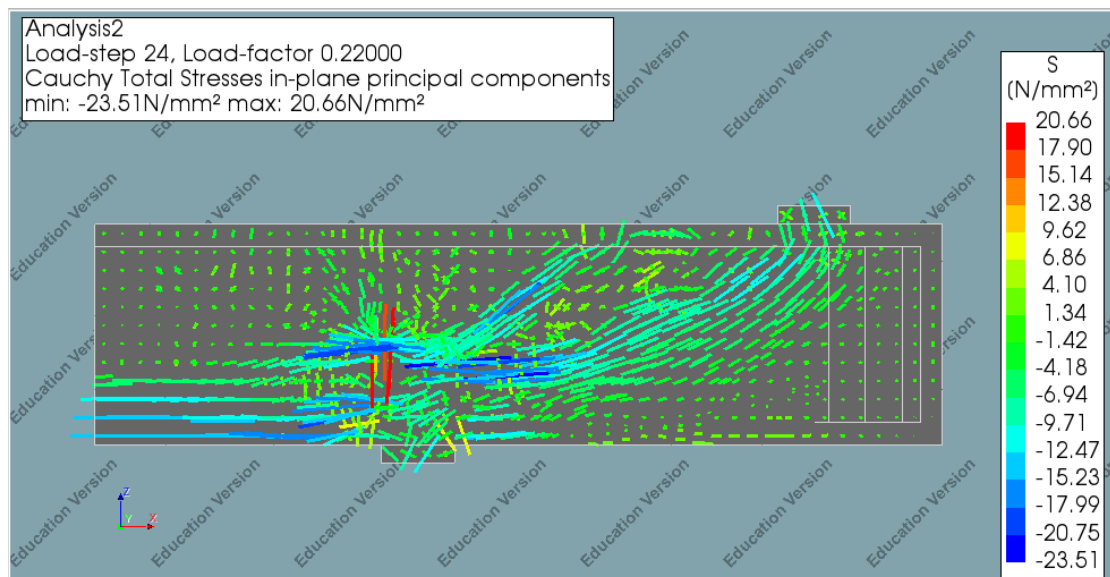




Σχήμα 6.3 Τροχιές κυρίων τάσεων στο μέγιστο φορτίο – D100

Στην περιοχή της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο παρατηρείται συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε τοπική αστοχία, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση στην καμπύλη pushover.

### Πτώση

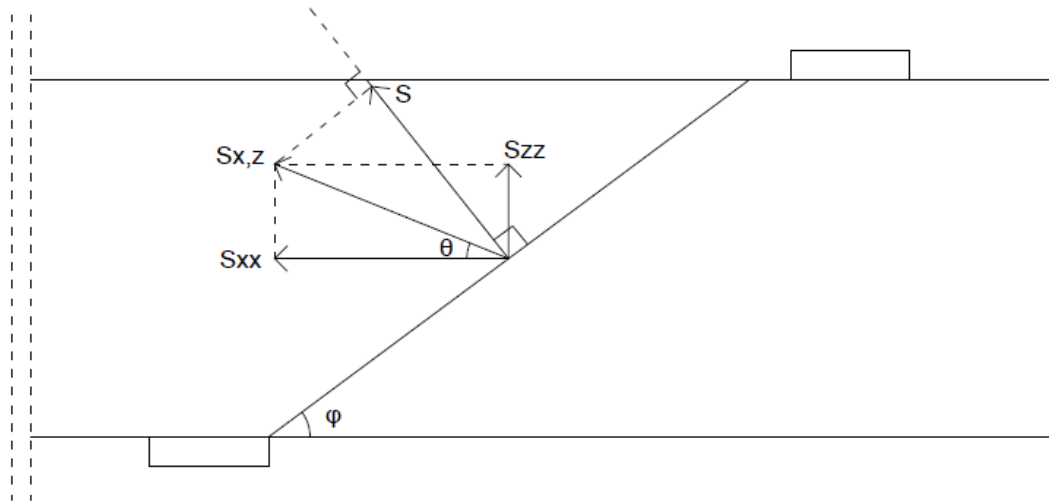


Σχήμα 6.4 Τροχιές κυρίων τάσεων στην πτώση – D100

## Αναζήτηση πιθανών επιφανειών αστοχίας λόγω διάτμησης

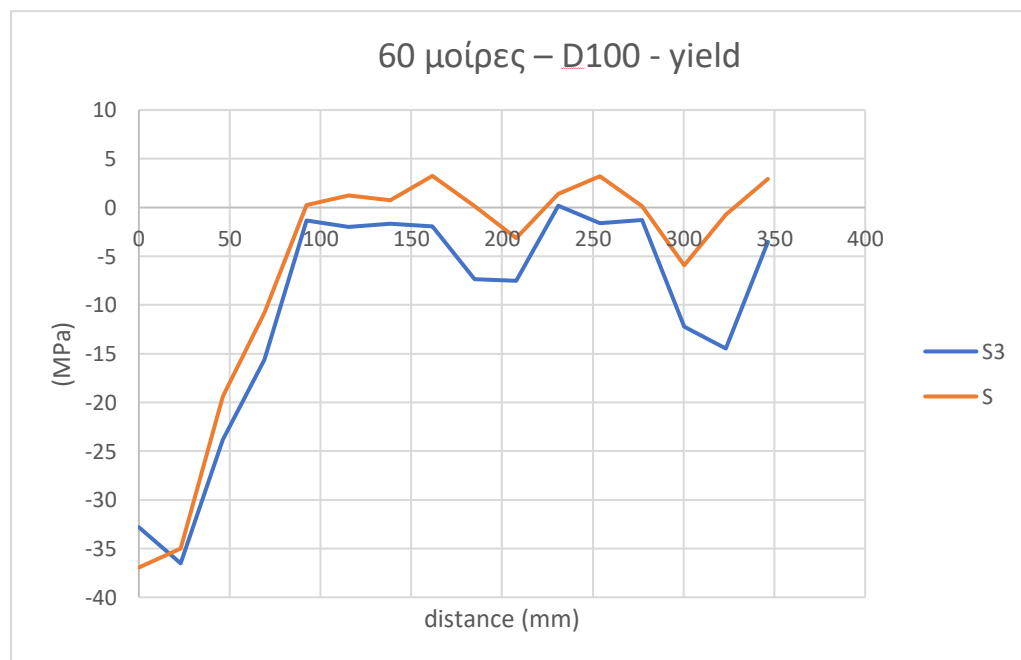
Στη συνέχεια αναζητούνται πιθανές επιφάνειες αστοχίας λόγω διάτμησης, οι οποίες ξεκινούν από την παρειά της άνω ή της κάτω στήριξης και έχουν τέτοια κλίση ώστε κάθε φορά να τέμνουν σημεία με μεγάλες τιμές κυρίων εφελκυστικών τάσεων. Από το

DIANA FEA λαμβάνονται οι ορθές τάσεις κατά τον διαμήκη άξονα x και κατά τον κατακόρυφο z και υπολογίζεται η προβολή (S) της συνισταμένης τους στην κάθετη στην επιφάνεια διεύθυνση και συγκρίνεται με την κύρια τάση (S3), για να διαπιστωθεί κατά πόσον η επιλεγθείσα επιφάνεια προσεγγίζει την πραγματική επιφάνεια αστοχίας.

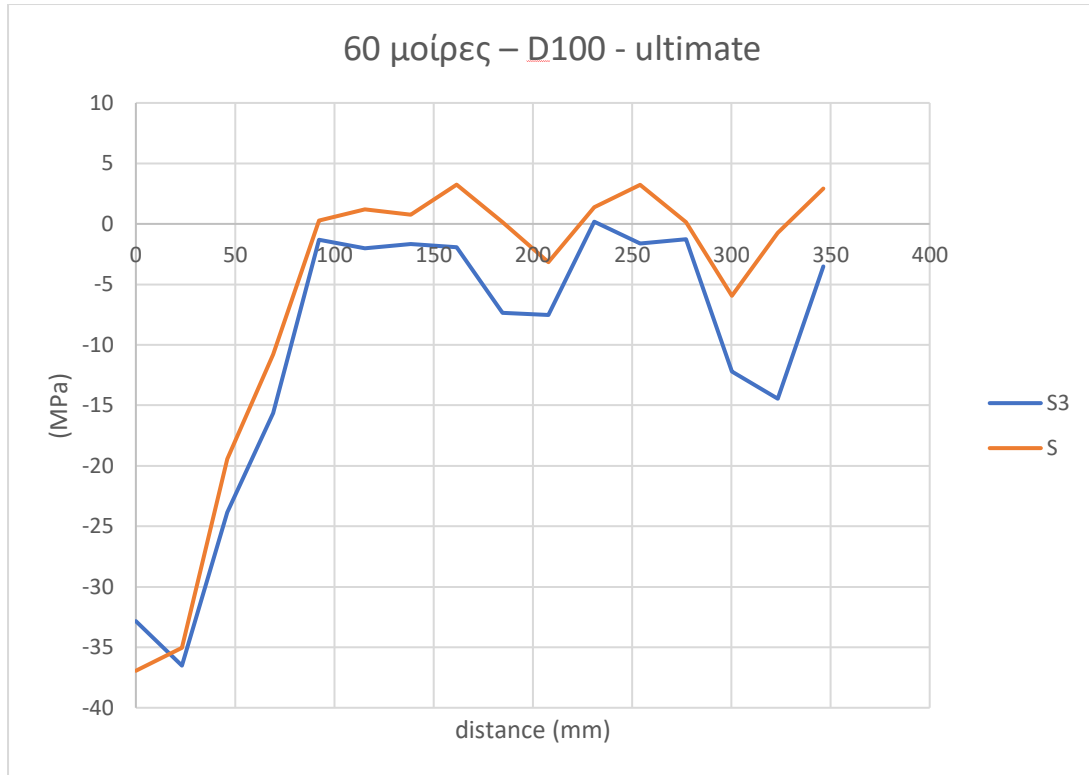


Σχήμα 6.5 Υπολογισμός των ορθών τάσεων της πιθανής επιφάνειας αστοχίας σε διάτμηση

Ορθές Τάσεις (S) επιφάνειας 60 μοιρών από την παρειά της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο (κάτω στήριξη). Ο οριζόντιος άξονας είναι παράλληλος στην εν λόγω επιφάνεια και το  $\theta$  είναι το κατώτατο σημείο αυτής (στην παρειά της στήριξης).

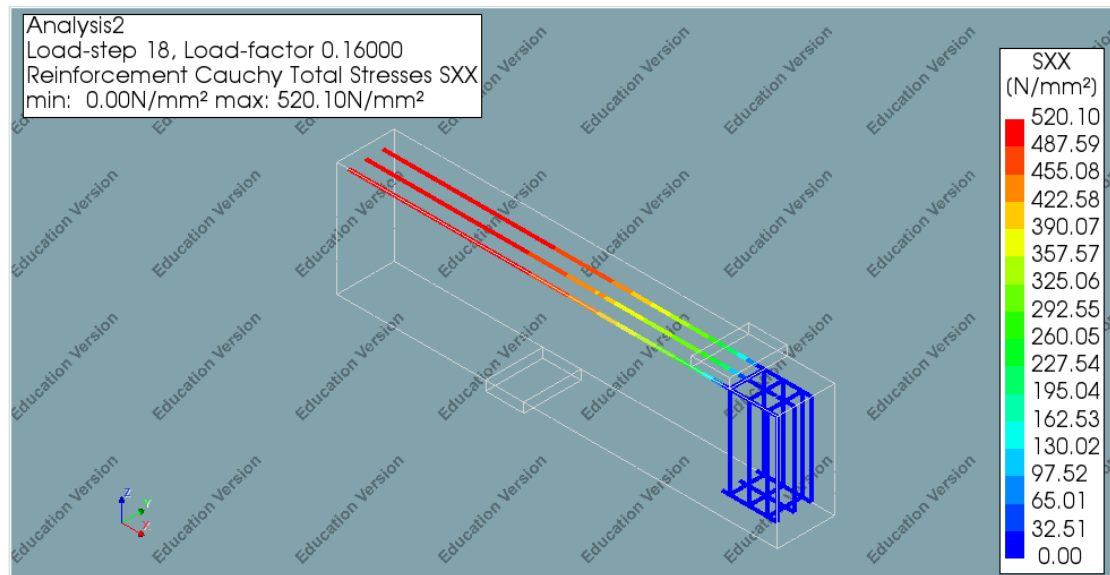


Σχήμα 6.6 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας D100 - Διαρροή

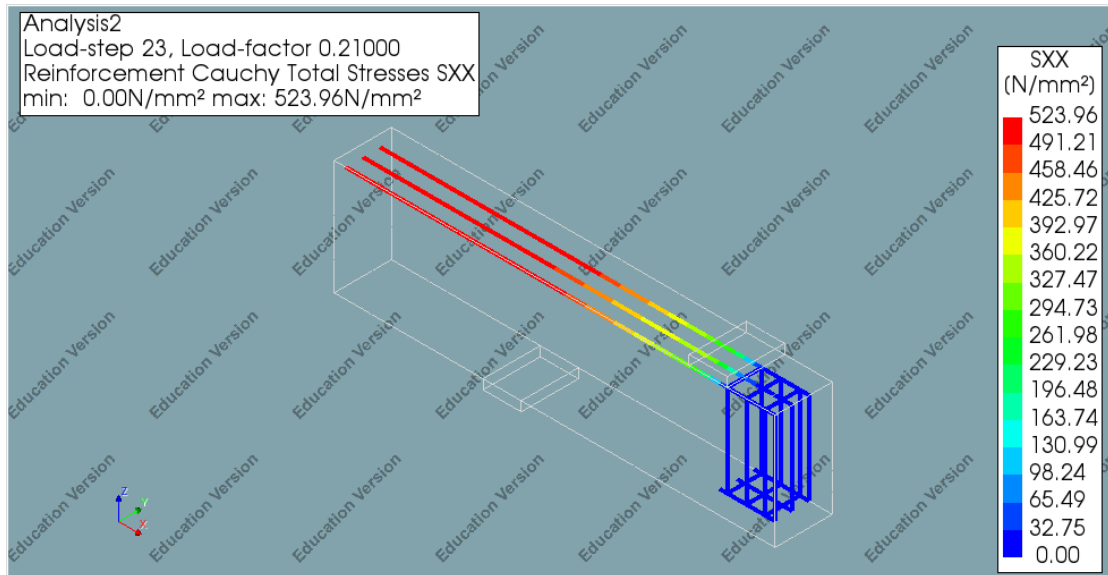


Σχήμα 6.7 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας D100 - Μέγιστο

### Τάσεις οπλισμών σε χαρακτηριστικά σημεία



Σχήμα 6.8 Τάσεις οπλισμών D100 – Διαρροή

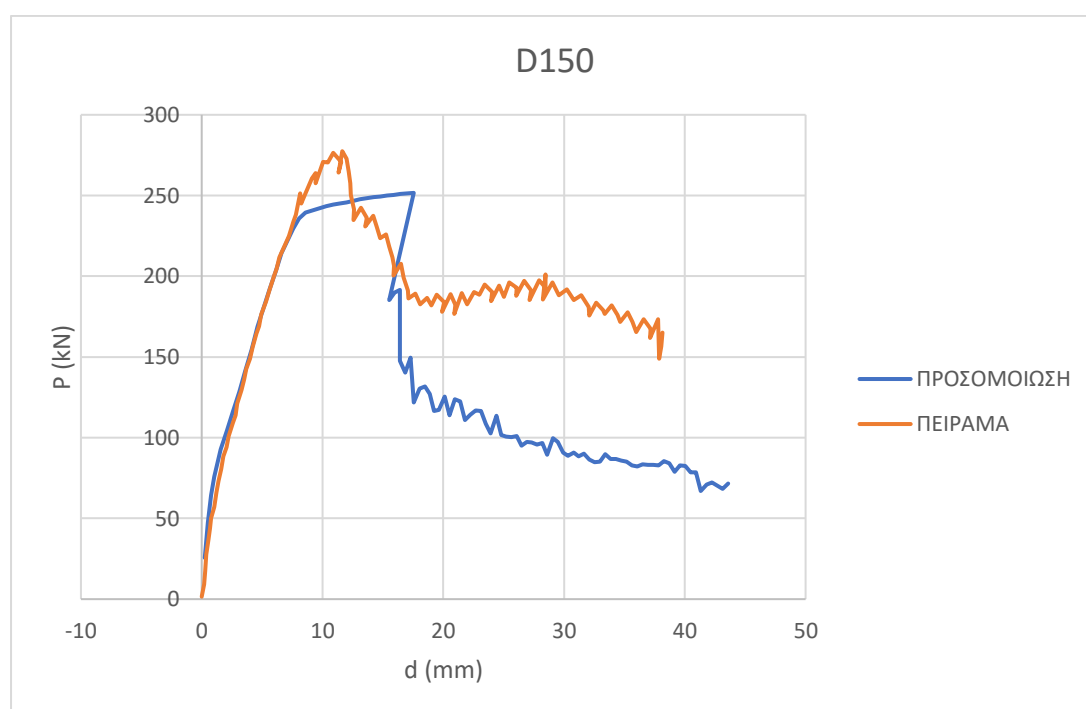


Σχήμα 6.9 Τάσεις οπλισμών D100 - Μέγιστο

Όπως διαπιστώνεται η διαρροή της διατομής ταυτίζεται με την διαρροή του οπλισμού ( $f_y = 520 \text{ MPa}$ ) και στην συνέχεια δεν αυξάνεται σημαντικά η τάση του μέχρι το μέγιστο φορτίο, όπως συμβαίνει και στη καμπύλη φορτίου - μετακίνησης, καθώς η εμφάνιση του μέγιστου φορτίου δεν απέχει πολύ από την διαρροή. Έτσι προκύπτει οριακά μία πολύ μικρή πλαστικοποίηση του οπλισμού.

### 6.3 Δοκίμιο D150

#### Καμπύλη φορτίου - μετακίνησης



Σχήμα 6.10 Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης D150

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	Φορτίου	Μετακίνησης
Ρηγμάτωση	64.29	0.768	64.06	1.163	+0.36%	-33.96%
Διαρροή	235.86	8.043	252.42	8.431	-6.56%	-4.60%
Μέγιστο	251.64	17.567	280.18	10.812	-10.19%	+61.55%
Πτώση	140.20	16.833	191.28	17.164	-26.70%	-1.93%

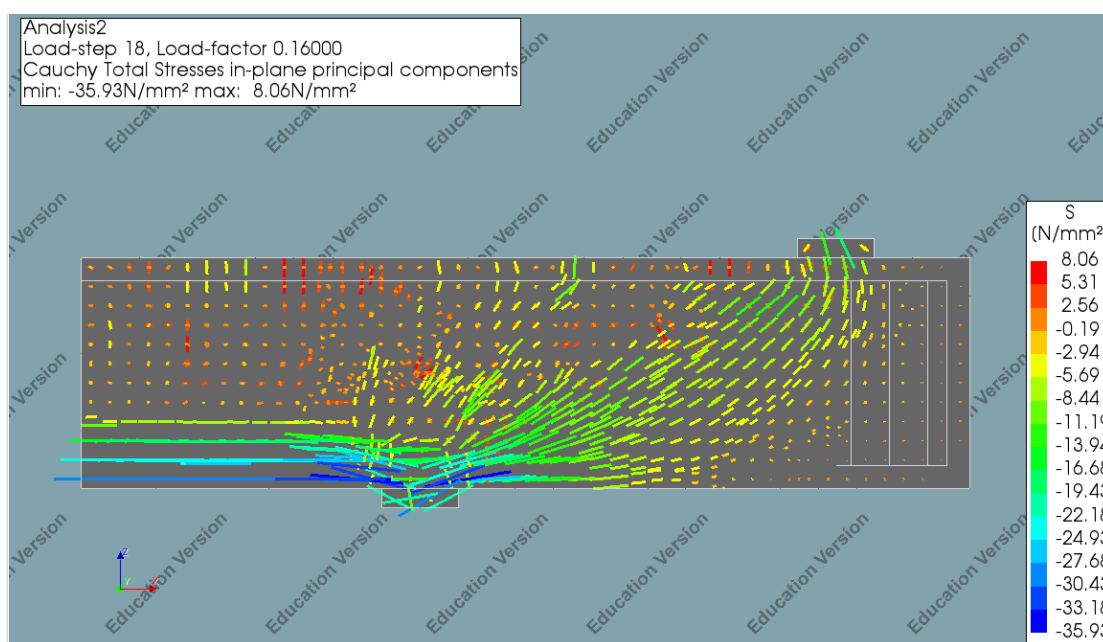
Πίνακας 6.2 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων καμπύλης φορτίου – μετακίνησης D150

Το προσομοίωμα φαίνεται να προσεγγίζει και πάλι ικανοποιητικά την ελαστική συμπεριφορά. Επίσης, συγκριτικά με άλλα δοκίμια έχουμε καλύτερη προσέγγιση του μετελαστικού κλάδου. Μάλιστα, σε ένα τμήμα η καμπύλη του προσομοιώματος βρίσκεται πάνω από αυτή του πειράματος, καθώς η μεγιστοποίηση του φορτίου αλλά και η πτώση συμβαίνουν σε μεγαλύτερη παραμόρφωση συγκριτικά με το πείραμα. Παρ' όλα αυτά η πτώση του φορτίου είναι και πάλι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα να βρίσκεται κάτω από την καμπύλη του πειράματος σε αυτό το στάδιο.

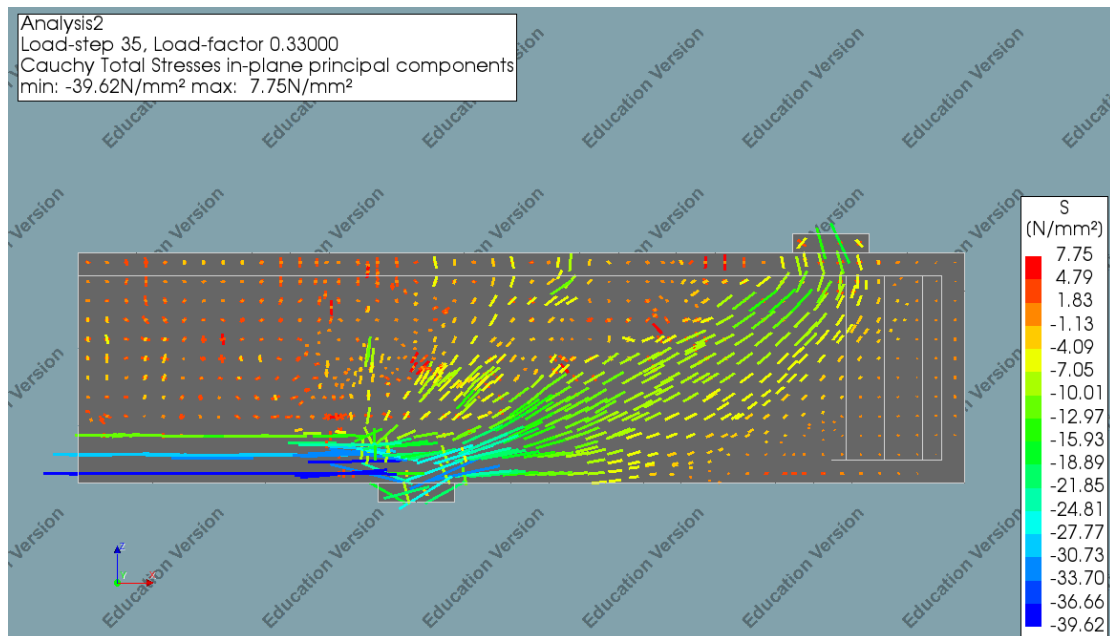
Από το πείραμα οι τιμές των καμπτικών ροπών που προκύπτουν στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο είναι  $M_y = 68.15$  kNm και  $M_u = 75.65$  kNm. Από το προσομοίωμα οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν είναι  $M_y = 63.76$  kNm και  $M_u = 68.12$  kNm, όπως υπολογίστηκαν από τις επικόμβιες αντιδράσεις για την μεσαία διατομή.

## Τροχιές κυρίων τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των συνιστωσών των κυρίων τάσεων σε κατακόρυφο διαμήκες επίπεδο που διέρχεται από το μέσον την δοκού με σκοπό την διερεύνηση των τοπικών αστοχιών που οδηγούν σε πτώση της καμπύλης φορτίου - μετακίνησης.

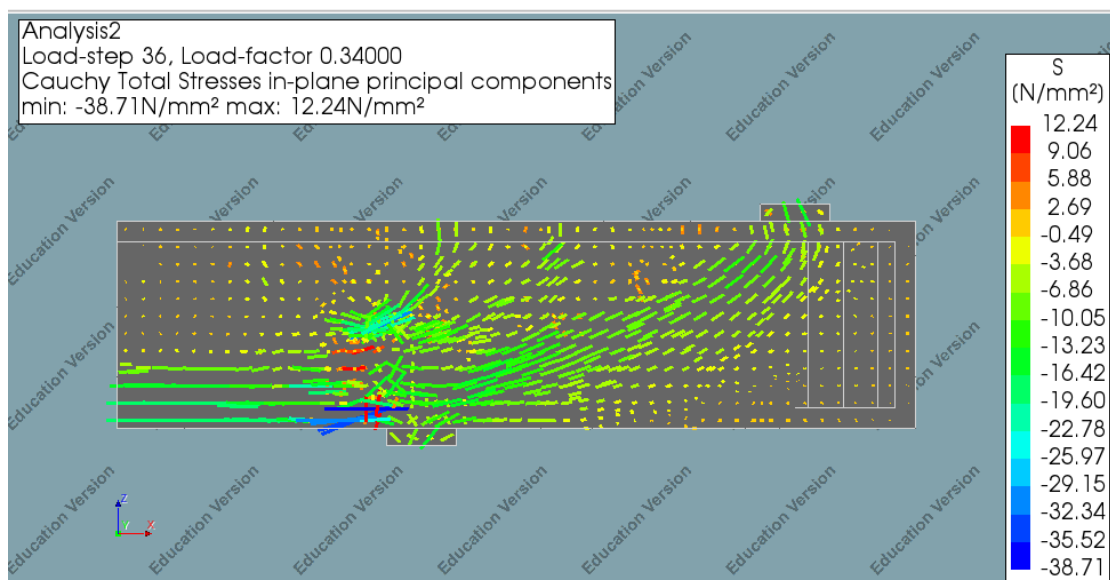


Σχήμα 6.11 Τροχιές κυρίων τάσεων D150 - Διαρροή



Σχήμα 6.12 Τροχιές κυρίων τάσεων D150 – Μέγιστο

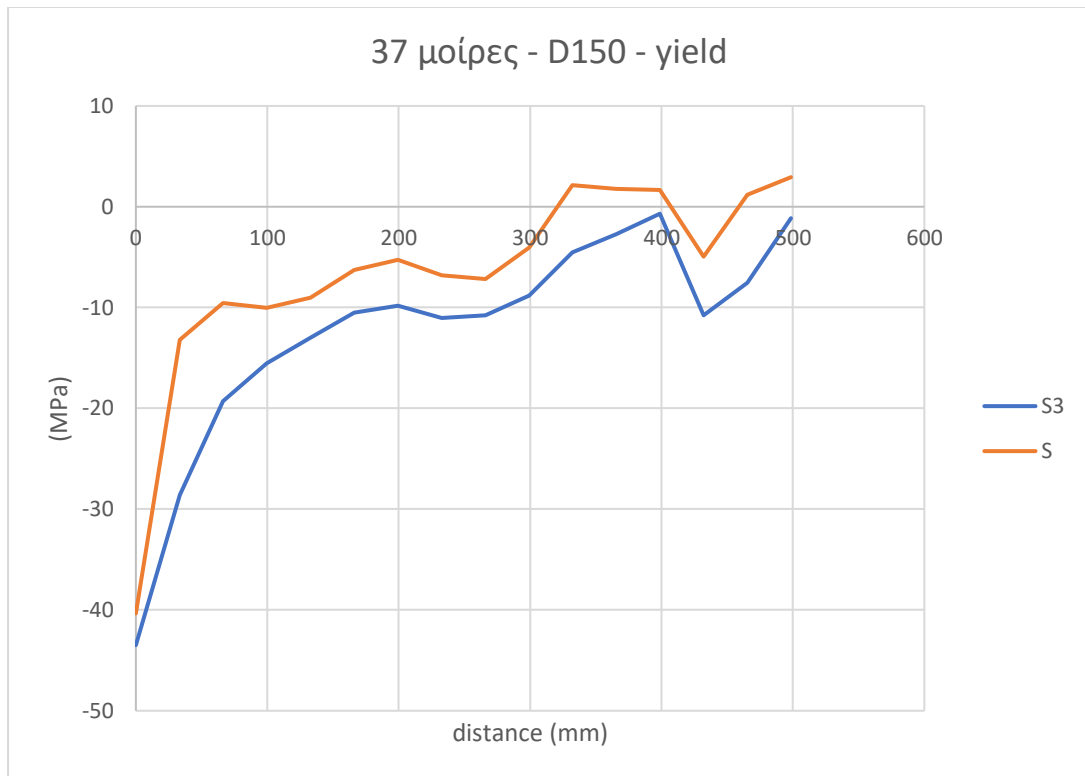
Στην περιοχή της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο παρατηρείται συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε τοπική αστοχία, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση στην καμπύλη pushover.



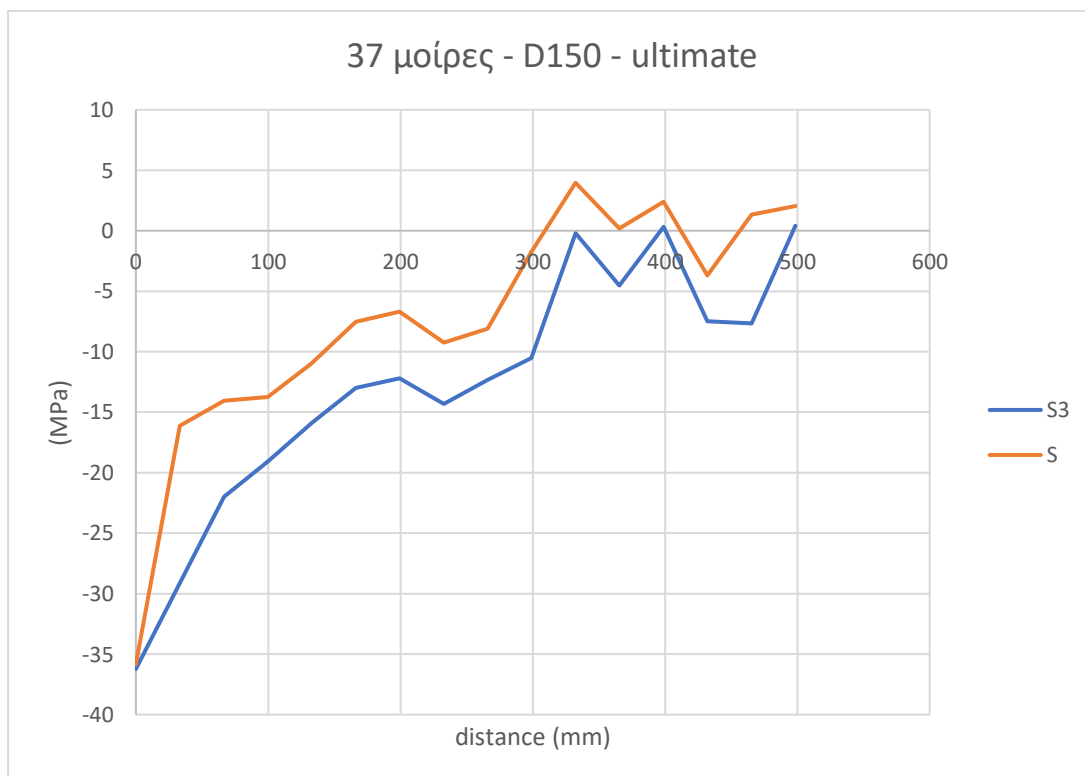
Σχήμα 6.13 Τροχιές κυρίων τάσεων D150 – Πτώση

### Αναζήτηση πιθανών επιφανειών αστοχίας λόγω διάτμησης

Ορθές Τάσεις (S) επιφάνειας 37 μοιρών από την παρειά της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο (κάτω στήριξη). Ο οριζόντιος άξονας είναι παράλληλος στην εν λόγω επιφάνεια και το 0 είναι το κατώτατο σημείο αυτής (στην παρειά της στήριξης).



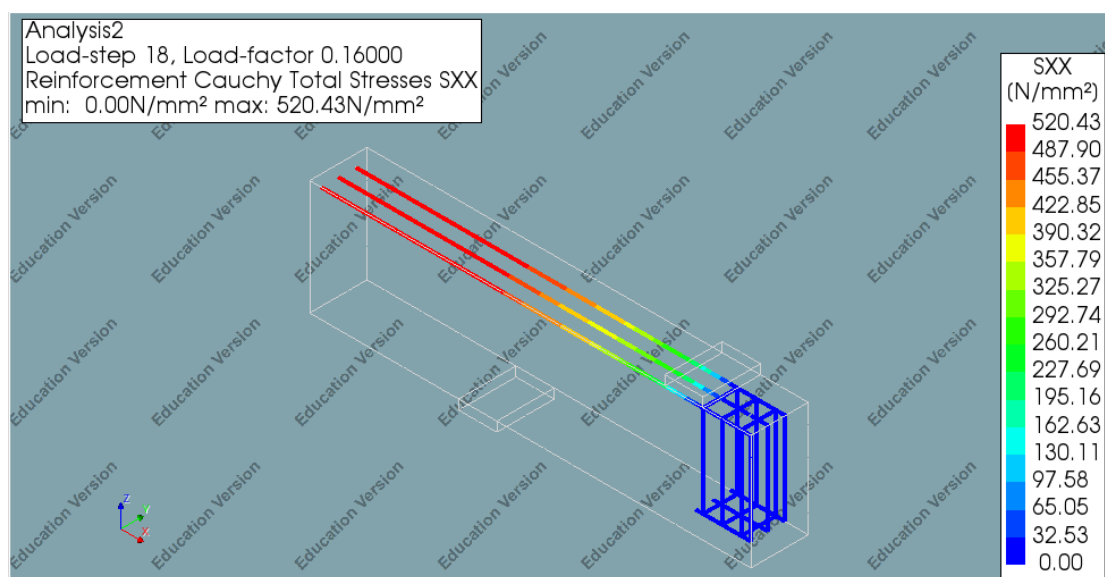
Σχήμα 6.14 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας D150 – Διαρροή



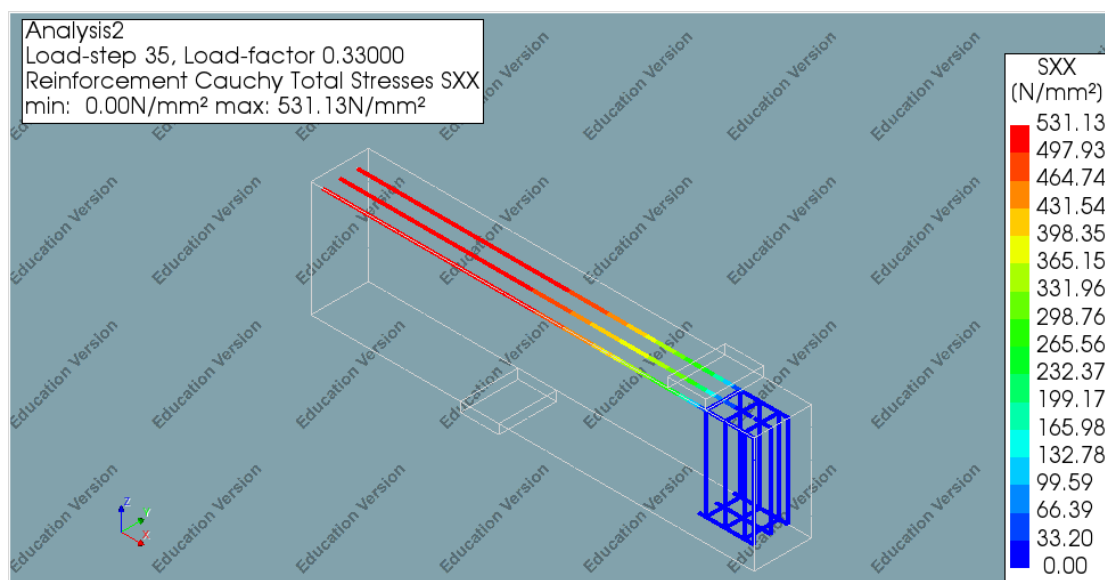
Σχήμα 6.15 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας D150 - Μέγιστο



## Τάσεις οπλισμών σε χαρακτηριστικά σημεία



Σχήμα 6.16 Τάσεις οπλισμών D150 – Διαρροή



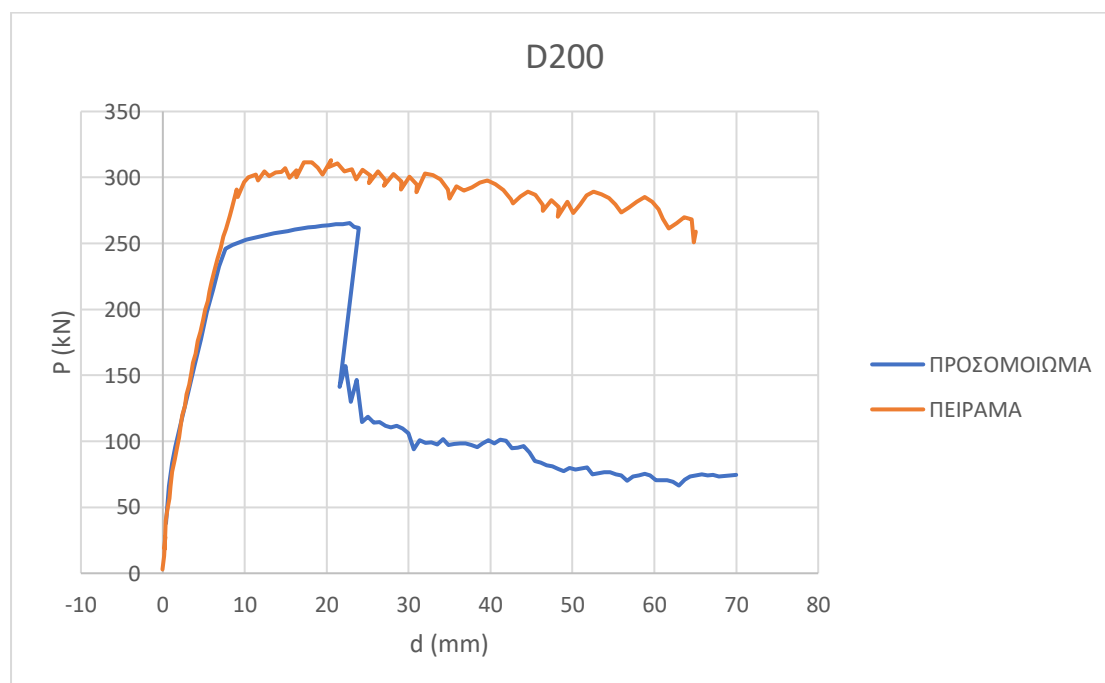
Σχήμα 6.17 Τάσεις οπλισμών D150 – Μέγιστο

Όπως διαπιστώνεται η διαρροή της διατομής ταυτίζεται με την διαρροή του οπλισμού ( $f_y = 520$  MPa). Στη συνέχεια, φτάνει στη μέγιστη τάση 530 MPa, που σημαίνει ότι ο οπλισμός έχει πλαστικοποιηθεί. Συγκριτικά με το δοκίμιο D100 ανέπτυξε μεγαλύτερη

μέγιστη τάση, που είναι λογικό διότι στο D150 ο ανοδικός κλάδος είναι μεγαλύτερος και κατά συνέπεια μεγαλύτερη και η πλαστιμότητα.

## 6.4 Δοκίμιο D200

### Καμπύλη φορτίου - μετακίνησης



Σχήμα 6.18 Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης D200

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	Φορτίου	Μετακίνησης
Ρηγμάτωση	83.57	1.161	59.86	0.781	+39.61%	+48.66%
Διαρροή	245.80	7.666	294.41	9.275	-16.51%	-17.35%
Μέγιστο	265.44	22.791	313.64	20.887	-15.37%	+9.12%
Πτώση	141.08	22.559	270.51	63.652	-	-

Πίνακας 6.3 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων καμπύλης φορτίου – μετακίνησης D200

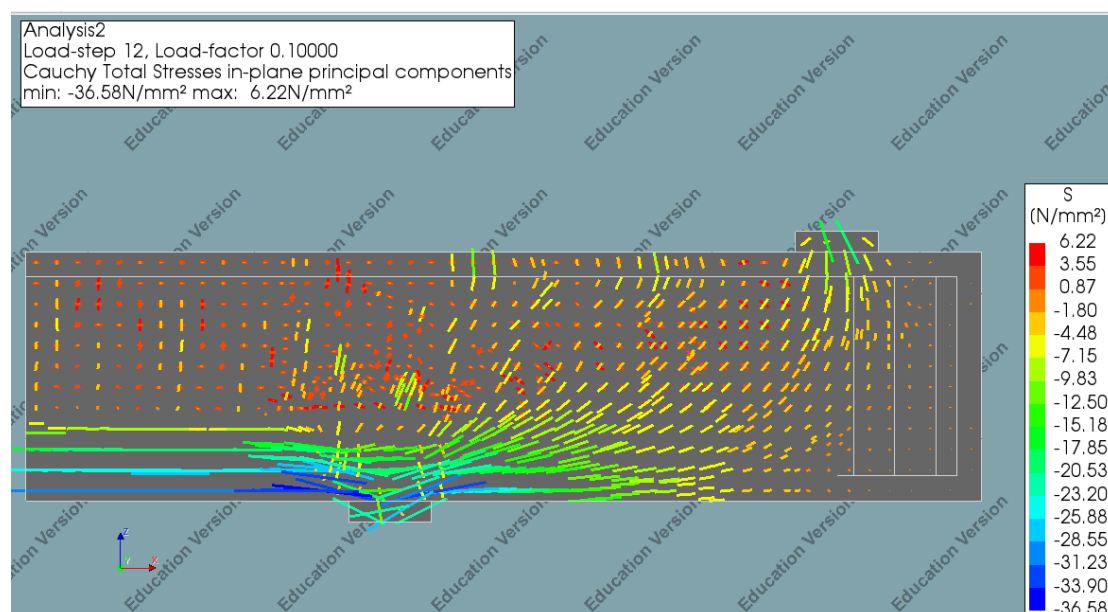
Το προσομοίωμα προσεγγίζει ικανοποιητικά το ελαστικό τμήμα του πειράματος, αλλά η απόκλιση όσον αφορά στην αντοχή εδώ είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό ινών, που κάνει το συγκεκριμένο δοκίμιο να συμπεριφέρεται διαφορετικά σε σχέση με τα υπόλοιπα, έχοντας μεγαλύτερη αντοχή και πλαστιμότητα. Επίσης, και σε αυτό το δοκίμιο η πτώση στην καμπύλη της προσομοίωσης συμβαίνει μεν σε

μεγαλύτερη παραμόρφωση σε σχέση με τα άλλα δοκίμια, αλλά συγκριτικά με το πείραμα συμβαίνει αρκετά νωρίς και η τιμή του φορτίου μετά από αυτήν είναι μεγάλη.

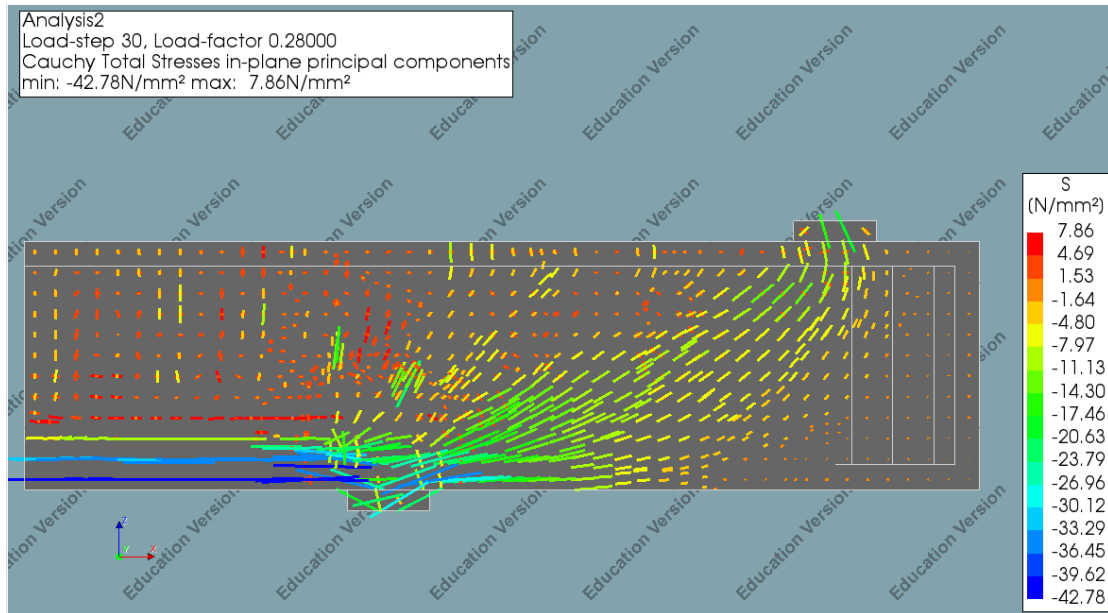
Από το πείραμα οι τιμές των καμπτικών ροπών που προκύπτουν στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο είναι  $M_y = 79.49$  kNm και  $M_u = 84.68$  kNm. Από το προσομοίωμα οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν είναι  $M_y = 66.30$  kNm και  $M_u = 71.80$  kNm, όπως υπολογίστηκαν από τις επικόμβιες αντιδράσεις για την μεσαία διατομή.

## Τροχιές κυρίων τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των συνιστωσών των κυρίων τάσεων σε κατακόρυφο διαμήκες επίπεδο που διέρχεται από το μέσον την δοκού με σκοπό την διερεύνηση των τοπικών αστοχιών που οδηγούν σε πτώση της καμπύλης φορτίου – μετακίνησης.

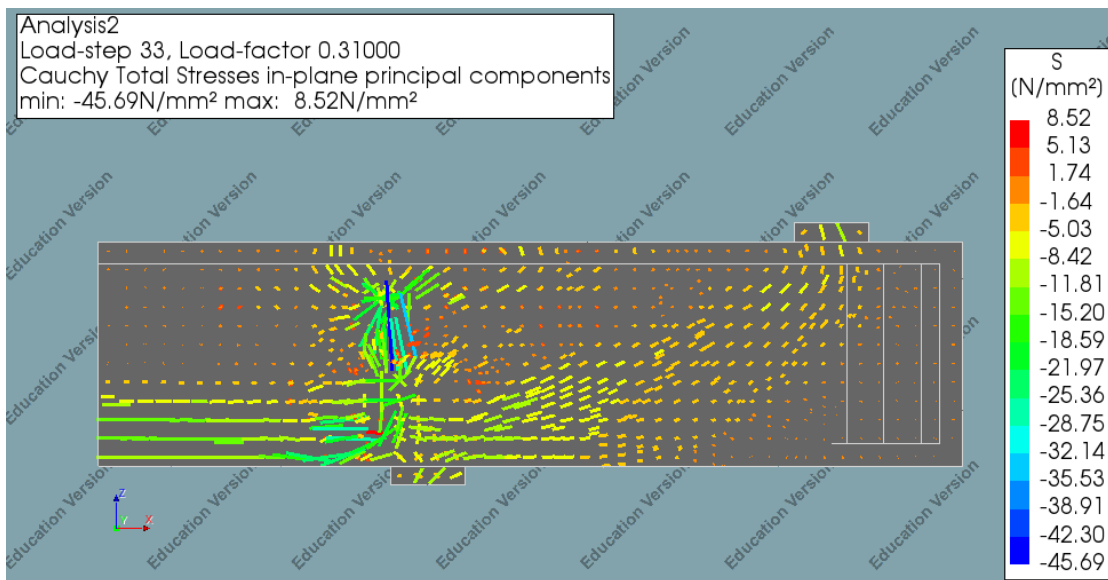


Σχήμα 6.19 Τροχιές κυρίων τάσεων D200 – Διαρροή



Σχήμα 6.20 Τροχιές κυρίων τάσεων D200 – Μέγιστο

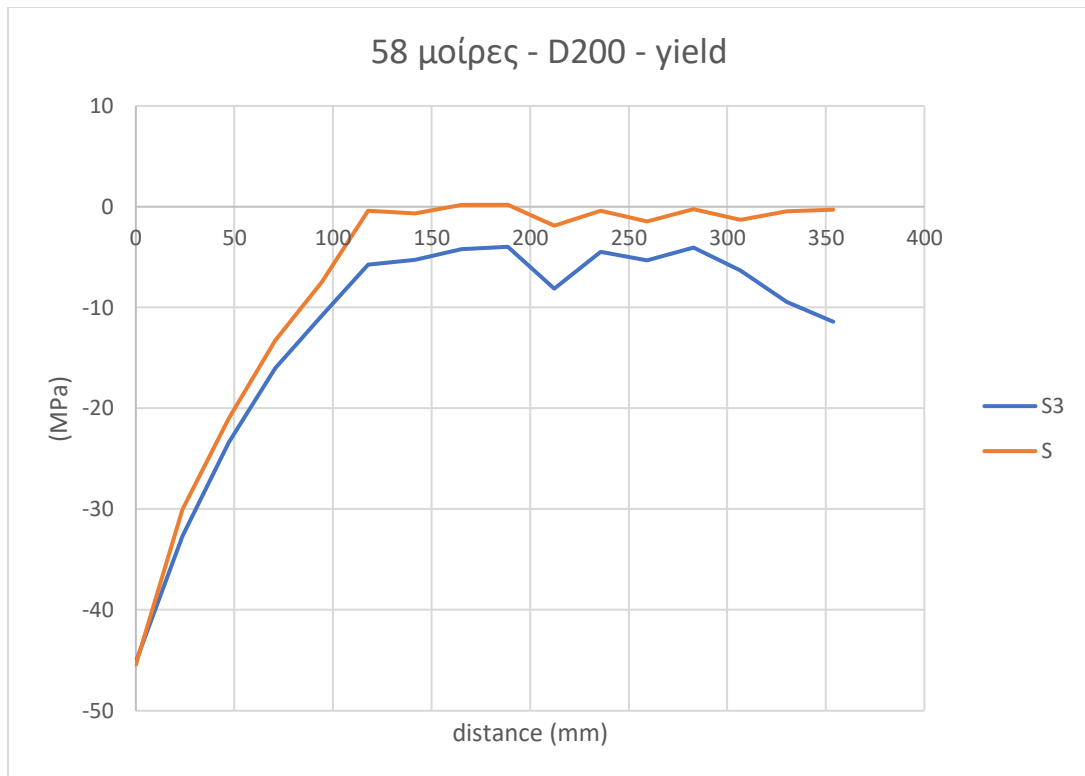
Στην περιοχή της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο παρατηρείται συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε τοπική αστοχία, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση στην καμπύλη pushover.



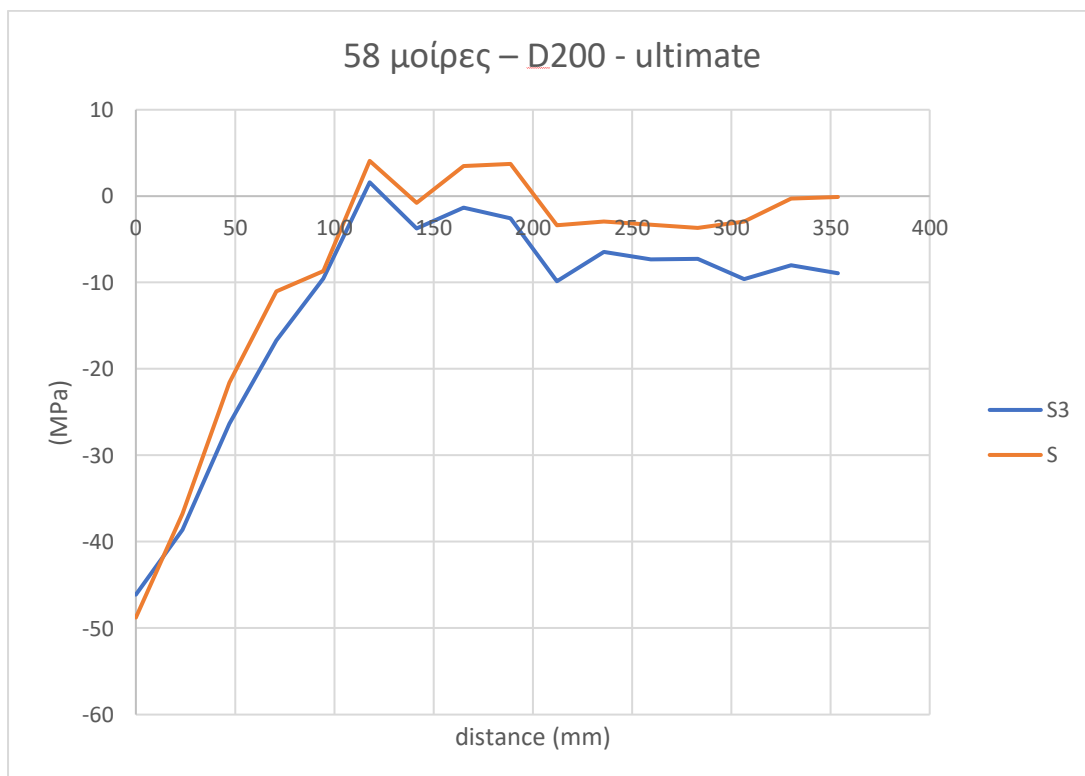
Σχήμα 6.21 Τροχιές κυρίων τάσεων D200 – Πτώση

### **Αναζήτηση πιθανών επιφανειών αστοχίας λόγω διάτμησης**

Ορθές Τάσεις (S) επιφάνειας 58 μοιρών από την παρειά της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο (κάτω στήριξη). Ο οριζόντιος άξονας είναι παράλληλος στην εν λόγω επιφάνεια και το 0 είναι το κατώτατο σημείο αυτής (στην παρειά της στήριξης).

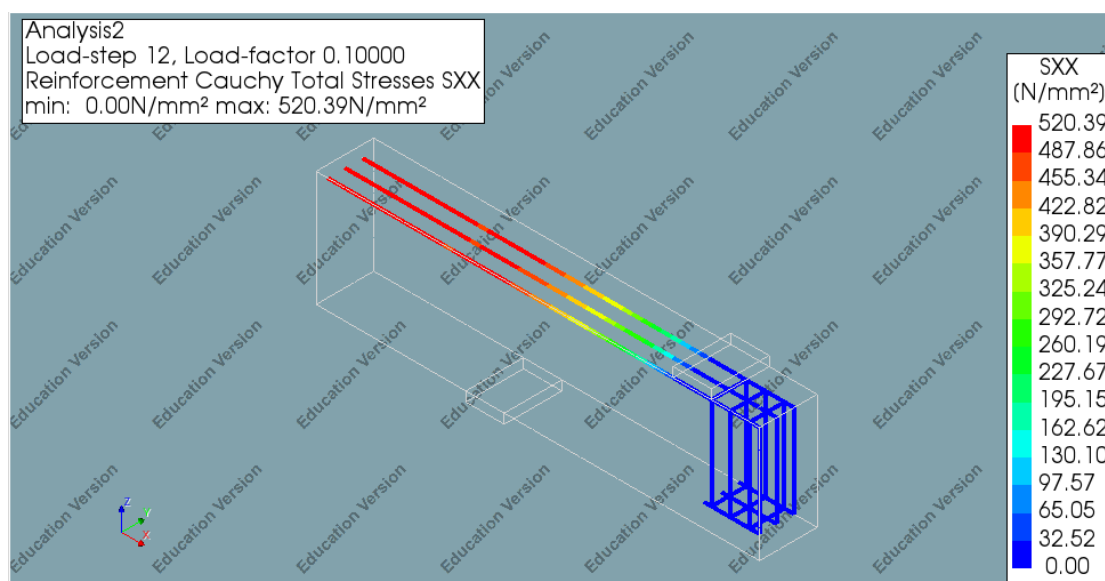


Σχήμα 6.22 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας D200 – Διαρροή

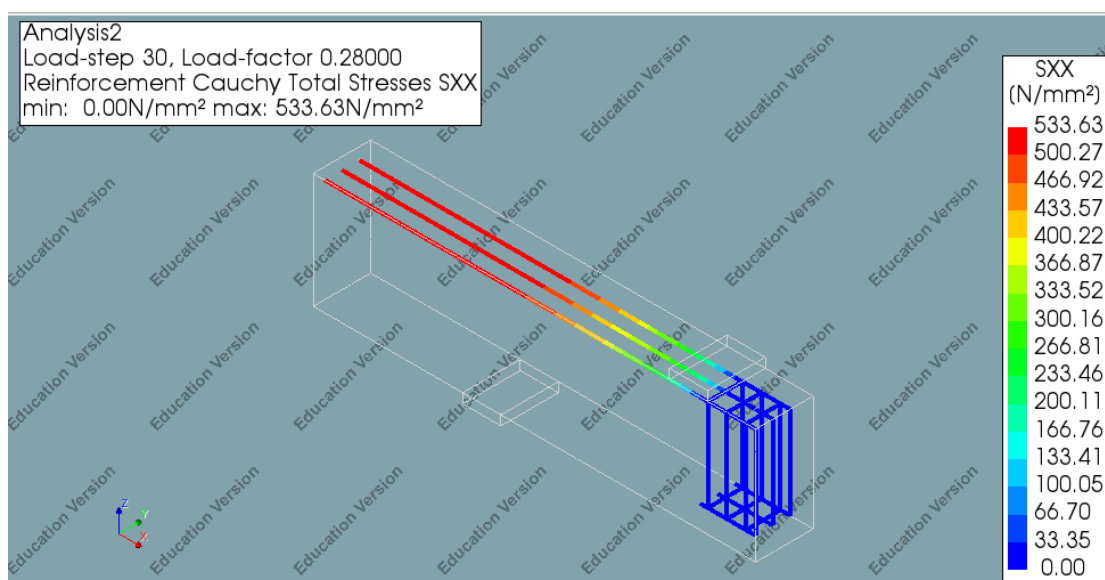


Σχήμα 6.23 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας D200 - Μέγιστο

## Τάσεις οπλισμών σε χαρακτηριστικά σημεία



Σχήμα 6.24 Τάσεις οπλισμών D200 – Διαρροή



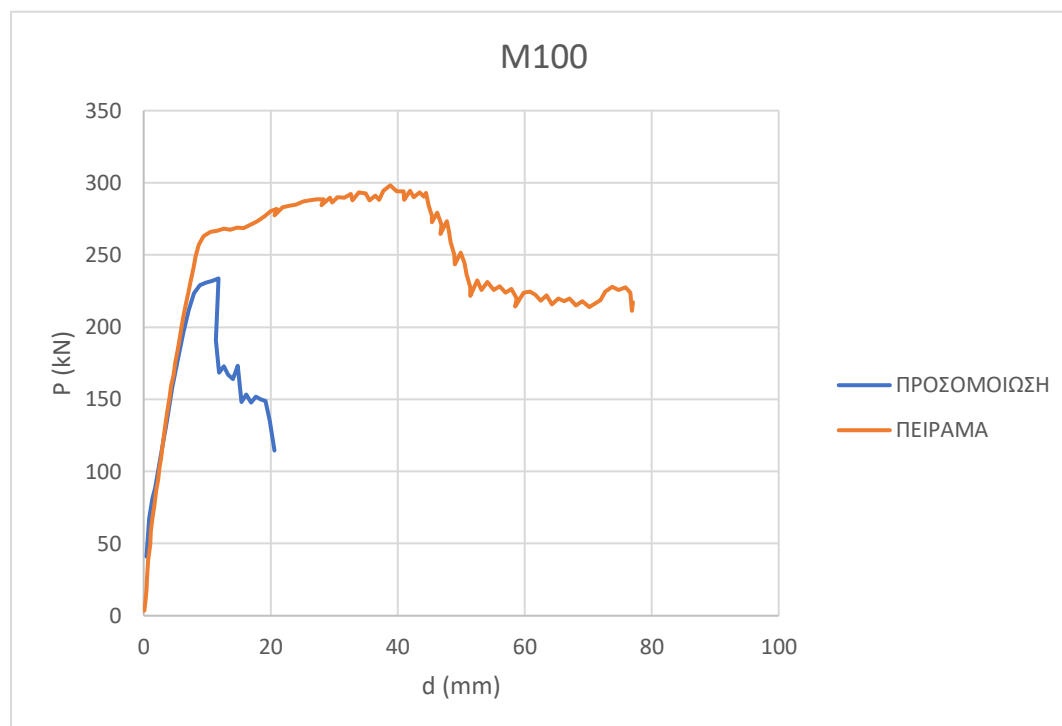
Σχήμα 6.25 Τάσεις οπλισμών D200 – Μέγιστο

Η διαρροή του οπλισμού συμβαίνει στο βήμα της ανάλυσης που διαρρέει και η διατομή συνολικά ( $f_y = 520\text{MPa}$ ). Αυτό συμβαίνει στο τμήμα του οπλισμού που βρίσκεται στο τμήμα σταθερής ροπής, ενώ στο τμήμα σταθερής τέμνουσας βρίσκεται ακόμα στο ελαστικό μέρος, τόσο στη διαρροή όσο και στο μέγιστο. Η μέγιστη τάση που

αναπτύσσει ο οπλισμός στο μοντέλο είναι 533 MPa που σημαίνει ότι έχει αναπτύξει πλαστική παραμόρφωση, όχι όμως όσο μεγάλη θα ήταν αναμενόμενο, καθώς και στο δοκίμιο D150 ανέπτυξε μέγιστη τάση 531 MPa που είναι αρκετά κοντά σε αυτή του D200.

## 6.5 Δοκίμιο M100

### Καμπύλη φορτίου - μετακίνησης



Σχήμα 6.26 Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης M100

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	Φορτίου	Μετακίνησης
Ρηγμάτωση	67.42	0.900	56.28	1.065	+19.79%	-15.49%
Διαρροή	223.61	7.886	259.04	8.751	-13.68%	-9.88%
Μέγιστο	233.73	11.794	301.29	55.816	-22.42%	-78.87%
Πτώση	191.088	11.409	230.91	55.816	-17.25%	-79.56%

Πίνακας 6.4 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων καμπύλης φορτίου – μετακίνησης M100

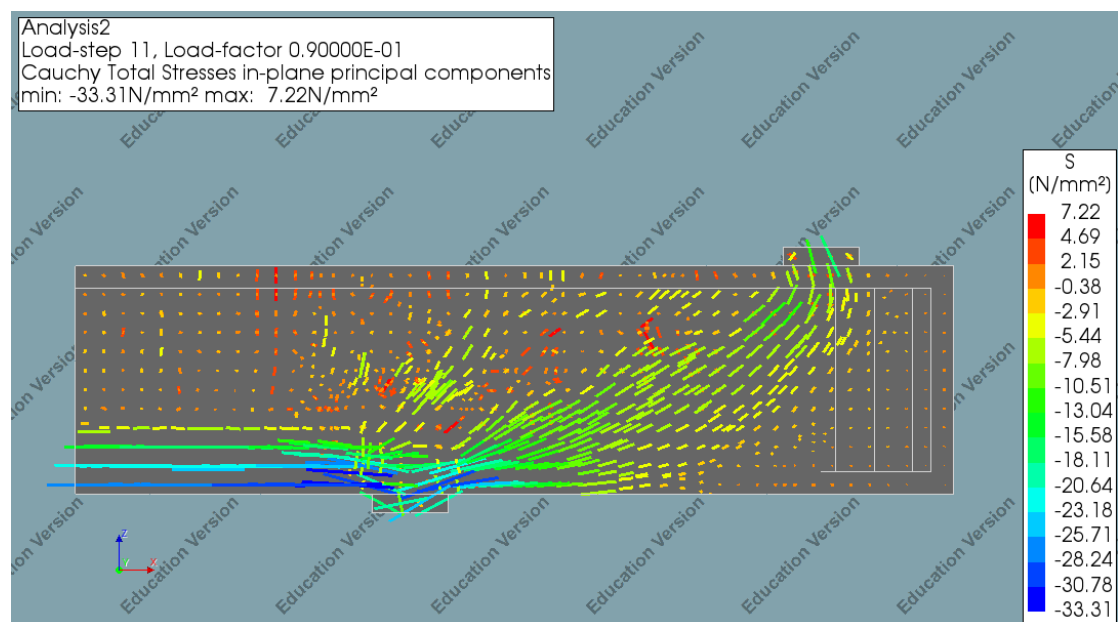
Η ελαστική απόκριση προσεγγίζεται ικανοποιητικά και σε αυτό το δοκίμιο, όμως υπάρχει αισθητή απόκλιση στην διαρροή και στην αστοχία. Αυτό εν μέρει είναι λογικό,

καθώς στους υπολογισμούς ο λόγος μορφής των ινών έχει εισαχθεί ως ο σταθμισμένος μέσος όρος από τα τρία είδη ινών που περιέχει το μείγμα, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 3 και προκύπτει  $L/d = 55$ , μικρότερο από τον λόγο μορφής των ινών Dramix που χρησιμοποιούνται στα δοκίμια της πρώτης ομάδας με  $L/d = 65$ .

Από το πείραμα οι τιμές των καμπτικών ροπών που προκύπτουν στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο είναι  $M_y = 69.94$  kNm και  $M_u = 81.35$  kNm. Από το προσομοίωμα οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν είναι  $M_y = 60.59$  kNm και  $M_u = 63.27$  kNm, όπως υπολογίστηκαν από τις επικόμβιες αντιδράσεις για την μεσαία διατομή.

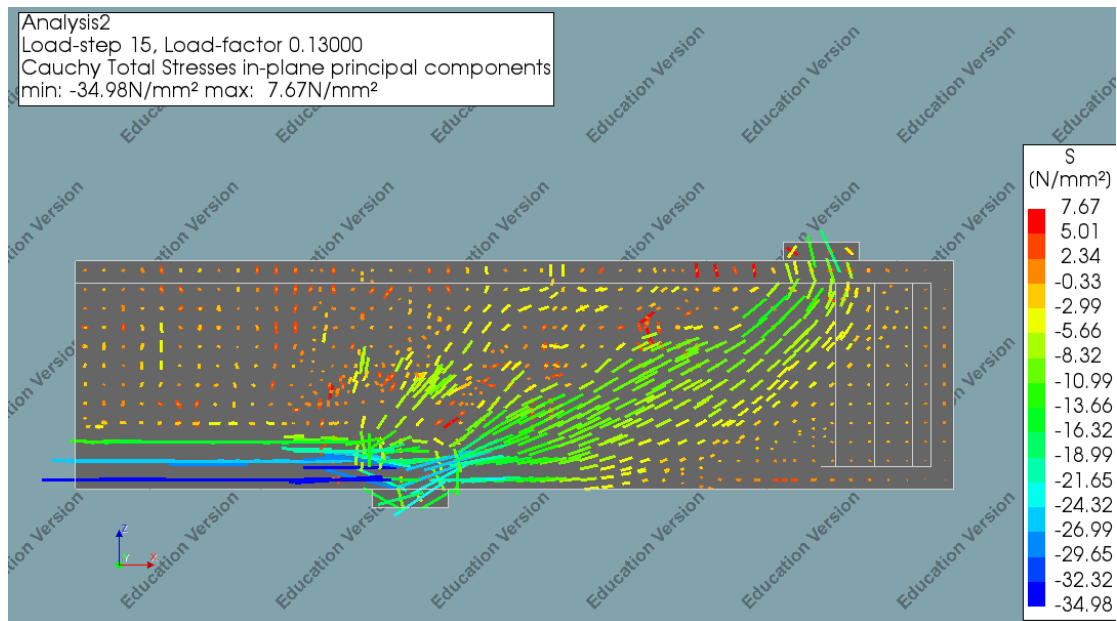
## Τροχιές κυρίων τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των συνιστωσών των κυρίων τάσεων σε κατακόρυφο διαμήκες επίπεδο που διέρχεται από το μέσον την δοκού με σκοπό την διερεύνηση των τοπικών αστοχιών που οδηγούν σε πτώση της pushover.



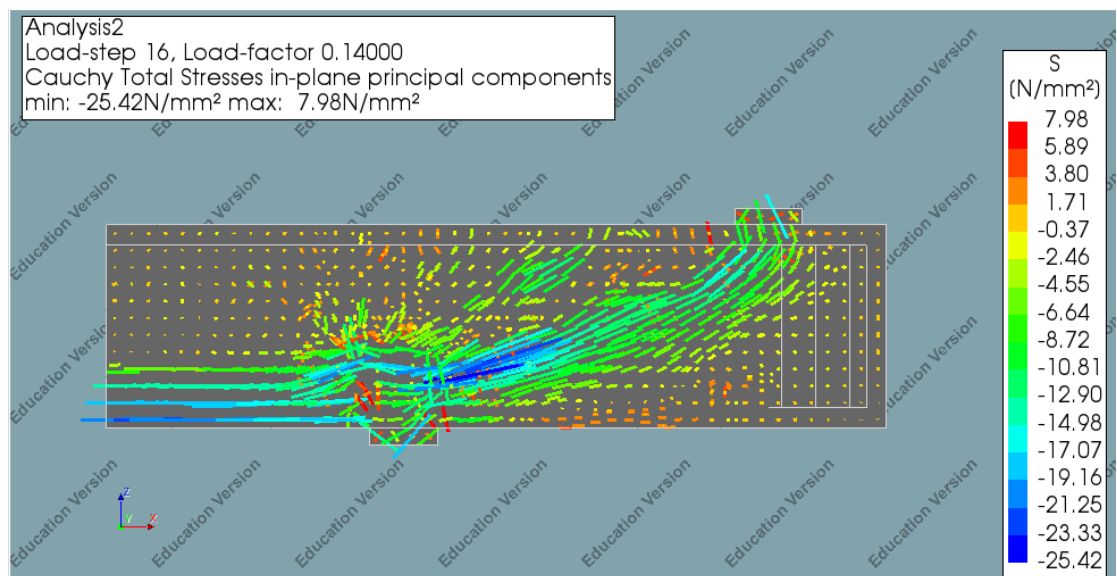
Σχήμα 6.27 Τροχιές κυρίων τάσεων M100 – Διαρροή





Σχήμα 6.28 Τροχιές κυρίων τάσεων M100 – Μέγιστο

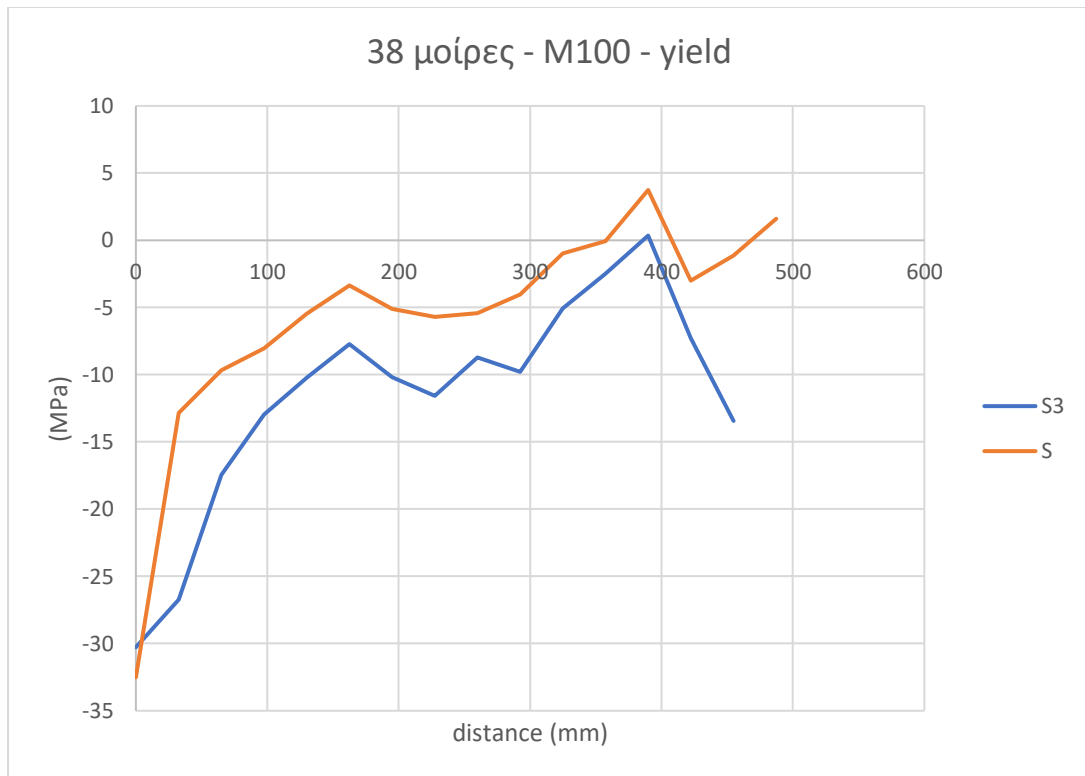
Στην περιοχή της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο παρατηρείται συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε τοπική αστοχία, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση στην καμπύλη φορτίου - μετακίνησης.



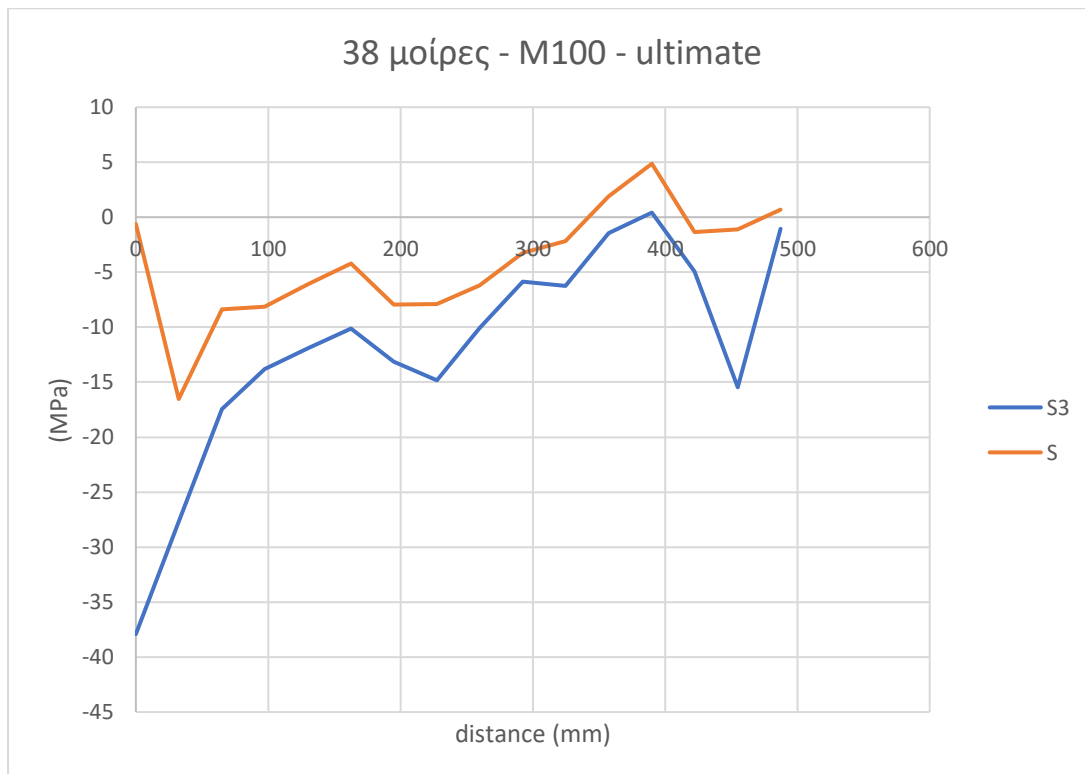
Σχήμα 6.29 Τροχιές κυρίων τάσεων M100 – Πτώση

### Αναζήτηση πιθανών επιφανειών αστοχίας λόγω διάτμησης

Ορθές Τάσεις (S) επιφάνειας 38 μοιρών από την παρειά της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο (κάτω στήριξη). Ο οριζόντιος άξονας είναι παράλληλος στην εν λόγω επιφάνεια και το 0 είναι το κατώτατο σημείο αυτής (στην παρειά της στήριξης).

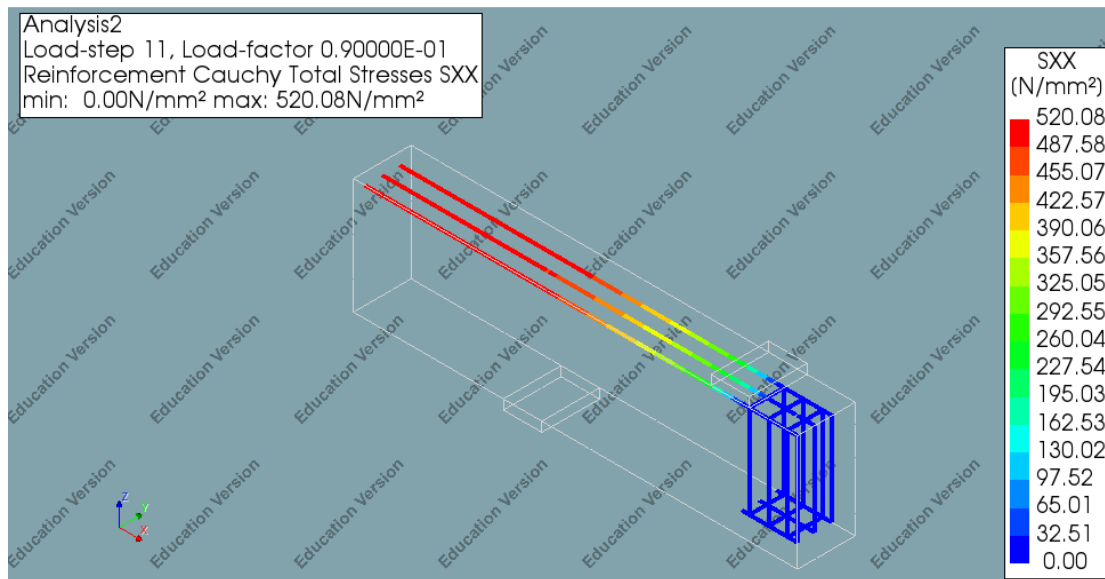


Σχήμα 6.30 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας M100 - Διαρροή

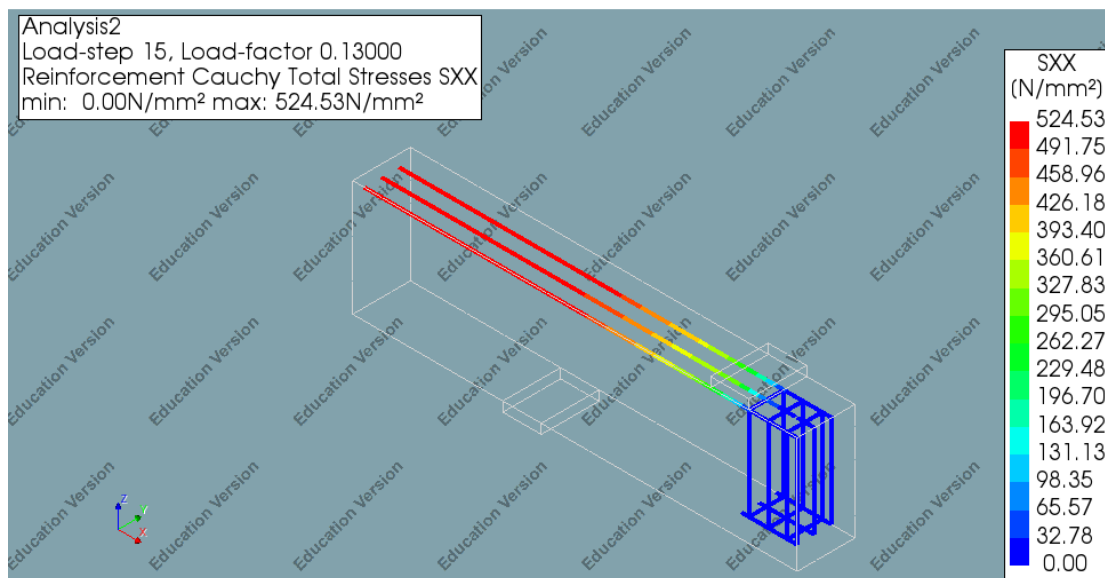


Σχήμα 6.31 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας M100 - Μέγιστο

## Τάσεις οπλισμών σε χαρακτηριστικά σημεία



Σχήμα 6.32 Τάσεις οπλισμών M100 – Διαρροή

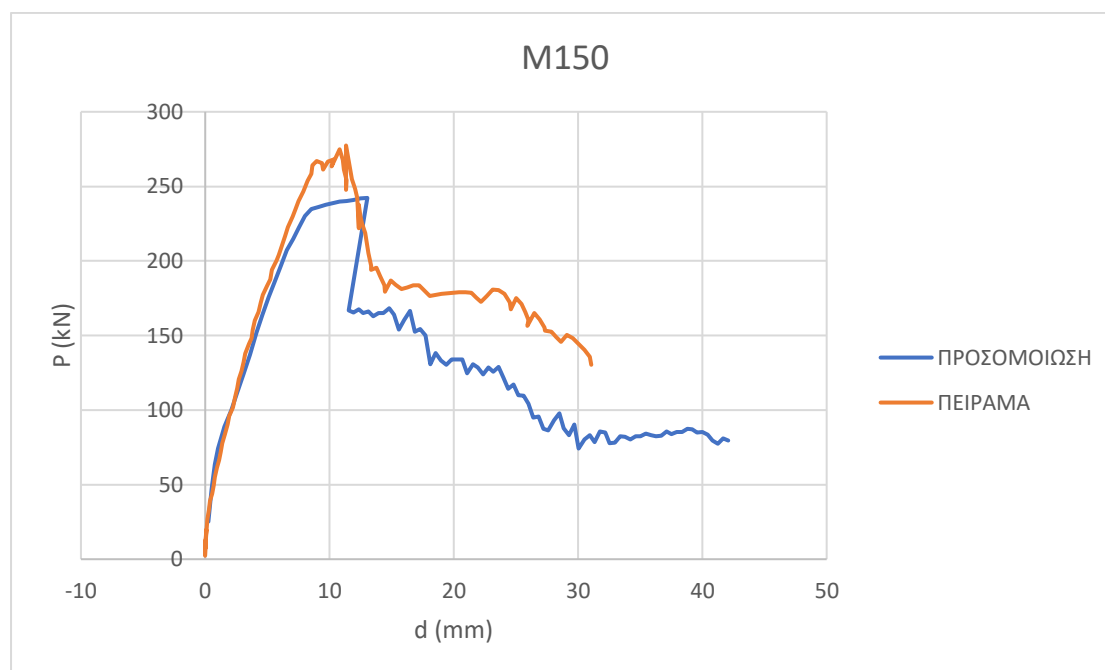


Σχήμα 6.33 Τάσεις οπλισμών M100 – Μέγιστο

Η διαρροή του οπλισμού συμβαίνει στο βήμα της ανάλυσης που διαρρέει και η διατομή συνολικά ( $f_y = 520\text{MPa}$ ). Αυτό συμβαίνει στο τμήμα του οπλισμού που βρίσκεται στο τμήμα σταθερής ροπής, ενώ στο τμήμα σταθερής τέμνουσας βρίσκεται ακόμα στο ελαστικό μέρος, τόσο στη διαρροή όσο και στο μέγιστο. Η μέγιστη τάση που αναπτύσσει ο οπλισμός στο μοντέλο είναι 524 MPa που σημαίνει ότι έχει αναπτύξει μικρή πλαστική παραμόρφωση.

## 6.6 Δοκίμιο M150

### Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης



Σχήμα 6.34 Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης M150

	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	Φορτίου	Μετακίνησης
Ρηγμάτωση	63.39	0.768	42.85	0.584	+47.93%	+31.51%
Διαρροή	230.10	8.015	268.31	9.069	-14.24%	-11.62%
Μέγιστο	242.26	13.056	277.03	10.693	-12.55%	+22.10%
Πτώση	166.89	11.545	188.49	14.859	-11.46%	-22.30%

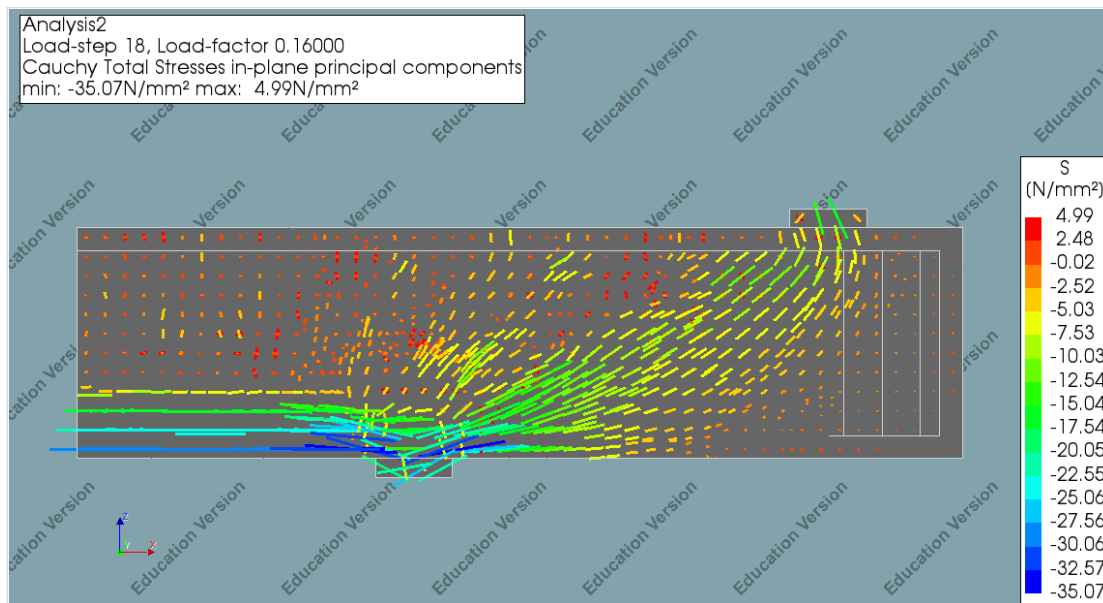
Πίνακας 6.5 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων καμπύλης φορτίου – μετακίνησης M150

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο προσεγγίζεται ικανοποιητικά το ελαστικό τμήμα. Όσον αφορά στην αντοχή, είναι πιο κάτω απ' ό τι στο πείραμα, όμως φαίνεται να προσομοιώνει καλά το σχήμα του μετελαστικού κλάδου και οι παραμορφώσεις των χαρακτηριστικών σημείων είναι κοντά.

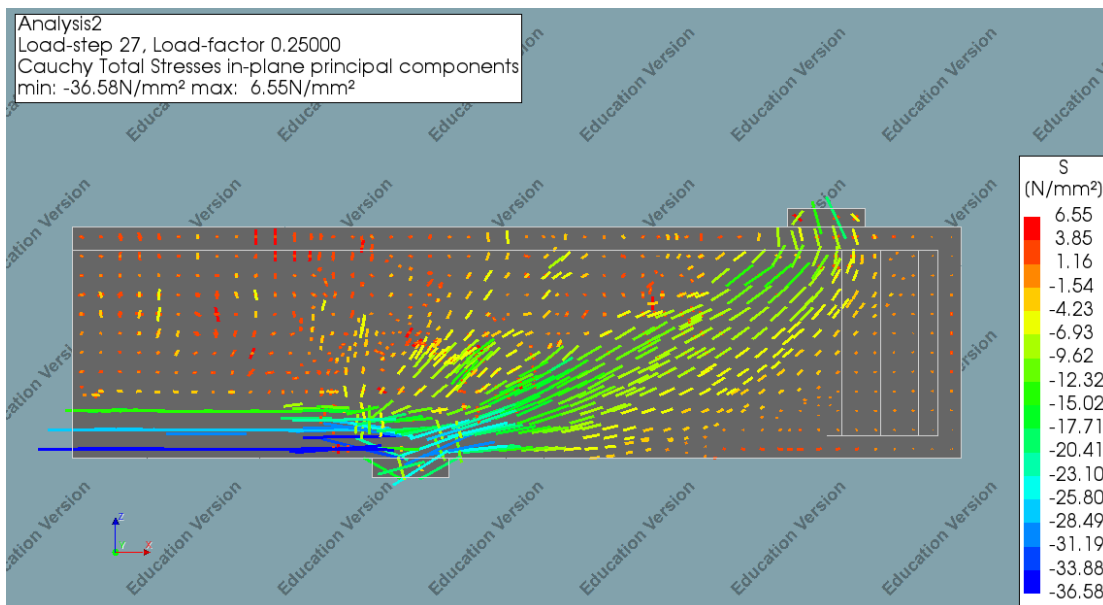
Από το πείραμα οι τιμές των καμπτικών ροπών που προκύπτουν στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο είναι  $M_y = 72.44$  kNm και  $M_u = 74.80$  kNm. Από το προσομοίωμα οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν είναι  $M_y = 62.20$  kNm και  $M_u = 65.59$  kNm, όπως υπολογίστηκαν από τις επικόμβιες αντιδράσεις για την μεσαία διατομή.

## Τροχιές κυρίων τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των συνιστωσών των κυρίων τάσεων σε κατακόρυφο διαμήκες επίπεδο που διέρχεται από το μέσον την δοκού με σκοπό την διερεύνηση των τοπικών αστοχιών που οδηγούν σε πτώση της καμπύλης φορτίου - παραμόρφωσης.

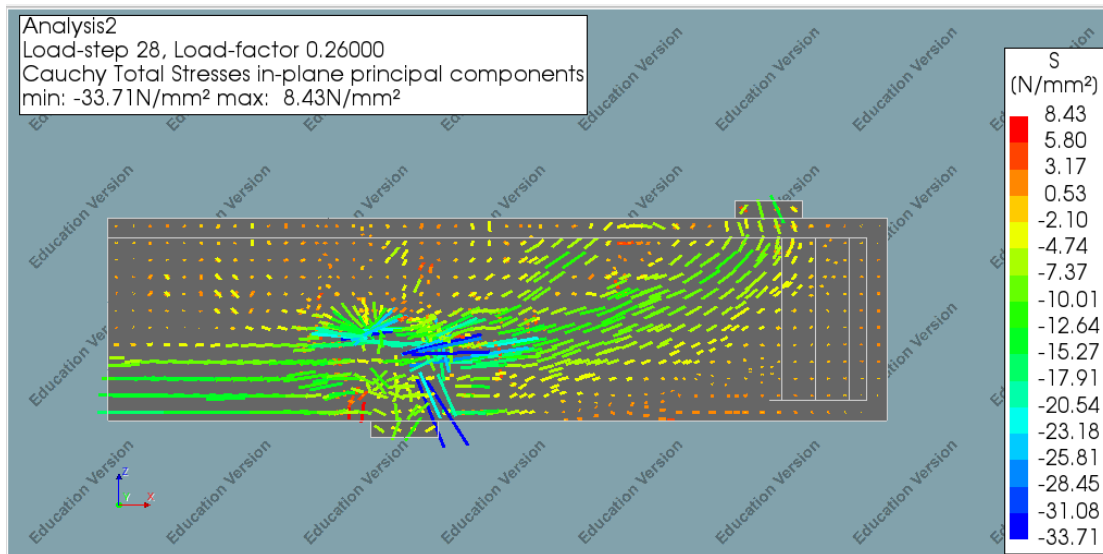


Σχήμα 6.35 Τροχιές κυρίων τάσεων M150 – Διαρροή



Σχήμα 6.36 Τροχιές κυρίων τάσεων M150 – Μέγιστο

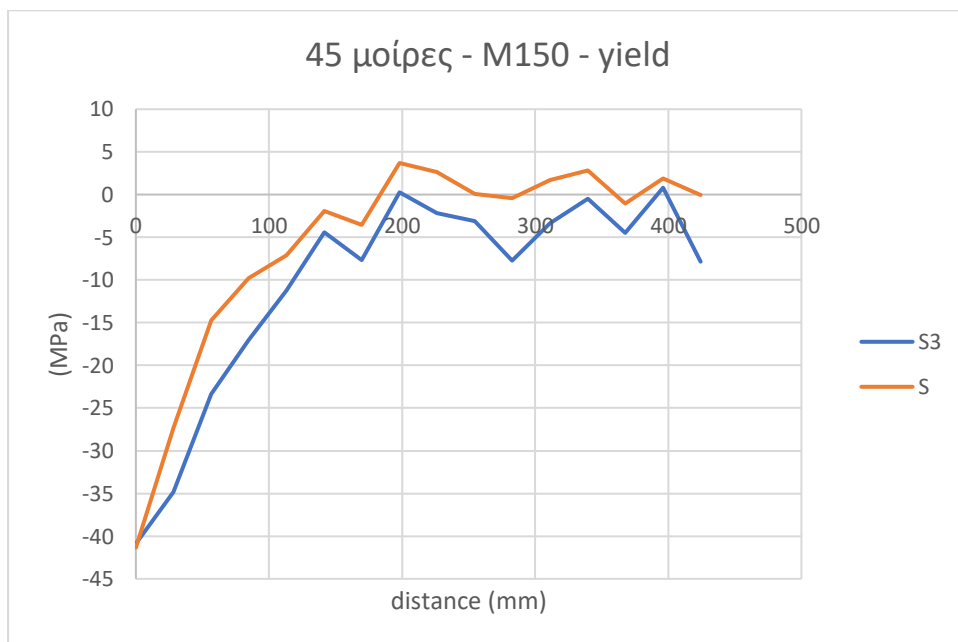
Στην περιοχή της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο παρατηρείται συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε τοπική αστοχία, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση στην καμπύλη φορτίου - μετακίνησης.



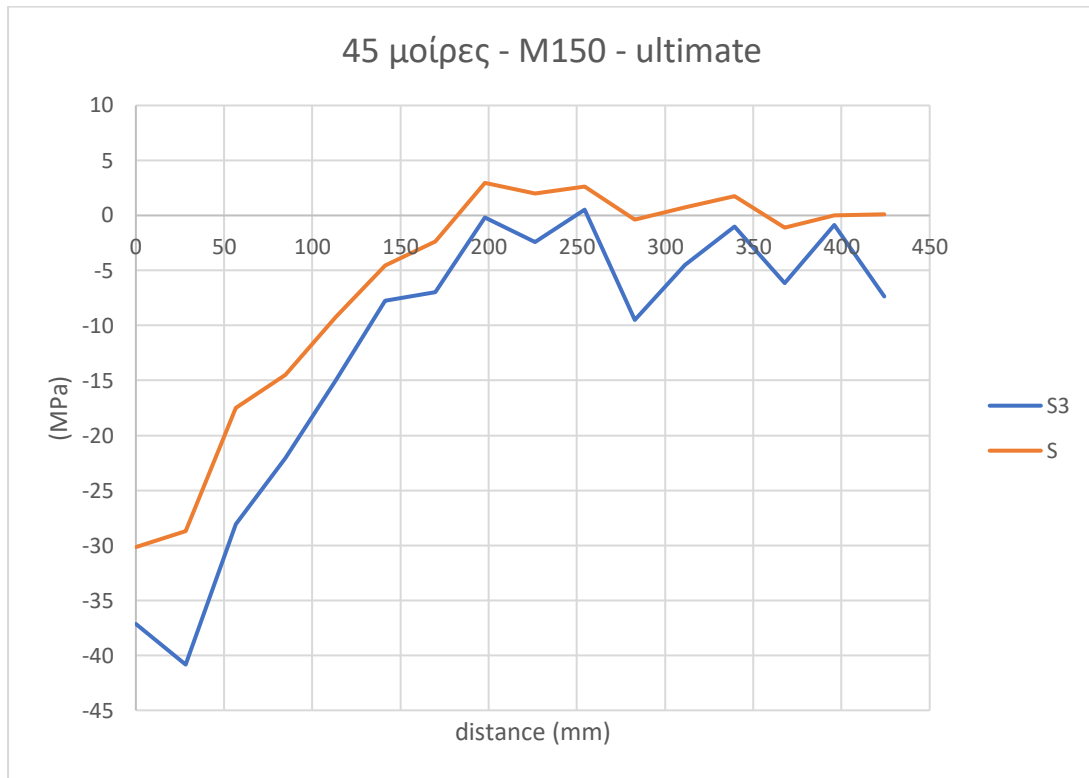
Σχήμα 6.37 Τροχιές κυρίων τάσεων M150 – Πτώση

### Αναζήτηση πιθανών επιφανειών αστοχίας λόγω διάτμησης

Ορθές Τάσεις (S) επιφάνειας 45 μοιρών από την παρειά της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο (κάτω στήριξη). Ο οριζόντιος άξονας είναι παράλληλος στην εν λόγω επιφάνεια και το 0 είναι το κατώτατο σημείο αυτής (στην παρειά της στήριξης).

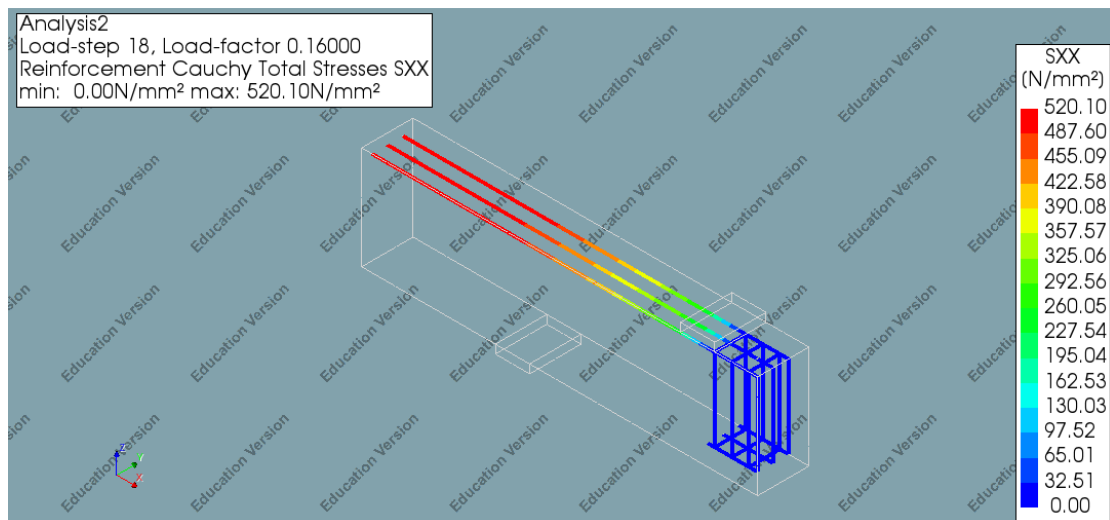


Σχήμα 6.38 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας M150 – Διαρροή

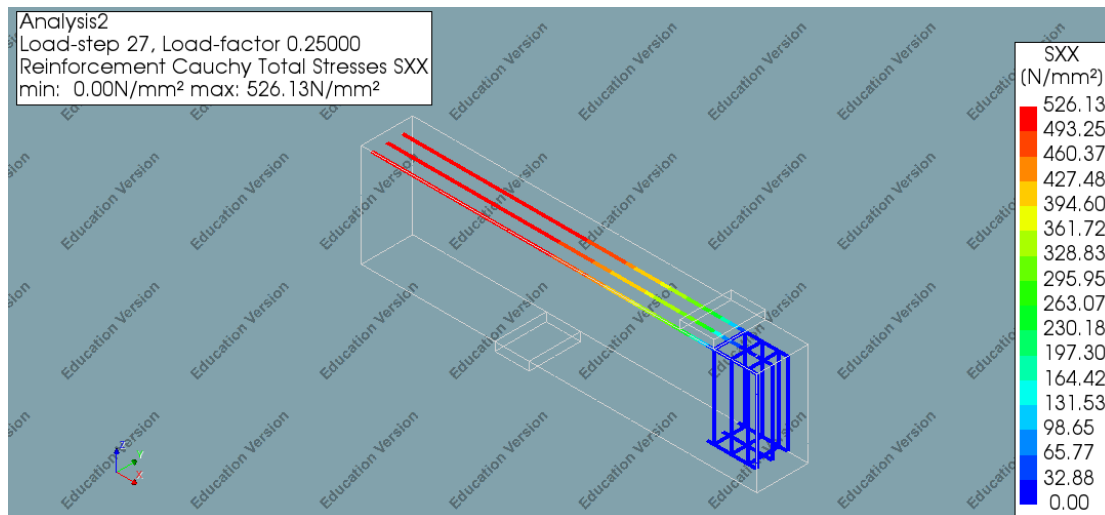


Σχήμα 6.39 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας M150 - Μέγιστο

## Τάσεις οπλισμών σε χαρακτηριστικά σημεία



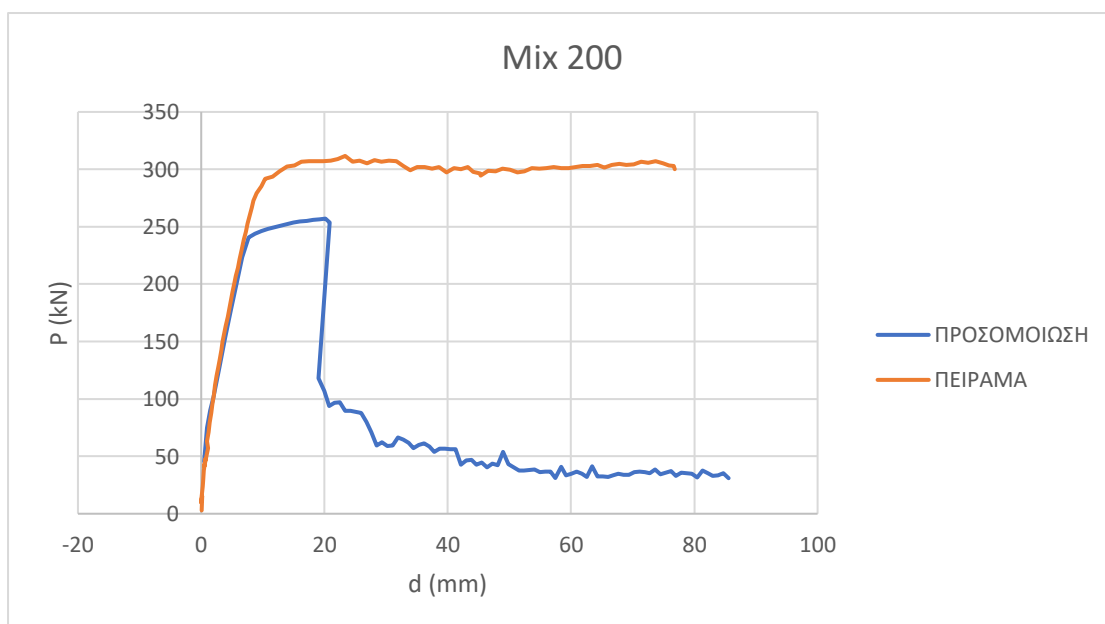
Σχήμα 6.40 Τάσεις οπλισμών M150 – Διαρροή



Σχήμα 6.41 Τάσεις οπλισμών M150 – Μέγιστο

Η διαρροή του οπλισμού συμβαίνει στο βήμα της ανάλυσης που διαρρέει και η διατομή συνολικά ( $f_y = 520\text{MPa}$ ). Αυτό συμβαίνει στο τμήμα του οπλισμού που βρίσκεται στο τμήμα σταθερής ροπής, ενώ στο τμήμα σταθερής τέμνουσας βρίσκεται ακόμα στο ελαστικό μέρος, τόσο στη διαρροή όσο και στο μέγιστο. Η μέγιστη τάση που αναπτύσσει ο οπλισμός στο μοντέλο είναι 526 MPa που σημαίνει ότι έχει αναπτύξει μικρή πλαστική παραμόρφωση.

## 6.7 Δοκίμιο M200 Καμπύλη φορτίου - μετακίνησης



Σχήμα 6.42 Καμπύλη φορτίου – μετακίνησης M200



	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	Φορτίου	Μετακίνησης
Ρηγμάτωση	74.60	0.964	60.45	0.915	+23.41%	+5.36%
Διαρροή	240.54	7.663	290.75	9.915	-17.27%	-22.71%
Μέγιστο	257.08	20.196	313.19	23.366	-17.92%	-13.57%
Πτώση	118.09	19.059	300.15	76.828	-60.66%	-75.19%

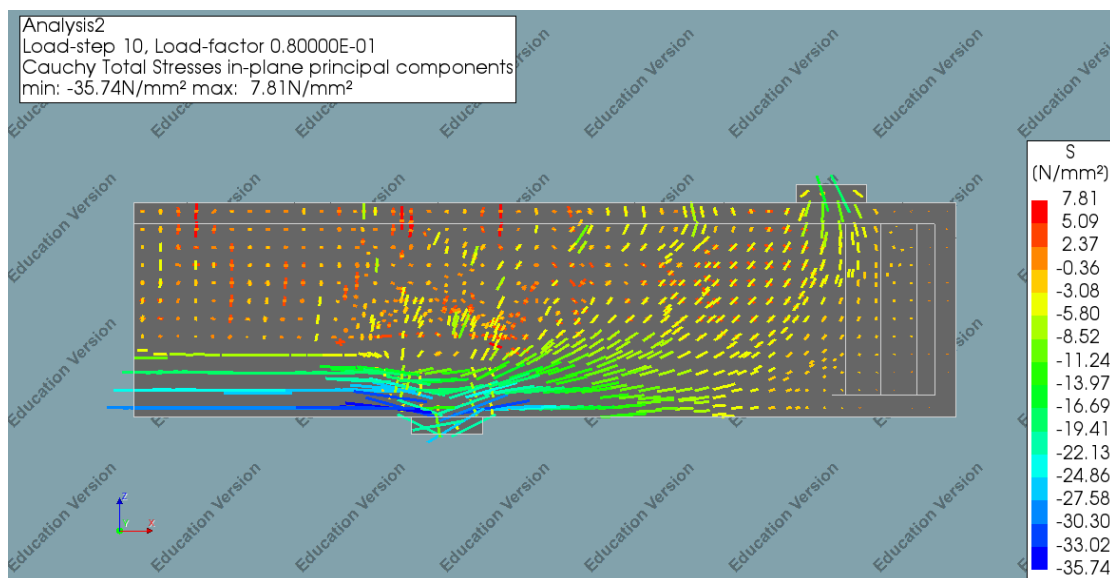
Πίνακας 6.6 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων καμπύλης φορτίου – μετακίνησης M200

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο το προσομοίωμα προσεγγίζει ικανοποιητικά το ελαστικό τμήμα της καμπύλης. Οι τιμές του φορτίου στα χαρακτηριστικά σημεία είναι αρκετά χαμηλές σε σχέση με αυτές του πειράματος και επιπλέον υπάρχει πτώση στην καμπύλη σε μικρή παραμόρφωση, κάτι που δεν συμβαίνει στο πείραμα.

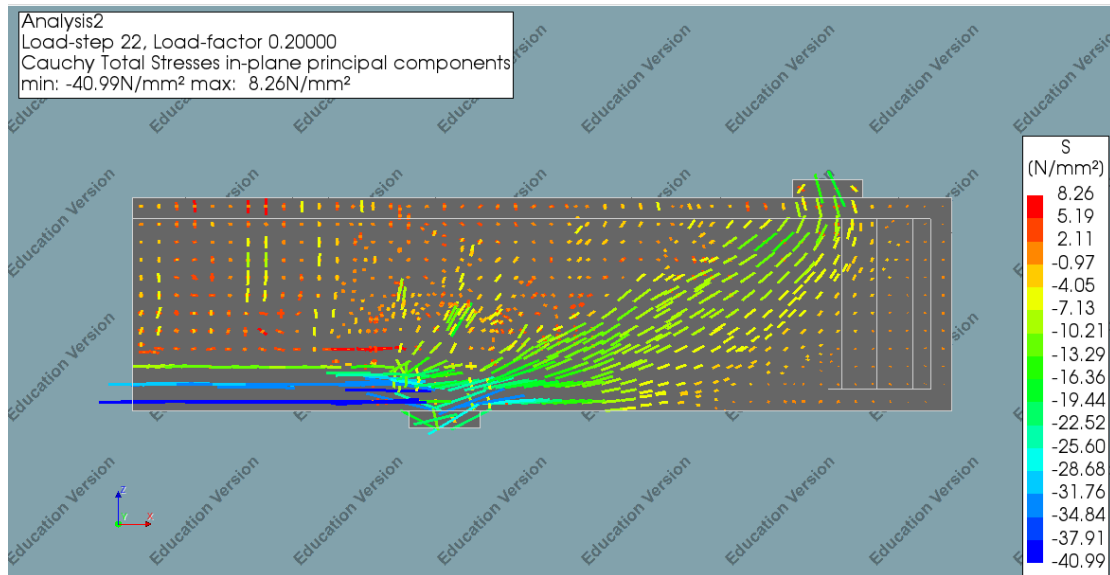
Από το πείραμα οι τιμές των καμπτικών ροπών που προκύπτουν στη διαρροή και στο μέγιστο φορτίο είναι  $M_y = 78.50$  kNm και  $M_u = 84.56$  kNm. Από το προσομοίωμα οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν είναι  $M_y = 64.97$  kNm και  $M_u = 69.57$  kNm, όπως υπολογίστηκαν από τις επικόμβιες αντιδράσεις για την μεσαία διατομή.

## Τροχιές κυρίων τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των συνιστωσών των κυρίων τάσεων σε κατακόρυφο διαμήκες επίπεδο που διέρχεται από το μέσον την δοκού με σκοπό την διερεύνηση των τοπικών αστοχιών που οδηγούν σε πτώση της καμπύλης φορτίου - μετακίνησης.

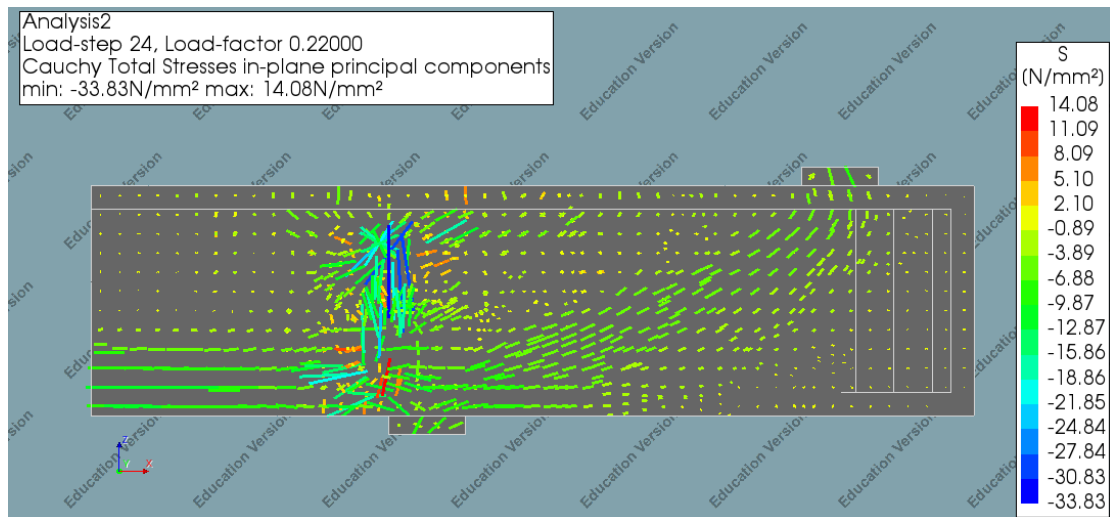


Σχήμα 6.43 Τροχιές κυρίων τάσεων M200 – Διαρροή



Σχήμα 6.44 Τροχιές κυρίων τάσεων M200 – Μέγιστο

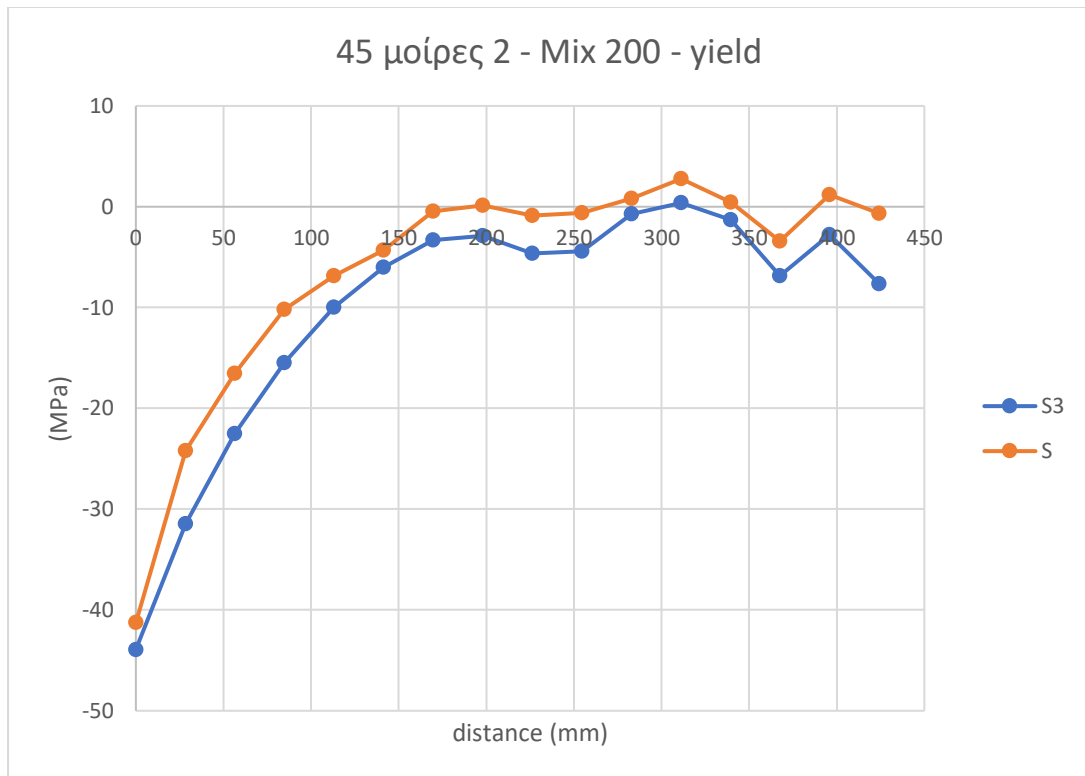
Στην περιοχή της στήριξης που επιβάλλεται το φορτίο παρατηρείται συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε τοπική αστοχία, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση στην καμπύλη φορτίου - μετακίνησης.



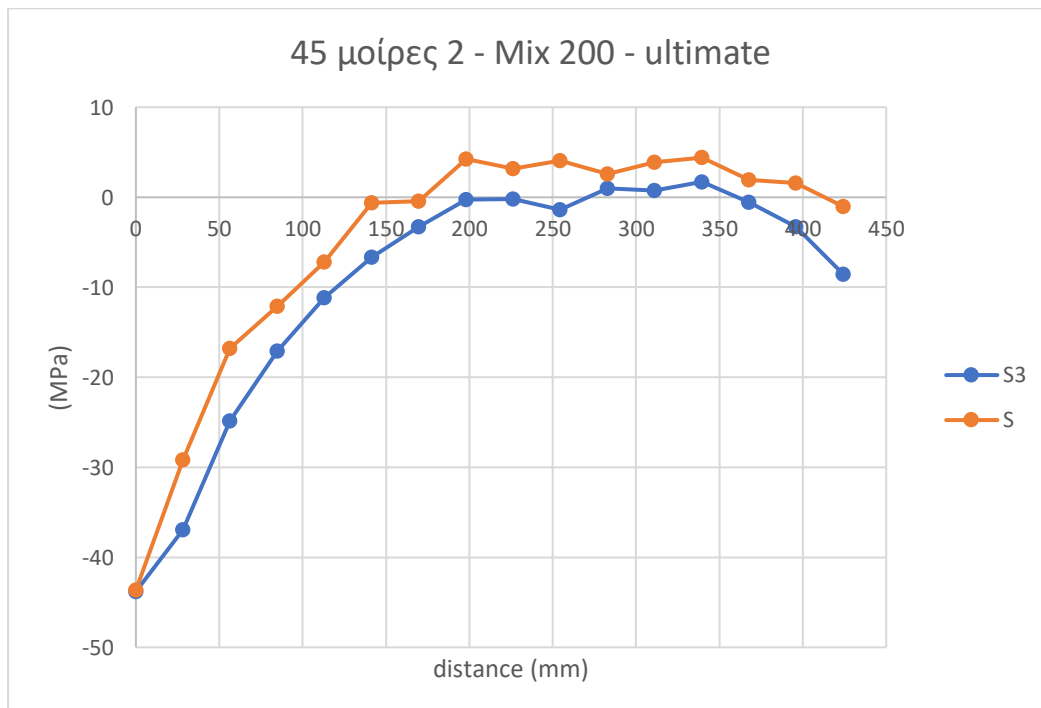
Σχήμα 6.45 Τροχιές κυρίων τάσεων M200 – Πτώση

## Αναζήτηση πιθανών επιφανειών αστοχίας λόγω διάτμησης

Ορθές Τάσεις (S) επιφάνειας 45 μοιρών από την παρειά της άνω στήριξης. Ο οριζόντιος άξονας είναι παράλληλος στην εν λόγω επιφάνεια και το 0 είναι το κατώτατο σημείο αυτής.

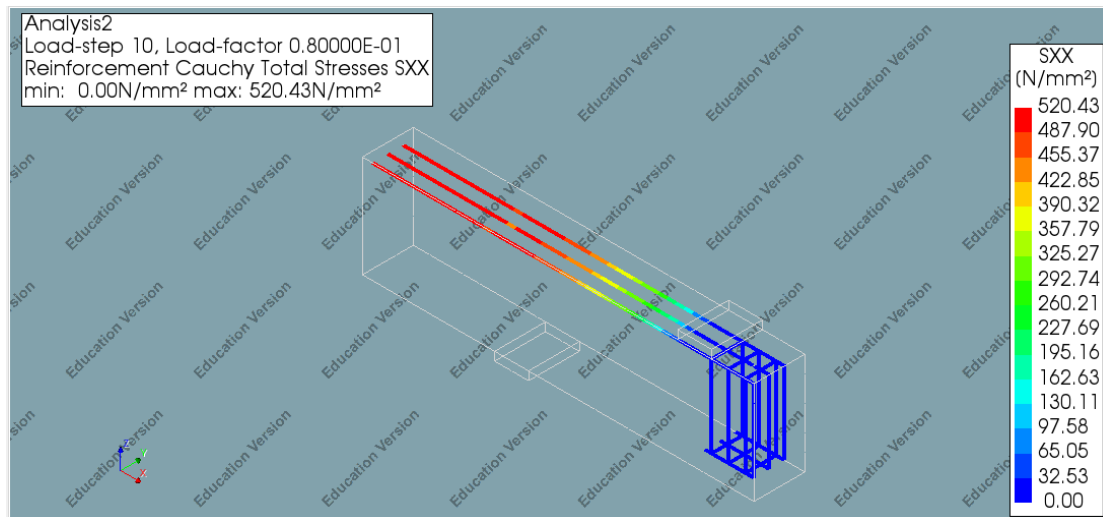


Σχήμα 6.46 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας M200 - Διαρροή

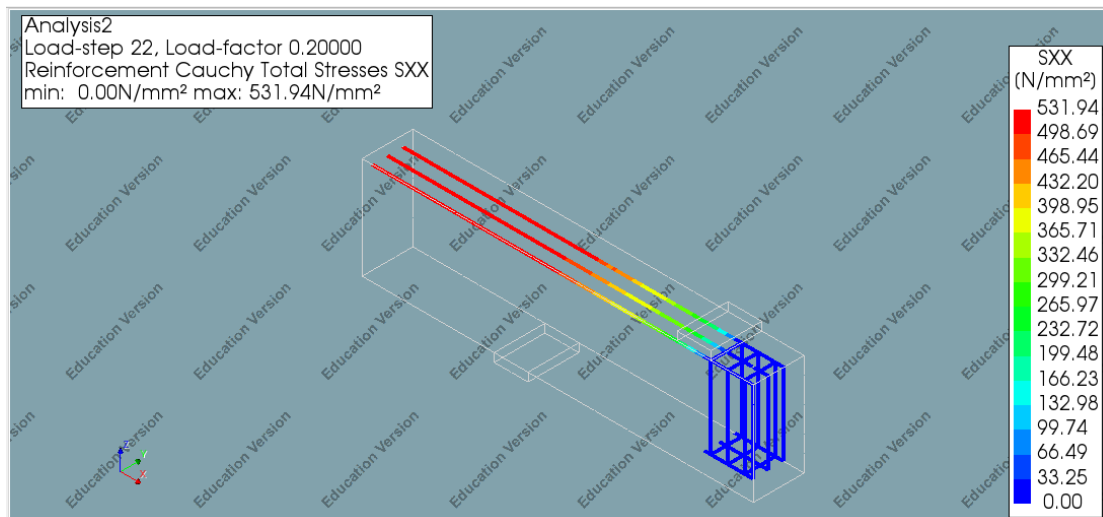


Σχήμα 6.47 Ορθές τάσεις πιθανής επιφάνειας αστοχίας M200 - Μέγιστο

## Τάσεις οπλισμών σε χαρακτηριστικά σημεία



Σχήμα 6.48 Τάσεις οπλισμών M200 – Διαρροή



Σχήμα 6.49 Τάσεις οπλισμών M200 – Μέγιστο

Η διαρροή του οπλισμού συμβαίνει στο βήμα της ανάλυσης που διαρρέει και η διατομή συνολικά ( $f_y = 520\text{MPa}$ ). Αυτό συμβαίνει στο τμήμα του οπλισμού που βρίσκεται στο τμήμα σταθερής ροπής, ενώ στο τμήμα σταθερής τέμνουσας βρίσκεται ακόμα στο ελαστικό μέρος, τόσο στη διαρροή όσο και στο μέγιστο. Η μέγιστη τάση που αναπτύσσει ο οπλισμός στο μοντέλο είναι 531 MPa που σημαίνει ότι έχει αναπτύξει πλαστική παραμόρφωση.

## 6.8 Συμπεράσματα

Το μοντέλο που προκύπτει από τις καμπύλες θλίψης των M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta και τις καμπύλες εφελκυσμού των Tat-Seng Lok, Jin-Song Pei δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην ελαστική συμπεριφορά του υλικού, αφού σε όλα τα δοκίμια ο ελαστικός κλάδος των προσομοιωμάτων ταυτίζεται με τα πειράματα. Παρ' όλα αυτά, ο μετελαστικός κλάδος δεν έχει την προσδοκώμενη εικόνα, καθώς όπως φαίνεται και στις καμπύλες φορτίου – μετακίνησης που προέκυψαν η αστοχία επέρχεται σε αρκετά μικρότερη παραμόρφωση από το πείραμα. Επιπλέον, οι τιμές των αντοχών σε όλα τα δοκίμια είναι μικρότερες από τις αναμενόμενες.

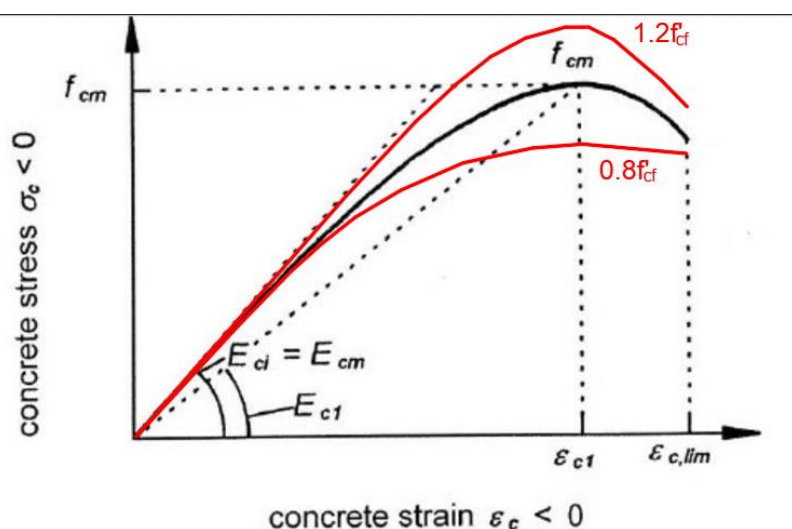
## 7. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

### 7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται η ευαισθησία των νόμων τάσης – παραμόρφωσης ( $\sigma - \epsilon$ ) που χρησιμοποιήθηκαν για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ως προς την μεταβολή των χαρακτηριστικών σημείων των καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού. Συγκεκριμένα, μεταβάλλονται οι χαρακτηριστικές τιμές των καμπυλών θλίψης και εφελκυσμού και αναλύεται η επίδραση που έχουν αυτές οι μεταβολές στις καμπύλες φορτίου – παραμόρφωσης των δοκιμίων και την γενικότερη συμπεριφορά του υλικού.

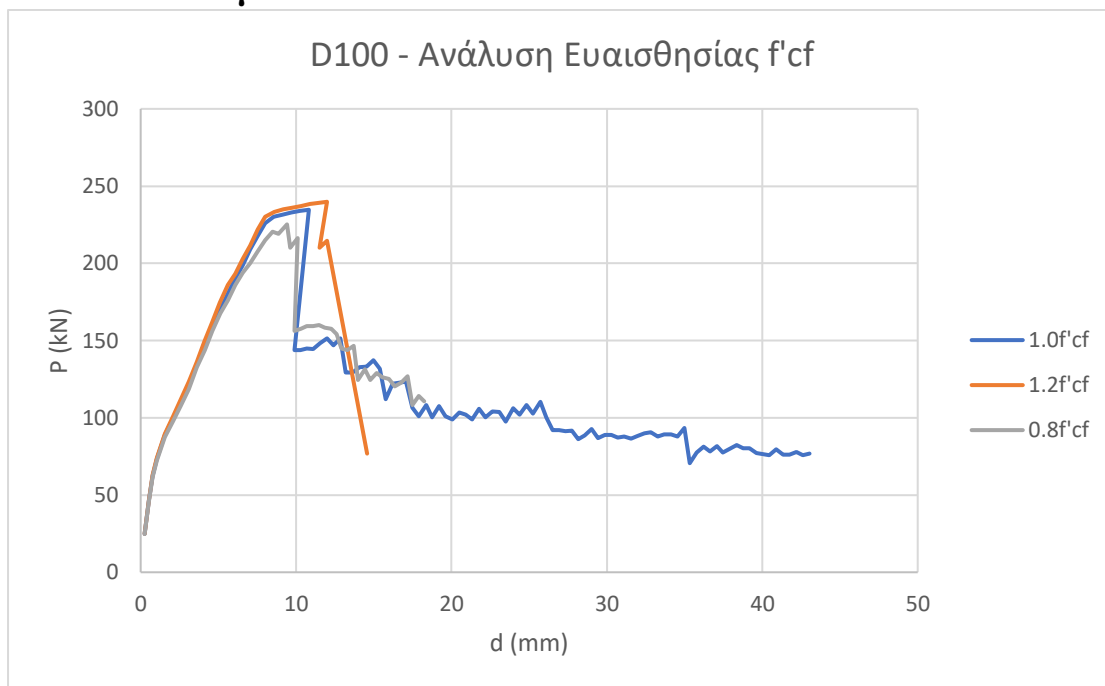
### 7.2 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής $f'_{cf}$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης που προέκυψαν για μεταβολή της θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  του ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά  $\pm 20\%$ .



Σχήμα 7.1 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος  $f'_{cf}$

## 7.2.1 Δοκίμιο D100

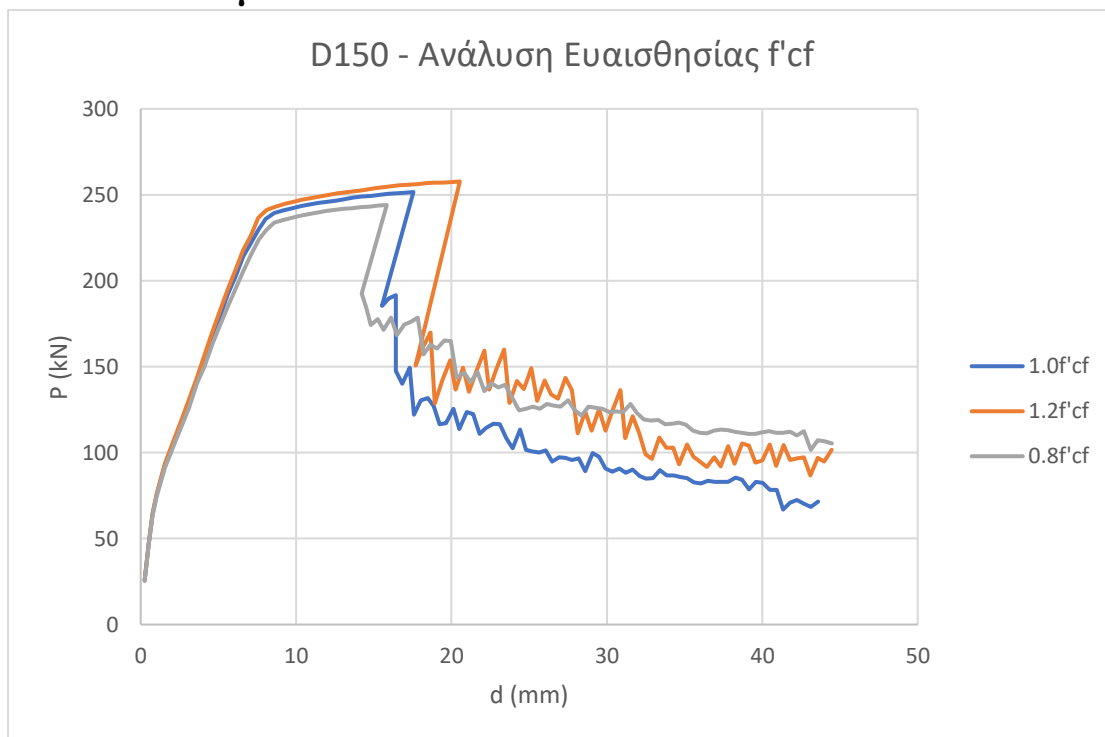


Σχήμα 7.2 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – D100

	$0.8f'_{cf}$		$1.2 f'_{cf}$		$1.0 f'_{cf}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	220.33	8.473	230.20	8.022	225.87	8.019
Μέγιστο	225.21	9.401	239.85	11.994	234.68	10.813
Πτώση	156.39	9.910	-	-	143.84	9.881

Πίνακας 7.1 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – D100

## 7.2.2 Δοκίμιο D150

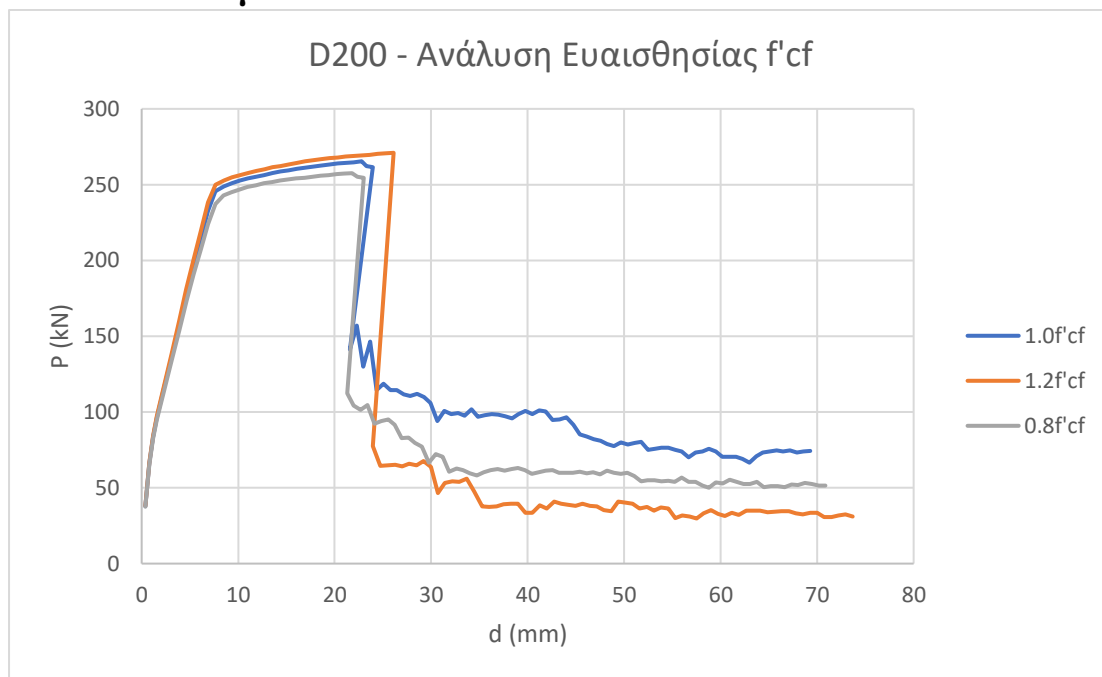


Σχήμα 7.3 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – D150

	$0.8f'_{cf}$		$1.2 f'_{cf}$		$1.0 f'_{cf}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	229.35	8.063	236.50	7.578	235.86	8.043
Μέγιστο	244.05	15.831	257.78	20.546	251.64	17.567
Πτώση	192.47	14.208	150.73	17.699	140.20	16.833

Πίνακας 7.2 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – D150

### 7.2.3 Δοκίμιο D200



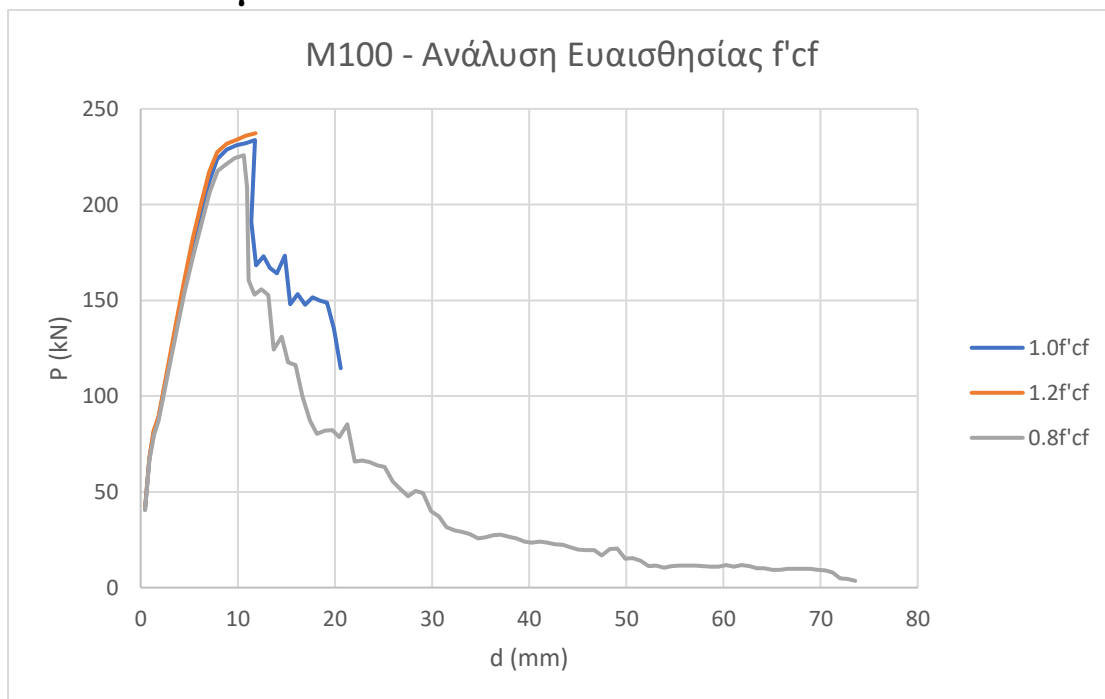
Σχήμα 7.4 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – D200

	0.8f'cf		1.2 f'cf		1.0 f'cf	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	242.97	8.455	249.88	7.668	245.80	7.666
Μέγιστο	257.57	21.800	271.01	26.093	265.45	22.791
Πτώση	112.29	21.277	77.36	23.944	141.08	21.559

Πίνακας 7.3 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – D200



## 7.2.4 Δοκίμιο M100

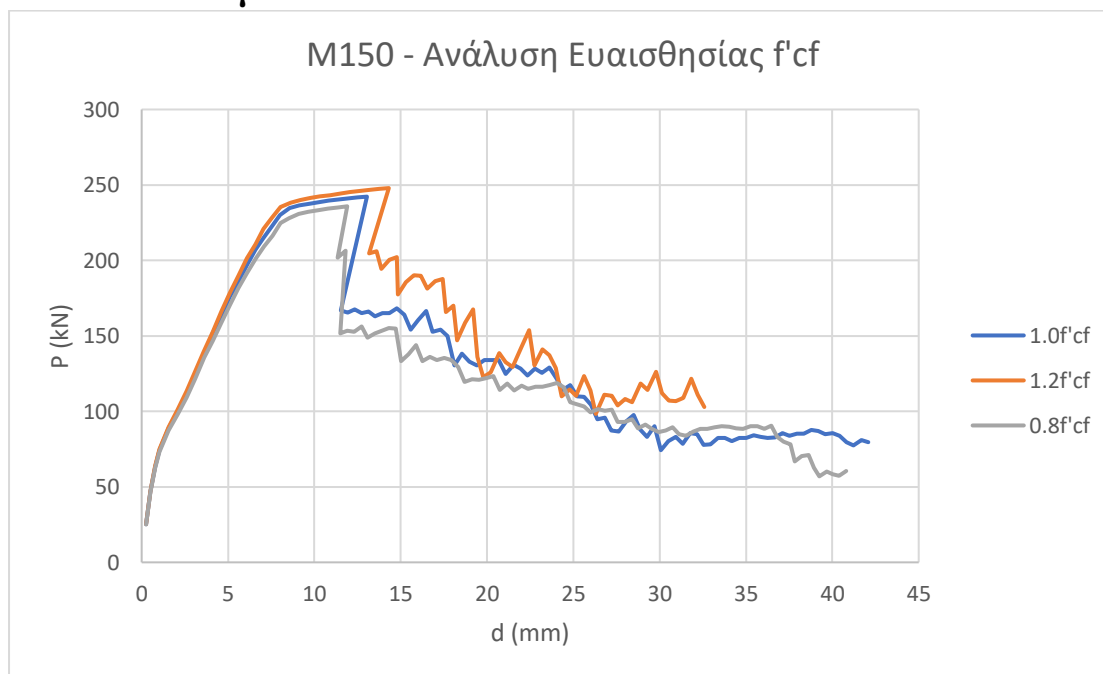


Σχήμα 7.5 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – M100

	$0.8f'_{cf}$		$1.2 f'_{cf}$		$1.0 f'_{cf}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	217.51	7.914	227.32	7.881	223.61	7.886
Μέγιστο	225.79	10.629	237.28	11.822	233.73	11.794
Πτώση	160.54	11.089	-	-	191.09	11.409

Πίνακας 7.4 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – M100

## 7.2.5 Δοκίμιο M150

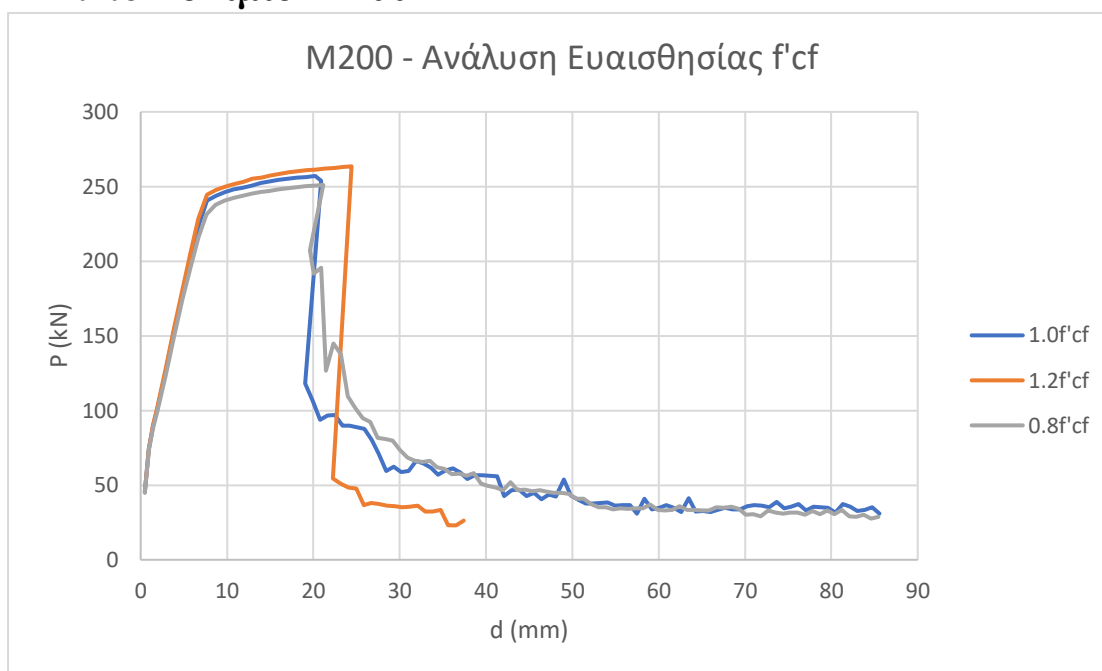


Σχήμα 7.6 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – M150

	0.8 $f'_{cf}$		1.2 $f'_{cf}$		1.0 $f'_{cf}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	224.89	8.051	235.35	8.041	230.10	8.015
Μέγιστο	235.87	11.900	247.93	14.301	242.26	13.056
Πτώση	151.59	11.487	204.65	13.176	166.89	11.545

Πίνακας 7.5 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – M150

## 7.2.6 Δοκίμιο M200



Σχήμα 7.7 Ανάλυση ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf}$  – M200

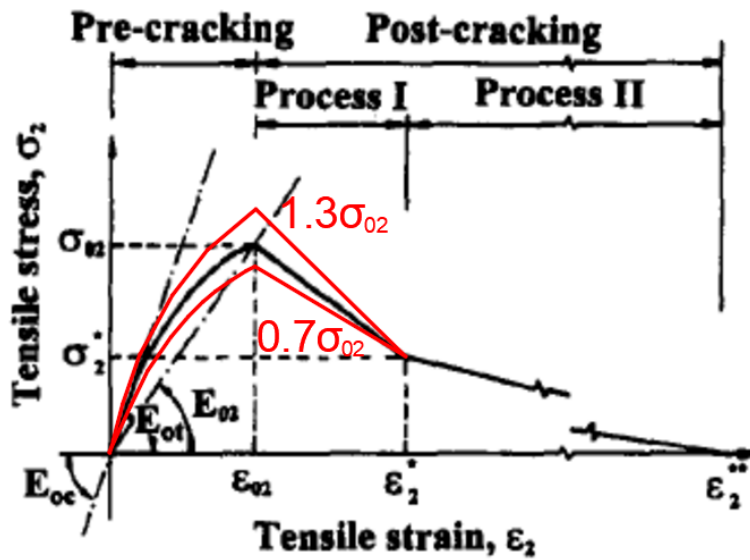
	0.8f'cf		1.2 f'cf		1.0 f'cf	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	231.45	7.624	244.55	7.677	240.54	7.663
Μέγιστο	251.05	21.152	263.52	24.450	257.08	20.196
Πτώση	126.50	21.440	54.44	22.272	118.09	19.059

Πίνακας 7.6 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας θλιπτικής αντοχής  $f'_{cf} - 00$

Παρατηρείται ότι η θλιπτική αντοχή σχετίζεται με μεταβολή της τιμής του φορτίου τόσο στη διαρροή όσο και στην μέγιστη αντοχή κατά την αστοχία. Η κλίση του ελαστικού κλάδου δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά, όπως και του μετελαστικού έως τη διαρροή. Επίσης σημειώνεται μεταβολή της πλαστιμότητας, ενώ η παραμόρφωση διαρροής δεν φαίνεται να μεταβάλλεται σημαντικά.

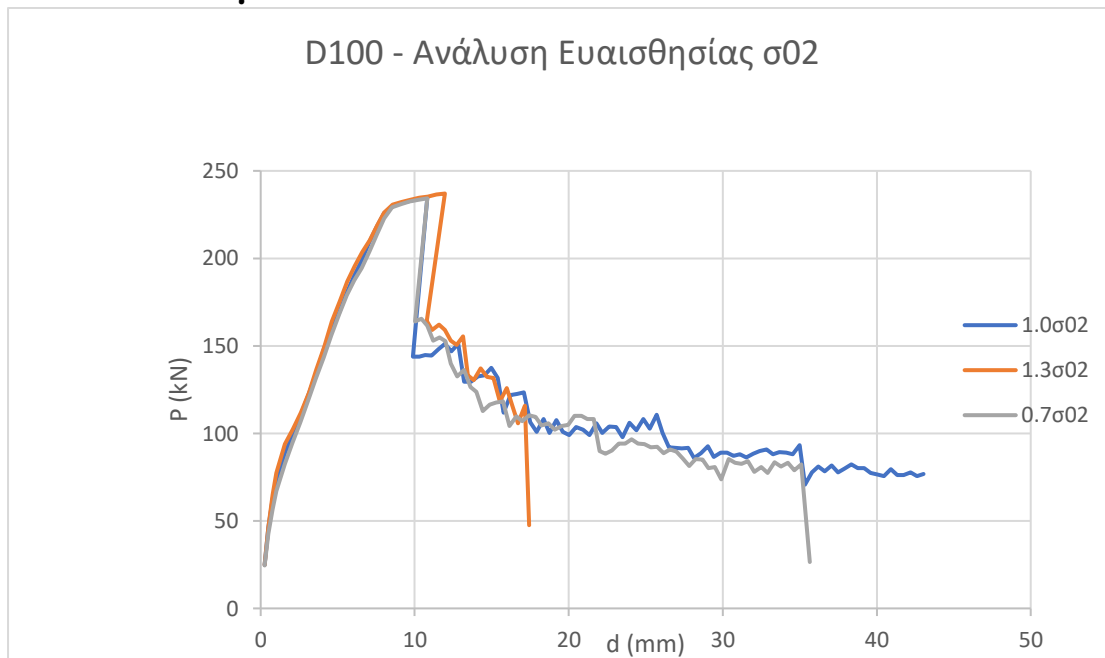
### 7.3 Ανάλυση ευαισθησίας της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό $\sigma_{02}$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες pushover που προέκυψαν για μεταβολή της τάσης διαρροής σε εφελκυσμό  $\sigma_{02}$  του ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά  $\pm 30\%$ .



Σχήμα 7.8 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$

### 7.3.1 Δοκίμιο D100

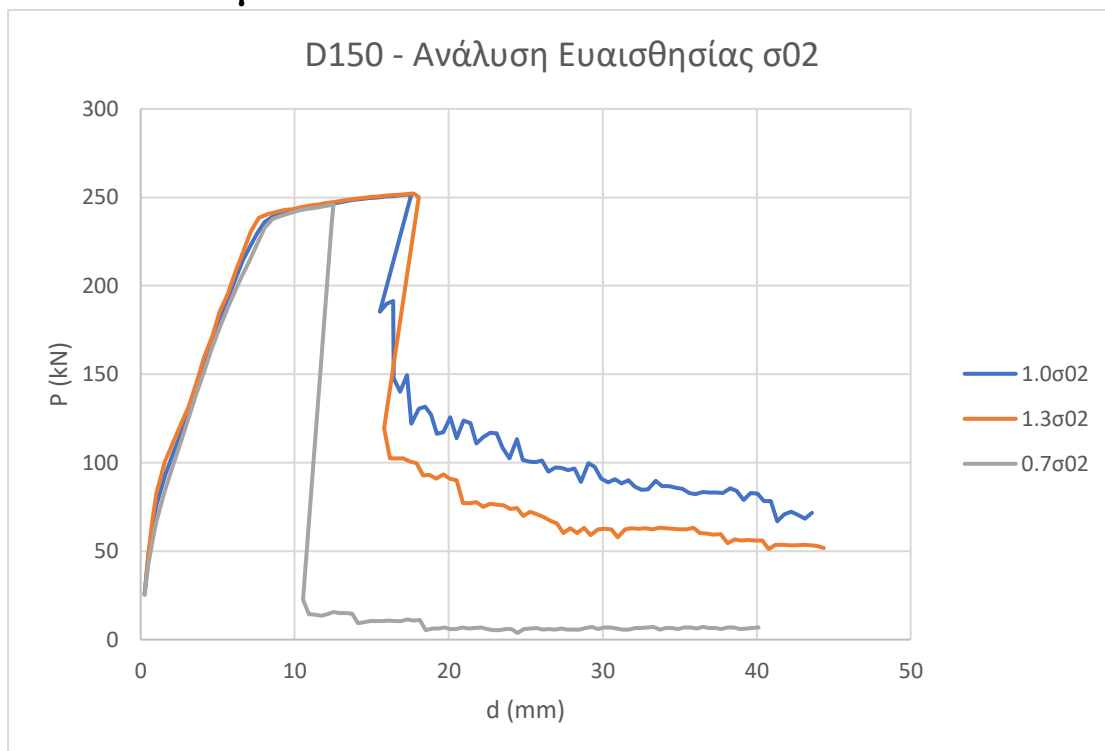


Σχήμα 7.9 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – D100

	0.7 $\sigma_{02}$		1.3 $\sigma_{02}$		1.0 $\sigma_{02}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	222.83	8.014	230.81	8.578	225.87	8.019
Μέγιστο	234.31	10.802	237.05	11.959	234.68	10.813
Πτώση	163.94	10.006	164.40	10.786	143.84	9.881

Πίνακας 7.7 Χαρακτηριστικές τιμές ανάλυσης ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – D100

### 7.3.2 Δοκίμιο D150

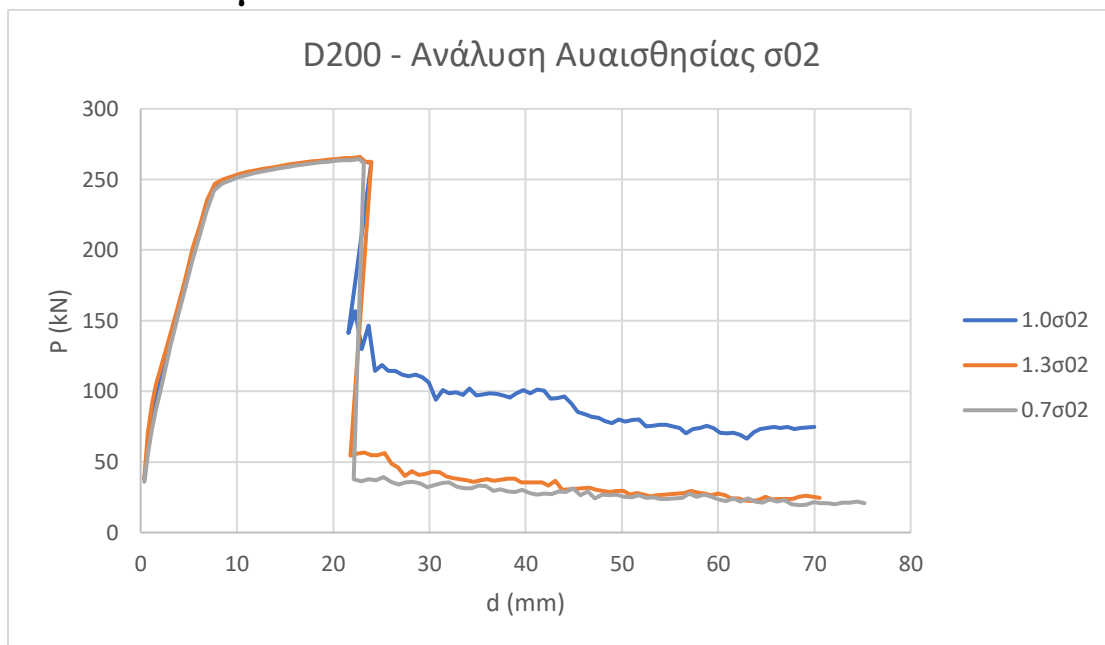


Σχήμα 7.10 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – D150

	0.7 $\sigma_{02}$		1.3 $\sigma_{02}$		1.0 $\sigma_{02}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	232.83	8.035	238.36	7.675	235.86	8.043
Μέγιστο	245.88	12.528	252.21	17.709	251.64	17.567
Πτώση	22.43	10.532	119.70	15.794	140.20	16.833

Πίνακας 7.8 Χαρακτηριστικές τιμές ανάλυσης ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – D150

### 7.3.3 Δοκίμιο D200



Σχήμα 7.11 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – D200

	0.7 $\sigma_{02}$		1.3 $\sigma_{02}$		1.0 $\sigma_{02}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	241.99	7.586	247.20	7.696	245.80	7.666
Μέγιστο	264.49	22.676	265.96	22.803	265.45	22.791
Πτώση	37.91	22.123	54.55	21.821	141.08	21.559

Πίνακας 7.9 Χαρακτηριστικές τιμές ανάλυσης ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – D200

### 7.3.4 Δοκίμιο M100



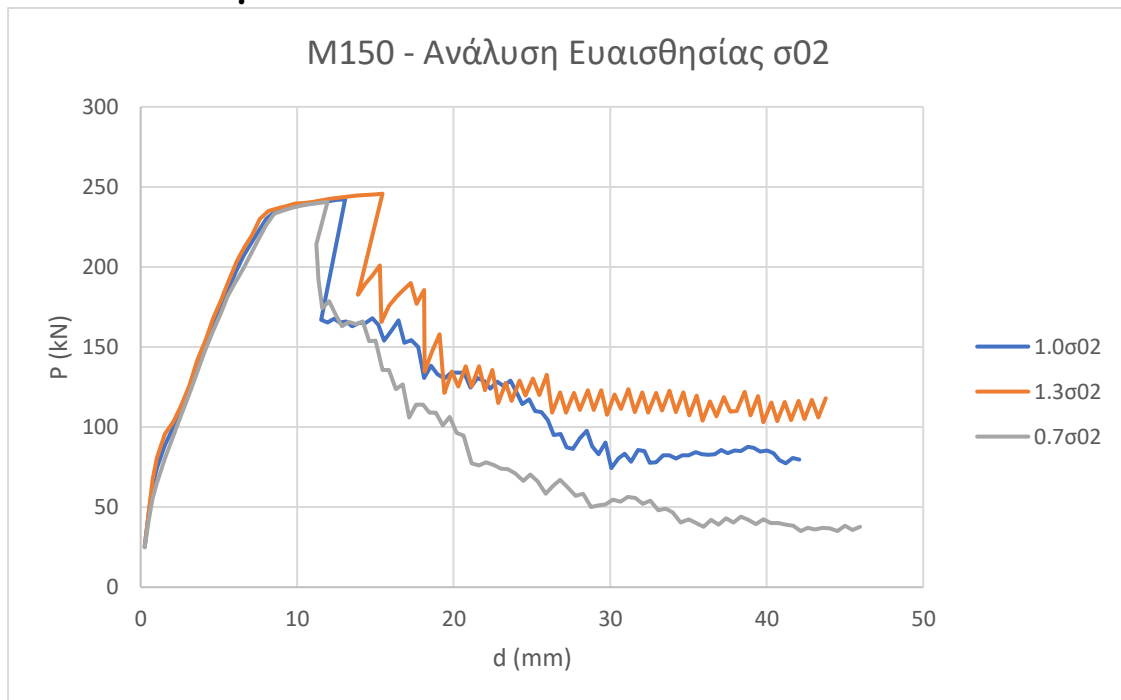
Σχήμα 7.12 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – M100

	0.7 $\sigma_{02}$		1.3 $\sigma_{02}$		1.0 $\sigma_{02}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	218.89	7.849	223.05	7.113	223.61	7.886
Μέγιστο	228.04	9.578	234.35	11.801	233.73	11.794
Πτώση	163.52	10.869	188.64	11.398	191.09	11.409

Πίνακας 7.10 Χαρακτηριστικές τιμές ανάλυσης ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – M100



### 7.3.5 Δοκίμιο M150

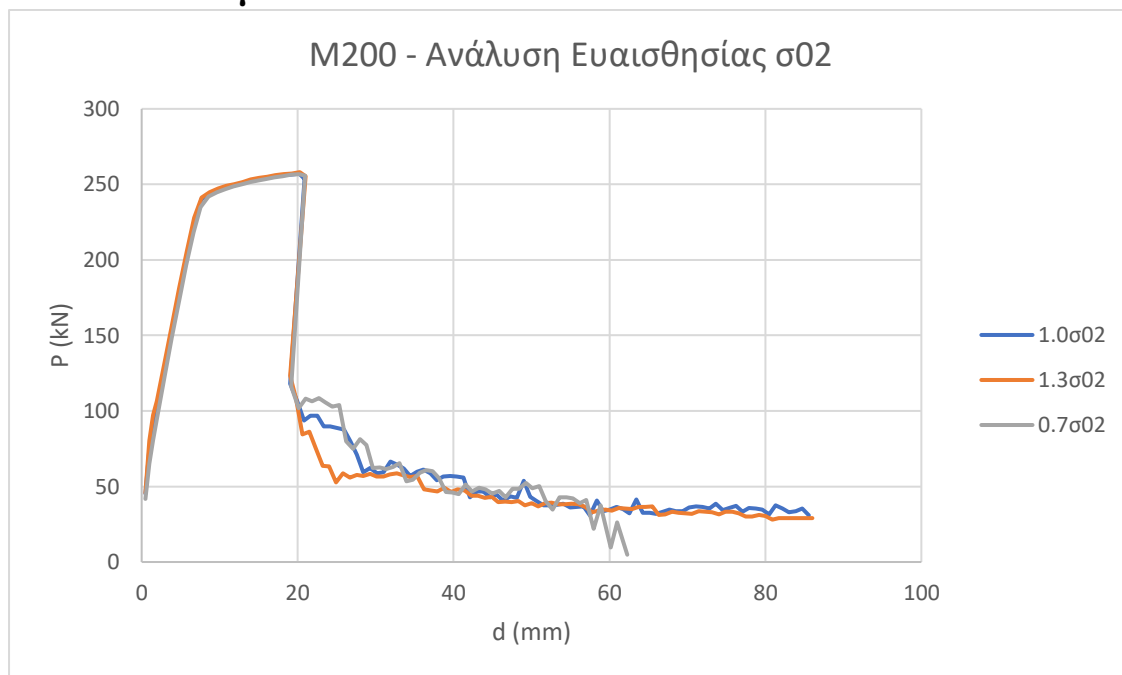


Σχήμα 7.13 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – M150

	0.7 $\sigma_{02}$		1.3 $\sigma_{02}$		1.0 $\sigma_{02}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	233.37	8.532	235.06	8.145	230.10	8.015
Μέγιστο	240.71	11.924	245.77	15.445	242.26	13.056
Πτώση	174.48	11.595	182.79	13.875	166.89	11.545

Πίνακας 7.11 Χαρακτηριστικές τιμές ανάλυσης ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – M150

### 7.3.6 Δοκίμιο M200



Σχήμα 7.14 Ανάλυση ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – M200

	0.7 $\sigma_{02}$		1.3 $\sigma_{02}$		1.0 $\sigma_{02}$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	235.07	7.574	241.41	7.690	240.54	7.663
Μέγιστο	256.76	20.192	258.12	20.297	257.08	20.196
Πτώση	116.33	19.178	123.40	19.012	118.09	19.059

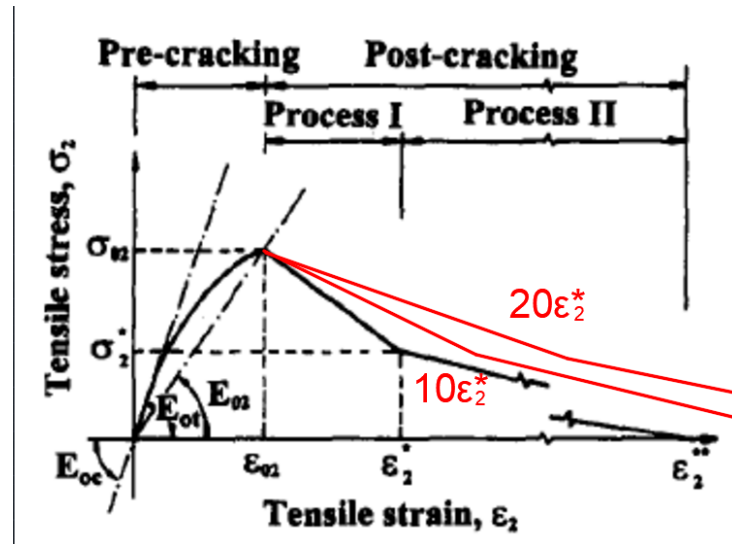
Πίνακας 7.12 Χαρακτηριστικές τιμές ανάλυσης ευαισθησίας μέγιστης θλιπτικής τάση  $\sigma_{02}$  – M200

Όσον αφορά στην αντοχή φαίνεται να έχει μικρή επίδραση η τάση  $\sigma_{02}$  αλλά και γενικά στην συμπεριφορά του υλικού. Μόνο στα δοκίμια D150 και M150 έχει επιρροή στην πλαστικότητα.

## 7.4 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης

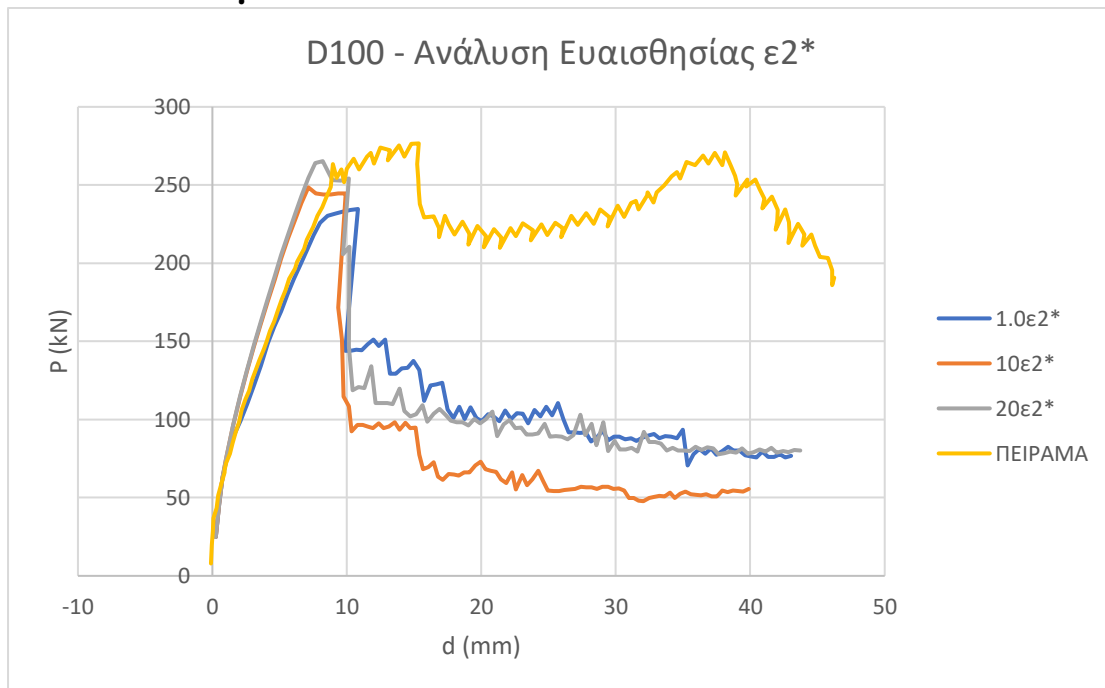
$\epsilon_2^*$

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής της παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  της καμπύλης  $\sigma - \epsilon$  στην περιοχή εφελκυσμού. Συγκεκριμένα αυξάνεται κατά 10 φορές και κατά 20 φορές.



Σχήμα 7.15 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$

### 7.4.1 Δοκίμιο D100

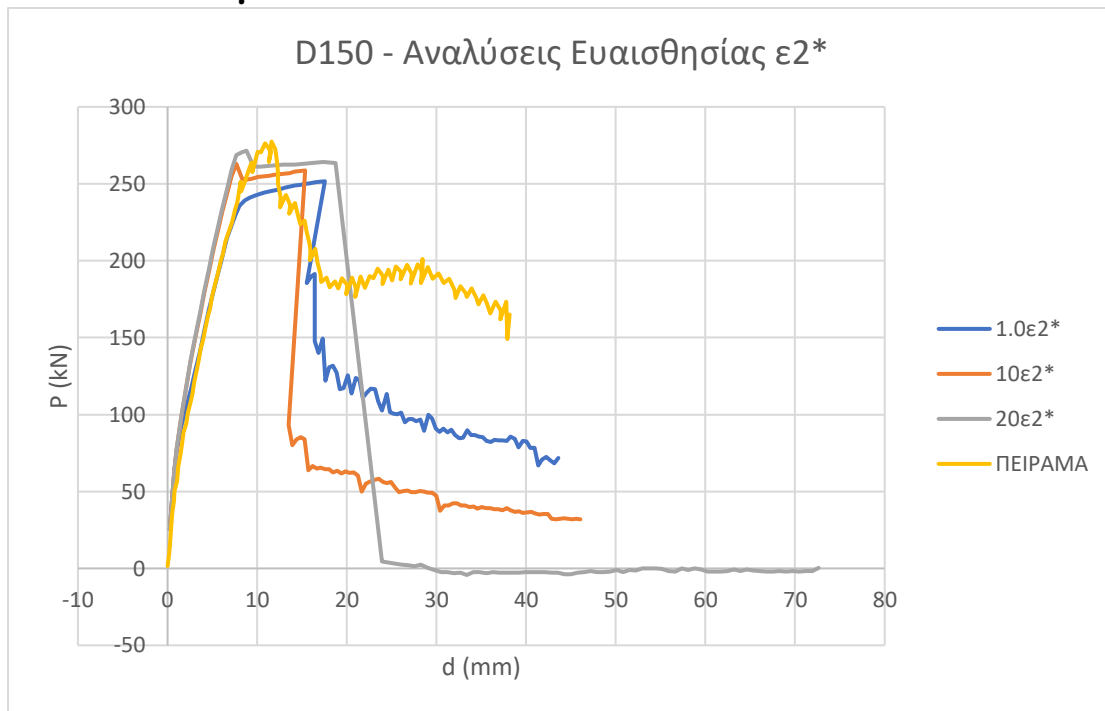


Σχήμα 7.16 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  - D100

	10 $\epsilon_2^*$		20 $\epsilon_2^*$		1.0 $\epsilon_2^*$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	248.53	7.141	263.91	7.652	225.87	8.019
Μέγιστο	248.53	7.141	263.91	7.652	234.68	10.813
Πτώση	171.49	9.346	118.75	10.435	143.84	9.881

Πίνακας 7.13 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  - D100

## 7.4.2 Δοκίμιο D150

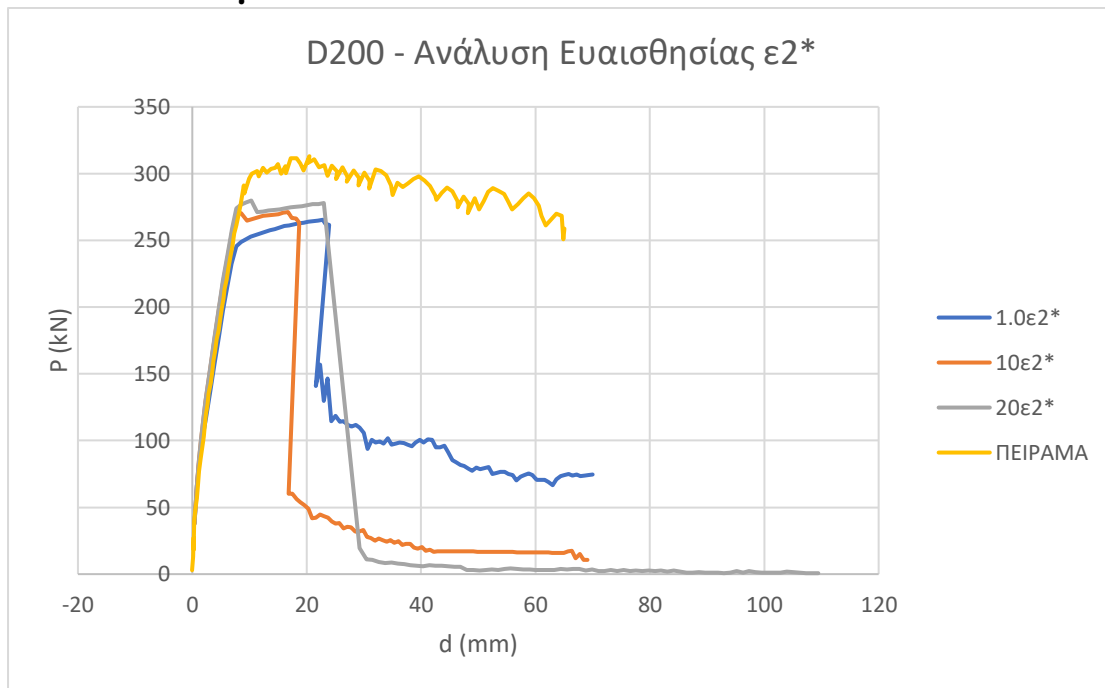


Σχήμα 7.17 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_2^*$  - D150

	10 $\varepsilon_2^*$		20 $\varepsilon_2^*$		1.0 $\varepsilon_2^*$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	262.95	7.681	268.75	7.669	235.86	8.043
Μέγιστο	262.95	7.681	271.54	8.826	251.64	17.567
Πτώση	93.30	13.492	4.62	23.890	140.20	16.833

Πίνακας 7.14 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_2^*$  - D150

### 7.4.3 Δοκίμιο D200

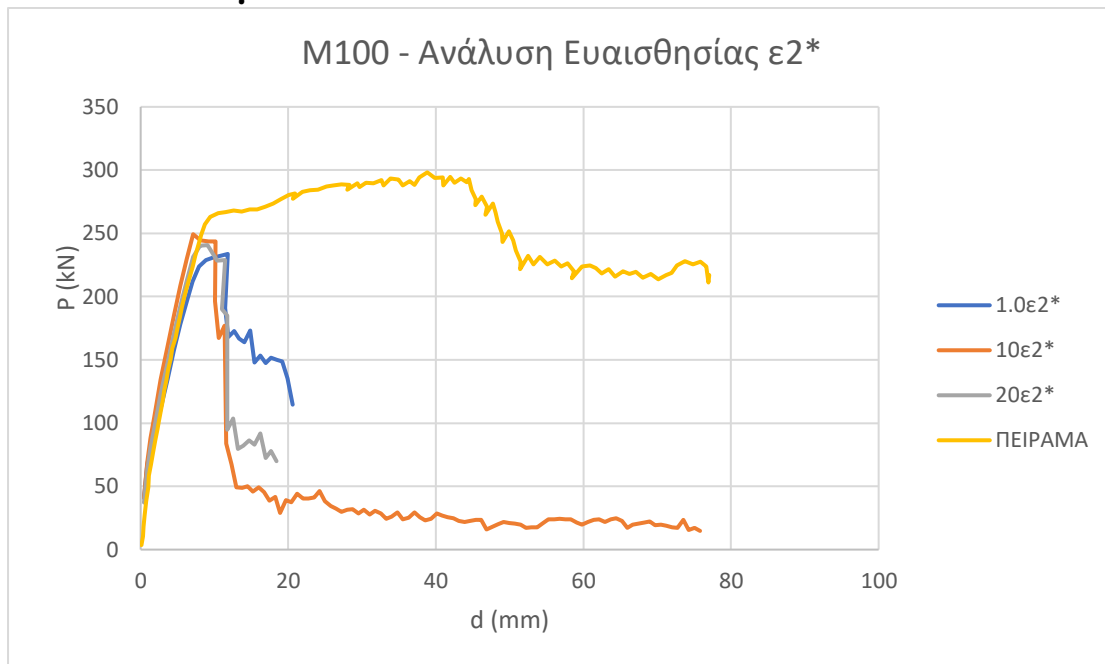


Σχήμα 7.18 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_2^*$  - D200

	10 $\varepsilon_2^*$		20 $\varepsilon_2^*$		1.0 $\varepsilon_2^*$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	270.14	7.697	273.87	7.693	245.80	7.666
Μέγιστο	271.17	16.782	279.86	10.280	265.45	22.791
Πτώση	60.06	16.824	19.64	29.221	141.08	21.559

Πίνακας 7.15 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_2^*$  - D200

### 7.4.4 Δοκίμιο M100

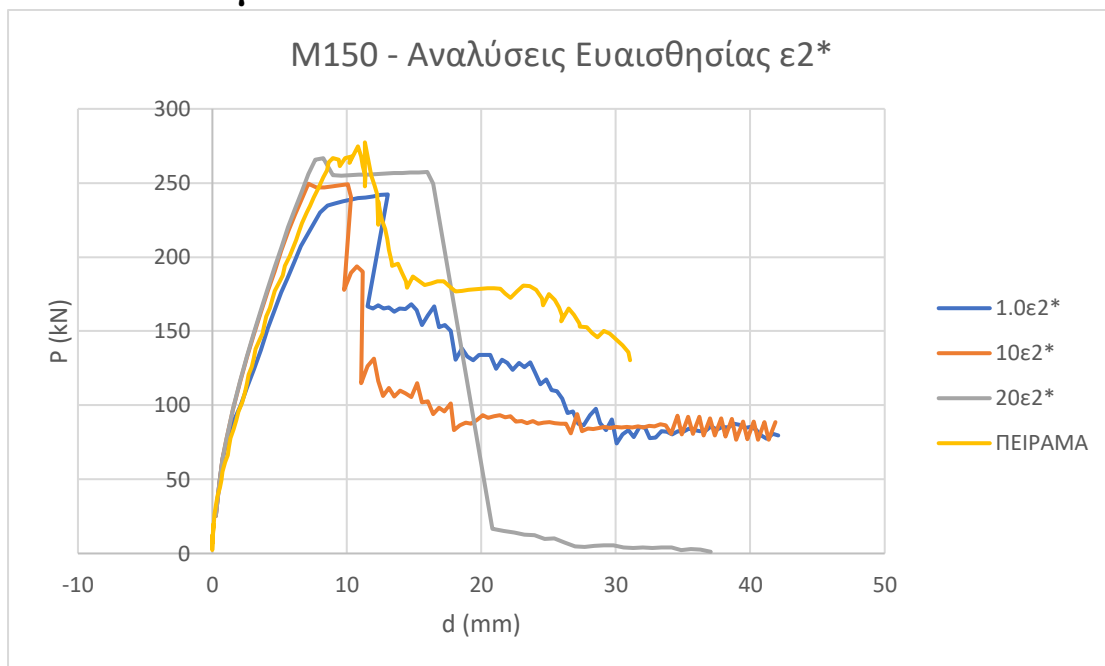


Σχήμα 7.19 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  - M100

	10 $\epsilon_2^*$		20 $\epsilon_2^*$		1.0 $\epsilon_2^*$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	249.33	7.142	231.50	7.143	223.61	7.886
Μέγιστο	249.33	7.142	240.73	9.089	233.73	11.794
Πτώση	49.03	12.966	94.82	11.700	191.09	11.409

Πίνακας 7.16 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  - M100

### 7.4.5 Δοκίμιο M150



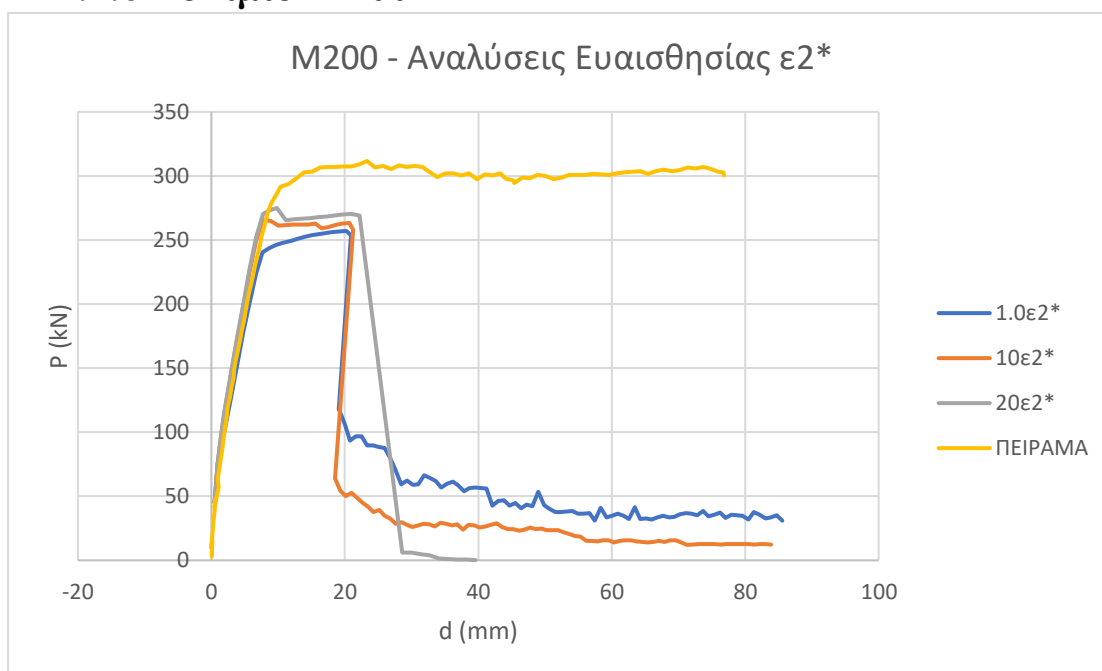
Σχήμα 7.20 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  - M150

	10 $\epsilon_2^*$		20 $\epsilon_2^*$		1.0 $\epsilon_2^*$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	249.51	7.148	265.60	7.663	230.10	8.015
Μέγιστο	249.51	7.148	266.72	8.243	242.26	13.056
Πτώση	177.78	9.803	16.54	20.841	166.89	11.545

Πίνακας 7.17 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_2^*$  - M1500



## 7.4.6 Δοκίμιο M200



Σχήμα 7.21 Ανάλυση ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_2^*$  - M200

	10 $\varepsilon_2^*$		20 $\varepsilon_2^*$		1.0 $\varepsilon_2^*$	
	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)	P (kN)	d (mm)
Διαρροή	265.63	7.706	270.39	7.699	240.54	7.663
Μέγιστο	265.63	7.706	274.99	9.844	257.08	20.196
Πτώση	64.05	18.538	6.17	28.590	118.09	19.059

Πίνακας 7.18 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων ανάλυσης ευαισθησίας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_2^*$  - M200

Η αύξηση της  $\varepsilon_2^*$  οδηγεί σε αύξηση της κλίσης του ελαστικού κλάδου, αλλά και του ορίου διαρροής. Οι καμπύλες που προκύπτουν, συγκρινόμενες με τα πειράματα, φαίνεται να προσεγγίζουν ικανοποιητικά το φορτίο διαρροής. Επιπλέον, η μεγιστοποίηση του φορτίου γίνεται λίγο μετά τη διαρροή ενώ, στην συνέχεια, σημειώνεται μία μικρή πτώση που ακολουθείται από έναν οριζόντιο μετελαστικό κλάδο μέχρι την αστοχία. Παρ' όλα αυτά, αυτό που σε κανένα από τα παραπάνω προσομοιώματα δεν επετεύχθη είναι η προσέγγιση του μετελαστικού κλάδου των πειραμάτων μέχρι το τέλος και κατ' επέκταση η πλαστιμότητα. Σε κάθε ανάλυση η αστοχία επέρχεται σε πολύ μικρότερη παραμόρφωση απ' ότι στην πραγματικότητα.

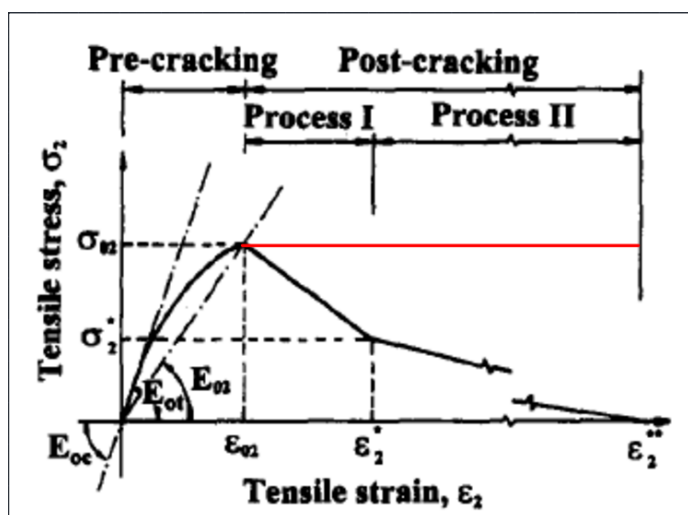
## 7.5 Συμπεράσματα

Οι παραπάνω αναλύσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μέγεθος που επηρεάζει περισσότερο την καμπτική και διατμητική απόκριση του υλικού είναι η παραμόρφωση  $\epsilon_2^*$  ή γενικότερα η κλίση της καμπύλης εφελκυσμού μετά την διαρροή. Η τάση  $\sigma_{02}$  φαίνεται να μην έχει ιδιαίτερη σημασία στην αντοχή και την συμπεριφορά του υλικού, κάτι που είναι λογικό, καθώς όσο αυξάνεται η καμπυλότητα της διατομής η κορυφή αυτή της καμπύλης εφελκυσμού είναι όλο και μικρότερη αναλογικά με το υπόλοιπο μέρος της καμπύλης εφελκυσμού – μετά την διαρροή – που εκτείνεται στο υπόλοιπο ύψος της εφελκυσμένης ζώνης. Η θλιπτική αντοχή φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στο μέγιστο φορτίο διαρροής και αστοχίας, αλλά αφ' ενός δεν φτάνει ικανοποιητικά κοντά στις τιμές του πειράματος και αφ' εταίρου δεν έχει νόημα να αυξηθεί περεταίρω, διότι η αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη σε σχέση με το άοπλο. Αυτό που αυξάνεται σημαντικά με την ινόπλιση είναι η πλαστιμότητα του υλικού. Επομένως, για την καλύτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του υλικού όπως καταγράφηκε στα πειράματα, δύναται να μειωθεί η αρνητική κλίση της καμπύλη εφελκυσμού μετά την διαρροή. Έτσι, αυτό που θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο είναι μία καμπύλη εφελκυσμού με ελαστικό – πλήρως πλαστικό κλάδο.

## 8. ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 8.1 Εισαγωγή

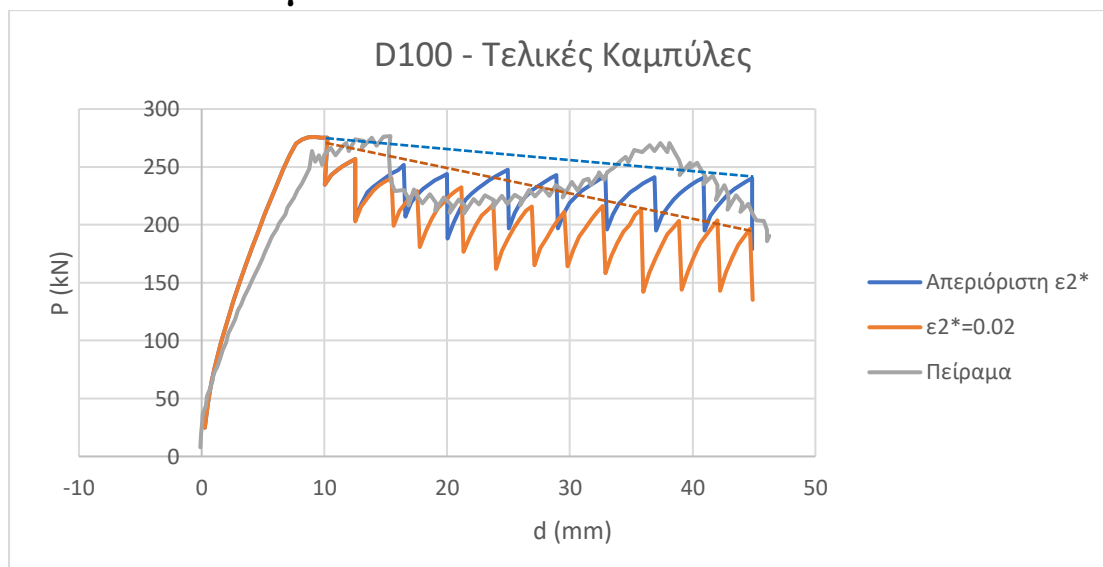
Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται μία καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  ινοπλισμένου σκυροδέματος σε εφελκυσμό, με μορφή ελαστική – πλήρως πλαστική, καθώς οι αναλύσεις ευαισθησίας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι αυτή η μορφή καμπύλης είναι πιθανό να οδηγήσει σε καλύτερη προσέγγιση των καμπυλών φορτίου μετατόπισης που προέκυψαν από τα πειράματα. Έτσι, ο μετελαστικός κλάδος θα έχει σταθερή τάση ίση με την  $\sigma_{02}$  που είναι η τάση διαρροής σε εφελκυσμό, μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας  $\epsilon_2^{**}$  που έχει ληφθεί για κάθε δοκίμιο, ίση με 0.20 για τα δοκίμια με περιεκτικότητα ιών  $100 \text{ kg/m}^3$  και  $150 \text{ kg/m}^3$  και 0.40 για αυτά με περιεκτικότητα  $200 \text{ kg/m}^3$ . Επιπλέον, εξετάζεται ένα ακόμη μοντέλο με απεριόριστη παραμόρφωση  $\epsilon_2^{**}$ .



Σχήμα 8.0.1 Ελαστικό – πλήρως πλαστικό μοντέλο καμπύλης εφελκυσμού τάσεων - παραμορφώσεων

## 8.2 Αποτελέσματα – αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου μετατόπισης

### 8.2.1 Δοκίμιο D100



Σχήμα 8.2 Αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης – D100

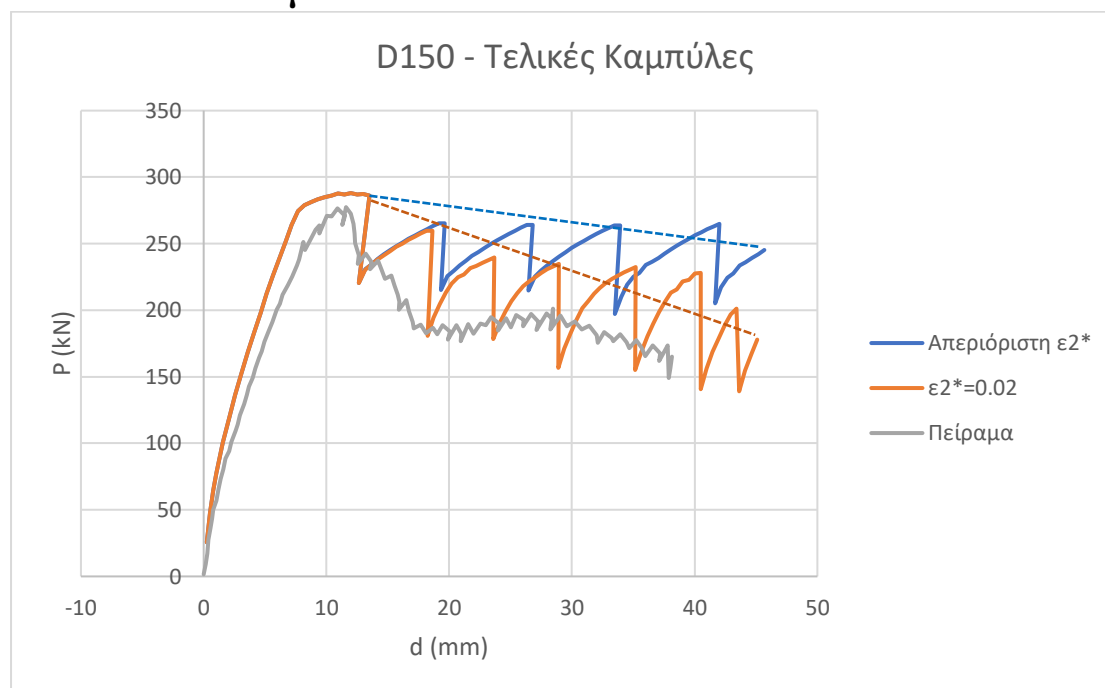
	$\varepsilon_2 = 0.02$		Απεριόριστη $\varepsilon_2$		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P	d
Διαρροή	269.96	7.675	269.96	7.675	264.18	9.521	2.19%	-19.39%
Μέγιστο	275.85	9.239	275.85	9.239	278.56	13.845	-0.97%	-33.27%

Πίνακας 8.1 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων αναθεωρημένων καμπυλών φορτίου - παραμόρφωσης – D100

Παρατηρείται ότι η τιμή του φορτίου στη διαρροή και στη μεγιστοποίηση αντοχής προσεγγίζονται ικανοποιητικά. Επιπλέον, ο μετελαστικός κλάδος του προσομοιώματος είναι αρκετά κοντά σε αυτόν του πειράματος. Ακόμη, οι αυξομειώσεις του φορτίου που συμβαίνουν στον μετελαστικό κλάδο, υποδηλώνουν την ύπαρξη διαδοχικών τμηματικών αστοχιών και ρηγματώσεων του προσομοιώματος, που παραπέμπουν σε πλάστιμη συμπεριφορά και ανακατανομή. Οι δύο καμπύλες με  $\varepsilon_2^*=0.02$  και με απεριορίστη  $\varepsilon_2^*$  δίνουν ίδιες τιμές φορτίων και παραμορφώσεων, ενώ λίγο μετά την μεγιστοποίηση του φορτίου η πρώτη βρίσκεται λίγο πιο κάτω από τη δεύτερη, κάτι που είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι πρακτικά το δοκίμιο απεριορίστης  $\varepsilon_2^*$  δεν αστοχεί ποτέ σε εφελκυσμό. Όσον αφορά στον ελαστικό κλάδο, το προσομοίωμα είναι πιο

δύσκαμπτο από το πείραμα, κάτι που δεν συμβαίνει στο αρχικό μοντέλο με την καμπύλη εφελκυσμού των Tat-Seng Lok και Jin-Song Pei.

## 8.2.2 Δοκίμιο D150



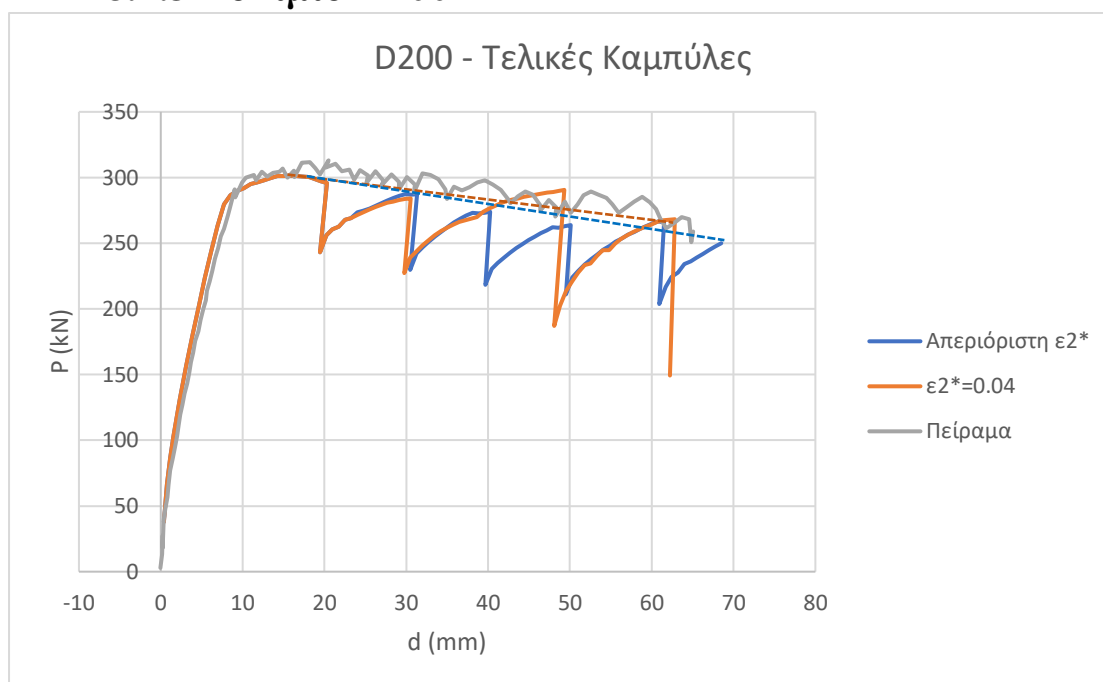
Σχήμα 8.3 Αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης – D150

	$\varepsilon_2^{**} = 0.02$		Απεριόριστη $\varepsilon_2^{**}$		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P	d
Διαρροή	274.45	7.691	274.45	7.691	252.42	8.431	8.73%	-8.78%
Μέγιστο	288.02	11.990	288.02	11.990	280.18	10.812	2.80%	10.90%

Πίνακας 8.2 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων αναθεωρημένων καμπυλών φορτίου - παραμόρφωσης – D150

Ο ελαστικός κλάδος (στάδιο I και II) έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτή του πειράματος και γενικότερα σε όλη την ανάλυση οι καμπύλες των προσομοιωμάτων έχουν μεγαλύτερες τιμές απ' ότι το πείραμα. Παρ' όλα αυτά οι τιμές του φορτίου στα χαρακτηριστικά σημεία βρίσκονται ικανοποιητικά κοντά στο πείραμα.

### 8.2.3 Δοκίμιο D200



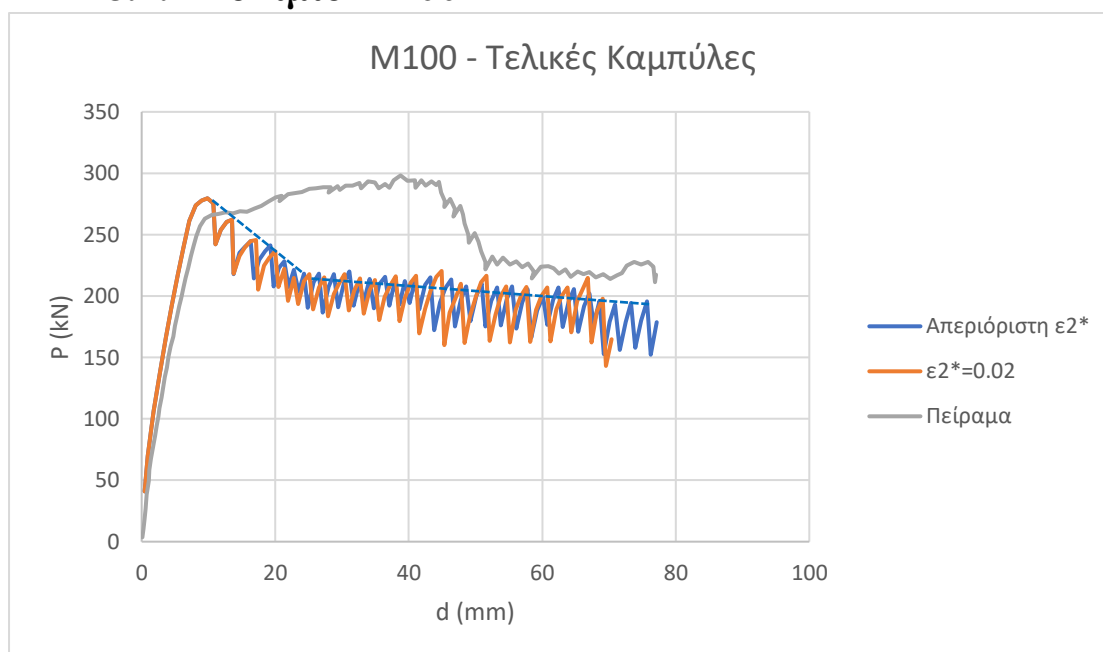
Σχήμα 8.4 Αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης – D200

	$\varepsilon_2^{**} = 0.04$		Απεριόριστη $\varepsilon_2^{**}$		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P	d
Διαρροή	286.38	8.506	286.38	8.506	294.41	9.275	-2.73%	-8.29%
Μέγιστο	301.14	14.243	301.14	14.243	313.64	20.887	-3.99%	-31.81%

Πίνακας 8.3 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων αναθεωρημένων καμπυλών φορτίου - παραμόρφωσης – D200

Σε αυτό το δοκίμιο ο ελαστικός κλάδος (στάδιο I και II) είναι ελάχιστα πιο δύσκαμπτος σε σχέση με το πείραμα, όμως η απόκλιση είναι αμελητέα, εν αντιθέσει με τα δοκίμια που έχουν μικρότερη περιεκτικότητα ινών. Επιπλέον, προσεγγίζονται ικανοποιητικά οι τιμές του φορτίου στη διαρροή και στο μέγιστο. Ακόμη, ικανοποιητική είναι και η προσέγγιση του μετελαστικού κλάδου.

## 8.2.4 Δοκίμιο M100



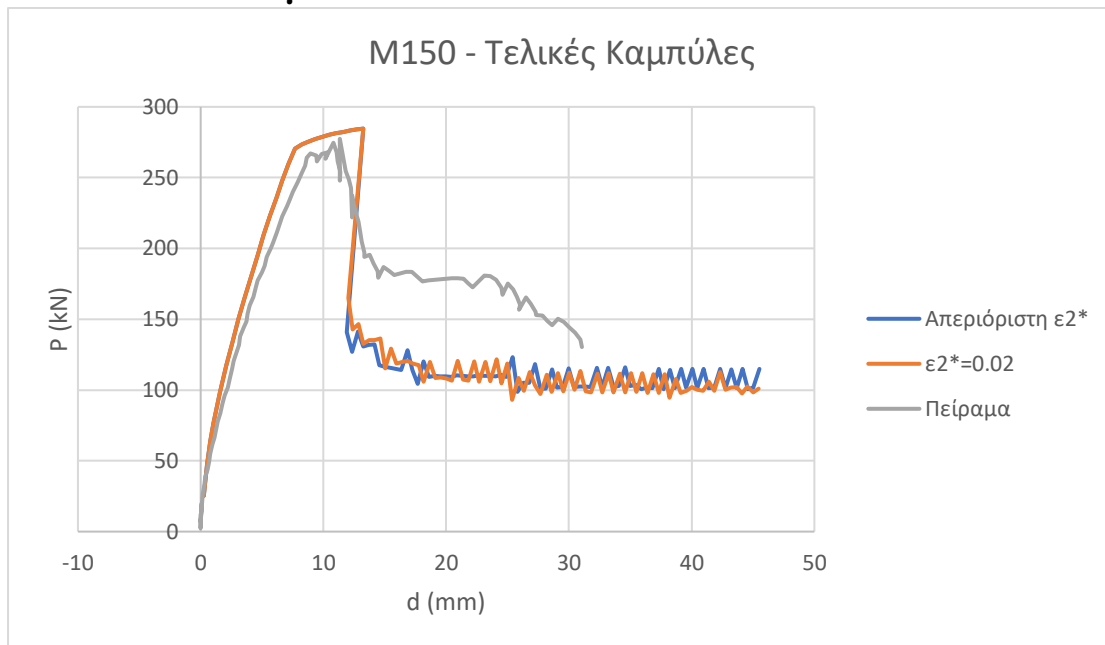
Σχήμα 8.5 Αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης – M100

	$\varepsilon_2^{**} = 0.02$		Απεριόριστη $\varepsilon_2^{**}$		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P	d
Διαρροή	273.93	8.071	273.93	8.071	259.04	8.751	5.75%	-7.77%
Μέγιστο	279.62	9.880	279.62	9.880	301.29	55.816	-7.19%	-82.30%

Πίνακας 8.4 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων αναθεωρημένων καμπυλών φορτίου - παραμόρφωσης – M100

Ο ελαστικός κλάδος (στάδιο I και II) έχει μεγαλύτερη κλίση σε σχέση με το πείραμα, ενώ οι τιμές του φορτίου στη διαρροή και στο μέγιστο είναι ικανοποιητικά κοντά σε αυτές του πειράματος. Ο μετελαστικός κλάδος των προσομοιωμάτων βρίσκεται κάτω από αυτόν του πειράματος, ενώ μετά τη διαρροή σημειώνεται μία καθοδική πορεία και στη συνέχεια μία σταθεροποίηση, σε αντίθεση με το πείραμα, όπου παρατηρείται ένα κρατυνόμενος κλάδος και στη συνέχεια ένας, καθοδικός. Αυτό ενδεχομένως θα βελτιωνόταν αν στο νόμο εφελκυσμού των Tat – Seng Lok και Jin – Song Pei υπήρχε μία κράτυνση στον στάδιο μετά τη ρηγματώση.

## 8.2.5 Δοκίμιο M150



Σχήμα 8.6 Αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης – M150

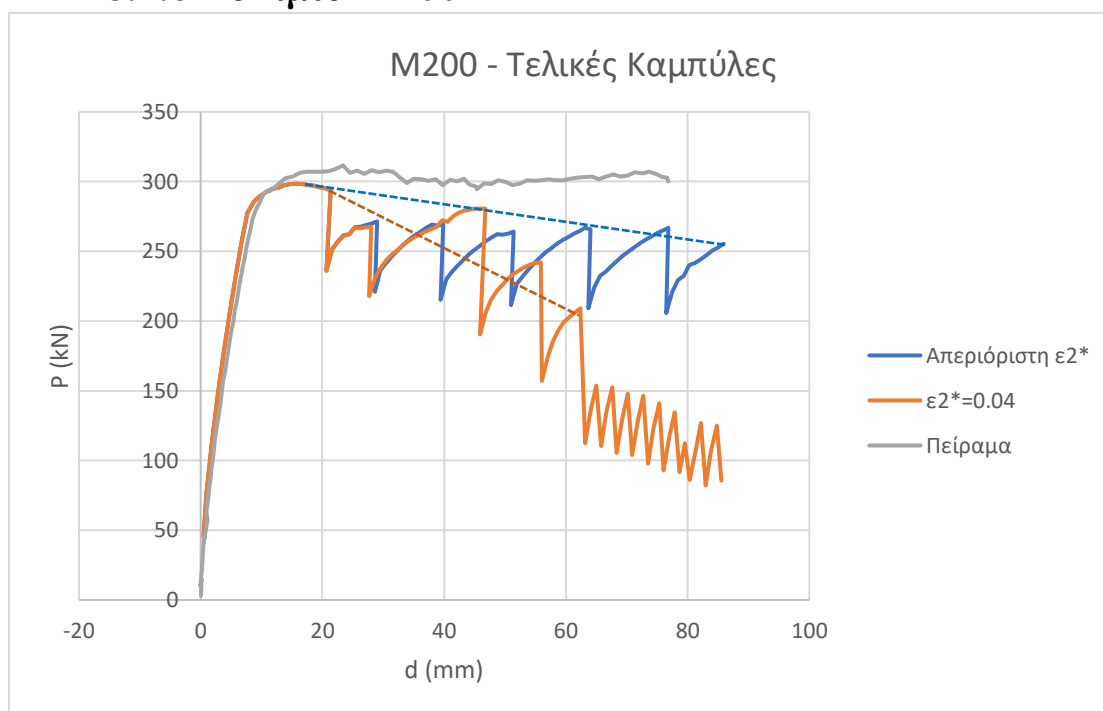
	$\varepsilon_2^{**} = 0.02$		Απεριόριστη $\varepsilon_2^{**}$		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P	d
Διαρροή	270.65	7.665	270.65	7.665	268.31	9.069	0.87%	-15.48%
Μέγιστο	284.65	13.234	284.65	13.234	277.03	10.693	2.75%	23.76%

Πίνακας 8.5 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων αναθεωρημένων καμπυλών φορτίου - παραμόρφωσης – M150

Από την αρχή τη ανάλυσης μέχρι την μεγιστοποίηση του φορτίου η καμπύλη του προσομοιώματος βρίσκεται πάνω από το πείραμα, ενώ η προσέγγιση του ορίου διαρροής και του μεγίστου είναι ικανοποιητική. Επιπροσθέτως, τόσο στο πείραμα, όσο και στο προσομοίωμα παρατηρείται μία απότομη πτώση του φορτίου μετά την μεγιστοποίηση, η οποία και στα δύο συμβαίνει περίπου στην ίδια παραμόρφωση.



## 8.2.6 Δοκίμιο M200



Σχήμα 8.7 Αναθεωρημένες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης – M200

	$\varepsilon_2^{**}=0.04$		Απεριόριστη $\varepsilon_2^{**}$		ΠΕΙΡΑΜΑ		Αποκλίσεις	
	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P (kN)	d(mm)	P	d
Διαρροή	277.78	7.701	277.78	7.701	290.75	9.915	-4.46%	-22.33%
Μέγιστο	298.41	15.737	298.41	15.737	313.19	23.366	-4.72%	-32.65%

Πίνακας 8.6 Τιμές χαρακτηριστικών σημείων αναθεωρημένων καμπυλών φορτίου - παραμόρφωσης – M200

Όπως και στα δοκίμιο D200 έχει την ίδια περιεκτικότητα ιών παρατηρείται μικρότερη απόκλιση στην κλίση του ελαστικού κλάδου σε σχέση με τα δοκίμια με περιεκτικότητες  $100 \text{ kg/m}^3$  και  $150 \text{ kg/m}^3$ . Η προσέγγιση της διαρροής και του μεγίστου είναι αρκετά ικανοποιητικές. Ο μετελαστικός κλάδος των προσομοιωμάτων βρίσκεται κάτω από αυτόν του πειράματος, ενώ προς το τέλος της ανάλυσης παρατηρείται μία πτώση στο προσομοίωμα με  $\varepsilon_2^{**}=0.04$ . Σε αυτή την περίπτωση ίσως θα έπρεπε και ο νόμος θλίψης να είναι πλαστικός, για να προκύψει η συμπεριφορά του πειράματος.

### 8.3 Συμπεράσματα

Συνολικά το ελαστικό – πλήρως πλαστικό μοντέλο προσομοιάζει καλύτερα την συμπεριφορά των δοκιμίων, γιατί ο μετελαστικός κλάδος του είναι αρκετά κοντά στα αποτελέσματα των πειραμάτων και έτσι προκύπτουν και οι αναμενόμενες πλαστιμότητες για τα συγκεκριμένα ποσοστά ινών. Αυτό στο οποίο υπερτερεί το αρχικό μοντέλο είναι ο ελαστικός κλάδος, όπου σε όλα τα δοκίμια σχεδόν ταυτίζεται πλήρως με το πείραμα. Όμως και στο ελαστικό – πλήρως πλαστικό μοντέλο η απόκλιση του ελαστικού κλάδου είναι μικρή και αφορά κυρίως στα δοκίμια των  $100 \text{ kg/m}^3$  και  $150 \text{ kg/m}^3$ .

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η προσομοίωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό DIANA FEA, με βάση σχέσεις που προτάθηκαν από τους Tat-Seng Lok, Jin-Song Pei και M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta αλλά και κατά RILEM TC 162 TDF. Οι σχέσεις αυτές εφαρμόστηκαν σε προσομοιώματα δοκιμίων δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος, που διερευνήθηκαν πειραματικά όπως περιγράφονται από τους Ζέρης κ.α. (Πειραματική Διερεύνηση Δοκών Από Ινοπλισμένο Σκυροδέμα Χωρίς Οπλισμό Διάτμησης, Χρήστος ΖΕΡΗΣ, Σαρής ΒΙΤΑΛΗΣ, Παρασκευάς ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ), τα οποία εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ.

Τα πειράματα αυτά αφορούσαν σε δοκούς ινοπλισμένου σκυροδέματος διαφορετικών πυκνοτήτων ινών και συνθέσεων, με εφελκόμενο μόνο οπλισμό έναντι κάμψης και χωρίς διατμητικό οπλισμό, που υποβλήθηκαν σε μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων, με σκοπό τη διερεύνηση της καμπτο-διατμητικής συμπεριφοράς και της πλαστιμότητας δοκών με χαμηλό λόγο διάτμησης ινοπλισμένου σκυροδέματος. Τα δοκίμια αυτά περιλάμβαναν 3 δοκούς με ίνες Dramix σε περιεκτικότητες  $100 \text{ kg/m}^3$ ,  $150 \text{ kg/m}^3$  και  $200 \text{ kg/m}^3$  (D100, D150, D200) και άλλες 3 δοκούς που περιείχαν μείγμα τριών διαφορετικών ινών της ΕΤΑΛ με τις ίδιες περιεκτικότητες (M100, M150, M200). Οι ίνες Dramix είχαν μήκος 35 mm λόγω μορφής  $L/D = 65$ . Τα 3 είδη ινών της ΕΤΑΛ που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μήκη 80 mm, 60 mm και 31 mm, με λόγους μορφής 80, 60 και 40 αντίστοιχα και χρησιμοποιήθηκαν σε αναλογίες 1:1:2 σε κάθε δοκίμιο.

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των καμπυλών φορτίου – μετακίνησης των προσομοιωμάτων συγκρίθηκαν αναλυτικά με αυτά των πειραμάτων για τον έλεγχο των

σχέσεων που προτείνονται από την βιβλιογραφία. Έπειτα διενεργήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας αυτών, όπου εξετάστηκε η επιρροή της κάθε παραμέτρου των σχέσεων τάσεων – παραμορφώσεων στις αναλυτικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης, με σκοπό την επιλογή των βέλτιστων παρεμβάσεων που μπορούν να γίνουν στο αρχικό μοντέλο για να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Αυτό που έδειξαν οι αναλύσεις είναι ότι το αρχικό μοντέλο υλικού έδινε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ελαστική (Στάδιο I και II) συμπεριφορά του υλικού, αφού ο ελαστικός κλάδος πριν και μετά τη ρηγμάτωση των καμπυλών που προέκυψαν ταυτίστηκε με αυτό των πειραμάτων σε όλα τα δοκίμια. Αυτό στο οποίο υστερεί το αρχικό μοντέλο είναι η μετελαστική συμπεριφορά των δοκιμίων και ο προσδιορισμός των αντοχών αυτών, αφού σε όλα τα δοκίμια οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης που προέκυψαν από τα προσομοιώματα ήταν χαμηλότερες από τις πειραματικές και η αστοχία επήλθε σε αρκετά μικρότερη παραμόρφωση απ' ότι στα πειράματα, με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν οι πειραματικά αποτιμημένες πλαστιμότητες. Έπειτα, οι αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν, έδειξαν ότι αυτό που μπορούσε να μεταβάλει πιο ουσιαστικά την εικόνα των καμπυλών φορτίου - μετατόπισης και θα είχε μεγαλύτερο φυσικό νόημα να τροποποιηθεί, εν αντιθέσει με τις άλλες παραμέτρους, ήταν η μεταβολή της κλίσης του φθιτού κλάδου της καμπύλης εφελκυσμού μετά την διαρροή. Έτσι ο κλάδος αυτός επιλέχθηκε να είναι οριζόντιος αντί καθοδικός και, όντως, βελτιώθηκαν σημαντικά τα αποτελέσματα και προέκυψαν πιο ικανοποιητικοί μετελαστικοί κλάδοι με μεγαλύτερες πλαστιμότητες, έτσι ώστε οι τιμές των αντοχών να είναι πολύ κοντά στην πειραματική πρόβλεψη.

Παρ' όλα αυτά το αρχικό μοντέλο εξακολουθεί να είναι καλύτερο στον ελαστικό κλάδο, αφού το τελικό μοντέλο απέδωσε ελαφρώς μεγαλύτερη αρχική δυσκαμψία στα δοκίμια με περιεκτικότητες ινών  $100 \text{ kg/m}^3$  και  $150 \text{ kg/m}^3$ .

## Βιβλιογραφία

- DIANA FEA User's Manual -- Release 10.2.* (2017). Manie Joanna.
- ASTM C39 / C39M-14, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. (2014). *ASTM International*.
- Carreira, D. J., & Chu, K. H. (1985). Stress strain relationship for plain concrete in compression. *ACI Journal*, 82(6), 797-804.
- CEB-FIP MODEL CODE 1990: DESIGN CODE. (1993). *Comite Euro-International Du Beton*.
- Chuang, T., & Mai, Y. (1987). Behavior of strain softening materials in flexural bending. *SP105, American Concrete Institute*, 85-100.
- Craig, R. J., Decker, J., Dombrowski, L., Laurencelle, R., & Federovich, J. (1987). Inelastic behavior of reinforced fibrous concrete. *J. Struct. Engrg. ASCE*, 113(4), 802-817.
- EN1992 - Eurocode 2: Design of concrete structures.* (2004). Brussels, CEN: European Committee, f. S. .
- fib Model Code for Concrete Structures.* (2010). Laussane: International Federation for Structural Concrete.
- Ghalib, M. A. (1980). Moment capacity of steel fiber reinforced small concrete slabs. *ACI J.*, 77(4), 247-257.
- Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures, CNR-DT 204.* (2006). Roma, Italy: Ricerche, Consiglio Nazionale delle.
- Hannant, D. J. (1978). Fiber cements and fiber concretes. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Henagar, C. H. (1977). Ultimate strength of reinforced steel fibrous concrete beams. (I. o. Engineers, Επιμ.) *Fibre reinforced materials: design & engineering applications*, 165-173.
- IS: 12269-1987. Specifications for 53 Grade Ordinary Portland Cement. (1987). Στο *Bureau of Indian Standards (BIS)*. New Delhi.
- IS:10262-1982. Recommended Guidelines for Concrete Mix Design. (1982). Στο *Bureau of Indian Standards (BIS)*.
- IS:516-1959. Method of test for strength of concrete. (1959). Στο *Bureau of Indian Standards (BIS)*. New Delhi.
- Lim, T. Y., Paramasivam, P., & Lee, S. L. (1987a). Analytical model for tensile behavior of steel-fiber concrete. *ACI Mat. J.*, 84(4), 286-289.
- Lim, T. Y., Paramasivam, P., & Lee, S. L. (1987b). Bending behavior of steel-fiber concrete beams. *ACI Struct J.*, 84(4), 286-298.
- Lok, T.-S., & Pei, J.-S. (1998). Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 86-97. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(86)

- Nataraja, M. C., Dhang, N., & Gupta, A. P. (1999). Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 21, 383-390. doi:10.1016/S0958-9465(99)00021-9.
- RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. (2003). *Materials and Structures*, 36(262), σσ. 560-567.
- Sakai, M., & Nakamura, N. (1986). Analysis of flexural behavior of steel fibre reinforced concrete. Στο S. R. N., W. R. L., & D. R. Oakley, *RILEM SYmp., FRC 86, 3rd Int. Symp. Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*.
- Soroushian, P., & Lee, C. D. (1989). Constitutive modeling of steel fiber reinforced concrete under tension and compression. Στο S. R. N., & B. B., *Fiber reinforced cements and concretes* (σσ. 363-377). New York.
- Swamy, R. N., & Al-Ta'an, S. A. (1981). Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete. *ACI Struct. J.*, 78(5), 395-405.
- Swamy, R. N., Mangat, P. S., & Rao, C. V. (1974). "The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices." *SP44, American Concrete Institute*, 1-28.
- UNI 11039: Steel Fibre Reinforced Concrete - Test Method for Determination of First Crack Strength and Ductility Indexes*. (2003). Italy: National Italian Unification Centre.
- UNI 11188: Structural elements of steel fibre reinforced concrete, execution and control*. (2007). Italy: National Italian Unification Centre.
- Worner, J. D., & Muller, M. (1994). Procedure for the Calculation of Fiber Reinforced Concrete for Moments and Normal Forces. *ACI Symposium Publication*, 139-156. doi:10.14359/4591
- Zhuang, Y. P., Jiang, J. J., Y., J. S., & Ye, Z. M. (1990). Basic element design for steel reinforced concrete structures. *Earthquake Press*.
- Ζέρης, Χ., & Βιτάλης, Σ. (2008). Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονοτονική φόρτιση. Ανάκτηση από <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.3330>
- Ζέρης, Χ., Βιτάλης, Σ., & Κοντογιάννης, Π. (χ.χ.). Πειραματική Διερεύνηση Δοκών Από Ινοπίσμένο Σκυρόδεμα Χωρίς Οπλισμό Διάτμησης.