



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.
Τομέας Δομοστατικού Σχεδιασμού**

Πτυχιακή Εργασία

«Πειραματική και θεωρητική, με την χρήση ANSYS, διερεύνηση της αντοχής σε κάμψη ινοπλισμένων δοκών με διαφορετικό ύψος και ποσοστό ινών»

**Μηλιώνης Παναγιώτης
Σίνγκ Τζασκίρατ**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Δρ. Κωνσταντίνος Δημάκος,
Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ και Πρόεδρος Τμήματος.**

Αθήνα, 2016



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.
Τομέας Δομοστατικού Σχεδιασμού**

Πτυχιακή Εργασία

«Πειραματική και θεωρητική, με την χρήση ANSYS, διερεύνηση της αντοχής σε κάμψη ινοπλισμένων δοκών με διαφορετικό ύψος και ποσοστό ινών»

**Μηλιώνης Παναγιώτης
Σίνγκ Τζασκίρατ**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16/03/2016

.....
Κ. Δημάκος
Πρόεδρος Τμήματος

.....
Κ. Ρεππαπής
Επίκουρος καθηγητής

.....
Δ. Δρίβας

Αθήνα, 2016

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά	17
1.2 Ιστορική Αναδρομή	18
1.3 Πεδίο Εφαρμογής	19
1.4 Αντικείμενο Πτυχιακής Εργασίας	20

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Διερεύνηση

2.1 Σκυρόδεμα	22
2.1.1 Κατηγορίες Σκυροδέματος	22
2.2 Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα	23
2.2.1 Ιδιότητες Ινοπλισμένου Σκυροδέματος	24
2.3 Ίνες	25
2.3.1 Ιδιότητες Τεχνητών Ινών	26
2.3.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά - Μορφή Ινών	28
2.3.2.1 Λόγος Μορφής – Διάμετρος	28
2.3.2.2 Ισοδύναμη Διάμετρος Ινών	29
2.3.2.3 Μορφή Ινών	30
2.3.2.4 Μήκος Ινών	30
2.3.3 Περιεκτικότητα σε Ίνες	31
2.3.4 Προσανατολισμός Ινών στο Χώρο	31
2.3.5 Μηχανισμός Αστοχίας Ινών	33
2.4 Ίνες Χάλυβα	34
2.4.1 Ιδιότητες Ινών Χάλυβα	34
2.4.2 Παραγωγή Ινών Χάλυβα	35
2.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Χρήσης των Ινών	38
2.6 Θεωρητική διερεύνηση της αντοχής ινοπλισμένων δοκών	40

Κεφάλαιο 3: Πειραματικό Μέρος

3.1 Προμήθεια Υλικών	46
3.2 Καλούπια – Μήτρες	50
3.3 Διαμήκης Οπλισμός Δοκών – Συνδετήρες	51
3.4 Υπολογισμός Όγκων και Ζύγιση Υλικών	51
3.4.1 Υπολογισμός Μάζας Ινών	53
3.4.2 Υπολογισμός Βάρους Κάθε Σκυροδέτησης	53
3.5 Διαδικασία Σκυροδέτησης	56
3.6 Εργαστηριακές Δοκιμές	58
3.6.1 Δοκιμή Θλίψης και Διάρρηξης	58
3.6.2 Υπολογισμός Θλιπτικής Τάσης	59
3.6.3 Υπολογισμός Εφελκυστικής Τάσης	59
3.6.4 Δοκιμή Κάμψης	60
3.7 Υπολογισμός Καμπτικής Αντοχής	61

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Δοκίμια $V_f=0\%$

Δοκίμιο BV1/15/0.8/VF0	66
Δοκίμιο BV2/15/2.5/VF0	67
Δοκίμιο BV1/20/0.8/VF0	68
Δοκίμιο BV2/20/2.5/VF0	69
Δοκίμιο BV3/20/1.5/VF0	70

Δοκίμια $V_f=0.6\%$

Δοκίμιο BFRC1/15/0.8/VF06	72
Δοκίμιο BFRC2/15/2.5/VF06	73
Δοκίμιο BFRC3/15/0.8/VF06	74
Δοκίμιο BFRC1/20/0.8/VF06	75

Δοκίμιο BFRC2/20/2.5/VF06	76
Δοκίμιο BFRC3/20/0.8/VF06	77
Δοκίμια Vf=1.2%	
Δοκίμιο BFRC1/15/0.8/VF12	79
Δοκίμιο BFRC2/15/2.5/VF12	80
Δοκίμιο BFRC3/15/0.8/VF12	81
Δοκίμιο BFRC1/20/0.8/VF12	82
Δοκίμιο BFRC2/20/2.5/VF12	83
Δοκίμιο BFRC3/20/0.8/VF12	84
4.1 Αποτελέσματα Δοκιμών Θλίψης-Διάρρηξης	85
4.1.1 Αποτελέσματα Δοκιμή Θλίψης	85
4.1.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Διάρρηξης	86
4.2 Πείραμα 2^ο	86
4.2.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 2 ^{ου} Πειράματος	87
Δοκίμιο BFRC1/15/08/VF06-2	88
Δοκίμιο BFRC2/15/08/VF06-2	89
Δοκίμιο BFRC1/20/08/VF06-2	90
Δοκίμιο BFRC2/20/08/VF06-2	91
4.3 Σύγκριση και Συμπεράσματα 2ου Πειράματος	92

Κεφάλαιο 5: ANSYS

5.1 Modeling (προσομείωμα δοκών)	95
5.2 Παρουσίαση θεωρητικών αποτελεσμάτων	109
A_BV1/20/08/VF0	110
A_BFRC1/20/08/VF06	110
A_BFRC3/20/08/VF06	110
A_BFRC1/20/08/VF12	111
A_BFRC3/20/08/VF12	111

A_BV2/20/25/VFO	111
A_BFRC2/20/25/VF06	112
A_BFRC2/20/25/VF12	112
A_BV1/15/08/VFO	112
A_BFRC1/15/08/VF06	113
A_BFRC3/15/08/VF06	113
A_BFRC1/15/08/VF12	113
A_BFRC3/15/08/VF12	114
A_BV2/15/25/VFO	114
A_BFRC2/15/25/VF06	114
A_BFRC2/15/25/VF12	115
5.3 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα από το ANSYS	115

Κεφάλαιο 6: Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

6.1 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	117
6.1.1 Επιρροή ποσοστού ινών-VF	117
6.1.2 Συμπεράσματα-Επιρροή Ποσοστού Ινών	119
6.1.3 Επιρροή διατμητικού λόγου-AR	120
6.1.4 Συμπεράσματα-Επιρροή Διατμητικού Λόγου-AR	123
6.2 Συμπεράσματα- Αποτελέσματα Θλίψης-Εφελκυσμού (Διάρρηξη)	124

Βιβλιογραφία

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Συγκριτικό διάγραμμα παραμορφώσεων συμβατικού και ινοπλισμένου σκυροδέματος (JSCE NO.16, 2007)	24
Διάγραμμα 2: Συγκριτικό διάγραμμα παραμορφώσεων συμβατικού και ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικό ποσοστό ινών (Nguyen VAN CHANH)	25
Διάγραμμα 3: Κατηγορίες ινών με τους κωδικούς τους (BISFA, 2009)	26
Διάγραμμα 4: Επιρροή προσανατολισμού ινών στην δυσθραυστότητα (Maidl, 1995)	32
Διάγραμμα 5: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών	47
Διάγραμμα 6: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για της δοκούς H15 των δύο πειραμάτων	92
Διάγραμμα 7: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για της δοκούς H20 των δύο πειραμάτων	92
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος χωρίς ίνες $v_f=0\%$, από το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών	98
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος με ίνες $v_f=0.6\%$, από το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών	99
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος με ίνες $v_f=1.2\%$, από το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών	99
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα διαμέτρου Φ8, από το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών	100
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα διαμέτρου Φ6, από το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών	100
Διάγραμμα 13: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H15-AR0.8	117
Διάγραμμα 14: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H20-AR0.8	118
Διάγραμμα 15: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H15-AR2.5	118
Διάγραμμα 16: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H20-AR2.5	119

Διάγραμμα 17: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H15-VF0	120
Διάγραμμα 18: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H15-VF06	120
Διάγραμμα 19: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H15-VF12	121
Διάγραμμα 20: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H20-VF0	121
Διάγραμμα 21: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H20-VF06	122
Διάγραμμα 22: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H20-VF12	122
Διάγραμμα 23: Γενικό συγκριτικό διάγραμμα δοκιμής κάμψης φορτίου-ποσοστού ινών (P-vf)	124
Διάγραμμα 24: Γενικό συγκριτικό διάγραμμα δοκιμής θλίψης, τάσης-ποσοστού ινών (σ-vf)	125
Διάγραμμα 25: Γενικό συγκριτικό διάγραμμα δοκιμής διάρρηξης, τάσης-ποσοστού ινών (σ-vf)	126

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Επιφάνεια θραύσης ινοπλισμένου σκυροδέματος (ASTM 544.1R-96)	23
Εικόνα 2: Τυπικές μορφές χάλυβα (ASTM 544.1R-96)	30
Εικόνα 3: Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995)	32
Εικόνα 4: Επιρροή απόστασης ινών στην εφελκυστική αντοχή (Romvaldi, Batson 1963)	33
Εικόνα 5.α: Μηχανισμοί αστοχίας ινών (Fractures Mechanics, Anderson 1991)	33
Εικόνα 5.β: Τομή διεπαφής σκυροδέματος-ίνας (Dawood Abdulhai Pandor, 1994)	34
Εικόνα 6: Παραγωγή χαλύβδινων ινών ψυχρής ολκσής (Maidl, 1995)	35
Εικόνα 7: Παραγωγή ινών από κοπή φύλλων χάλυβα (Maidl, 1995)	35
Εικόνα 8: Παραγωγή χαλύβδινων ινών από εξαγωγή τήγματος (Maidl, 1995)	36
Εικόνα 9: Ίνες που παράγονται από αποκοπή πλινθώματος χάλυβα (Maidl, 1995)	37
Εικόνα 10: Χαρακτηριστικά τομής ίνας (Kobayashi, 1983)	42
Εικόνα 11: Γεωμετρία ίνας	49
Εικόνα 12: Χαλύβδινες ίνες πειράματος	49
Εικόνα 13: Καλούπι σκυροδέτησης δοκού	50
Εικόνα 14: Μήτρες σκυροδέματος κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων	50
Εικόνα 15: Οπλισμός δοκού (κλωβός)	51
Εικόνα 16: (α) δοκίμια σκυροδετήσεων, (β) διάταξη οπλισμού (γ) δονητής, (δ) αναμεικτήρας	57
Εικόνα 17: Μηχανή θλίψης	58
Εικόνα 18: Διάταξη δοκιμίου εντός μηχανής θλίψης για δόκιμη διάρρηξης	58
Εικόνα 19.1: Πειραματική διάταξη για δόκιμη κάμψης δοκού	60
Εικόνα 19.2: Πειραματική διάταξη για δόκιμη κάμψης δοκού	60
Εικόνα 20: Διάγραμμα ροπών δοκών	61
Εικόνα 21: Χαρακτηριστικά Δοκού	63
Εικόνα 22: Οπλισμός δοκού για το 2 ^ο πείραμα	87
Εικόνα 23: Περιβάλλον χώρος του προγράμματος	95
Εικόνα 24: Περιβάλλον χώρος του προγράμματος	96

Εικόνα 25: Κύλινδρος έτοιμος για θλίψη, με την χρήση μηκυνσιόμετρου καταγράφεται η βράχυνση	97
Εικόνα 26: Μηχανή εφελκυσμού ράβδων χάλυβα	97
Εικόνα 27: Περιβάλλον προγράμματος, ρυθμίσεις των ιδιοτήτων του σκυροδέματος	101
Εικόνα 28: Περιβάλλον προγράμματος, ρυθμίσεις των ιδιοτήτων του σκυροδέματος	101
Εικόνα 29: Περιβάλλον προγράμματος, εισαγωγή της διαμέτρου του χάλυβα οπλισμού	102
Εικόνα 30: Περιβάλλον προγράμματος, δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	102
Εικόνα 31: Περιβάλλον προγράμματος, πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων	103
Εικόνα 32: Περιβάλλον προγράμματος, επιβολή μετακίνησης $-0,05\text{cm}$ κατά άξονα Y	103
Εικόνα 33: Περιβάλλον προγράμματος, καθορισμός των παραγόντων της επίλυσης	104
Εικόνα 34: Περιβάλλον προγράμματος, μη γραμμική ανάλυση	105
Εικόνα 35: Περιβάλλον προγράμματος, καταγραφή του κώδικα	105
Εικόνα 36: Περιβάλλον προγράμματος, κατασκευή-εξαγωγή διαγραμμάτων	106
Εικόνα 37: Περιβάλλον προγράμματος, ρωγμές στο σκυρόδεμα	107
Εικόνα 38: Περιβάλλον προγράμματος, κατανομή παραμορφώσεων	107
Εικόνα 39: Περιβάλλον προγράμματος, κατανομή φορτιού	108

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες επιλεγμένων ινών (9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003)	27
Πίνακας 2: Τυπικές ιδιότητες συνθετικών ινών (ASTM 544.1R-96)	28
Πίνακας 3: Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος	46
Πίνακας 4: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών	47
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά ρευστοποιητή	48
Πίνακας 6: Μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα	48
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά ίνας	49
Πίνακας 8: Αναλυτικός πίνακας δοκών, κύβων και κυλίνδρων βάση σκυροδέτησης	52
Πίνακας 9: Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος για το πείραμα	43
Πίνακας 10: Πίνακας 1 _{ης} σκυροδέτησης (vf=0%)	53
Πίνακας 11: Πίνακας 2 _{ης} σκυροδέτησης (vf=0.6%)	53
Πίνακας 12: Πίνακας 3 _{ης} σκυροδέτησης (vf=1.2%)	54
Πίνακας 13: Πίνακας 4 _{ης} σκυροδέτησης (vf=0%)	54
Πίνακας 14: Πίνακας 5 _{ης} σκυροδέτησης (vf=0.6%)	54
Πίνακας 15: Πίνακας 6 _{ης} σκυροδέτησης (vf=1.2%)	55
Πίνακας 16: Πίνακας 7 _{ης} σκυροδέτησης (vf=0%)	55
Πίνακας 17: Πίνακας 8 _{ης} σκυροδέτησης (vf=0.6%)	55
Πίνακας 18: Πίνακας 9 _{ης} σκυροδέτησης (vf=1.2%)	56
Πίνακας 19: Πρότυπος πίνακας χαρακτηριστικών δοκού	63
Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης	85
Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμής διάρρηξης	86
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πρισματικών δοκιμών ύψους H=20cm	109
Πίνακας 23: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πρισματικών δοκιμών ύψους H=15cm	109
Πίνακας 24: Αναλυτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών κάμψης	123

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διεξήχθη στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τ.Ε.Ι Πειραιά. Αισθανόμαστε την υποχρέωση να ευχαριστήσουμε θερμά τον **Δρ. Κωνσταντίνο Δημάκο**, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, Καθηγητή, Πρόεδρο του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Τ.Ε.Ι Πειραιά και Διευθυντή του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και την επιστημονική του συμβολή.

Επίσης οφείλουμε ευχαριστίες στον **Δρ. Κωνσταντίνο Ρεπαπή** Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, Διευθυντή του τμήματος Δομοστατικού Σχεδιασμού του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Τ.Ε.Ι Πειραιά για την υπομονή και αμέριστη βοήθειά του κυρίως στο λογισμικό ANSYS.

Ακόμα ευχαριστούμε τους **κ. Δημήτρη Δρίβα**, Πολιτικό Μηχανικό και συνεργάτη του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι Πειραιά, τον **κ. Γιώργο Δημητράκη** τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τ.Ε.Ι Πειραιά, τους συμφοιτητές μας Γιώργο και Δημήτρη για την συμβολή τους κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Επιπρόσθετα οφείλουμε ευχαριστίες στην εταιρία **LAFARGE S.A**, ιδιαίτερα στην **κ. Σοφία Καραμάνου**, για την δωρεά των πρώτων υλών παρασκευής σκυροδέματος και στην εταιρία **SIDENOR S.A**. για τις χαλύβδινες ράβδους.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Στον 21ο αιώνα οι απαιτήσεις του σχεδιασμού των τεχνικών έργων οδηγούν στην ανάγκη βελτίωσης των δομικών υλικών. Με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών με το δυνατότερο ελάχιστο κόστος. Οι προσπάθειες αυτές οδήγησαν στην εύρεση τεχνολογιών που αποσκοπούν στην καλύτερευση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου δομικού υλικού, του σκυροδέματος (Beton). Η έρευνα αυτή ανέδειξε την πολύ καλή συμπεριφορά και ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Με τον όρο ινοπλισμένο σκυρόδεμα εννοούμε το σκυρόδεμα που περιέχει ίνες οι οποίες είναι διακριτές μεταξύ τους, ομοιόμορφα κατανεμημένες, με τυχαίο προσανατολισμό. Υπό κανονικές συνθήκες, το σκυρόδεμα περιέχει πολυάριθμες μικρορωγμές που ενυπάρχουν στη μάζα από τη διαδικασία πήξης. Η ταχεία επέκταση των μικρορωγμών κάτω από συνθήκες επιβαλλόμενης τάσης είναι υπεύθυνη τόσο για τη χαμηλή εφελκυστική αντοχή όσο και για την αστοχία του υλικού. Η ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα προσδίδει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, περιορίζει την ψαθυρή συμπεριφορά του και τον σχηματισμό ρωγμών καθώς και την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς του. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, της ικανότητας δηλαδή του υλικού να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση, που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης. Οι ίνες μπορεί να είναι από χάλυβα (SFRC), από πλαστικά υλικά, αμίαντο (AFRP), γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP) και οργανικά υλικά. Για κατασκευαστικούς λόγους χρησιμοποιούνται περισσότερο οι ίνες κατασκευασμένες από χάλυβα. Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα του χιλιοστού, και διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του, σε ποσοστό της τάξης του 1-3% κατά όγκο.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Από τους αρχαίους χρόνους, οι ίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσουν εύθραυστα υλικά. Το άχυρο και οι τρίχες ζώων χρησιμοποιήθηκαν για να ενισχύσουν τα ήλιο-ψημένα τούβλα, το κονίαμα τοιχοποιίας και τον γύψο. Ένα σπίτι χτισμένο γύρω στο 1540, που πιστεύεται ότι είναι το παλαιότερο σπίτι στις ΗΠΑ, είναι κατασκευασμένο από τον ήλιο ψημένη πλίθα ενισχυμένη με άχυρα. Ένας Γάλλος μηχανικός, που ονομάζεται Ιωσήφ Lambot, το 1847 βρήκε την ιδέα της προσθήκης συνεχών ινών στο σκυρόδεμα, με τη μορφή των συρμάτων ή πλέγματα. Η πρώτη ευρεσιτεχνία ινοπλισμένου σκυροδέματος κατοχυρώθηκε το 1874 στην Καλιφόρνια από τον Berard. Σε πιο πρόσφατες περιόδους, η χρήση σε μεγάλη εμπορική κλίμακα των ινών αμιάντου σε πάστα τσιμέντου ξεκίνησε με την εφεύρεση της διαδικασίας Hatschek το 1898. Που οδήγησε στην ευρεία χρήση προϊόντων δομικών κατασκευών από αμιαντοτσιμέντο σε όλο τον κόσμο σήμερα. Ωστόσο, κυρίως λόγω των κινδύνων για την υγεία που συνδέονται με τις ίνες αμιάντου, εναλλακτικοί τύποι ινών εισήχθησαν καθ' όλη τη δεκαετία του 1960 και του 1970. Από τότε, ένας σημαντικός αριθμός ερευνών, για την ανάπτυξη, τον πειραματισμό, και την βιομηχανική εφαρμογή ινών στο οπλισμένο σκυρόδεμα έχει συμβεί. Παρ' όλα αυτά, η έρευνα για τις γυάλινες ίνες που είχε διεξαχθεί στις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Ρωσία στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Στην πραγματικότητα, στη Ρωσία ίνες γυαλιού δεν ήταν μόνο στο στάδιο της έρευνας, αλλά χρησιμοποιήθηκαν επίσης στον κλάδο των κατασκευών. Ωστόσο, αυτό το είδος των ινών βρέθηκε να είναι επιρρεπείς σε αλκαλικό επιθέσεις. Σημαντικό έργο ανάπτυξης κατευθύνθηκε προς παράγει μια μορφή ανθεκτικών σε αλκάλια ινών υάλου που περιέχουν ζιρκόνια. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 στις Ηνωμένες Πολιτείες, πραγματοποιήθηκε η πρώτη μεγάλη έρευνα για να εκτιμηθεί η δυναμική της χρήσης χαλύβδινων ινών ως ενίσχυση για το σκυρόδεμα. Έπειτα έγιναν προσπάθειες για την χρήση συνθετικών ινών όπως νάιλον και προπυλένιο, που ωστόσο δεν ήταν τόσο επιτυχείς όσο εκείνες που χρησιμοποιούν γυαλί ή χάλυβα. Έτσι, το 1971 πραγματοποιούνται τα πρώτα πειράματα στο Columbus του Battelle Memorial Institute και γίνεται η πρώτη εφαρμογή ινοπλισμένου σκυροδέματος για τη σταθεροποίηση πρανούς σε είσοδο σήραγγας στο Idaho το 1972. Έπειτα ακολούθησε η εφαρμογή του σε στρατιωτικά καταφύγια και επενδύσεις σιράγγων στην Γερμανία. Αργότερα, κατά τη σύγχρονη εξέλιξη της FRC στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές του 1980, όταν ο εξοπλισμός δοκιμών και διαδικασίες ανάλυσης έγιναν περισσότερο ποσοτικές και καλύτερα ποιοτικές η έννοια της

απορρόφησης ενέργειας (ή δυσθραυστότητα) εισήχθη. Αυτή η έννοια επέτρεψε τη μέτρηση ανθεκτικότητας των υλικών. Αυτό ήταν το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του FRC που ανακαλύφθηκε και δεν ήταν άλλο από την εξαιρετική ιδιότητα να απορροφά μεγάλες ποσότητες ενέργειας.

1.3 Πεδίο Εφαρμογής

- Κατοικίες: πεζοδρόμια, κατασκευή πισίνας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υπόγεια, έγχρωμο σκυρόδεμα, θεμέλια, αποχέτευσης.
- Εμπορική: εξωτερικά και εσωτερικά δάπεδα, πλάκες, χώρους στάθμευσης.
- Αποθήκη / Βιομηχανική: ελαφρώς έως βαρέως φορτωμένα δάπεδα και διαδρόμους
- Αυτοκινητόδρομοι / Δρόμοι / Γέφυρες: συμβατικό σκυρόδεμα οδοστρωσίας, διαχωριστικές νησίδες, ρείθρο, διαπερατό σκυρόδεμα, ηχοπετάσματα.
- Λιμάνια και Αεροδρόμια: διάδρομοι απογειώσεων, κυματοθραύστες, λιμάνια, χώρο στάθμευσης και ράμπες φόρτωσης.
- Waterways: φράγματα, κανάλια ύδρευσης, χαντάκια, τις δομές των όμβριων υδάτων.
- Εξόρυξη και κατασκευή σήραγγων: Προκατασκευασμένα τμήματα, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει επένδυση της σήραγγας, φρέατα, σταθεροποίηση πρσανών, εργασίες αποχέτευσης.
- Γεωργία: υποδομές κτηνοτροφίας και γεωργίας.
- Προκατασκευασμένα από σκυρόδεμα προϊόντα: αρχιτεκτονικά πάνελ, τοίχους, περιφράξεις, δεξαμενές.

1.4 Αντικείμενο Παρούσας Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της αντοχής, σε κάμψη ινοπλισμένων δοκών με διαφορετικό ύψος, ποσοστό ινών και λόγο διάτμησης. Η θεωρητική διερεύνηση πραγματοποιείται με την χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS). Ενώ για τις ανάγκες του πειραματικού μέρους της, πραγματοποιείται η κατασκευή ινοπλισμένων δοκών ορθογωνικής διατομής και τα αντίστοιχα πειράματα για την εύρεση της παραπάνω αντοχής. Από τις πειραματικές και θεωρητικές διαδικασίες δημιουργούνται τα διαγράμματα φορτίου-Βύθισης στο μέσον της δοκού (P-δ). Συγκεντρώνοντας και συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα είμαστε σε θέση αξιολογήσουμε την επιρροή του ποσοστού ινών, του διατμητικού λόγου στις αντοχές των δοκών.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Διερεύνηση

2.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό προϊόν που παράγεται απο την ανάμιξη των παρακάτω συστατικών: νερό,τσιμέντο, χαλίκι, άμμο, γαρμπίλι σε κατάλληλες αναλογίες. Το σκυρόδεμα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σύμφωνα με τον (Γεωργίου Ρ. Γκρός) τεχνητός λίθος, διότι εμφανίζει όπως και οι φυσικοί λίθοι υψηλή θλιπτική αντοχή και μικρή εφελκυστική. Αυτό αποκτά τις τελικές του ιδιότητες μετα την σκλήρυνση του τσιμεντοπολτού, για την βελτίωση των ιδιοτήτων αυτών, χρησιμοποιούνται κατά την φάση της ανάμιξης χημικά ή φυσικά πρόσθετα. Όπως βελτιωτικά άντλησης, ρευστοποιητές για την αύξηση της εργασιμότητας, αερακτικά πρόσμικτα, επιβραδυντές ή επιταχυντές, και ίνες για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.

2.1.1 Κατηγορίες Σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ 97' οι κατηγορίες σκυροδέματος είναι οι παρακάτω, όπου ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στην θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm ενώ ο δεύτερος σε κύβο ακμής 150mm.

Κατηγορία σκυροδέματος	f_{ck} , κυλίνδρου [Μpa]	f_{ck} , κύβου [Μpa]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

2.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Concrete- FRC) ορίζεται αυτό που περιέχει ίνες οι οποίες είναι διακριτές μεταξύ τους, ομοιόμορφα κατανεμημένες, με τυχαίο προσανατολισμό. Η ανάμιξη των ινών στην μάζα του σκυροδέματος οδηγεί στην αύξηση της δομικής του ακεραιότητας και των μηχανικών του ιδιοτήτων. Οι ίνες από χάλυβα είναι ο βασικότερος τύπος ίνας που χρησιμοποιείται στις κατασκευές από ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Οι χαλύβδινες ίνες έχουν επικρατήσει λόγω του λογικού κόστους κατασκευής τους, της διαθεσιμότητάς τους και λόγω της ήδη διαδεδομένης χρήσης του δομικού χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα). Έτσι, οι πρώτες έρευνες που έγιναν γύρω στο 1950-1960, γύρω από το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, επικεντρώθηκαν στη χρήση και τη συμπεριφορά των χαλύβδινων ινών.

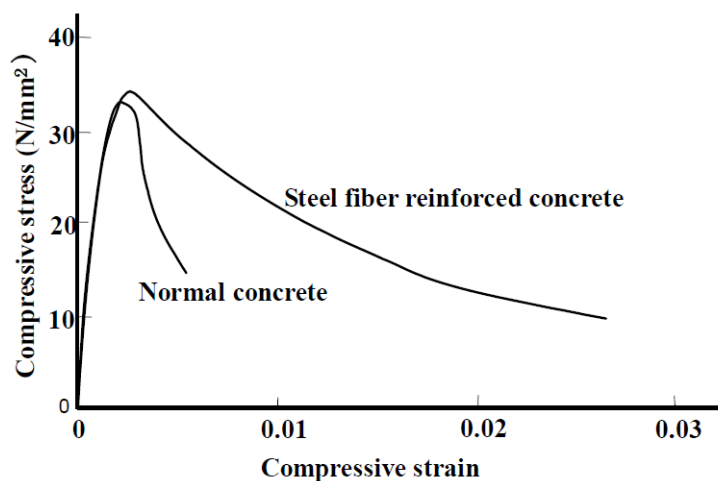


Εικόνα 1: Επιφάνεια θραύσης ινοπλισμένου σκυροδέματος (ASTM 544.1R-96)

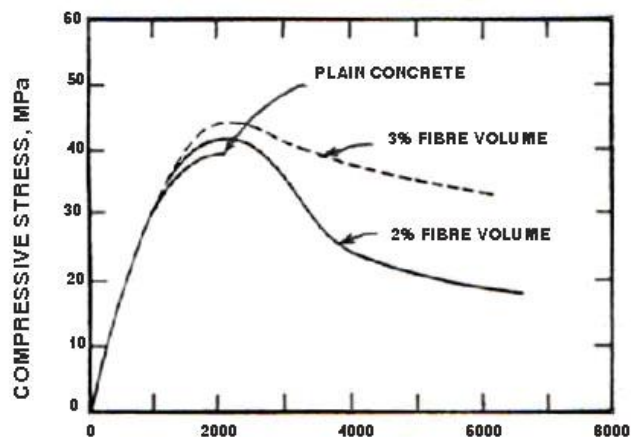
2.2.1 Ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος

Στην πιο κάτω λίστα παραθέτονται κάποιες απο τις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος:

- Βελτίωση της δομικής ακεραιότητας
- Υψηλή αντοχή σε μηχανική καταπόνηση
- Αύξηση της εφελκυστικής και καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος (διάγραμμα 1)
- Αυξημένη αντοχή στην κρούση
- Βελτίωση της κατανομής των ρωγμών
- Τροποποίηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος
- Αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας του υλικού κατα τον εφελκυσμό και περιορισμός της ρηγμάτωσης
- Μικρή αύξηση της αντοχής (διάγραμμα 1)
- Αύξηση δυθραυστότητας, δηλαδή της ικανότητας του υλικού να απορροφάει ενέργεια Γραφικά αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κατά την καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης το οποίο είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έναντι άοπλου. (διάγραμμα 1)



Διάγραμμα 1: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων συμβατικού και ινοπλισμένου σκυροδέματος (JSCE No.16,2007)

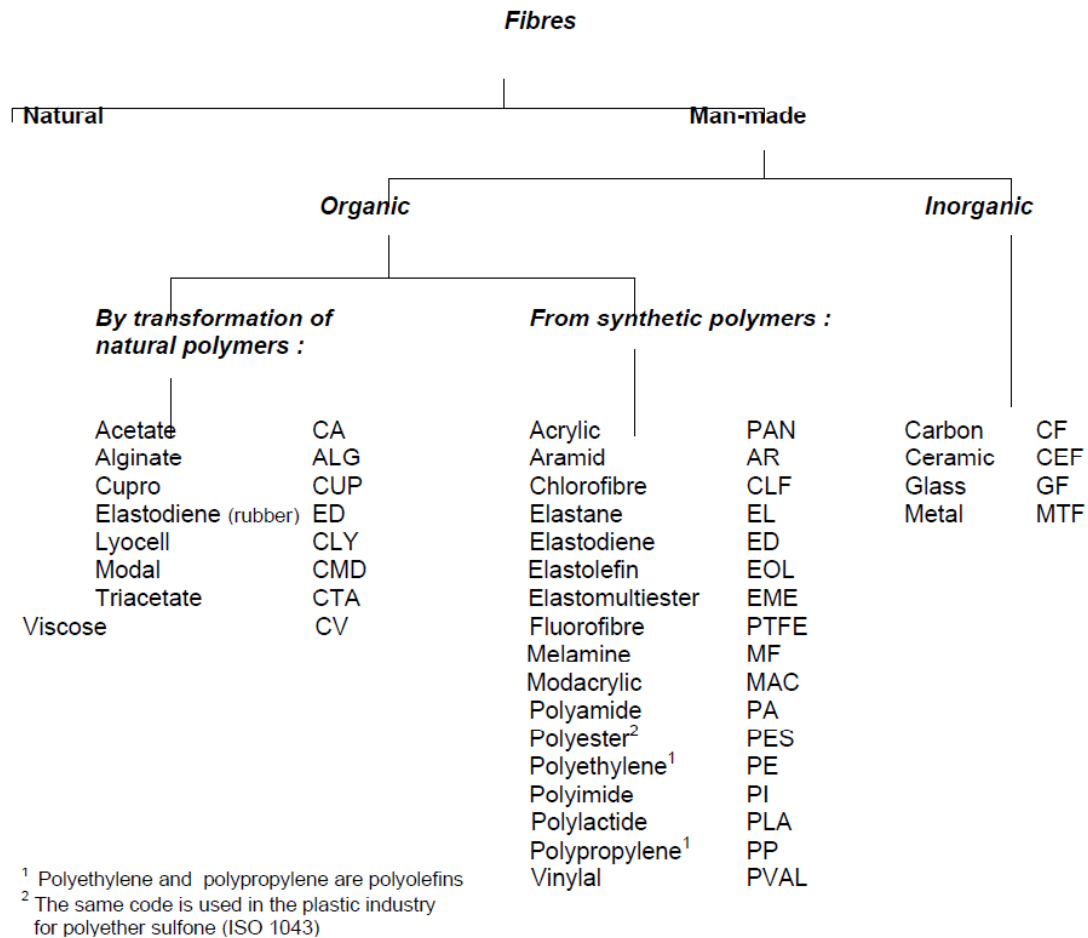


Διάγραμμα 2: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων συμβατικού και ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικό ποσοστό ινών (Nguyen Van CHANH)

Η χρήση ινών προσδίδει στο σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά αφού κατά τον χρόνο φόρτισης οι ίνες παραλαμβάνουν φορτία με αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας, η ενέργεια αυτή στην περίπτωση συμβατικού σκυροδέματος θα οδηγούσε σε αστοχία. Ακόμα και μετά την αστοχία οι ίνες συνεχίζουν να παραλαμβάνουν φορτίσεις ενισχύοντας την πλαστική συμπεριφορά

2.3 ΙΝΕΣ

Οι ίνες έχουν διάσταση λίγων εκατοστών και διαμέτρου τάξης μεγέθους χιλιοστού, προστίθενται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του σε ποσοστό της τάξης του 1-3% του συνολικού όγκου. Οι ίνες μπορεί να είναι από χάλυβα (SFRC), από πλαστικά υλικά, αμιάντο (AFRP), γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP) και οργανικά υλικά.



Διάγραμμα 3: Κατηγορίες Ινών με τους κωδικούς τους (BISFA, 2009)

2.3.1 Ιδιότητες Τεχνητών Ινών

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των ινών για την βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος είναι: μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, που επιτρέπει μεταφορά τάσεων από το σκυρόδεμα στις ίνες, λόγος Poisson παρόμοιος με αυτόν του σκυροδέματος, ώστε να μην προκαλείται αποκόλληση των ινών, μεγάλος λόγος μήκους προς διάμετρο (l/d), ώστε η αστοχία των ινών να γίνεται με εξόλκευση και όχι με θραύση, ώστε να αυξάνεται το έργο παραμόρφωσης, όσο το δυνατόν πιο παραμορφωμένη επιφάνεια ώστε να βελτιώνεται η συνάφεια τους με το σκυρόδεμα και αύξηση του φορτίου που απαιτείται για την αποκόλληση και εξολκευσή τους.

Η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, που ξεκινούν από τα υλικά και καταλήγουν στην εκτέλεση

της εργασίας και στη συντήρηση. Στα έργα, προδιαγράφονται συνήθως η απαιτούμενη ποσότητα των ινών, η αντοχή τους και τα γενικά γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, ευελπιστώντας ότι κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιζητούμενη μηχανική συμπεριφορά του υλικού του φορέα. Οι διεθνείς, εν τούτοις, προδιαγραφές απαιτούν τον έλεγχο της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με σκοπό την αποτίμηση της ικανότητας του επί τόπου υλικού να ανταποκριθεί στο σκοπό της τοποθέτησής του. Παρόλα αυτά, στον Ελλαδικό χώρο ο έλεγχος του ινοπλισμένου σκυροδέματος επί τόπου περιορίζεται, γενικά, στην ποσότητα των τοποθετούμενων ινών. Όλα τα σύγχρονα πρότυπα αναγνωρίζουν την προσφορά των ινών στη δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος, δηλ. στην ικανότητά του να αναλαμβάνει φορτίο πέραν της καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Ο έλεγχος της δυσθραυστότητας πραγματοποιείται συνήθως με δοκιμές κάμψης σε δοκίμια δοκών ή με κεντρική φόρτιση μικρών πλακών κατά τις οποίες το ινοπλισμένο σκυροδέμα υφίσταται κάμψη-διείσδυση. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι της ASTM, της EFNARC, τα Ιαπωνικά και τα Γαλλικά.

Ίνες	Διάμετρος (μm)	Πυκνότητα (t/m ³)	Μέτρο Ελαστικ. (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκ. Αντοχή (MPa)	Παραμ Θραύσης (%)	Τυπική αναλογία (% κ.ο.)
Χάλυβας	100-600	7,86	200	0,28	700-2000	3,5	0,5-2
Ανοξ. χάλυβας	10-330	7,86	160	0,28	2100	3	0,5-2
Πολυπροπυλεν.	500-4000	0,9	3-8	0,3-0,45	400-700	8-25	0,2-1,2
Γυαλί E	8—12	2,54	72-75	0,25	3500	4,8	2-8
Γυαλί AR	8-12	2,27	70-76	0,25	2000-3500	3-4,6	2-8
Κέβλαρ 29	10	1,44	70	0,32	2900	2,1	0,5-2
Κέβλαρ 49	10	1,45	135	0,35	2900	2,1	0,5-2
Άνθρακας	Υψηλού (E)	8	1,9	0,35	1800	0,5	2-12
	Υψηλής (ft)	9	1,9	0,35	2600	1,2	2-12
Νάιλον	5-200	1,14	1-5	0,4	750-900	16-20	0,1-6
Ξύλο	100-5000	1,5	50-75	0,2-0,4	700-1000	1-2	2-4

Πίνακας 1: Ιδιότητες επιλεγμένων ινών (9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003)

Τύπος ινών	Ισοδύναμη Διάμετρος (in*10 ⁻³)	Ειδικό Βάρος (t/m ³)	Εφελκυστική Αντοχή (ksi)	Μέτρο Ελαστικότητας (ksi)	Παραμόρφωση Θραύσης (%)
Ακρυλικό	0,5-4,1	1,16-1,18	39-145	2000-2800	7,5-50
Αραμιδίου I	0,47	1,44	425	9000	4,4
Αραμιδίου II (υψηλού E)	0,40	1,44	340	17000	2,5
Ανθρακα πολυακρυλονιτριλίου (υψηλού E)	0,30	1,6-1,7	360-440	55100	0,5-0,7
Ανθρακα πολυακρυλονιτριλίου (υψηλού f _t)	0,35	1,6-1,7	500-580	33400	1-1,5
Ισοτροπικού άνθρακα	0,39-0,51	1,6-1,7	70-115	4000-5000	2-2,4
Μεσοφασικού άνθρακα	0,35-0,70	1,8-2,15	220-450	22000-70000	0,5-1,1
Νάιλον	0,90	1,14	140	750	20
Πολυεστέρα	0,78	1,34-1,39	33-160	2500	12-150
Πολυαιθυλένιο	1-40	0,92-0,96	11-85	725	3-80
Πολυπροπυλένιο	-	0,9-0,91	20-100	500-700	15

Πίνακας 2: Τυπικές ιδιότητες συνθετικών ινών (ASTM 544.1R-96)

2.3.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά – Μορφή Ινών

Ανάλογα με τη χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι ίνες που περιέχονται σ' αυτό θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Για να λάβουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα απο την χρήση ινών στην μάζα του σκυροδέματος, θα πρέπει το μήκος των ινών να είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο του μέγιστου κόκκου των αδρανών.

2.3.2.1 Λόγος Μορφής – Διάμετρος

Ως λόγο μορφής των ινών (aspect ratio), ονομάζουμε το λόγο του μήκους της ίνας προς τη διάμετρο αυτής. Είναι αδιάστατο μέγεθος το οποίο εκφράζει την ευκαμψία της. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος μορφής, τόσο πιο εύκαμπτη είναι η ίνα. Είναι ένας αρκετά σημαντικός παράγοντας επιλογής της κατάλληλης ίνας, για την εκάστοτε εφαρμογή, αφού επηρεάζει την εργασιμότητα του σκυροδέματος και την απόσταση των ινών μέσα σε αυτό. Για την επίτευξη της καλύτερης εργασιμότητας του σκυροδέματος, ο λόγος μορφής δε θα πρέπει να ξεπερνά την τιμή 150. Κυρίως χρησιμοποιείται λόγος μορφής μεταξύ 50-100 που αντιστοιχεί σε μήκος που κρίνεται υποκρίσιμο.

2.3.2.2 Ισοδύναμη Διάμετρος Ινών

Το υλικό κατασκευής και η γεωμετρία των ινών καθορίζουν την καταλληλότητα της ίνας για την εκάστοτε εφαρμογή. Η ποικιλία των ινών είναι πολύ μεγάλη τόσο όσον αφορά την γεωμετρία τους (πολυγωνικής, κυκλικής διατομής, με άγκιστρα ή χωρίς) όσο και το υλικό κατασκευής τους όπως προαναφέρθηκε.

Για τις ίνες που δεν είναι κυκλικής ή πρισματικής διατομής, είναι χρήσιμο να οριστεί ποια θα ήταν η διάμετρος μιας ισοδύναμης ίνας με κυκλική ή πρισματική διατομή. Έτσι, ορίζεται η ισοδύναμη διάμετρος ως η διάμετρος του κύκλου που έχει μια ίνα και είναι ίση την μέση διάμετρό της (Zollo, 1995). Η ισοδύναμη διάμετρος καθορίζει την ευκαμψία της ίνας. Έτσι μικρή ισοδύναμη διάμετρος σημαίνει μικρή ευκαμψία η οποία προσδίδει στις ίνες μία συγκεκριμένη ικανότητα να προσαρμόζονται στο χώρο και στο σχήμα ανάμεσα στα αδρανή. Αντίθετα μεγάλη ισοδύναμη διάμετρος σημαίνει μεγάλη ευκαμψία η οποία επηρεάζει τη συμπίκνωση, την ανάμιξη και τη διάσπρωση.

Η ισοδύναμη διάμετρος ίνας κυκλικής διατομής προκύπτει ως εξής:

$$d_e = 2 \sqrt{\frac{A}{2\pi}}$$

όπου

A : επιφάνεια διατομής ίνας

Ενώ η ισοδύναμη διάμετρος χαλύβδινων ινών με ακανόνιστη μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$d_e = 12.74 \sqrt{\frac{m}{L}}$$

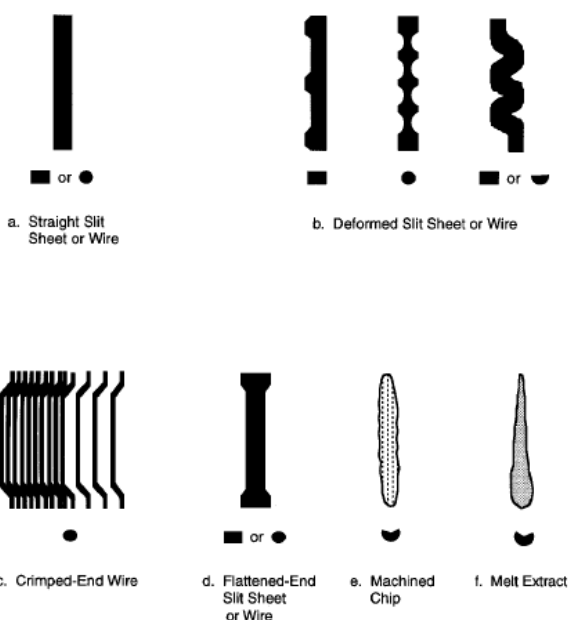
όπου:

m: μέσο βάρος σε γραμμάρια ενός δεδομένου αριθμού ινών

L: το μέσο μήκος της ίνας σε χιλιοστά

2.3.2.3 Μορφή Ινών

Διάφοροι τύποι ινών παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Η μορφή των ινών εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής και τις ανάγκες της κατασκευής. Η συνάφεια μεταξύ ίνας και τσιμεντολιθώματος αποτελεί βασική ιδιότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος για τη



βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Η λεία επιφάνεια των ινών δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις υψηλής συνάφειας και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ίνες με διάφορα γεωμετρικά σχήματα (διευρυμένα άκρα, αγκύρια, ίνες κυματοειδούς μορφής), τα οποία αυξάνουν την αγκύρωση των άκρων τους. Για την προστασία του χάλυβα των ινών από την διάβρωση, χρησιμοποιούνται ίνες γαλβανισμένες ή από ανοξείδωτο χάλυβα.

Εικόνα 2: Τυπικές μορφές χάλυβα (ASTM 544.1R-96)

2.3.2.4 Μήκος Ινών

Η χρήση ινών μικρού μήκους είναι ασύμφορη, διότι το μήκος τους είναι ανεπαρκές για να αγκυρωθεί στο σκυρόδεμα. Οπότε για λόγο μορφής $l/d \leq 50$ η μάζα των ινών είναι χαλαρή και η παραγωγή ενός ομοιογενούς ινοπλισμένου σκυροδέματος προκύπτει με τη μίξη σε τυποποιημένους αναμικτήρες.

Με την αύξηση του μήκους των ινών σε $l = 80 \cdot d$ έως $120 \cdot d$: παρατηρείται συσσώρευση των ινών. Ωστόσο τα συσσωματώματα που παραμένουν διαχωρίζονται κατά την ανάμιξη. Η παραγωγή ομοιογενούς μίγματος πραγματοποιείται με την βαθμιαία προσθήκη των ινών κατά την ανάμιξη.

Για μήκος ινών $l = 200 \cdot d$ ή μεγαλύτερο η συσσώρευση των ινών είναι υψηλή. Αδύνατο να παραχθεί μίγμα σκυροδέματος με συμβατικούς αναμικτήρες, χρειάζονται νέες τεχνολογικές μέθοδοι ανάμιξης σκυροδέματος και ινών.

Εμπειρικά ένας μέσος λόγος μορφής ινών $l/d=100$ κρίνεται ικανοποιητικό

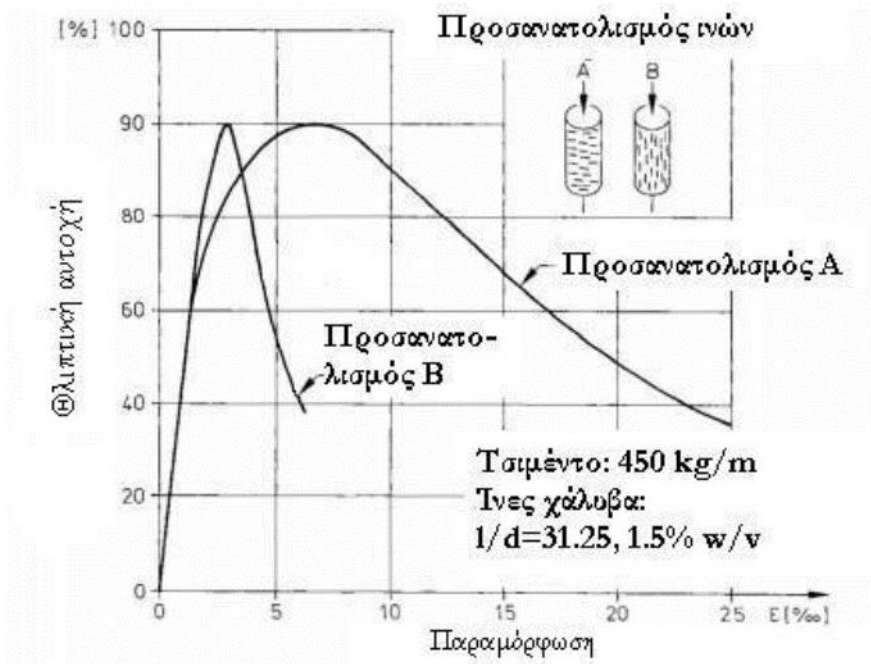
2.3.3 Περιεκτικότητα σε ίνες

Το ποσοστό των ινών που θα τοποθετηθεί στο σκυρόδεμα εξαρτάται από το αν το σκυρόδεμα είναι έγχυτο ή εκτοξευόμενο και την χρήση για την οποία προορίζεται, δηλαδή τις απαιτήσεις ανάληψης φορτίου. Ενδεικτικά στο έγχυτο σκυρόδεμα οι ίνες συμμετέχουν σε ένα ποσοστό της τάξεως του 0,5-2% κατ' όγκο ενώ στο εκτοξευόμενο μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερη αναλογία, όσο όμως αυξάνεται το ποσοστό αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Για μεγάλη ποσότητα ινών $>60 \text{ kg/m}^3$ το εργάσιμο γίνεται προβληματικό ενώ για μικρή ποσότητα κάτω $<25 \text{ kg/m}^3$, το αποτέλεσμα των ινών στις μηχανικές ιδιότητες είναι απρόβλεπτο και συχνά ανεπαίσθητο.

Η περιεκτικότητα σε ίνες μετριέται είτε σε kg ινών ανά m^3 σκυροδέματος, είτε σε % κατ' όγκο ή κατ' βάρος. Παράδειγμα για ίνες χάλυβα 60 kg/m^3 με ειδικό βάρος σκυροδέματος ($\rho_{\text{σκυροδέματος}}=2.4 \text{ t/m}^3$) και ειδικό βάρος χάλυβα ($\rho_{\text{steel}}=7.85 \text{ t/m}^3$) αντιστοιχούν σε 2,5% κατά βάρος (κ.β.) ή σε 0,76% κατά όγκο (κ.ο.).

2.3.4 Προσανατολισμός ινών στο χώρο

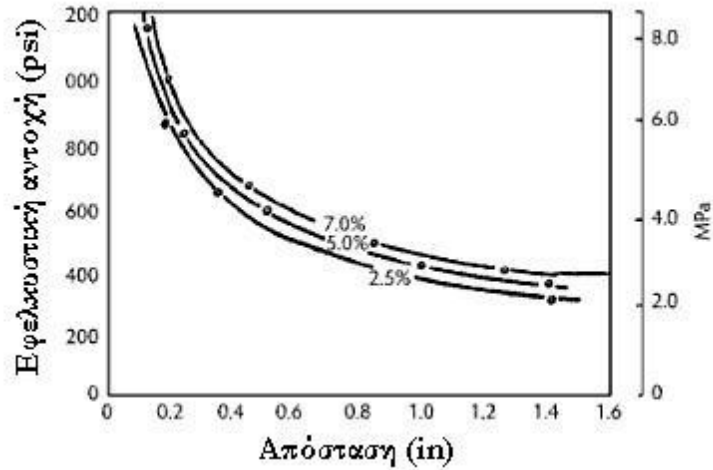
Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα σημαντική επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες παίζει η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών στον χώρο. Οι ίνες διασπείρονται τρισδιάστατα μέσα στο σκυρόδεμα και συρράπτουν τις αντικριστές επιφάνειες των ρωγμών παραλαμβάνοντας εφελκυστικές τάσεις παρεμποδίζοντας τη διάδοση των ρωγμών. Οι ίνες έχουν βέλτιστο προσανατολισμό όταν αναπτύσσονται προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης διότι οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα σε αυτήν. Όσο πυκνότερη είναι η συγκέντρωση των ινών τόσο ευκολότερα παραλαμβάνουν φορτία αφού δρουν συνδυαστικά πλέον, γεγονός που κάνει τη χρήση τους περισσότερο αποτελεσματική. Επειδή δεν είναι δυνατόν όλες οι ίνες να βρίσκονται στην κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης που τείνει να προκαλέσει τη ρωγμή είναι πολύ πιθανό να συναντούν τη ρωγμή πλάγια και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώσει την δράση τους. Η μείωση της αποτελεσματικότητας τους υπολογίζεται μαθηματικά με κατάλληλους συντελεστές. Μία ίνα συμμετέχει στην ανάληψη δυνάμεων όταν η κλίση της ως προς τη διεύθυνση της δύναμης δεν είναι μεγαλύτερη των 45° .



Διάγραμμα 4: Επιρροή προσανατολισμού ινών στην δύθραυστότητα (Maidl, 1995)



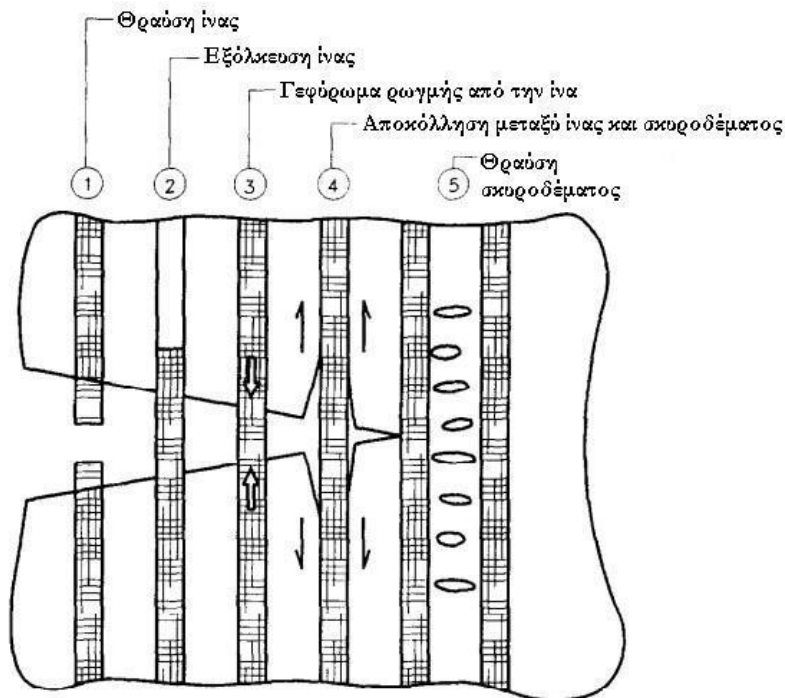
Εικόνα 3: Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995)



Εικόνα 4: Επιρροή απόστασης ινών στην εφελκυστική αντοχή (Romualdi, Batson, 1963)

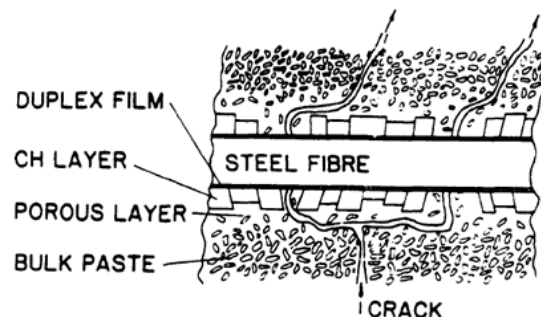
2.3.5 Μηχανισμός Αστοχίας Ινών

Οι ίνες μπορεί να αστοχήσουν είτε λόγω θραύσης απο εφελκυστική καταπόνηση, είτε λόγω εξόλκευσης που είναι και η συνηθέστερη μορφή αστοχίας. Ο τρόπος με τον οποίο εκδηλώνεται κάθε φορά η αστοχία, επηρεάζεται από το λόγο μορφής, την αγκύρωση, την εφελκυστική αντοχή της ίνας και την πρόσφυση ανάμεσα στις ίνες και το σκυροδέμα.



Εικόνα 5.α: Μηχανισμοί αστοχίας ινών (Fractures Mechanics, Anderson, 1991)

Παρατηρείται αύξηση της πλαστιμότητας με την ύπαρξη ινών. Αυτό είναι αποτέλεσμα απορρόφησης της ενέργειας κατά την εξόλκευση και τον εφελκυσμό των ινών από την μάζα του σκυροδέματος, καθώς η συνοχή μεταξύ τους είναι αδύναμη για τυπικά σκυροδέματα, αυτό οφείλεται στην συσώρευση αδύναμου υδροξειδίου του ασβεστίου στην διεπαφή σκυροδέματος-ίνας.



Εικόνα 5.β: Τομή διεπαφής σκυροδέματος-ίνας (Dawood Abdulhai Pandor, 1994)

2.4 Ίνες Χάλυβα

Οι χαλύβδινες ίνες είναι αυτές που επικρατούν στην αγορά, λόγω του λογικού κόστους αγοράς τους, της διαθεσιμότητάς τους και λόγω της εμπειρίας που προϋπήρχε από την χρήση χαλύβινών ράβδων για τον συμβατικό σπλισμό του σκυροδέματος. Οι ίνες αυτές αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος κι έτσι το μετατρέπουν από ένα ψαθυρό υλικό σε πλαστικό. Έχει παρατηρηθεί ότι καθυστερούν τη ρηγμάτωσή του, συντελούν στον ομοιόμορφο καταμερισμό των τάσεων και δεν επηρεάζουν την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος. Οι χαλύβδινες ίνες είναι επιρρεπείς ως προς τη διάβρωση όπως και ο συμβατικός σπλισμός του σκυροδέματος, είναι γνωστό ότι αυτός απαιτεί μια ελάχιστη επικάλυψη ώστε να εξασφαλίζεται από τη διάβρωση, το οποίο δεν είναι τεχνικά εφικτό για τις ίνες οι οποίες βρίσκονται διασκορπισμένες τυχαία στο μίγμα κι έτσι η διάβρωση μπορεί να επηρεάσει αυτές που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια.

2.4.1 Ιδιότητες Ινών Χάλυβα

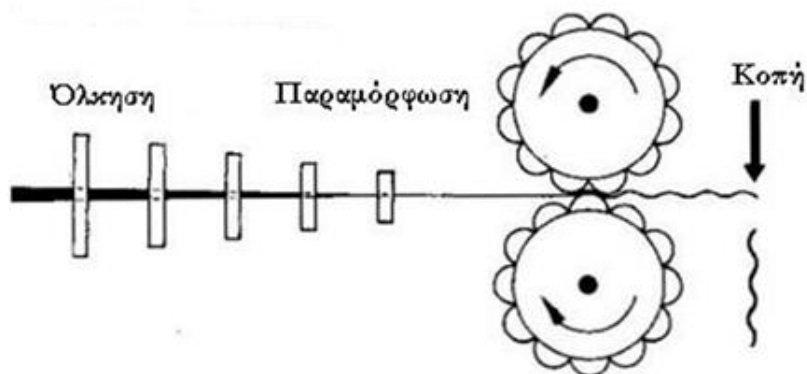
Οι ιδιότητες των χαλύβδινων ινών είναι οι εξής:

- Αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος, μετατρέποντάς το από ψαθυρό σε πλαστικό.
- Έχουν αντίσταση στα αλκαλικά πρόσμικτα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και μηχανικά χαρακτηριστικά που κρίνονται ικανοποιητικά.
- Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 144 – 1.500 MPa. (οι ανθρακούχοι χάλυβες, ειδικά σκληρυμένοι, μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 4 GPa)
- Έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 200 GPa και ειδικό βάρος 8 gr/cm³

2.4.2 Παραγωγή Ινών Χάλυβα

Σύμφωνα με την προδιαγραφή (A 820/A 820M-06) του ASTM προσδιορίζονται, με βάση την διεργασία παραγωγής, οι παρακάτω πέντε γενικοί τύποι ινών:

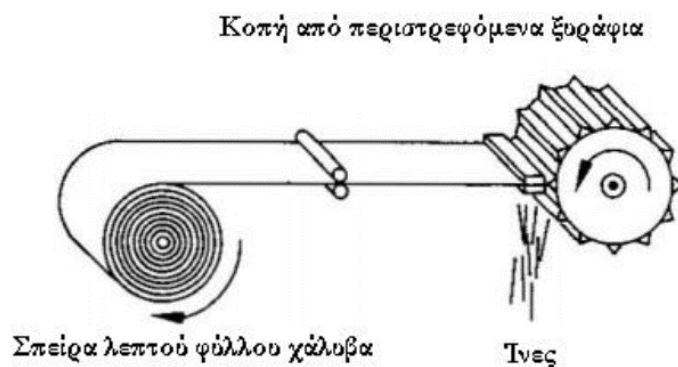
Τύπος I: Είναι ίνες ψυχρής ολκής, παρασκευάζονται από την εν ψυχρώ κατεργασία σύρματος χάλυβα (συρματοποίηση)



Εικόνα 6: Παραγωγή χαλύβδινων ινών ψυχρής ολκής (Maidl, 1995)

Για να παραχθούν ίνες με αυτή την μέθοδο, ακατέργαστο σύρμα χάλυβα περνά μέσα από ειδικές μήτρες κωνικής οπής, με την επίτευξη της επιθυμητής διαμέτρου το σύρμα κατευθύνεται μέσω δύο αντιθέτως περιστρεφόμενων κυλίνδρων για να αποκτήσει την απαραίτητη μορφή.

Τύπος II: Είναι ίνες που παράγονται από την κοπή φύλλων χάλυβα

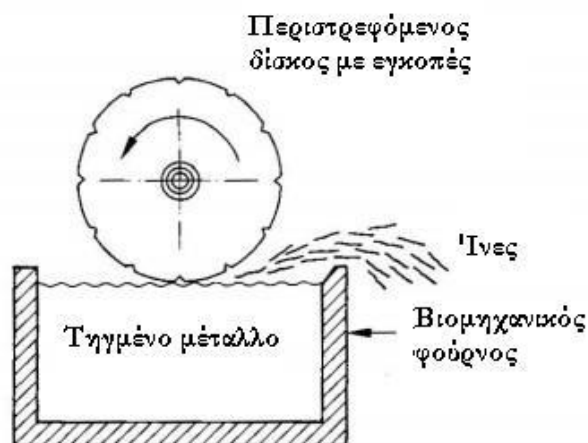


Εικόνα 7: Παραγωγή ινών από κοπή φύλλων χάλυβα (Maidl, 1995)

Οι ίνες παράγονται από την κοπή ενός λεπτού φύλλου χάλυβα που βρίσκεται σε μορφή σπείρας. Το πλάτος της σπείρας θα είναι το μήκος της παραγόμενης ίνας. Η διαδικασία μπορεί να ολοκληρωθεί με κατάλληλη επεξεργασία ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό σχήμα.

Τύπος III: Ίνες που παράγονται από την εξαγωγή τήγματος

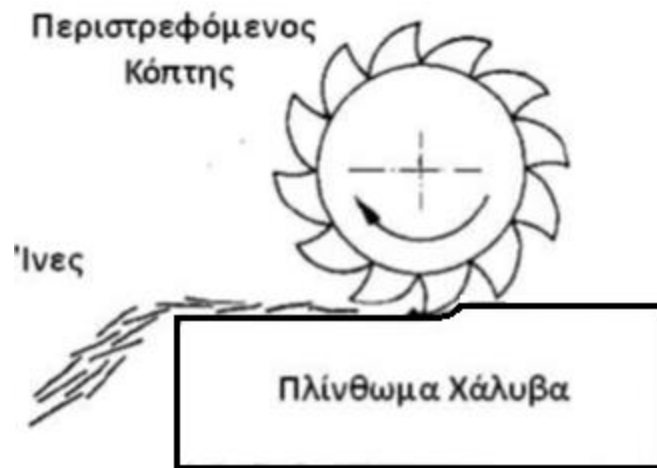
Η διαδικασία περιλαμβάνει την εξαγωγή τηγμένου μετάλλου μέσω ενός δίσκου με εγκοπές ο οποίος περιστρέφεται πάνω από τον φούρνο τήξης. Με την άμεση αφαίρεση του υλικού αυτό πήζει και το τήγμα πλέον αποτελεί μια στερεή μάζα. Με την μέθοδο αυτή πραγματοποιείται η παραγωγή ινών με διαφορετικές διατομές και μήκη.



Εικόνα 8: Παραγωγή χαλύβδινων ινών με εξαγωγή τήγματος (Maidl, 1995)

Τύπος IV: Ίνες που παράγονται με φρεζάρισμα

Οι ίνες που παράγονται με αυτή την μέθοδο αποτελούν προϊόν αποκοπής απο την επιφάνεια ενός πλινθώματος χάλυβα, το οποίο είναι κατάλληλο για φρεζάρισμα, με την χρήση ενός περιστροφικού κόπτη. Οι ίνες-ρινίσματα που παράγονται κατ' αυτό τον τρόπο γίνονται ελαφρώς εύθραυστες κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και έχουν πιο ανώμαλη μορφή σε σχέση με τις ίνες που προέρχονται από την κοπή συρμάτων.



Εικόνα 9: Ίνες που παράγονται απο αποκοπή πλινθώματος χάλυβα (Maidl, 1995)



Εικόνα 10: Χαρακτηριστική τομή ίνας (Kobayashi, 1983)

Τύπος V: Τροποποιημένες ίνες ψυχρής ολκής

Παράγονται όπως και οι ίνες τύπου I, στην συνέχεια δέχονται τροποποιήσεις.

2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Χρήσης των Ινών

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ινών είναι πολλά σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό. Σε κάθε περίπτωση βέβαια και ανάλογα με την φύση του έργου οι ίνες δεν θεωρείται ότι μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα χρήσης των ινών είναι τα παρακάτω:

- ομοιόμορφο καταμερισμό των τάσεων, δεν επηρεάζουν την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος και καθυστερούν την ρηγμάτωση.
- Οι ίνες διασκορπίζονται ομοιογενώς στο μίγμα και περιορίζουν τις ρωγμές και τις επιπτώσεις της συστολής ξήρανσης. Έτσι, δεν τις αφήνουν να μεγαλώσουν πέρα από ένα πολύ μικρό όριο.
- Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνει χώρα η σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.
- Σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει όχι μόνο καλύτερες πρώιμες αντοχές αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, σε διάτμηση, ενώ έχει και αυξημένη δυσθραυστότητα..
- Οι ίνες έχουν πολύ καλό συνδυασμό αντοχής και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας εξασφαλίζοντας μεγάλη ικανότητα παραλαβής φορτίων. Επιπλέον, η χρήση τους κάνει το σκυρόδεμα πιο πλάστιμο, άρα και καταλληλότερο να ενδίδει στις συγκλίσεις, χωρίς όμως να τις περιορίζει σε μεγάλο βαθμό και χωρίς η επένδυση να αστοχεί.
- Κατάλληλες ίνες όταν προστίθενται στο σκυρόδεμα αυξάνουν κατά πολύ την ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες, περιορίζοντας τη θραύση του.

Κάποια από τα μειονεκτήματα χρήσης των ινών είναι τα παρακάτω:

- Οι ίνες διασκορπίζονται στο μίγμα αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών τελικά παραλαμβάνει φορτία και περιορίζει το άνοιγμα των ρωγμών. Το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι ακόμη και 25%, που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος τους δεν αξιοποιείται. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι ένα μέρος τους χάνεται και ως υλικό αναπήδησης. Ειδικά στην περίπτωση της ξηρής μίξης μπορεί να φθάσει το 50%.
- Οι χαλύβδινες κυρίως ίνες είναι σχετικά κοφτερές μπορεί να προκαλέσουν εκδορές και μικροτραυματισμούς στο προσωπικό αν δεν γίνεται χρήση τους με προσοχή.
- Οι ίνες δε μπορούν να αντικαταστήσουν τον συμβατικό οπλισμό. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δε μπορεί να αναπτύξει τόσο μεγάλη εφελκυστική αντοχή όσο το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα (Wong C., 2004).
- Κατά τη μίξη τους, εάν αυτή δεν εκτελείται σωστά ή αν δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, μπορεί να δημιουργούνται συσσωματώματα ινών χειροτερεύοντας την ποιότητα του σκυροδέματος. Οι χαλύβδινες ίνες φθείρονται όταν εκτίθενται σε υγρασία ενώ οι υάλινες έχουν μικρή ανθεκτικότητα σε αλκαλικά περιβάλλοντα. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια έχουν από μικρή έως ελάχιστη επικάλυψη, έτσι τείνουν να εμφανίζουν σημεία σκουριάς. Για λόγους αισθητικής και ασφάλειας, προτείνεται ότι η μόνιμη επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα κονιάματος
- Φθορά επίσης μπορεί να προκληθεί και από λάθος στη συσκευασία ή στη μεταφορά.
- Η εμπειρία από τη χρήση τους δεν είναι τόσο διαδομένη όσο αυτή του δομικού πλέγματος.
- Είναι συνήθως ακριβότερες σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό και η διαθεσιμότητά τους στον χώρο του έργου μπορεί να είναι περιορισμένη.

2.6 Θεωρητική διερεύνηση της αντοχής ινοπλισμένων δοκών

Σύμφωνα με την διπλωματική εργασία με τίτλο «Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονοτονική φόρτιση» του σπουδαστή Βιτάλη Σαρρή. Στην οποία γίνεται αναφορά στις εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής που παραθέτονται παρακάτω.

Σχέση του Sharma (1986)

Βασιζόμενος στα αποτελέσματα των δικών του δοκιμών και εκείνων των Batson, Jenkins και Spatney (1972), ο Sharma πρότεινε μία απλή εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών:

$$v_u = k \cdot f_t' \cdot (d / a)^{0.25} \quad [1]$$

όπου:

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$k = 2/3$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $0.79 (f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου (MPa)

Η απλότητα της εξίσωσης (1) την κάνει ελκυστική, αλλά η εξίσωση αυτή δεν περιέχει παραμέτρους όπως το ογκομετρικό ποσοστό ινών, το σχήμα των ινών και το ποσοστό διαμήκους σπλισμού. Οι παραπάνω συντελεστές έχουν σημαντική επίδραση στη διατμητική αντοχή. Επιπλέον, η εξίσωση (1) υποεκτιμά την επίδραση του λόγου a/d , συνεπώς, είναι συντηρητική για χαμηλές τιμές του λόγου a/d και αισιόδοξη για ψηλές τιμές του λόγου a/d .

Σχέση των Narayanan και Darwish (1987)

Οι Narayanan και Darwish (1982) πρότειναν μια εμπειρική σχέση για τη μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία ν :

$$V_u = e \left[0.24 \cdot f_{spfc} + 80 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \right] + v_b \quad (\text{MPa}) \quad [2]$$

Όπου:

f_{spfc} = η αντοχή κυλίνδρου σε διάρρηξη ινοπλισμένου σκυροδέματος
= $f_{cuf} / (20 - F/2) + 0.7 + F/2$ (MPa)

ρ = ποσοστό διαμήκους οπλισμού

F = συντελεστής γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών = $(L_f/D_f) V_f df$

e = συντελεστής τοξωτής λειτουργίας: (1.0 για $a/d > 2.8$ και $2.8d/a$ για $a/d < 2.8$)

f_{cub} = θλιπτική αντοχή κύβου [MPa]

L_f = μήκος ίνας

D_f = διάμετρος ίνας

V_f = ογκομετρικό ποσοστό ινών

df = συντελεστής συνάφειας: (0.5 για ευθύγραμμες ίνες, 0.75 για ίνες με άγκιστρα, 1.0 για οδοντωτές)

$v_b = 0.41 \tau F$

τ = μέση τάση συνάφειας ινών και σκυροδέματος, ίση με 4.15 MPa όπως έχει προταθεί από τους Swamy, Mangat και Rao, ελλείψει κατάλληλων δοκιμών.

Σχέσεις των Ashour, Hasanain και Wafa (1992)

Οι Ashour, Hasanain και Wafa εξέτασαν 18 δοκούς κατασκευασμένες από υψηλής αντοχής ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των πειραμάτων, πρότειναν δύο σχέσεις για την πρόβλεψη των αντοχών. Η πρώτη σειρά εκφράσεων τροποποιήθηκε για να συμπεριλάβει τις ίνες .

Για $a/d \geq 2.5$,

$$V_u = (2.11 \cdot \sqrt[3]{f'_c} + 7F) \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (Mpa) \quad [3.a]$$

Για $a/d < 2.5$,

$$V_u = \left[(2.11 \cdot \sqrt[3]{f'_c} + 7F) \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a} \right)^{0.333} \right] \cdot \frac{2.5}{a} + V_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (Mpa) \quad [3.b]$$

Η δεύτερη εξίσωση ήταν παρόμοια με την (11-4) του ACI Building Code, απλώς τροποποιημένη για να συμπεριλάβει την επιρροή των ινών:

$$V_u = \left(0.7 \sqrt{f'_c} + 7 \cdot F \right) \cdot \frac{d}{a} + 17.2 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \quad (Mpa) \quad [4]$$

Οι εξισώσεις των Ashour, Hasanain και Wafa, σύμφωνα με τους ίδιους, αυτές εξασφαλίζουν μία καλύτερη εφαρμογή για υψηλής αντοχής σκυροδέματα σε σχέση με την εξίσωση των Narayanan και Darwish. Ωστόσο οι εξισώσεις [3] και [4] είναι λιγότερο ακριβείς από ότι η εξίσωση [2].

Σχέση των Imam και Vandewalle (1994)

Οι Imam και Vandewalle τροποποίησαν μία έκφραση που είχαν αναπτύξει οι Bazant και Sun για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής σε συνήθους αντοχής δοκούς συμβατικού σκυροδέματος. Οι Bazant και Sun έδωσαν μία έκφραση που βασίστηκε στα αποτελέσματα μη γραμμικής θραυστομηχανικής, που δείχνει ότι η διατμητική ικανότητα ποικίλει με τη μέγιστη διάμετρο αδρανούς d_a και το λόγο του στατικού ύψους δοκού προς τη μέγιστη διάμετρο αδρανούς d/d_a . Η εξίσωση των Imam και Vandewalle διαφέρει από την εξίσωση των Bazant και Sun μόνο ως προς τον παράγοντα σπλισμού ω που αντικατέστησε το μηχανικό ποσοστό σπλισμού ρ , ενώ οι λοιπές σταθερές προσαρμόστηκαν σαν αποτέλεσμα στατιστικών αναλύσεων.

$$V_u = 0.6 \cdot \Psi \cdot \sqrt[3]{\omega} \cdot \left[(f'c)^{0.44} + 275 \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\left(\frac{d}{d_a}\right)^5}} \right] \quad (Mpa) \quad [5]$$

Όπου:

$$\Psi = \text{παράγοντας επιρροής του σχήματος} = \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{5.08}{d_a}\right)}}{\sqrt{1 + \frac{d}{(25d_a)}}}$$

$\omega = \text{παράγοντας σπλισμού} = \rho (1 + 4F)$

$F = \text{συντελεστής γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών} = (L_f/D_f) V_f d_f$

$d_f = \text{συντελεστής συνάφειας: (0.5 για λείες ίνες, 0.9 για ίνες διαφορετικής μορφής, 1.0 για ίνες με άγκιστρα)}$

Η εξίσωση [5] ενσωματώνει την επίδραση παραμέτρων από άλλα μοντέλα υπολογισμού και προσθέτει την επιρροή του μεγέθους του δοκιμίου. Αυτή η εξίσωση, ωστόσο, επιβεβαιώθηκε μόνο με 29 δοκιμές ινοπλισμένου σκυροδέματος δοκών, από τα οποία μερικά αστόχησαν σε κάμψη αντί της διάτμησης.

Κεφάλαιο 3

Πειραματικό Μέρος

3 Πειραματικό Μέρος

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την διερεύνηση της αντοχής σε κάμψη ινοπλισμένων δοκών με διαφορετικό ύψος και ποσοστό ινών, παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ, 9 δοκοί διαστάσεων 110x10x15 cm και 9 δοκοί 110x10 x20 cm, 18 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm, 12 κυλινδρικά διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm.

Από αυτά τα κυβικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (συμβατικού και ινοπλισμένου) ενώ τα κυλινδρικά δοκίμια για την Δοκιμή Έμμεσου Εφελκυσμού (διάρρηξη) του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Οι δύο ομάδες των δοκών ανάλογα με το ποσοστό ινών χωρίζονται ως εξής:

- A) 3 δοκοί με ποσοστό ινών $V_f=0\%$, με 3 κύβους
- B) 3 δοκοί με ποσοστό ινών $V_f=0.6\%$, με 3 κύβους και 3 κυλίνδρους
- Γ) 3 δοκοί με ποσοστό ινών $V_f=1.2\%$, με 3 κύβους και 3 κυλίνδρους

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια:

- Προμήθεια υλικών
- Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σκυροδέτηση
- Σκυροδέτηση
- Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες
- Συντήρηση δοκιμίων
- Πειραματικές Δοκιμές
- Συλλογή αποτελεσμάτων

3.1 Προήθεια Υλικών

Η επιλογή της τελικής σύνθεσης του σκυροδέματος έγινε με δεδομένη προδιαγραφή για σκυρόδεμα C16/20. Για την καλύτερη εργασιμότητα, κατά τη σκυροδέτηση κάθε δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής. Η επιλογή των συνθέσεων στηρίχθηκε στην πρότυπη σύνθεση που προτείνει η εταιρεία LAFARGE από την οποία προμηθευτήκαμε και τα περισσότερα υλικά

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ				
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ: C16/20			ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑ Μ3	
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ: Κ.Τ.Σ./97			ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	
ΥΛΙΚΟ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ		ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	
ΧΑΛΙΚΙ	ΘΡΑΥΣΤΑ	ΤΡΙΑΣ	620	33,70%
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΘΡΑΥΣΤΑ	ΜΠΕΛΕΓΡΑΤΗΣ	140	7,61%
ΑΜΜΟΣ	ΘΡΑΥΣΤΑ	ΜΠΕΛΕΓΡΑΤΗΣ	1080	58,70%
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΗΡΑΚΛΗΣ ΙΙΙ	CEM IV-M(P-W) 42,5	0	
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΗΡΑΚΛΗΣ ΙΙΙ	CEM IV/B(P-W) 32,5	270	
ΜΑΧ ΝΕΡΟ			190	
	PLASTIMENT 20 R	SIKA	1,080	
ΕΙΔΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ				
ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΝΤ.	ΝΑΙ			
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ Fck(MPa)	20,00			
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ Fa(Mpa)	24,92			
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΥΠ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ S	3,00			
ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΚΑΘΙΣΗ (ΕΚ)	S3 10-15			
ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΜΑΧ ΚΟΚΚΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ(mm)	31,50			
ΛΟΓΟΣ ΝΕΡΟΥ/ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	0,70			
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ				
ΑΔΡΑΝΗ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ				
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ 'ΤΡΙΒΗ-ΚΡΟΥΣΗ' %			ΧΑΛ 30%	
ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ 'ΥΓΕΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ' %			1	
ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΑΜΜΟΥ ΣΕ			71	
ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΑΙΠΑΛΗ 0.075mm %			15,2	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΚΤΕΛΕΣΘΕΙΣΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ				
ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 15X15X15 ΕΚ				
ΗΛΙΚΙΑ(ΗΜ) ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ(Mpa)				
ΑΕΡΟΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ %			1,7	
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ(7) ΗΜΕΡΩΝ			20,10	
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ(28) ΗΜΕΡΩΝ			25,50	
ΚΑΘΙΣΗ (ΕΚ)			S3 12	
ΚΑΘΙΣΗ ΣΕ ΥΠΕΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ				
ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΣΚΥΡ/ΤΟΣ tn/m3			2,300	

Πίνακας 3: Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος

▪ **Τσιμέντο**

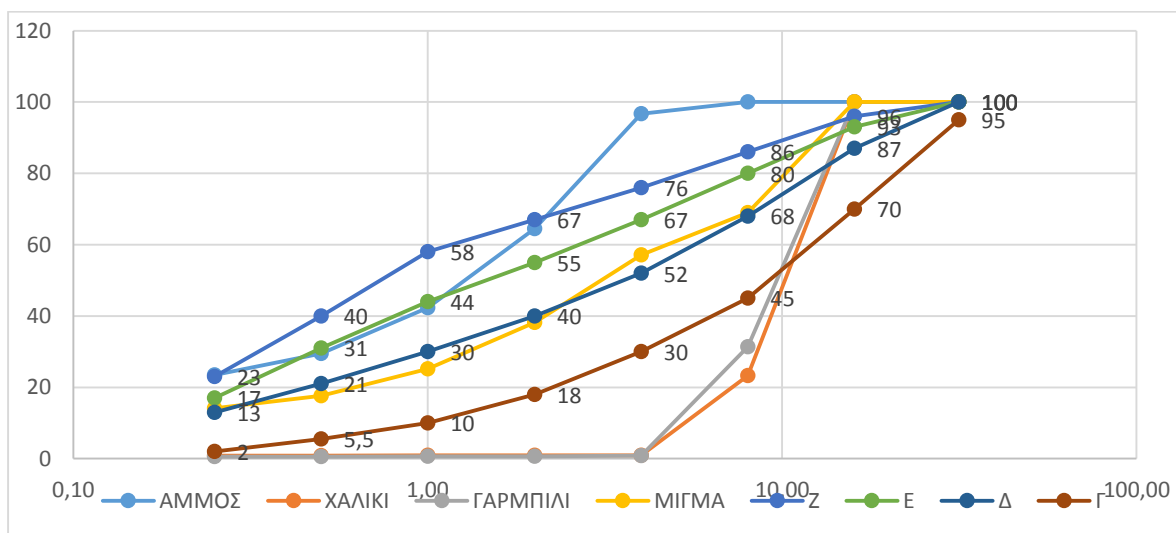
Το τσιμέντο που προμηθευτήκαμε είναι CEM IV / B (P-W) 32,5 R. Έχει ως βάση κλίνκερ τύπου Πόρτλαντ, που έχει αλεσθεί μαζί με πρόσθετα (συνδετικά). Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, είναι κατηγορίας αντοχής 32,5 R (πρώρες αυξημένες αντοχές). Το CEM IV / B (P-W) 32,5 R καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1.

▪ **Αδρανή**

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθικά και χωρίζονται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος κόκκου του καθενός έτσι έχουμε άμμο χαλίκι γαρμπίλι.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΦΥΛΛΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ								
ΑΔΡΑΝΗ								
620	ΧΑΛΙΚΙ							
140	ΓΑΡΜΠΙΛΙ							
1080	ΑΜΜΟΣ							
1840	ΣΥΝΟΛΟ							
					ΑΝΩ ΟΡΙΑ ΥΠΟΖΩΝΩΝ			
ΚΟΣΚΙΝΟ	ΑΜΜΟΣ	ΧΑΛΙΚΙ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΜΙΓΜΑ	Ζ	Ε	Δ	Γ
0,25	23,5	0,8	0,6	14,11	23	17	13	2
0,50	29,5	0,8	0,6	17,63	40	31	21	5,5
1,00	42,3	0,9	0,7	25,18	58	44	30	10
2,00	64,5	0,9	0,7	38,22	67	55	40	18
4,00	96,7	0,9	0,8	57,12	76	67	52	30
8,00	100	23,3	31,4	68,94	86	80	68	45
16,00	100	100	100	100,00	96	93	87	70
31,50	100	100	100	100,00	100	100	100	95

Πίνακας 4: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών



Διάγραμμα 5: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

- **Ρευστοποιητή**

Ο ρευστοποιητής που χρησιμοποιήσαμε ήταν προϊόν της εταιρείας Sika με ονομασία Plastiment 20r Sika σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 934-2. Είναι ισχυρός ρευστοποιητής σκυροδέματος για υψηλή διατήρηση εργασιμότητας με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά.

Πυκνότητα	1,16 Kg/l (στους +20°C)
pH	7,5-10 (στους +20°C)
Ολικό περιεχόμενο σε χλωριόντα	Ελεύθερο από χλωριόντα
Επίδραση στην πήξη	επιβράδυνση

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά ρευστοποιητή

- **Νερό**

Σύμφωνα με την μελέτη της σύνθεσης σκυροδέματος ο λόγος νερού/τσιμέντου είναι 0.7, το νερό που χρησιμοποιήθηκε είναι από το δίκτυο ύδρευσης.

- **Χάλυβας Οπλισμού**

Ο χάλυβας οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι κατηγορίας B500C (ΕΛΟΤ 1421-3) της εταιρείας ΣΙΔΕΝΟΡ. Ο εφελκόμενος και ο διατμητικός οπλισμός είναι διαμέτρου 8mm ενώ ο θλιβόμενος είναι 6mm

Μηχανικά χαρακτηριστικά του Χάλυβα				
Μηχανικά Χαρακτηριστικά	ΕΚΩΣ 2000	ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ 1421 - B500C	ΣΙΔΕΝΟΡ SD Κατηγορία C (B500C)	
fy(N/mm²)	>=500	>=500	>=500	560
ft(N/mm²)	>=550	>=550	>=575	665
Agt(%)	>=7	>=7,5	>=8	10
ft/fy	>=1,10	>=1,15	>=1,15	1,18
fy act/ fy nom	<=1,30	<=1,25	<=1,20	1,12

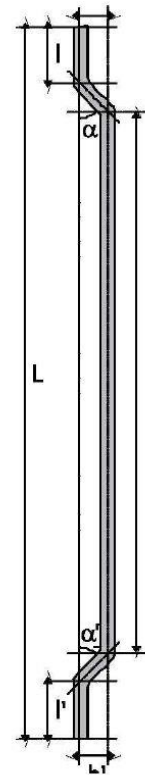
Πίνακας 6: Μηχανικά χαρακτηριστικά Χάλυβα

- Ίνες

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινες, της εταιρείας ΣΙΔΕΝΟΡ, ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα και συγκολλημένες. Είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM A820-2001, EN 10016 1994 και ΚΩΔΙΚΟΣ 600 023. Η ανάμειξη των χαλύβδινων ινών έγινε «εν υγρώ» με προσθήκη στον αναμεικτήρα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ινών παρουσιάζονται παρακάτω.

Χαρακτηριστικά ίνας	
I & I'	1 - 4mm
h και h'	1,80 mm +1/-0 mm
a και α'	45° min 30°
L	60mm
d	1mm
L/d	60
Ίνες/kg	8.200
Συνολικό μήκος ινών/10kg	2.885 m
Αντοχή σε εφελκυσμό	1.100 MPa

Πίνακας 7: Μηχανικά χαρακτηριστικά Χάλυβα



Εικόνα 11: Γεωμετρία ίνας πειράματος



Εικόνα 12: Χαλύβδινες ίνες πειράματος

3.2 Καλούπια-Μήτρες

Για την σκυροδέτηση των δοκών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω ξύλινα καλούπια:



Εικόνα 13: Καλούπια σκυροδέτησης δοκού

Για τα κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω μήτρες, με βάση τα πρότυπα του (ΚΤΣ-97).



Εικόνα 14: Μήτρες σκυροδέτησης κυβικού και κυλινδρικού δοκιμίου

3.3 Διαμήκης Οπλισμός Δοκών-Συνδετήρες

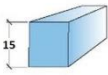
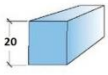


Ο οπλισμός των δοκών που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 2 Φ8 (κάτω στρώση-εφελκυσόμενος), 2Φ6 (άνω στρώση-θλιβόμενος) και διατμητικού οπλισμού με διάμετρο Φ8 στα άκρα της δοκού. Να σημειωθεί ότι η χρήση του διατμητικού οπλισμού εξυπηρετεί κατασκευαστικούς λόγους, όπως την ένωση του άνω και κάτω διαμήκους οπλισμού. Η συνεισφορά της στις αντοχές των δοκών θεωρείται αμελητέα. Η παραπάνω διάταξη παρουσιάζεται στην εξής φωτογραφία:



Εικόνα 15: Οπλισμός δοκού (κλωβός)

3.4 Υπολογισμός όγκων και ζύγιση υλικών

Ο συνολικός όγκος της σκυροδέτησης όλων των δοκιμών είναι 0.471 m³, ο αναμικτήρας που χρησιμοποιήθηκε είχε μέγιστη χωρητικότητα 0,064 m³. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν εννέα επιμέρους σκυροδετήσεις, όπου κάθε μία κατά μέγιστο επέτρεπε την κατασκευή 2 δοκών, 2 κυλίνδρων και δύο κύβων. Λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό ποσοστό ινών και τον αριθμό των δοκιμών καταλήγουμε στον παρακάτω σχεδιασμό:

	Δοκός H15 	Δοκός H20 	Κύβος ακμής 15cm 	Κύλινδρος (15*30 cm) 
Αριθμός Δοκιμών:				
Σκυροδέτηση 1 ^η (V _f =0%)		2	2	
Σκυροδέτηση 2 ^η (V _f =0,6%)		2	2	2
Σκυροδέτηση 3 ^η (V _f =1,2%)		2	2	2
Σκυροδέτηση 4 ^η (V _f =0%)	1	1	2	
Σκυροδέτηση 5 ^η (V _f =0,6%)	1	1	2	2
Σκυροδέτηση 6 ^η (V _f =1,2%)	1	1	2	2
Σκυροδέτηση 7 ^η (V _f =0%)	2		2	
Σκυροδέτηση 8 ^η (V _f =0,6%)	2		2	2
Σκυροδέτηση 9 ^η (V _f =1,2%)	2		2	2

Πίνακας 8: Αναλυτικός πίνακας δοκών, κύβων και κυλίνδρων βάση σκυροδέτησης

- Ο Υπολογισμός του Βάρους των Υλικών κάθε σκυροδέτησης, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη παρακάτω σύνθεση:

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ		
ΥΛΙΚΟ	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑ m ³ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	
	ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (Kg)	ΠΟΣΟΣΤΑ %
ΧΑΛΙΚΙ	620	33,70 %
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	140	7,61 %
ΑΜΜΟΣ	1080	58,70 %
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	270	
ΝΕΡΟ	190	
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ	1,080	
ΙΝΕΣ	47,1	0,6%
	94,2	1,2%

Πίνακας 9: Σύνθεση σκυροδέματος για το πείραμα

3.4.1 Υπολογισμός μάζας ινών

Δεδομένου ότι το ποσοστό των ινών αναφέρεται στον όγκο της σκυροδέτησης, προκειμένου να το μετατρέψουμε σε βάρος χρησιμοποιούμε τον εξής τύπο:

$$B = \frac{V_f}{100} \times \gamma_s \times V_\sigma$$

Όπου:

B= μάζα ινών

V_f= ποσοστό ινών

γ_s= ειδικό βάρος χάλυβα ινών

V_σ= όγκος σκυροδέτησης

3.4.2 Υπολογισμός βάρους κάθε σκυροδέτησης

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 1 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.051 m ³		
	Kg	Kg (0.051 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	31.465	34.612
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	7.105	7.816
ΑΜΜΟ	54.810	60.291
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	13.703	15.073
ΝΕΡΟ	9.643	10.607
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.055	0.060
ΙΝΕΣ	0.000	0.000
ΙΝΕΣ %		0%

Πίνακας 10: Πίνακας I_{ης} σκυροδέτησης (v_f=0%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 2 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.061 m ³		
	Kg	Kg (0.061 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	38.039	41.843
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	8.589	9.448
ΑΜΜΟ	66.261	72.887
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	16.565	18.222
ΝΕΡΟ	11.657	12.823
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.066	0.073
ΙΝΕΣ	2.890	3.179
ΙΝΕΣ %		0.6%

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 3 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.061 m³		
	Kg	Kg (0.061 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	38.039	41.843
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	8.589	9.448
ΑΜΜΟ	66.261	72.887
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	16.565	18.222
ΝΕΡΟ	11.657	12.823
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.066	0.073
ΙΝΕΣ	5.779	6.357
ΙΝΕΣ %		1.2%

Πίνακας 12: Πίνακας 3^{ης} σκυροδέτησης (vf=1.2%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 4 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.045 m³		
	Kg	Kg (0.045 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	28.055	30.861
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	6.335	6.969
ΑΜΜΟ	48.870	53.757
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	12.218	13.439
ΝΕΡΟ	8.598	9.457
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.049	0.054
ΙΝΕΣ	0.000	0.000
ΙΝΕΣ %		0%

Πίνακας 13: Πίνακας 4^{ης} σκυροδέτησης (vf=0%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 5 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.056 m³		
	Kg	Kg (0.056 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	34.629	38.092
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	7.819	8.601
ΑΜΜΟ	60.321	66.353
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	15.080	16.588
ΝΕΡΟ	10.612	11.673
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.060	0.066
ΙΝΕΣ	2.631	2.894
ΙΝΕΣ %		0.6%

Πίνακας 14: Πίνακας 5^{ης} σκυροδέτησης (vf=0.6%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 6 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.056 m ³		
	Kg	Kg (0.056 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	34.629	38.092
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	7.819	8.601
ΑΜΜΟ	60.321	66.353
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	15.080	16.588
ΝΕΡΟ	10.612	11.673
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.060	0.066
ΙΝΕΣ	5.261	5.787
ΙΝΕΣ %		1.2%

Πίνακας 15: Πίνακας 6^{ης} σκυροδέτησης (vf=1.2%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 7 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.040 m ³		
	Kg	Kg (0.040 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	24.645	27.110
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	5.565	6.122
ΑΜΜΟ	42.930	47.223
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.733	11.806
ΝΕΡΟ	7.553	8.308
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.043	0.047
ΙΝΕΣ	0.000	0.000
ΙΝΕΣ %		0%

Πίνακας 16: Πίνακας 7^{ης} σκυροδέτησης (vf=0%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 8 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.050 m ³		
	Kg	Kg (0.050 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	31.219	34.341
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	7.049	7.754
ΑΜΜΟ	54.381	59.819
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	13.595	14.955
ΝΕΡΟ	9.567	10.524
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.054	0.060
ΙΝΕΣ	2.372	2.609
ΙΝΕΣ %		0.6 %

Πίνακας 17: Πίνακας 8^{ης} σκυροδέτησης (vf=0.6%)

ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ 9 ^η		
Όγκος σκυροδέτησης: 0.050 m ³		
	Kg	Kg (0.050 m ³ +10%)
ΧΑΛΙΚΙ	31.219	34.341
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	7.049	7.754
ΑΜΜΟ	54.381	59.819
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	13.595	14.955
ΝΕΡΟ	9.567	10.524
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗ	0.054	0.060
ΙΝΕΣ	4.743	5.218
ΙΝΕΣ %		1.2%

Πίνακας 18: Πίνακας 9^{ης} σκυροδέτησης (vf=1.2%)

Σημείωση: Στους παραπάνω πίνακες παρουσιάζεται επίσης η στήλη με προσαύξηση του βάρους των υλικών κατά 10% λόγω τυχόν απωλειών κατά την διαδικασία σκυροδέτησης. Όλες οι παραπάνω ποσότητες υλικών ζυγίστηκαν με ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας.

3.5 Διαδικασία Σκυροδέτησης

Η διαδικασία σκυροδέτησης ξεκινάει με την προσθήκη των υλικών στον αναμκτήρα, τοποθετούμε πρώτα τα χοντρόκοκκα (χαλίκι, γαρμπίλι) και την μισή ποσότητα άμμου και τσιμέντου. Έπειτα θέτουμε σε λειτουργία τον αναμκτήρα προσθέτοντας παράλληλα την υπόλοιπη ποσότητα άμμου και τσιμέντου μαζί με το νερό. Τέλος, γίνεται σταδιακά η προσθήκη της ποσότητας του ρευστοποιητή σε δόσεις, που κρίνεται απαραίτητη για να επιτύχουμε την ζητούμενη ρευστότητα. Στις σκυροδετήσεις που απαιτούν ίνες, αυτές προστίθενται λίγο πριν το τέλος της σκυροδέτησης.

Στην συνέχεια γίνεται η χύτευση των δοκιμίων και η συμπύκνωση τους με μηχανήμα δόνησης. Με το τέλος της παραπάνω διαδικασίας τα δοκίμια αριθμήθηκαν με βάση τις σκυροδετήσεις τους. Για την συντήρησή τους τα δοκίμια καλύφθηκαν με υγρές λινάτσες τις οποίες διαβρέχαμε περιοδικά. Μετά το πέρας των 28 ημερών τα δοκίμια ήταν έτοιμα για τις πειραματικές δοκιμές.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 16: (α) Δοκίμια σκυροδετήσεων, (β) Διάταξη σπλισμού, (γ) δονητής, (δ) αναμεικτήρας

3.6 Εργαστηριακές δοκιμές

3.6.1 Δόκιμη θλίψης και Διάρρηξης

Στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης των κυβικών δοκιμίων ακμής 15cm τα οποία τοποθετούνται στο κέντρο των μεταλλικών πλακών της μηχανής θλίψης. Ενώ στη δοκιμή διάρρηξης τα κυλινδρικά δοκίμια τοποθετούνται με το ύψος τους παράλληλα στις μεταλλικές πλάκες. Γίνεται η επιβολή του θλιπτικού φορτίου με ρυθμό μεταβολής 5 KN/s, ενώ παράλληλα καταγράφεται το φορτίο από την μηχανή. Η μηχανή σταματάει αυτόματα με την θραύση του δοκιμίου, παρουσιάζοντας στην οθόνη της το μέγιστο φορτίο θραύσης.

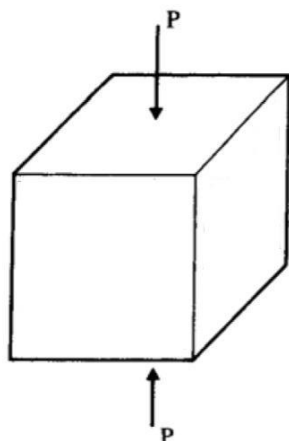


Εικόνα 17: Μηχανή Θλίψης



Εικόνα 18: Διάταξη δοκιμίου εντός μηχανής θλίψης για δοκιμή διάρρηξης

3.6.2 Υπολογισμός Θλιπτικής Τάσης



Η θλιπτική τάση υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$f_c = \frac{P_{\theta\text{ραυ}}}{b * d}$$

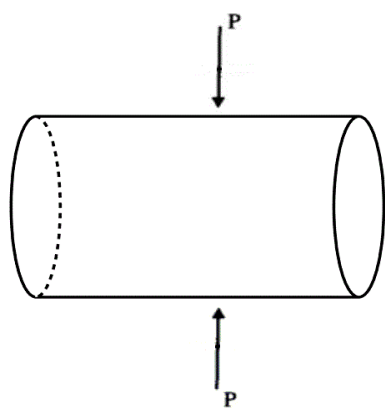
Όπου:

$P_{\theta\text{ραυ}}$ = Φορτίο Θραύσης

b = μήκος (150 mm)

d = πλάτος (150 mm)

3.6.3 Υπολογισμός Εφελκυστική Τάσης



Η εφελκυστική τάση υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$f_{ct} = \frac{2 * P_{\theta\text{ραυ}}}{\pi * D * H}$$

Όπου:

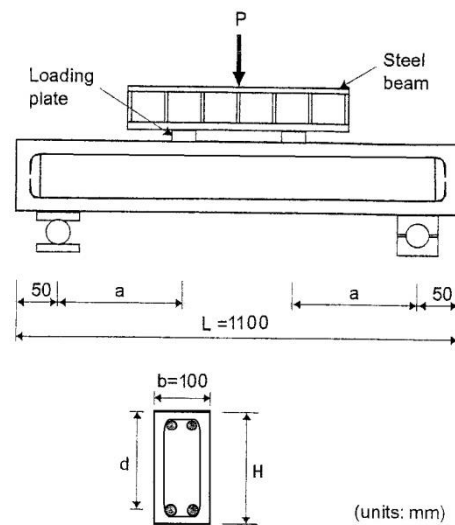
$P_{\theta\text{ραυ}}$ = Φορτίο Θραύσης

H = ύψος (300 mm)

D = διάμετρος (150 mm)

3.6.4 Δοκιμή Κάμψης

Η δοκιμή εφαρμόζεται στις δοκούς, οι οποίες τοποθετούνται στην μηχανή κάμψης και στηρίζονται αμφιέριστα με τις στηρίξεις να απέχουν 5cm από την άκρη της δοκού. Έπειτα στο άνω μέρος της δοκού βάζουμε τις μεταλλικές πλάκες φορτίου σε διατμητική απόσταση a από τις στηρίξεις, για την μεταφορά του φορτίου από την μηχανή στην δοκό. Η διατμητική απόσταση a προκύπτει από τον λόγο διάτμησης που χρησιμοποιείται κάθε φορά.



Εικόνα 19.1: Πειραματική διάταξη για δοκιμή κάμψης δοκού

$$\text{Λόγος διάτμησης: } \frac{a}{d}$$

Όπου: a = διατμητική απόσταση
 d = στατικό ύψος

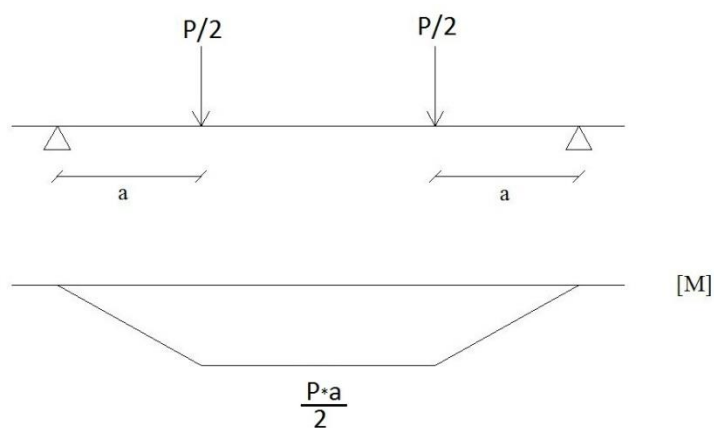
Για τη καταγραφή του βέλους κάμψης, στο μέσο της δοκού τοποθετούμε βελόμετρο υψηλής ακρίβειας. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται έως την αστοχία της δοκού, οι τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης καταγράφονται από Η/Υ. Κατά την διάρκεια της δοκιμής κάμψης, στις ρωγμές που εμφανίζονταν σημειώνονταν το αντίστοιχο φορτίο.



Εικόνα 19.2: Πειραματική διάταξη για δοκιμή κάμψης δοκού

3.7 Υπολογισμός Καμπτικής αντοχής

Από την πειραματική διάταξη έχουμε το εξής διάγραμμα ροπών :



Εικόνα 20: Διάγραμμα ροπών δοκού

$$\text{Με την μέγιστη ροπή : } M_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot a}{2}$$

$$\text{Ροπή αδρανείας: } I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\text{Ροπή αντίστασης: } W = \frac{I}{\frac{h}{2}} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Η καμπτική αντοχή της δοκού δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{3 \cdot P_{\max} \cdot a}{b \cdot h^2}$$

όπου:

P_{\max} = μέγιστο φορτίο

a = διατμητική απόσταση

b = πλάτος δοκού

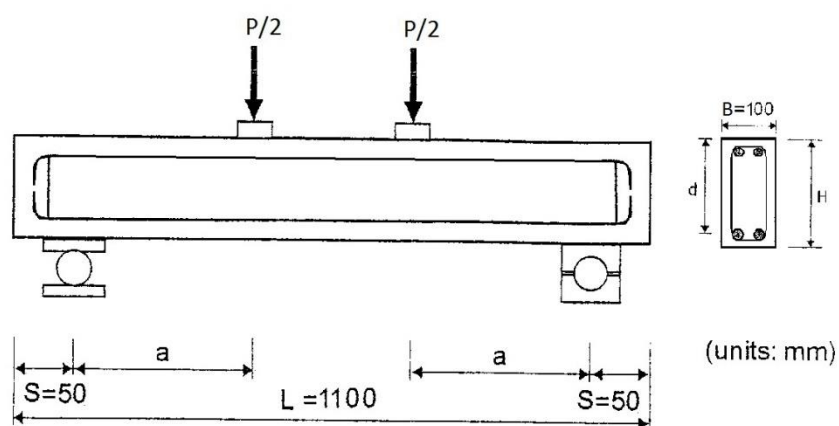
h = ύψος δοκού

Κεφάλαιο 4

Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

4. Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που πρόεκυψαν από τα πειράματα. Αρχικά η παρουσίαση ξεκινά με τις δοκούς, όπου παραθέτονται πρώτα τα πρισματικά δοκίμια ύψους 15cm με ποσοστό ινών 0%,0.6%,1.2% και υψους 20cm με ποσοστό ινών 0%,0.6%,1.2%. Στη παρουσίαση περιέχεται η επικεφαλίδα με την ονομασία του δοκιμίου, μια φωτογραφία της ρηγματωμένης κατάστασης του, πινακοποιημένα τα χαρακτηριστικά του, το διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης (Load-Displacement) και πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων, ο οποίος περιέχει τις τιμές του μέγιστου φορτίου P_{max} και την καμπτική αντοχή s_{max} . Τα χαρακτηριστικά της δοκού προβάλλονται στο παρακάτω σχήμα και συγκεντρώνονται στο από κάτω πίνακα :



Εικόνα 21: Χαρακτηριστικά Δοκού

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ		
H	cm	ύψος
L	cm	μήκος
B	cm	πλάτος
V_f	%	ποσοστό ινών
a/d		λόγος διάτμησης
a	cm	διατμητικό μήκος
d	cm	στατικό ύψος
s	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ		αριθμός σκυροδέτησης

Πίνακας 19: Πρότυπος πίνακας χαρακτηριστικών δοκού

Τελευταία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης και διάρρηξης . Για την εύρεση της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος κάθε δοκού χρησιμοποιούνται οι τιμές από δυο κύβους και δυο κυλίνδρους. Τα δοκίμια αυτά προέρχονται από την ίδια σκυροδέτηση με την δοκό.

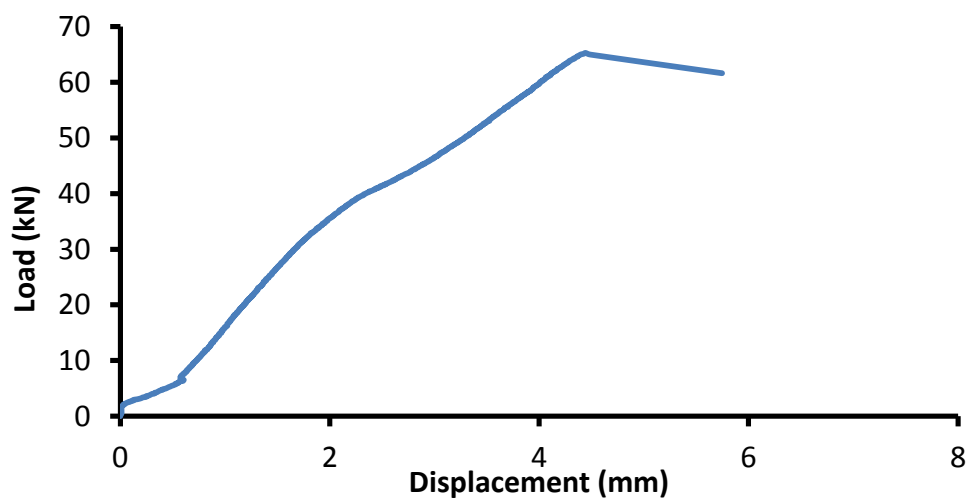
Σημείωση: Η δοκός ύψους $H=15\text{cm}$ με 0% ποσοστό ινών της 7ης σκυροδέτησης δεν εξετάστηκε πειραματικά.

Δοκίμια $V_f=0\%$

Δοκίμιο BV1/15/0.8/VF0



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	16.5	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	0.0	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	4		αριθμός σκυροδέτησης

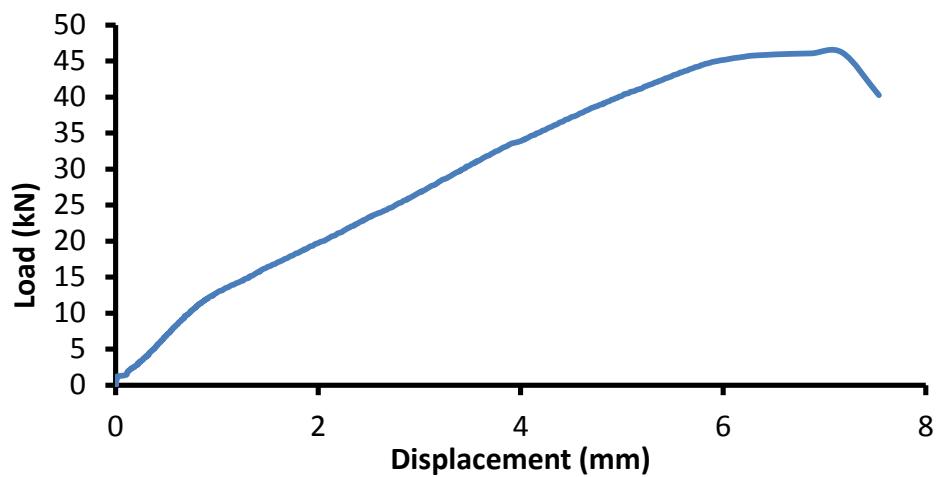


Αποτελέσματα		
P _{max}	65.28 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	7.55 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Αστοχία στη στήριξη λόγω εξάντλησης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος	

Δοκίμιο BV2/15/2.5/VFO



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	16	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	0.0	%	ποσοστό ινών
a/d	2.5		λόγος διάτμησης
a	32.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	7		αριθμός σκυροδέτησης

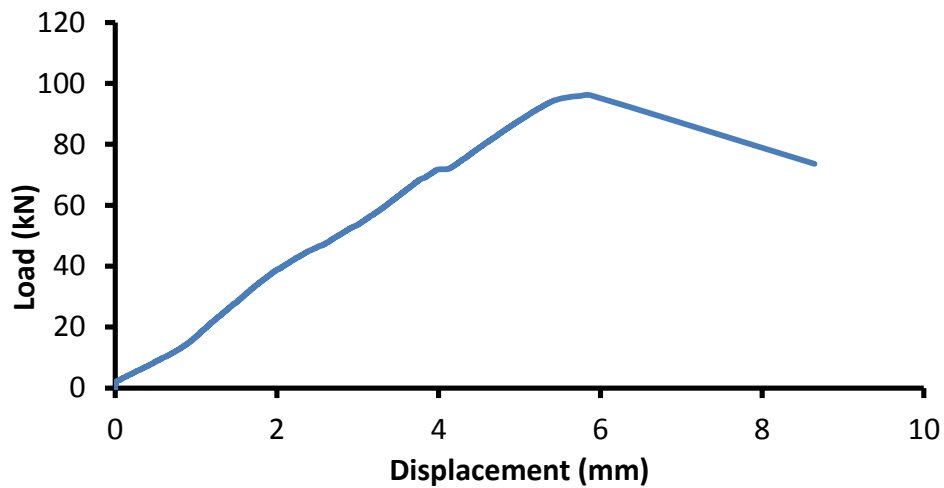


Αποτελέσματα		
P _{max}	46.16 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	17.58 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία-Μεταφορά του φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BV1/20/0.8/VF0

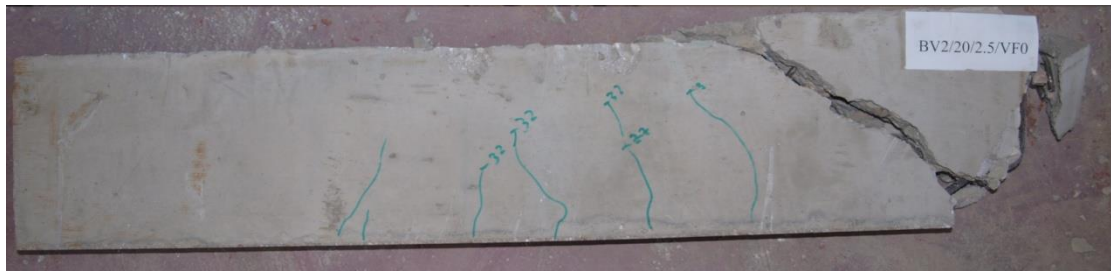


ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	19.5	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.0	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	1		αριθμός σκυροδέτησης

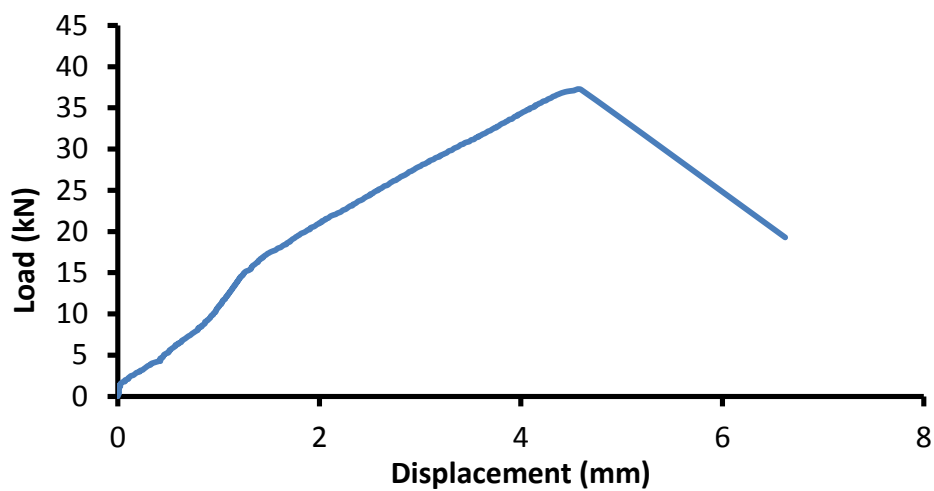


Αποτελέσματα		
P_{max}	96.08 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	10.31 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία	

Δοκίμιο BV2/20/2.5/VF0



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.0	%	ποσοστό ινών
a/d	2.5		λόγος διάτμησης
a	42.5	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	1		αριθμός σκυροδέτησης

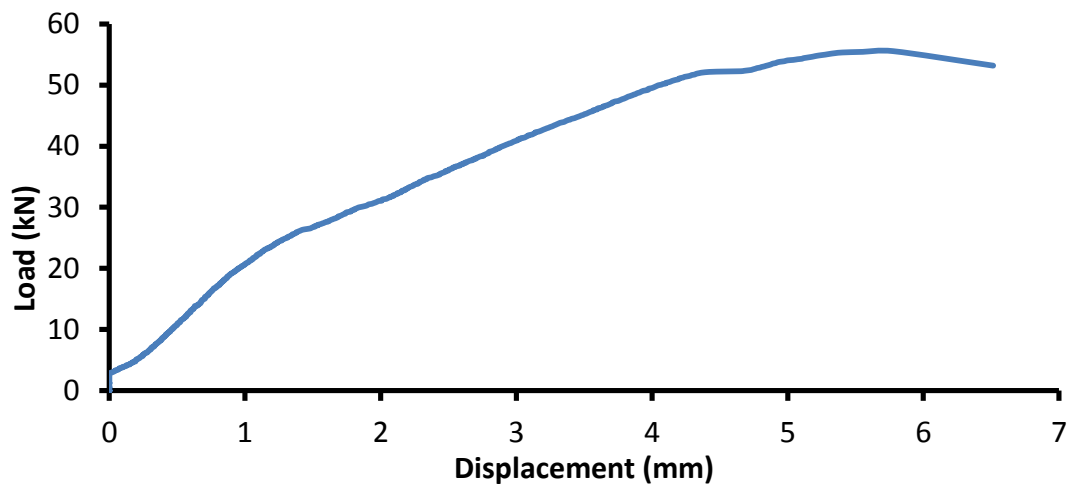


Αποτελέσματα		
P_{max}	37.2 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	11.86 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία-μεταφορά του φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BV3/20/1.5/VF0



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.0	%	ποσοστό ινών
a/d	1.5		λόγος διάτμησης
a	25.5	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	4		αριθμός σκυροδέτησης



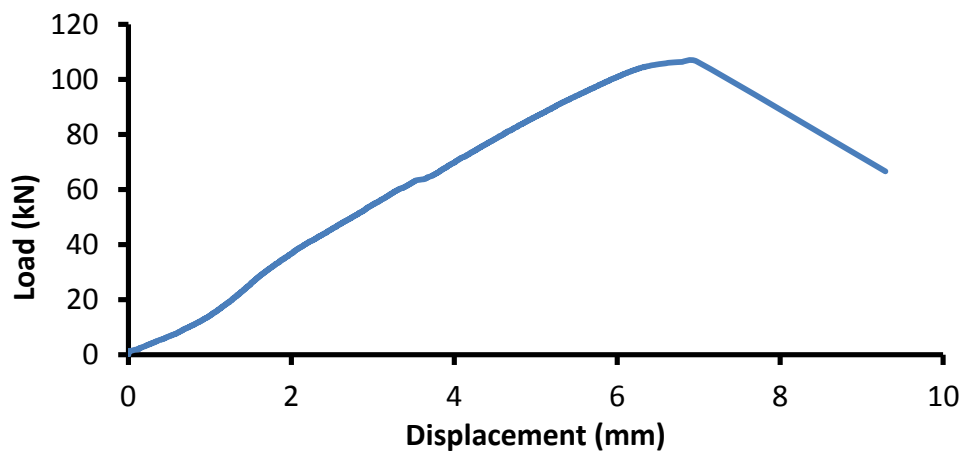
Αποτελέσματα		
P_{max}	55.54 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	10.62 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμια VF 0.6%

Δοκίμιο BFRC1/15/0.8/VF06



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15.4	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	5		αριθμός σκυροδέτησης

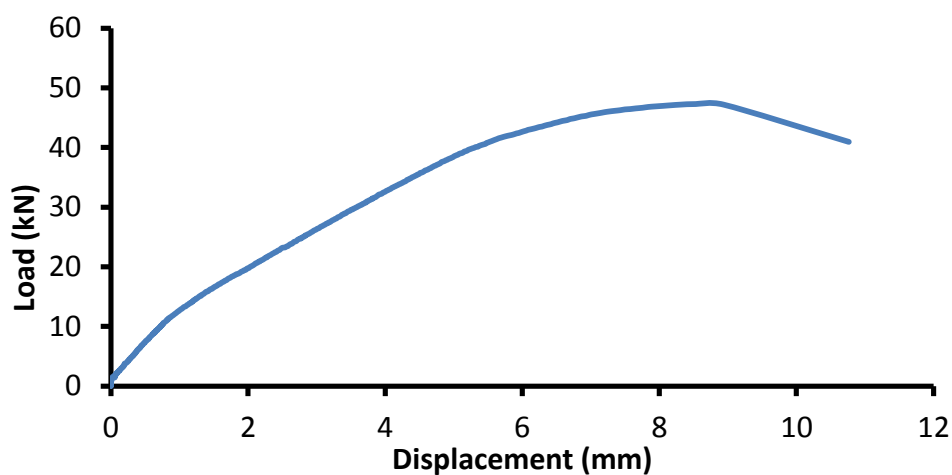


Αποτελέσματα		
P_{max}	106.55 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	14.15 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC2/15/2.5/VF06



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15.5	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	2.5		λόγος διάτμησης
a	32.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	8		αριθμός σκυροδέτησης

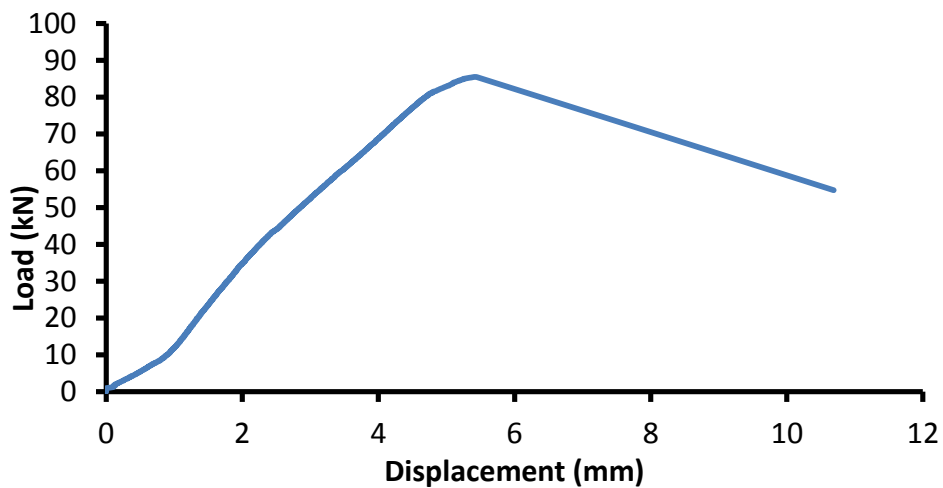


Αποτελέσματα		
P_{max}	47.29 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	19.19 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC3/15/0.8/VF06



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15.5	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	8		αριθμός σκυροδέτησης

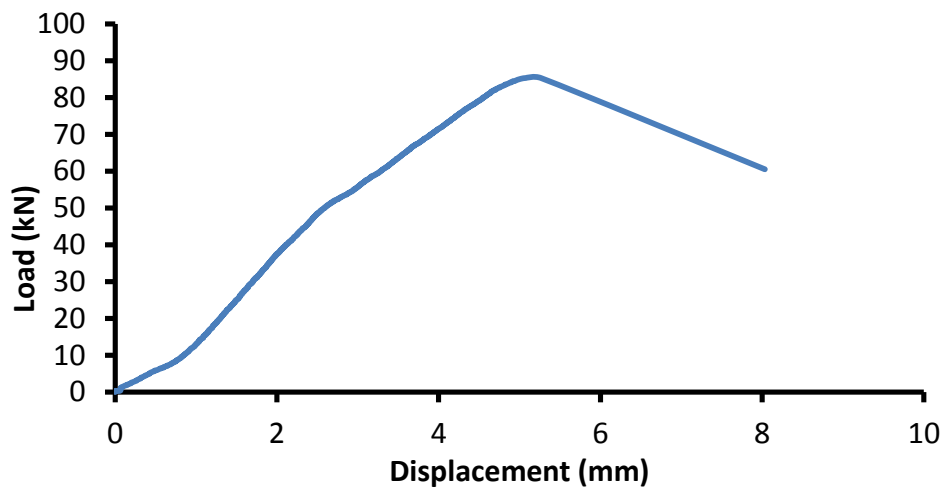


Αποτελέσματα		
P_{max}	85.43 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	11.20 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC1/20/0.8/VF06



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	5		αριθμός σκυροδέτησης

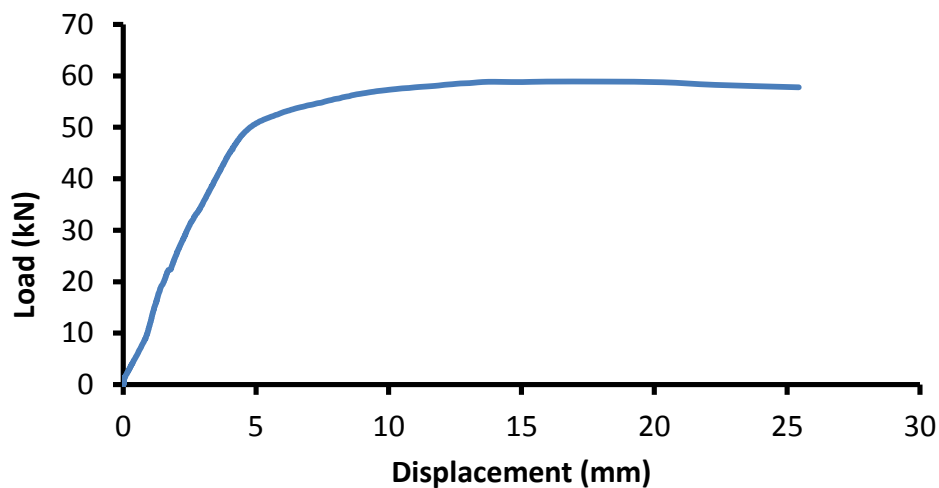


Αποτελέσματα		
P _{max}	85.3 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	8.70 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά του φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC2/20/2.5/VF06



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20.5	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	2.5		λόγος διάτμησης
a	42.5	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	2		αριθμός σκυροδέτησης

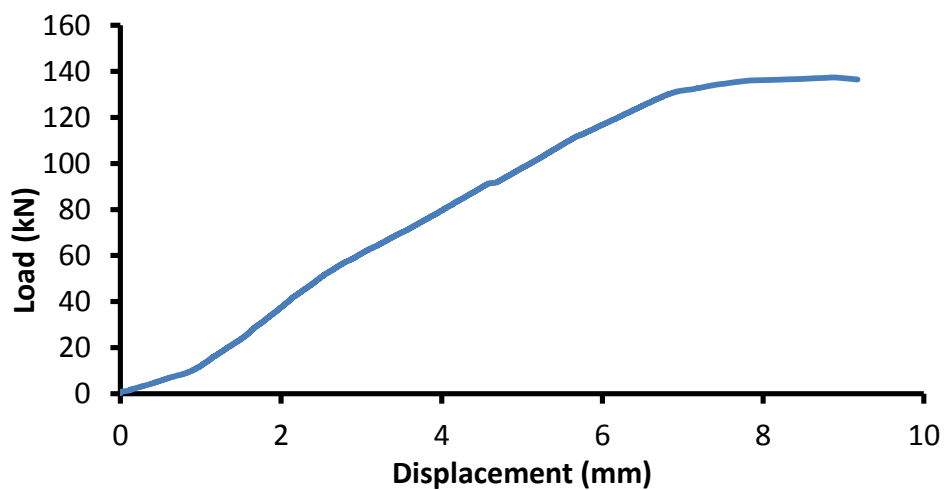


Αποτελέσματα		
P_{max}	58.89 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	17.87 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Καμπτοδιατμητική αστοχία	

Δοκίμιο BFRC3/20/0.8/VF06



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	2		αριθμός σκυροδέτησης



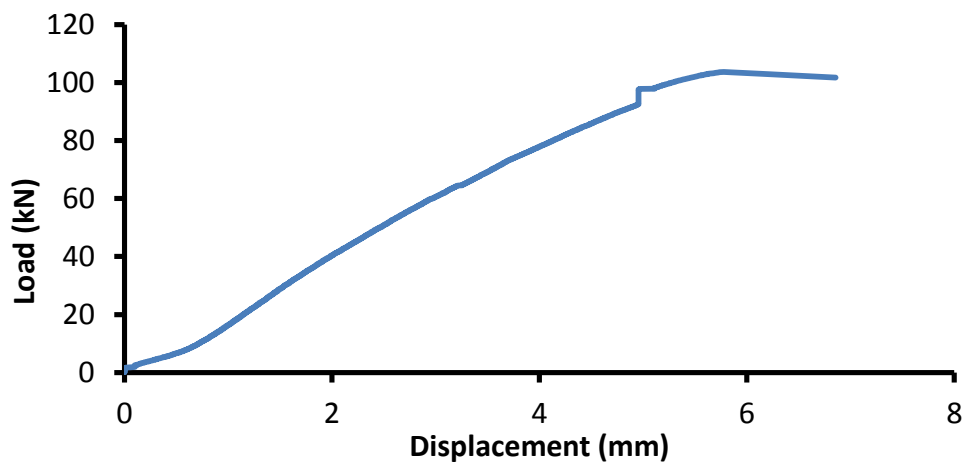
Αποτελέσματα		
P_{max}	137.37 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	14.01 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Αστοχία στην στήριξη λόγω εξάντλησης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος	

Δοκίμια VF1.2%

Δοκίμιο BFRC1/15/0.8/VF12



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15.5	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	1.2	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	9		αριθμός σκυροδέτησης

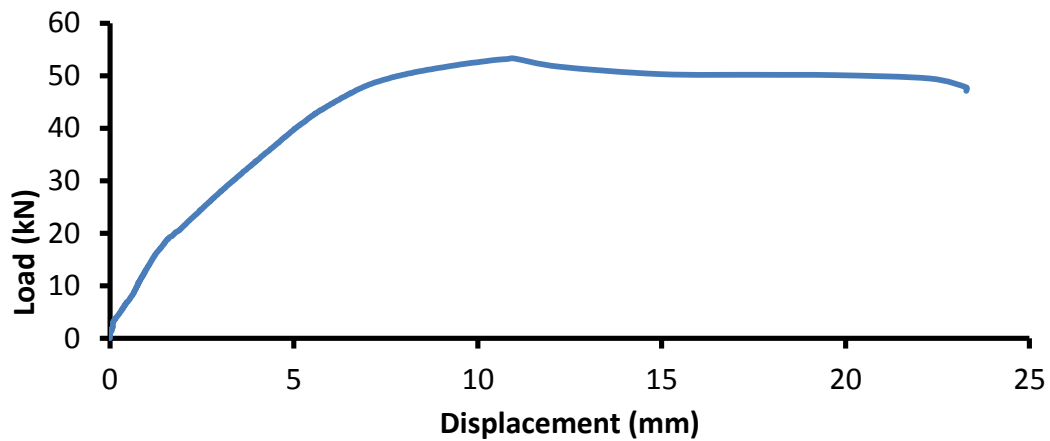


Αποτελέσματα		
P_{max}	106.98 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	14.03 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC2/15/2.5/VF12



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15.8	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	1.2	%	ποσοστό ινών
a/d	2.5		λόγος διάτμησης
a	32.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	9		αριθμός σκυροδέτησης

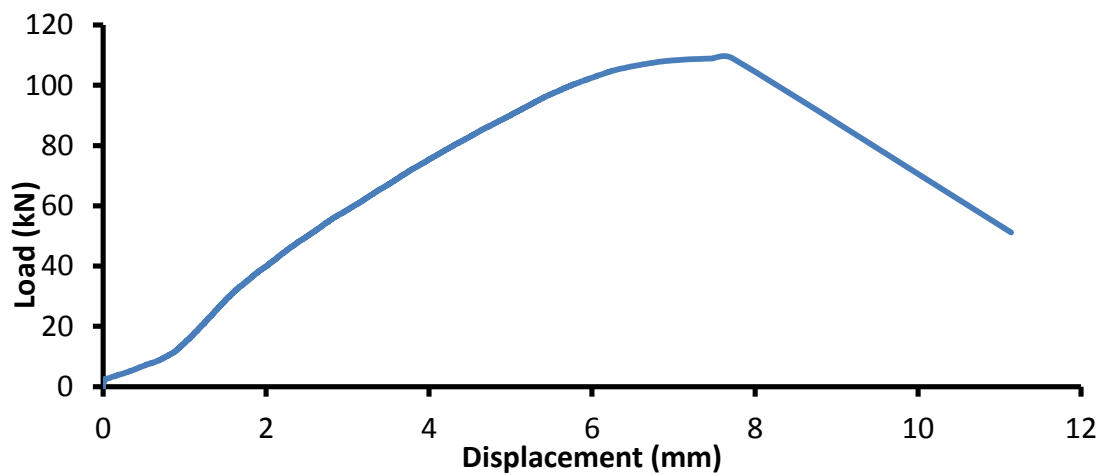


Αποτελέσματα		
P _{max}	53.28 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	20.81 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Καμπτοδιατμητική	

Δοκίμιο BFRC3/15/0.8/VF12



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15.3	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	1.2	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	6		αριθμός σκυροδέτησης

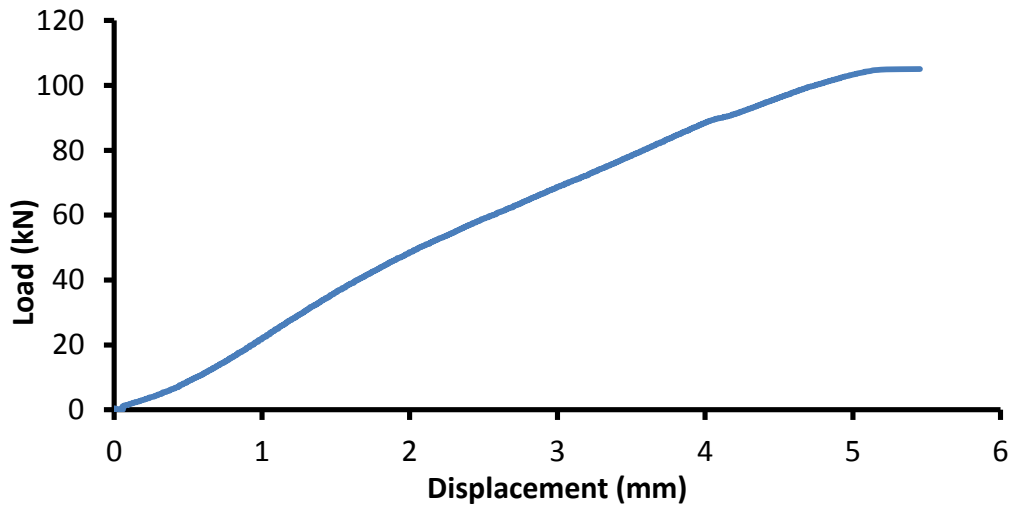


Αποτελέσματα		
P _{max}	108.98 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	14.66 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC1/20/0.8/VF12



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	1.2	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	6		αριθμός σκυροδέτησης

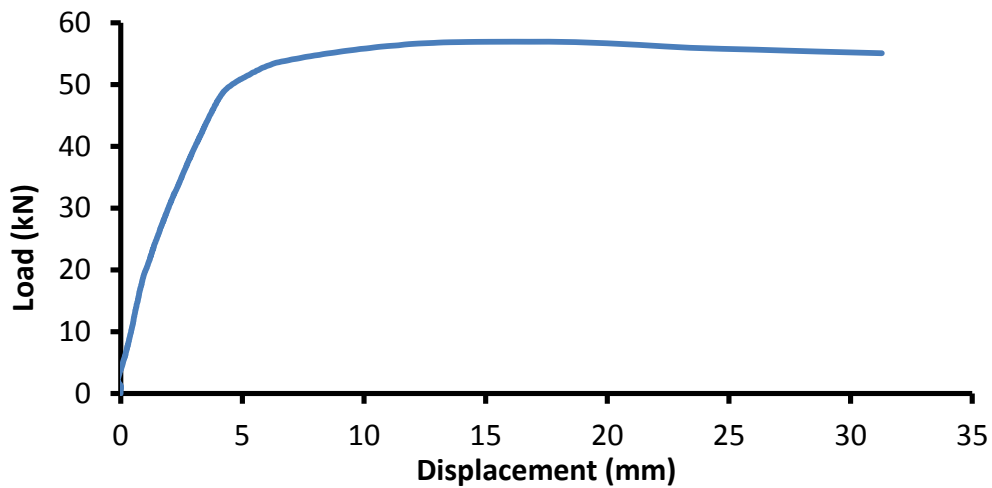


Αποτελέσματα		
P _{max}	105.03 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	10.71 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Αστοχία στην στήριξη λόγο εξάντλησης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος	

Δοκίμιο BFRC2/20/2.5/VF12



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	1.2	%	ποσοστό ινών
a/d	2.5		λόγος διάτμησης
a	42.5	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	3		αριθμός σκυροδέτησης

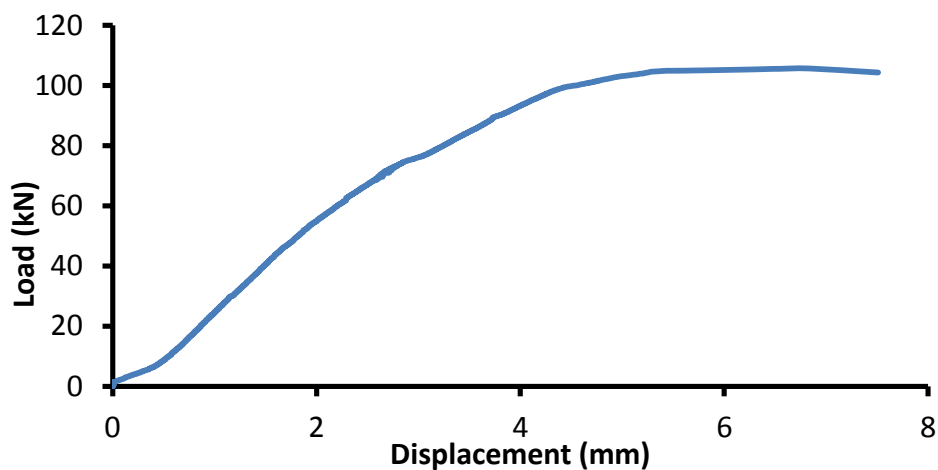


Αποτελέσματα		
P _{max}	56.93 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	18.15 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Καμπτική αστοχία	

Δοκίμιο BFRC3/20/0.8/VF12



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	1.2	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού
A/Σ	3		αριθμός σκυροδέτησης



Αποτελέσματα		
P _{max}	105.68 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	10.78 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Αστοχία στην στήριξη λόγο εξάντλησης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος	

4.1 Αποτελέσματα Δοκιμών Θλίψης-Διάρρηξης

4.1.1 Αποτελέσματα Δοκιμή Θλίψης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής Θλίψης. Για την εύρεση της Θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμίων.

Όνομασία Δοκιμίου	Αριθμός Σκυροδέτησης	Vf%	Φορτίο (KN)	Τάση (Μρα)	Μέση Τάση(Μρα)
ΚΥΒΟΣ 1	1	0.0%	647	28.76	29.16
ΚΥΒΟΣ 2	1	0.0%	665	29.56	
ΚΥΒΟΣ 3	4	0.0%	663	29.47	28.96
ΚΥΒΟΣ 4	4	0.0%	640	28.44	
ΚΥΒΟΣ 5	7	0.0%	814	36.18	36.20
ΚΥΒΟΣ 6	7	0.0%	815	36.22	
ΚΥΒΟΣ 7	2	0.6%	690	30.67	31.33
ΚΥΒΟΣ 8	2	0.6%	720	32.00	
ΚΥΒΟΣ 9	5	0.6%	677	30.09	30.00
ΚΥΒΟΣ 10	5	0.6%	673	29.91	
ΚΥΒΟΣ 11	8	0.6%	683	30.36	30.31
ΚΥΒΟΣ 12	8	0.6%	681	30.27	
ΚΥΒΟΣ 13	3	1.2%	672	29.87	30.98
ΚΥΒΟΣ 14	3	1.2%	722	32.09	
ΚΥΒΟΣ 15	6	1.2%	697	30.98	30.60
ΚΥΒΟΣ 16	6	1.2%	680	30.22	
ΚΥΒΟΣ 17	9	1.2%	722	32.09	31.87
ΚΥΒΟΣ 18	9	1.2%	712	31.64	

Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης

4.1.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Διάρρηξης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής διάρρηξης. Για την εύρεση της εφελκυστικής αντοχής χρησιμοποιούνται τα κυλινδρικά δοκίμια.

Ονομασία δοκιμίου	Αριθμός Σκυροδέτησης	Vf%	Φορτίο (KN)	Τάση (Mpa)	Μέση Τάση (Mpa)
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 1	2	0.6%	224	3.17	2.89
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 2	2	0.6%	185	2.62	
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 3	5	0.6%	199	2.82	2.70
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 4	5	0.6%	182	2.57	
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 5	8	0.6%	200	2.83	3.11
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 6	8	0.6%	240	3.40	
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 7	3	1.2%	275	3.89	4.00
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 8	3	1.2%	290	4.10	
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 9	6	1.2%	261	3.69	3.99
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 10	6	1.2%	303	4.29	
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 11	9	1.2%	312	4.41	4.18
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 12	9	1.2%	279	3.95	

Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμής διάρρηξης

4.2 Πείραμα 2ο

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του πειράματος κάμψης των δοκών, στο οποίο εξετάσαμε την επιρροή του ποσοστού ινών στην αντοχή των δοκών χωρίς την συμβολή του διατμητικού σπλισμού. Επειδή οι περισσότερες μορφές αστοχίας ήταν διατμητικές και εμφανίστηκαν κοντά στην περιοχή του διατμητικού σπλισμού, πραγματοποιήσαμε το ίδιο πείραμα, με την μοναδική διαφορά την προσθήκη επιπλέον διατμητικού σπλισμό. Τα δοκίμια με λόγο διάτμησης 0,8 ήταν αυτά που εμφάνισαν τις παραπάνω αστοχίες, για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν 2 X H15, 2 X H20 με ποσοστό ινών 0,6 % και υποβλήθηκαν στο πείραμα με τον παραπάνω λόγο διάτμησης. Με την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και την συλλογή των αποτελεσμάτων, είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε την τυχόν επιρροή του διατμητικού σπλισμού στην αντοχή των δοκών.



Εικόνα 22: Οπλισμός δοκού για το 2^ο πείραμα

4.2.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 2^{ου} Πειράματος

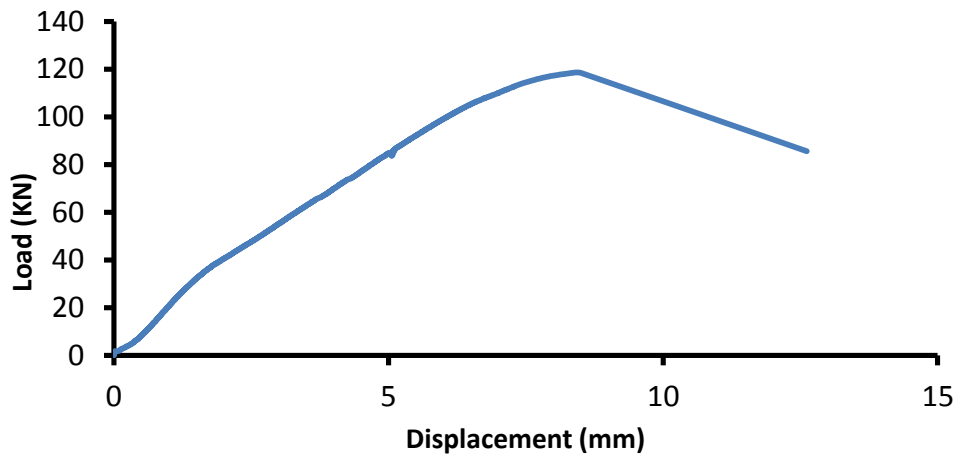
Για κάθε δοκό θα παρατίθεται μία εικόνα με την αστοχία της δοκού, ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά της, το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης της δοκού (P-δ) και στο τέλος της σελίδας ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά της αστοχίας της δοκού, ο οποίος θα περιέχει το μέγιστο φορτίο την, μέγιστη καμπτική αντοχή και την μορφή αστοχίας

Δοκίμιο BFRC1/15/08/VF06-2



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού

BFRC1/15/08/VF06-2



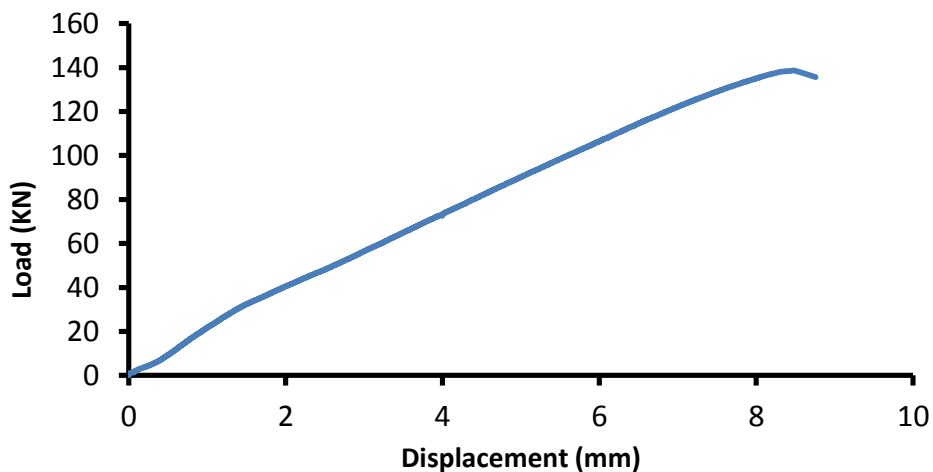
Αποτελέσματα		
P_{max}	118.6kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	16.60 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με μεταφορά φορτίου απευθείας στην στήριξη	

Δοκίμιο BFRC2/15/08/VF06-2



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	15	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V _f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	10.5	cm	διατμητικό μήκος
d	13	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού

BFRC2/15/08/VF06-2



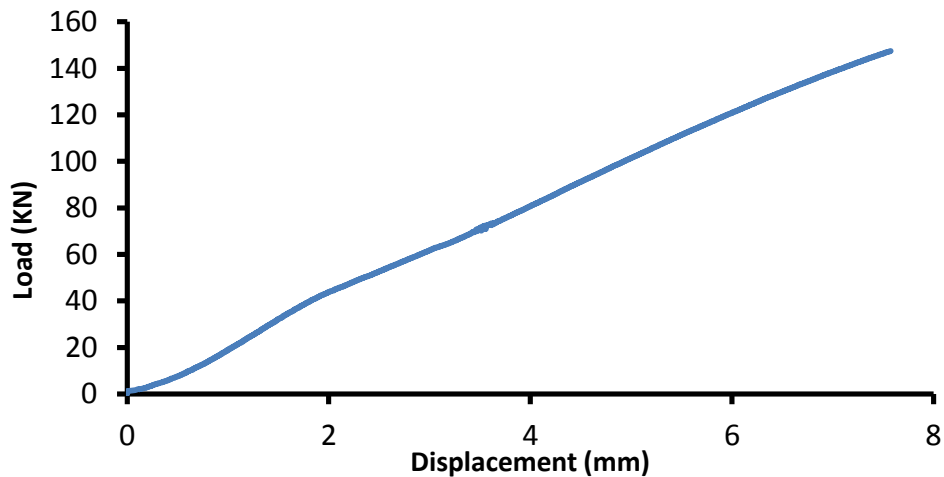
Αποτελέσματα		
P _{max}	138.59 kN	Μέγιστο φορτίο
σ _{max}	19.40 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Διατμητική αστοχία με εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στην περιοχή της στήριξης	

Δοκίμιο BFRC1/20/08/VF06-2



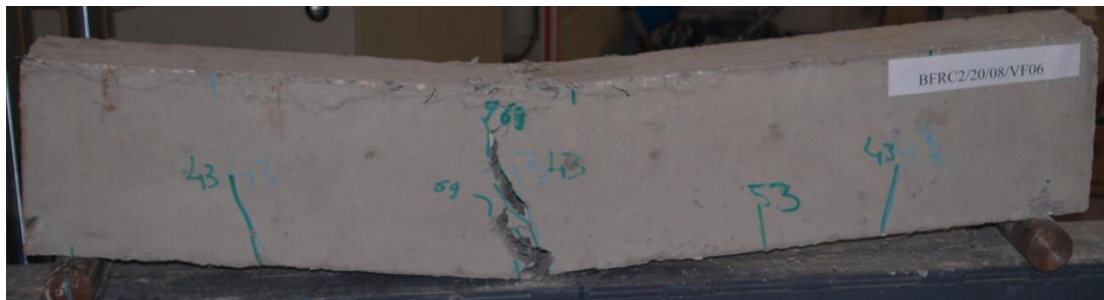
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού

BFRC1/20/08/VF06-2



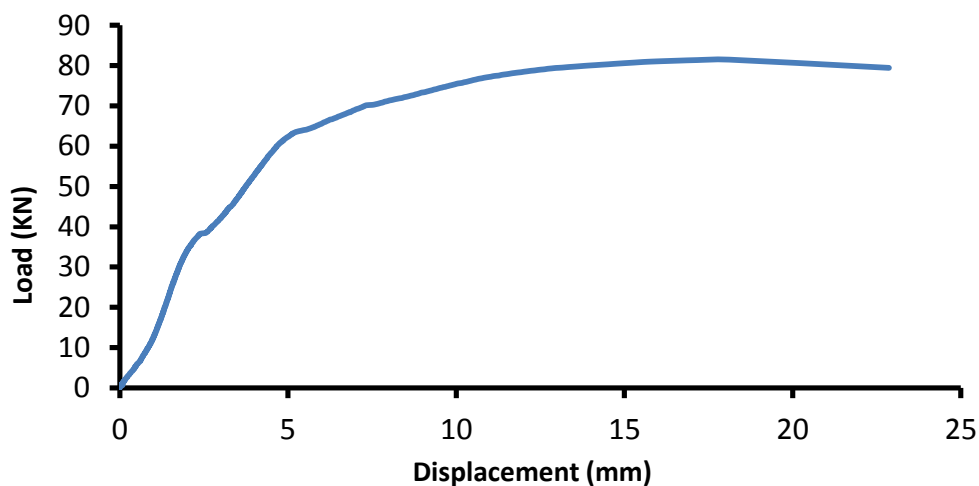
Αποτελέσματα		
P_{max}	147.44 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	15.04 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας	Δεν αστόχησε (η μηχανή δεν μπορούσε να επιβάλλει μεγαλύτερο φορτίο)	

Δοκίμιο BFRC2/20/08/VF06-2



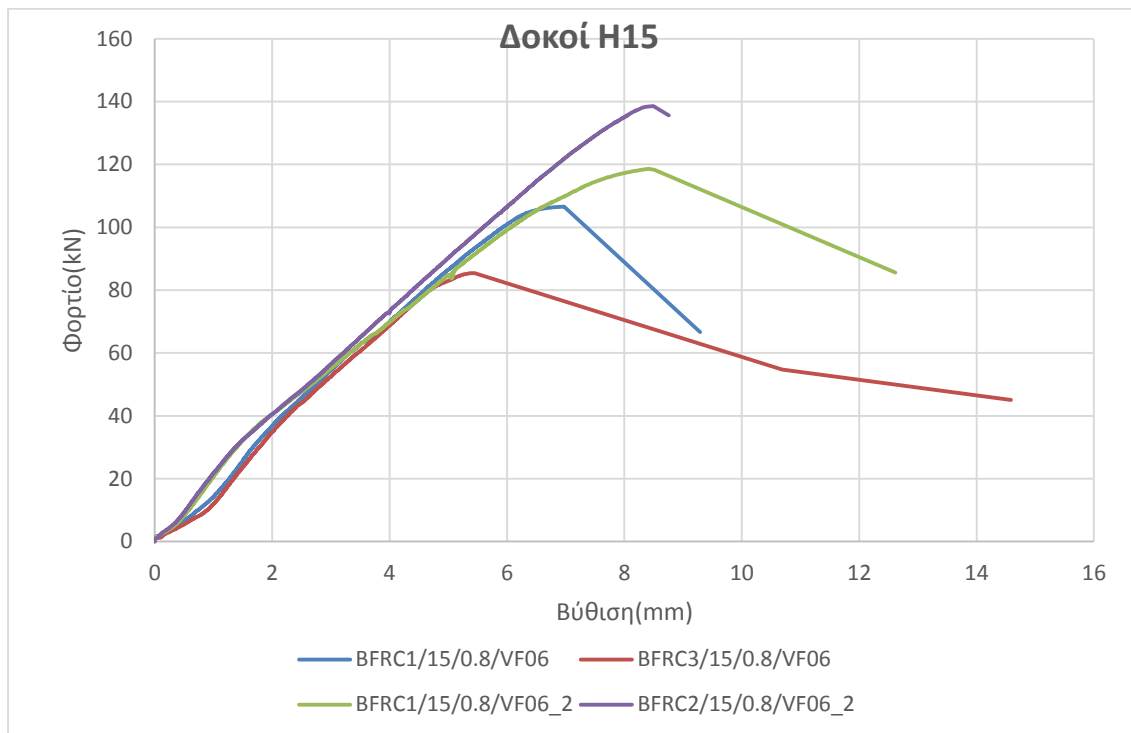
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ			
H	20	cm	ύψος
L	110	cm	μήκος
B	10	cm	πλάτος
V_f	0.6	%	ποσοστό ινών
a/d	0.8		λόγος διάτμησης
a	13.6	cm	διατμητικό μήκος
d	17	cm	στατικό ύψος
s	5	cm	απόσταση στήριξης από το άκρο της δοκού

BFRC2/20/08/VF06-2

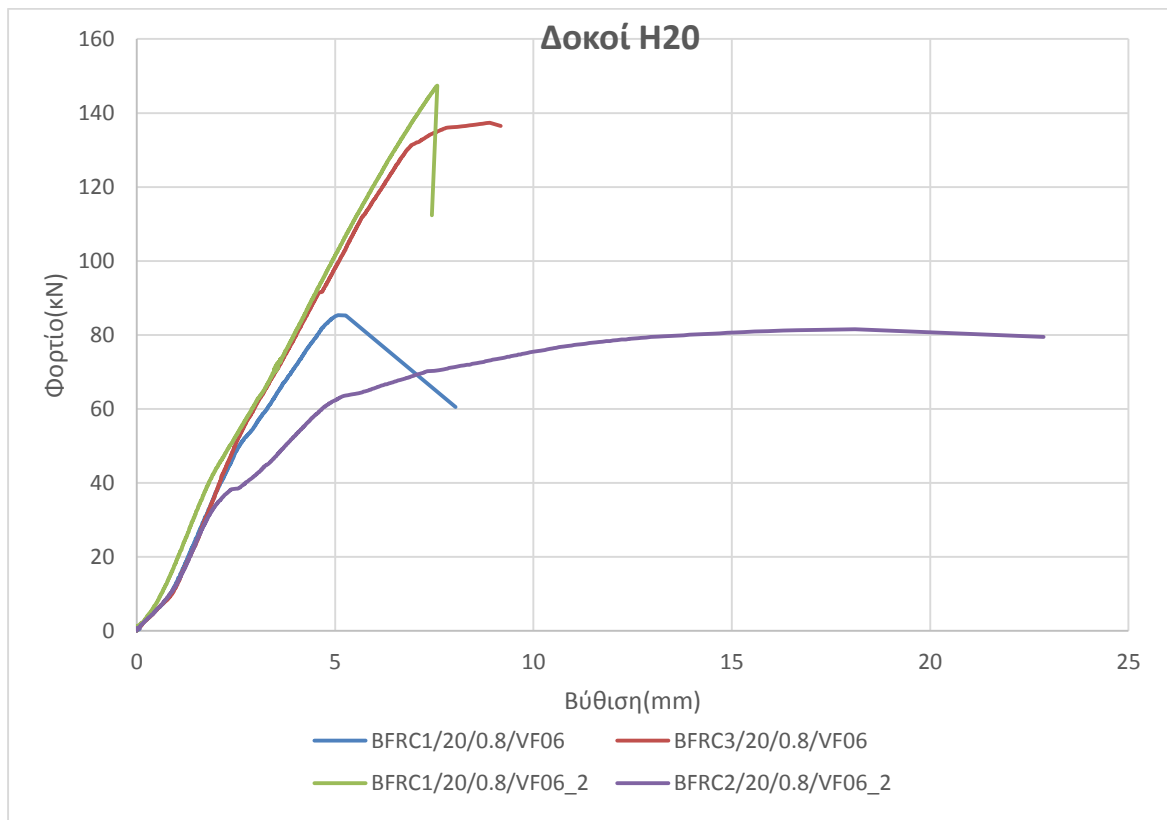


Αποτελέσματα		
P_{max}	81.49 kN	Μέγιστο φορτίο
σ_{max}	8.31 Mpa	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Μορφή αστοχίας		Καμπτική

4.3 Σύγκριση και Συμπεράσματα 2^{ου} Πειράματος



Διάγραμμα 6: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για τις δοκούς H15 των δύο πειραμάτων



Διάγραμμα 7: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για τις δοκούς H20 των δύο πειραμάτων

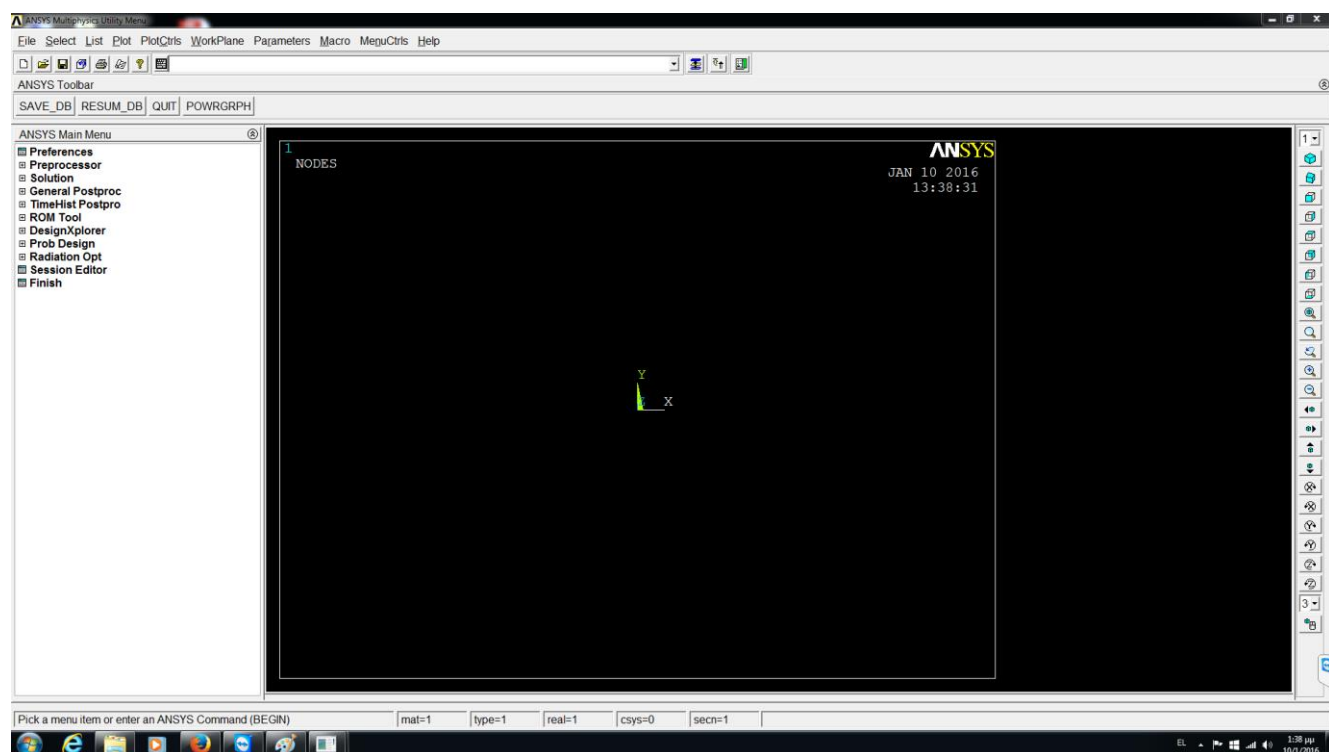
Από τα διαγράμματα σύγκρισης των δυο πειραμάτων καταλήγουμε στο ότι η επιρροή του διατμητικού οπλισμού είναι σημαντική και αναμφίβολα θετική στην αύξηση του μέγιστου φορτίου. Ειδικότερα οι δοκοί με ύψος 15cm μπόρεσαν και παρέλαβαν κατά μέσο όρο 33,96% περισσότερο μέγιστο φορτίο ενώ οι δοκοί με ύψος 20cm 2.81%. Οι δε βυθίσεις δεν επηρεάστηκαν συμπαντικά.

Κεφάλαιο 5

Ansys

5. ANSYS

Το ansys είναι ένα λογισμικό που επιτρέπει την ολοκληρωμένη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το εργαλείο αυτό μας επιτρέπει την δομική ανάλυση, γραμμική ή μη γραμμική επίλυση ενός μοντέλου-προβλήματος με μηχανικές εξισώσεις. Ένα από τα βασικά θετικά του προγράμματος είναι η ακριβής προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών και την εκάστοτε γεωμετρική αντίληψη του προβλήματος.



Εικόνα 23: Περιβάλλον χώρος του προγράμματος

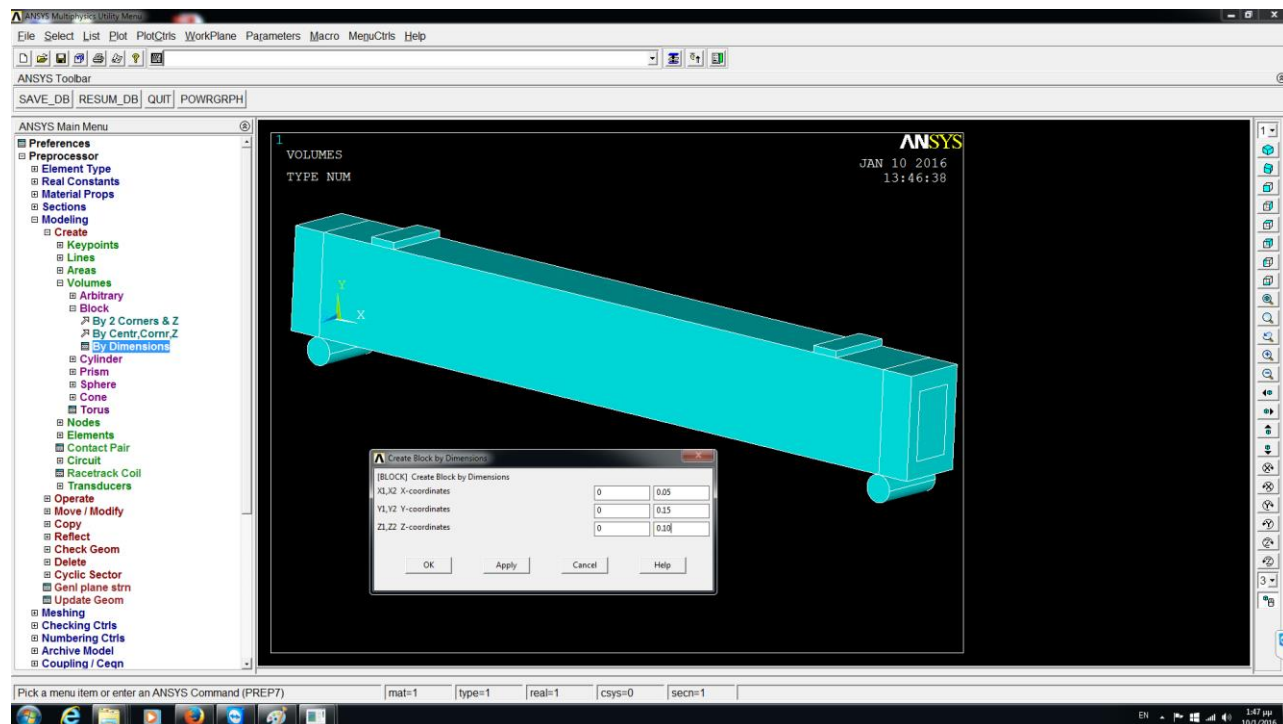
5.1 Modeling (προσομείωμα δοκών)

Για την θεωρητική ανάλυση των δοκών με πεπερασμένα στοιχεία προϋπόθεση αποτελεί η ακριβής προσομοίωση τους. Οι κύριοι άξονες της προσομοίωσης (model) είναι οι εξής:

α) Γεωμετρία της δοκού

Η δυνατότητα να σχεδιάσουμε την γεωμετρία των δοκών μας επιτρέπει να εισάγουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους αυτούσια από την πράξη στη οθόνη με οδηγούς τους άξονες X,Y,Z. Η κάθε δοκός σχεδιάστηκε λεπτομερές και ακριβές με τα όλα της τα γεωμετρικά στοιχεία όπως μήκος, πλάτος, ύψος, απόσταση στήριξης από το άκρο της δικού

(s), διατμητική απόσταση (α), στατικό ύψος (d) και διατμητικός σπλισμός. Στην παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται ενδεικτικά η σχεδιασμένη γεωμετρία ενός δοκού H15 με λόγο διάτμησης 0,8.



Εικόνα 24: Περιβάλλον χώρος του προγράμματος

β) Προσομείωμα υλικών (material models)

Ένα ακόμα μεγάλο σημείο της ανάλυσης είναι η προσομοίωση των υλικών. Οι υλικά που ενδιαφέρουν εμάς και πρέπει να γνωρίζουμε τις ιδιότητες τους είναι τα εξής :

- Το σκυρόδεμα χωρίς ίνες $V_f=0.0\%$
- Το σκυρόδεμα με ίνες $V_f=0.6\%$
- Το σκυρόδεμα με ίνες $V_f=1.2\%$
- Ο χάλυβας των σπλισμών

Οι βασικές ιδιότητες που έπρεπε να γνωρίζουμε και να εισάγουμε στο πρόγραμμα είναι το Μέτρο Ελαστικότητας και Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων(σ - ϵ). Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα θλίψης σε 2 κυλινδρικά δοκίμια με ίνες $V_f=0.0\%$, $V_f=0.6\%$ και $V_f=1.2\%$ αντίστοιχα και εφελκυσμού σε 3 χαλύβδινες ράβδους των σπλισμών φ8 και φ6.



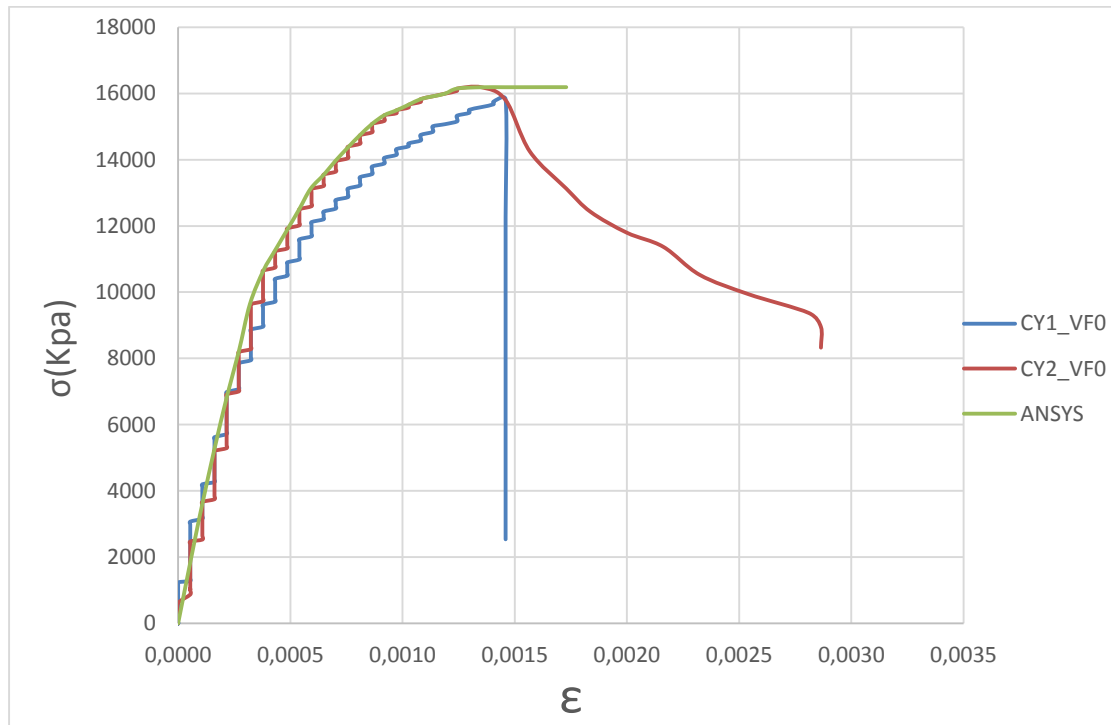
Εικόνα 25: Κύλινδρος έτοιμος για θλίψη, με την χρήση μηχανοστόμετρου καταγράφεται η βραχυνση



Εικόνα 26: Μηχανή εφελκυσμού ράβδων χάλυβα

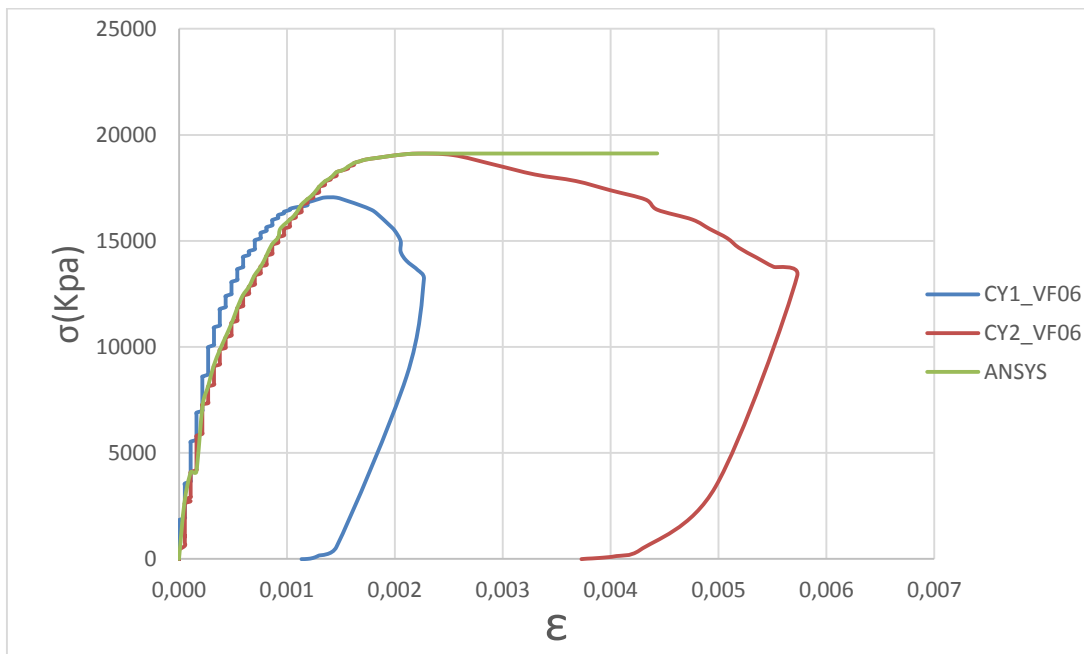
Από τα πειράματα αυτά προέκυψαν άμεσα τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων(σ - ϵ) και έμμεσα το Μέτρο Ελαστικότητας τους. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το σκυρόδεμα χωρίς ίνες $V_f=0\%$



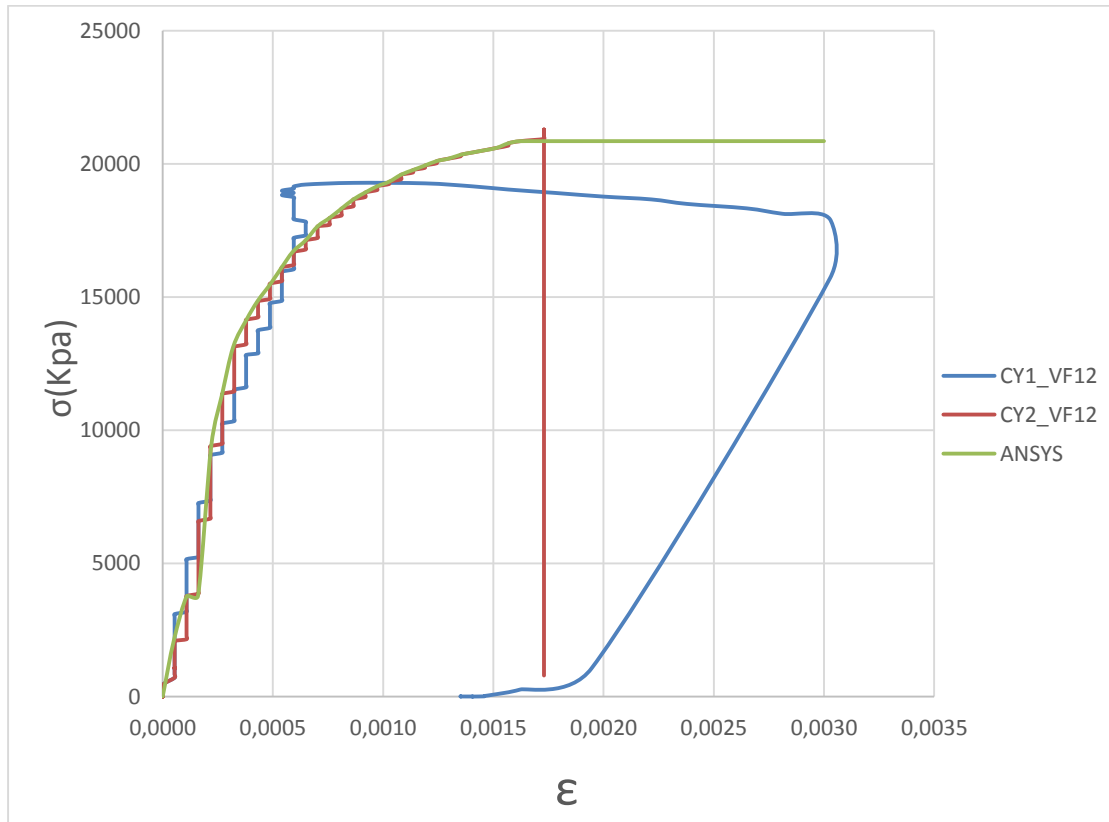
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος χωρίς ίνες $v_f=0\%$, απο το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών.

- Το σκυρόδεμα με ίνες Vf=0.6%



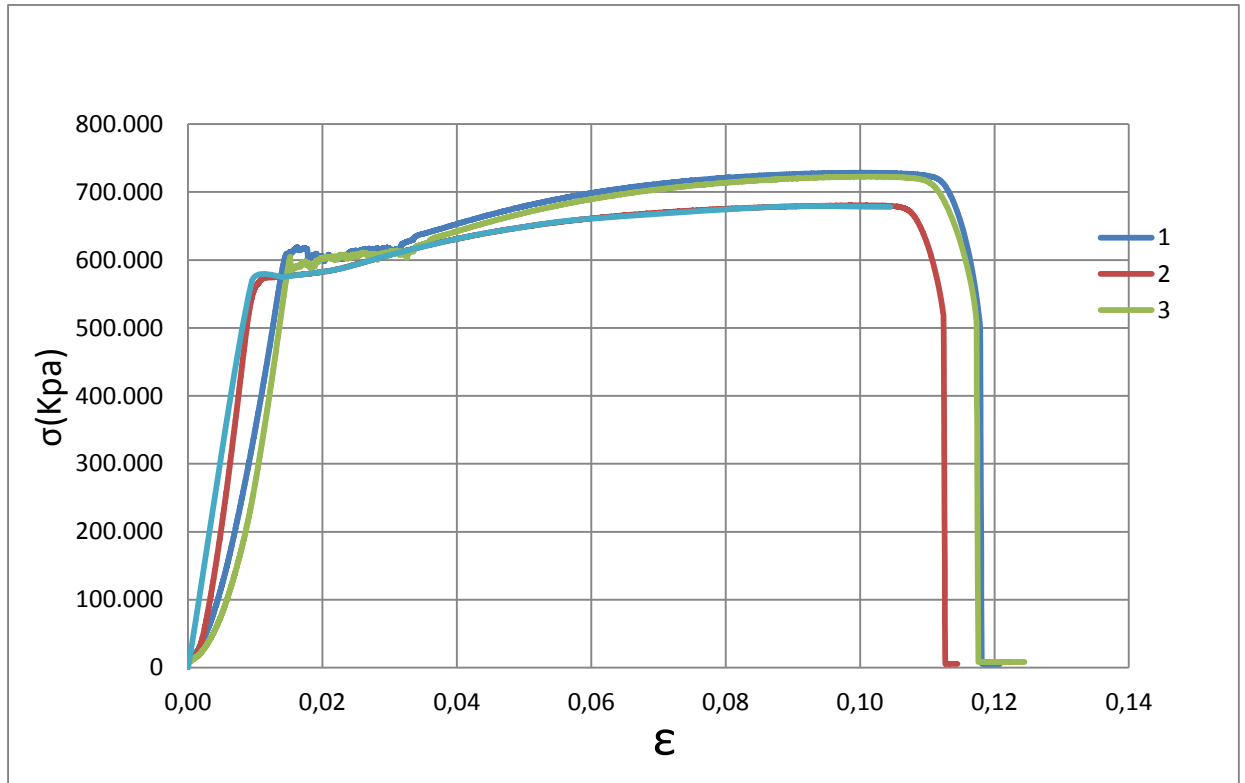
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος με ίνες $v_f=0.6\%$, απο το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών.

- Το σκυρόδεμα με ίνες Vf=1.2%



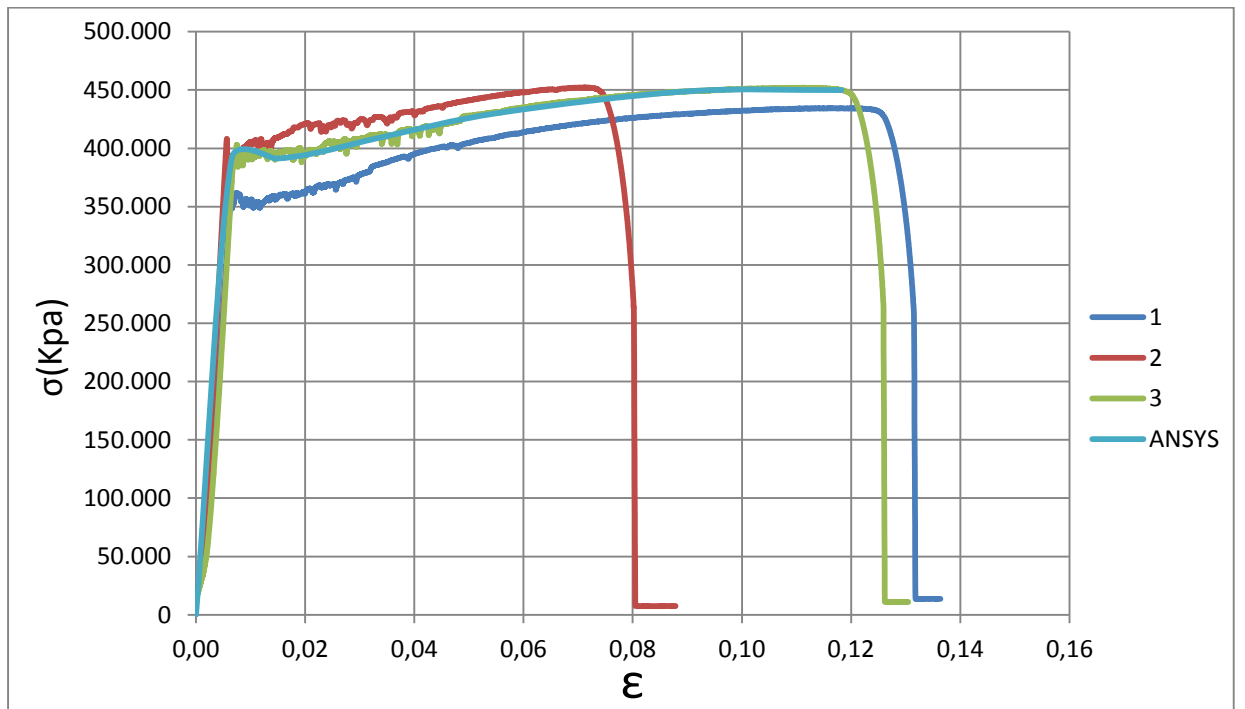
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος με ίνες $v_f=1.2\%$, απο το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών.

- Ο χάλυβας των οπλισμών φ8



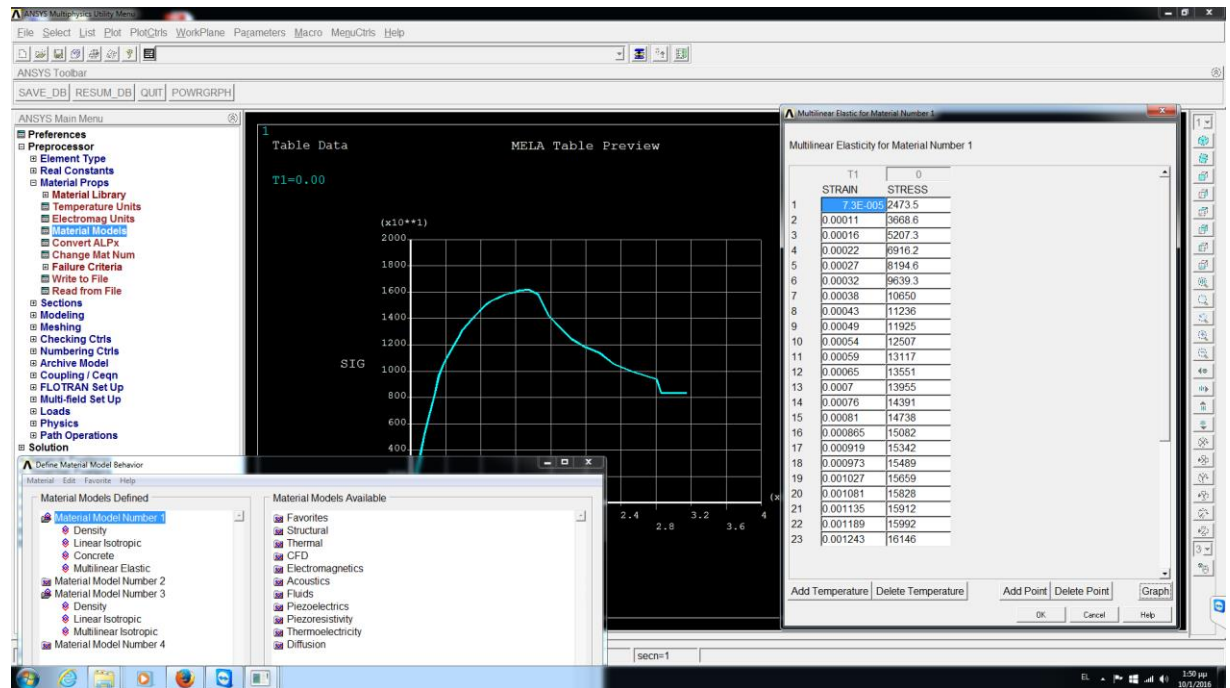
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα διαμέτρου $\Phi 8$, απο το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών.

- Ο χάλυβας των οπλισμών φ6

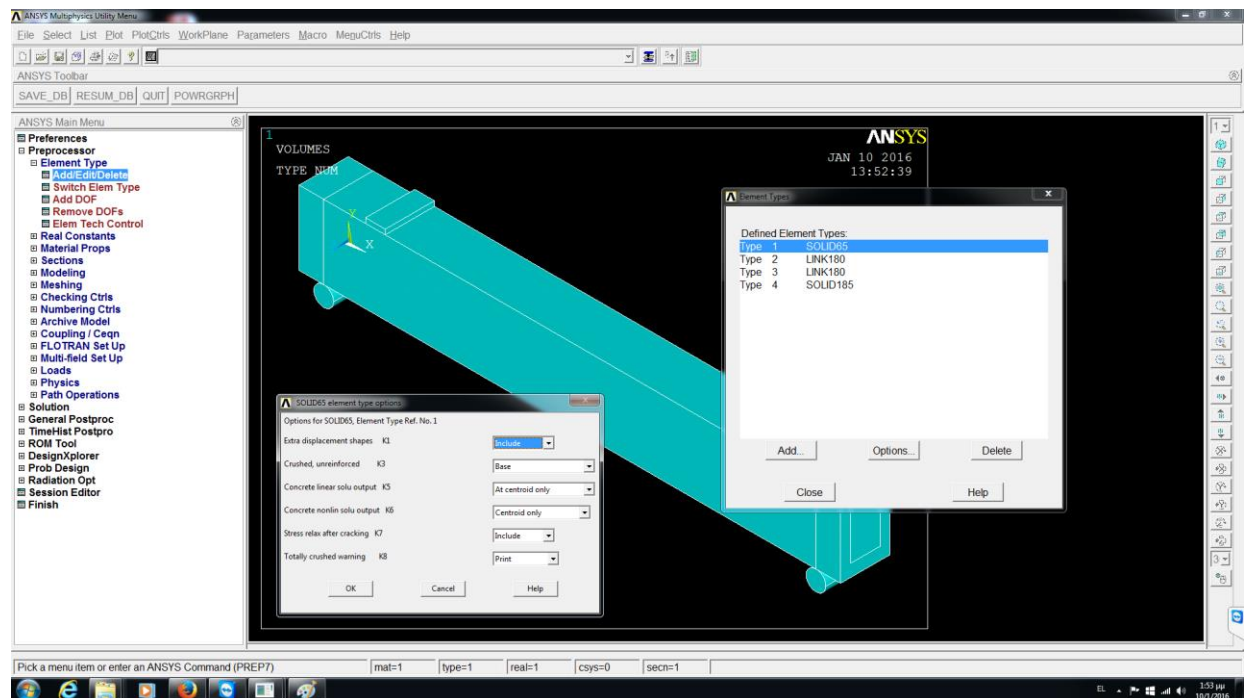


Διάγραμμα 12: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα διαμέτρου $\Phi 6$, απο το πείραμα μοντελοποίησης των πρώτων υλών.

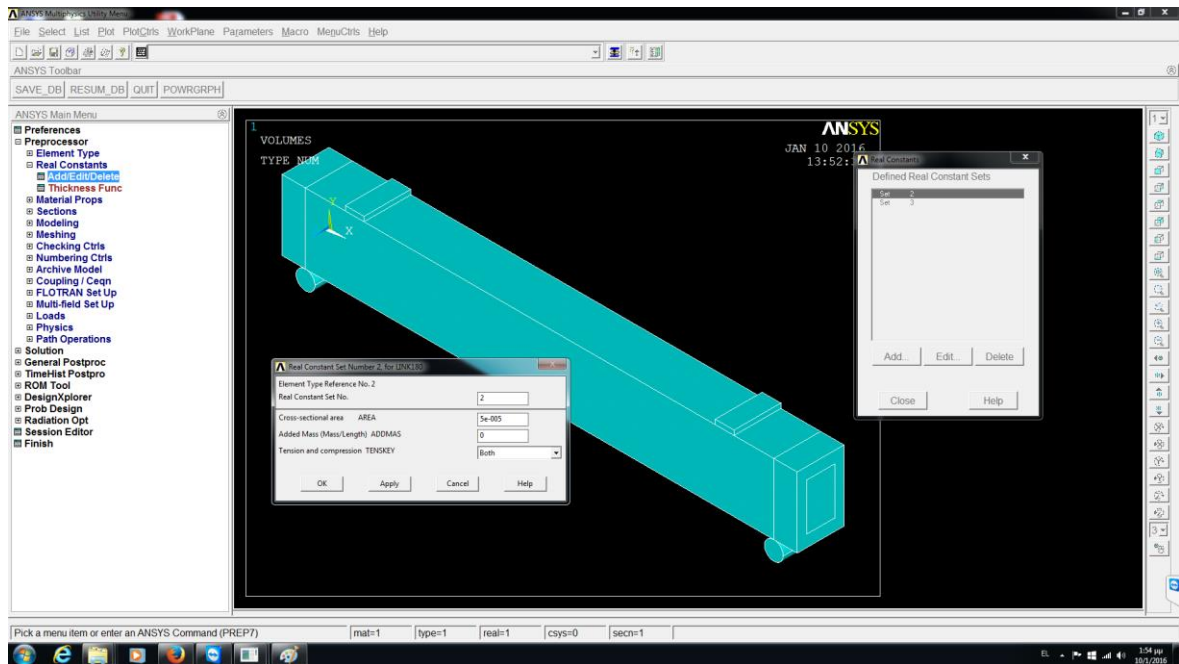
Παραδειγματικά στις επόμενες φωτογραφίες διακρίνεται ο τρόπος δημιουργίας ενός υλικού και η εισαγωγή του διαγράμματος σ-ε, οι ρυθμίσεις στις ιδιότητες των υλικών καθόλης της διάρκειας της ανάλυσης και ο καθορισμός της διαμέτρου του χάλυβα οπλισμού.



Εικόνα 27: Περιβάλλον προγράμματος, ρυθμίσεις των ιδιοτήτων του σκυροδέματος



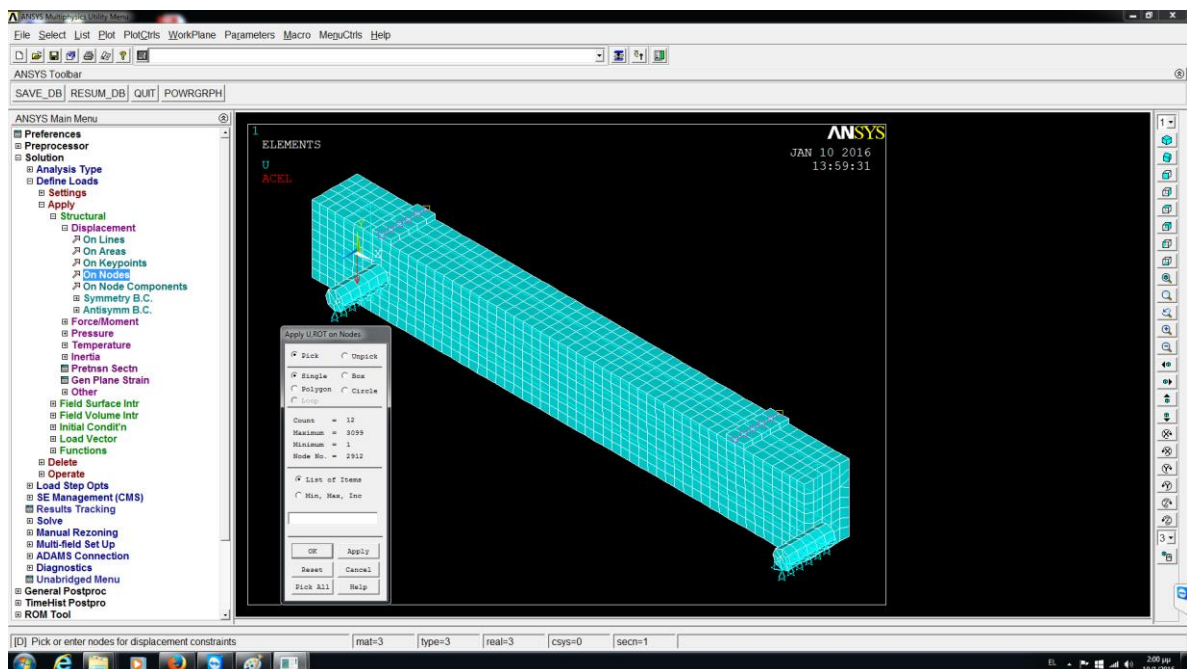
Εικόνα 28: Περιβάλλον προγράμματος, ρυθμίσεις των ιδιοτήτων του σκυροδέματος



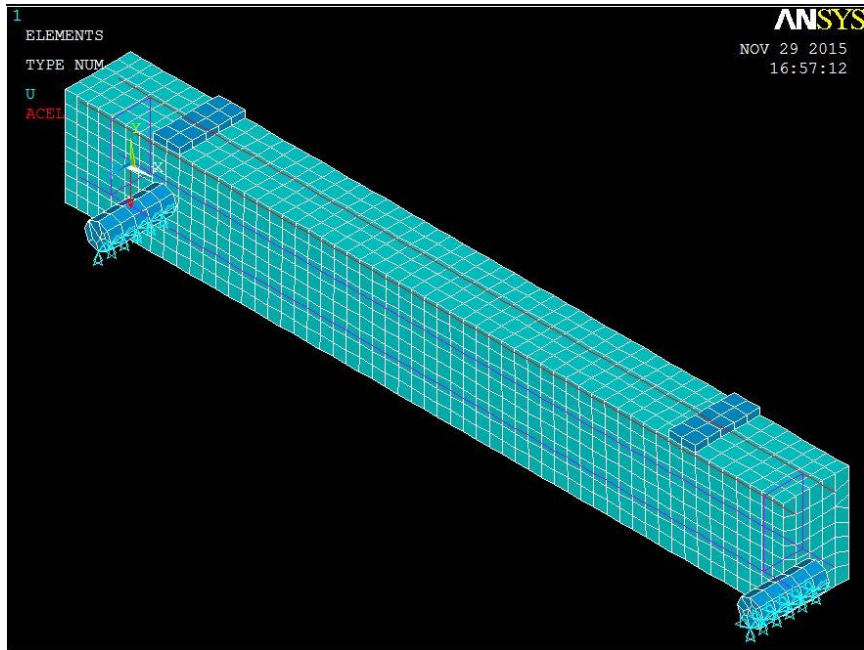
Εικόνα 29: Περιβάλλον προγράμματος, εισαγωγή της διαμέτρου του χάλυβα οπλισμού

γ) Η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρώικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Η αλληλοεπίδραση, στην συγκεκριμένη δοκιμή, των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται μέσω μηχανικών εξισώσεων όπως εξισώσεις ισορροπίας.



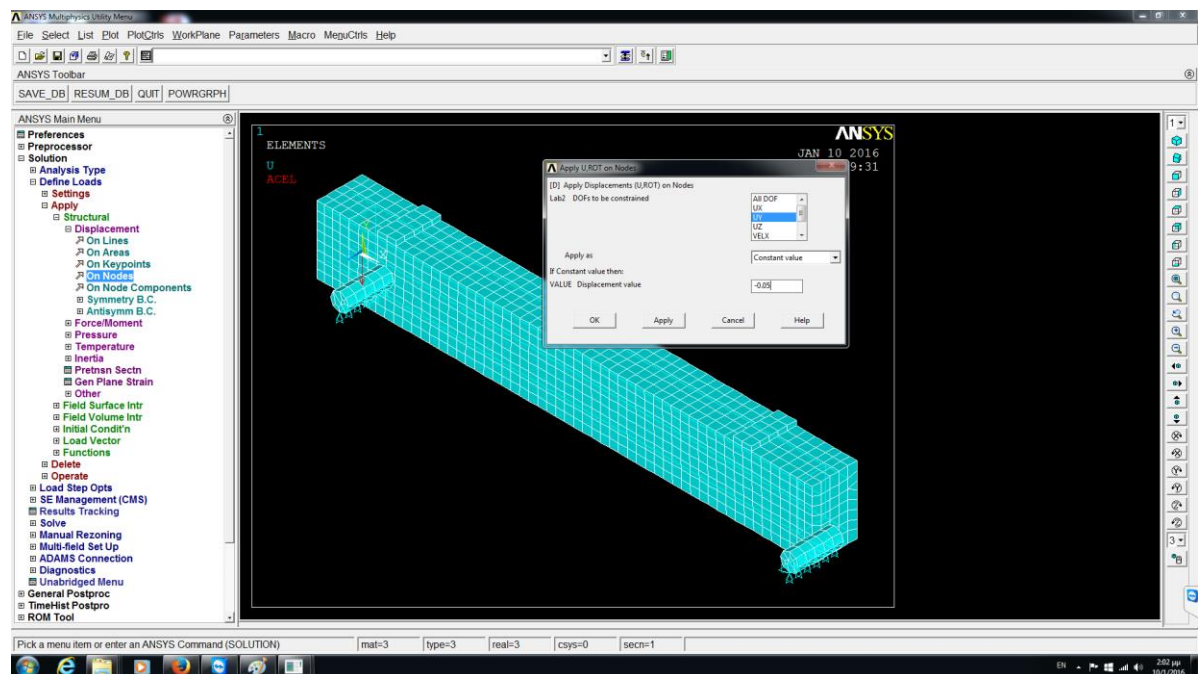
Εικόνα 30: Περιβάλλον προγράμματος, δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 31: Περιβάλλον προγράμματος, πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

δ) Επιβολή φορτίων

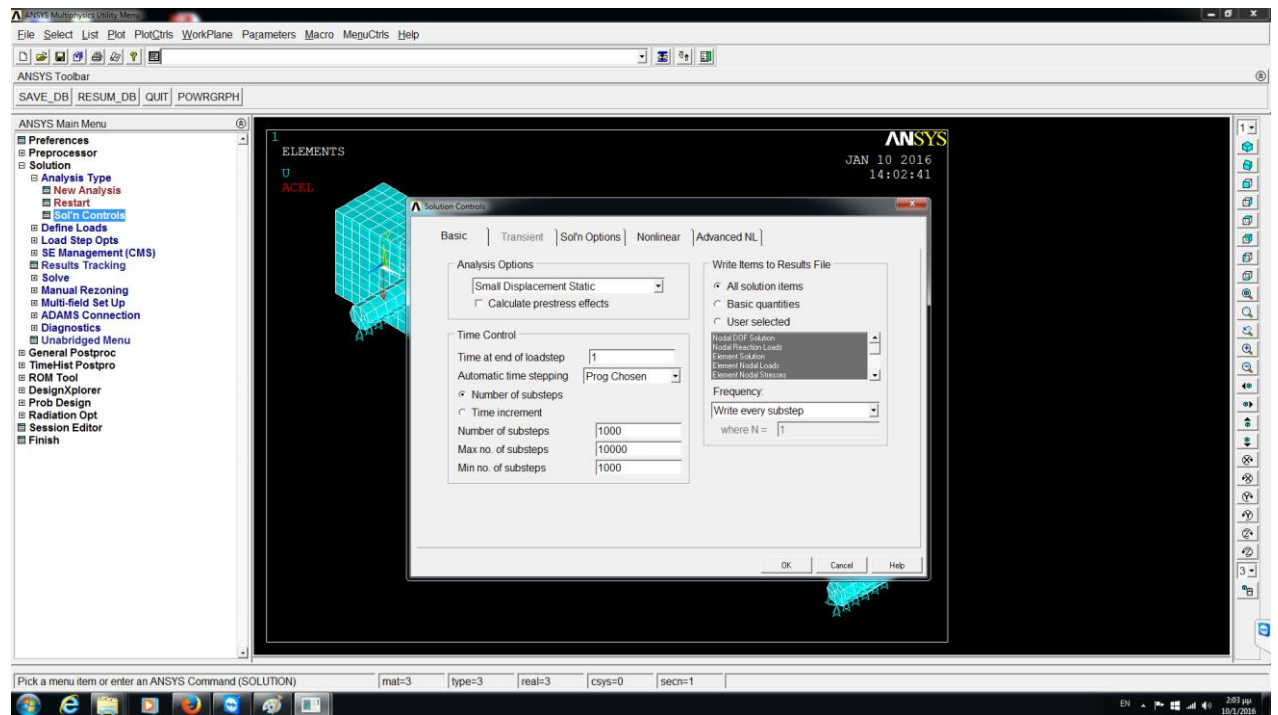
Η επιβολή των φορτίων γίνεται όπως έγινε στην πραγματικότητα. Οι πλάκες φορτιστής δέχονται μια μετακίνηση μεγάλη (5cm) ώστε να οδηγηθούμε στην αναμενομένη αστοχία της δοκού.



Εικόνα 32: Περιβάλλον προγράμματος, επιβολή μετακίνησης -0,05cm κατά άξονα Y

ε) ο τρόπος ανάλυσης(δυναμική ανάλυση)

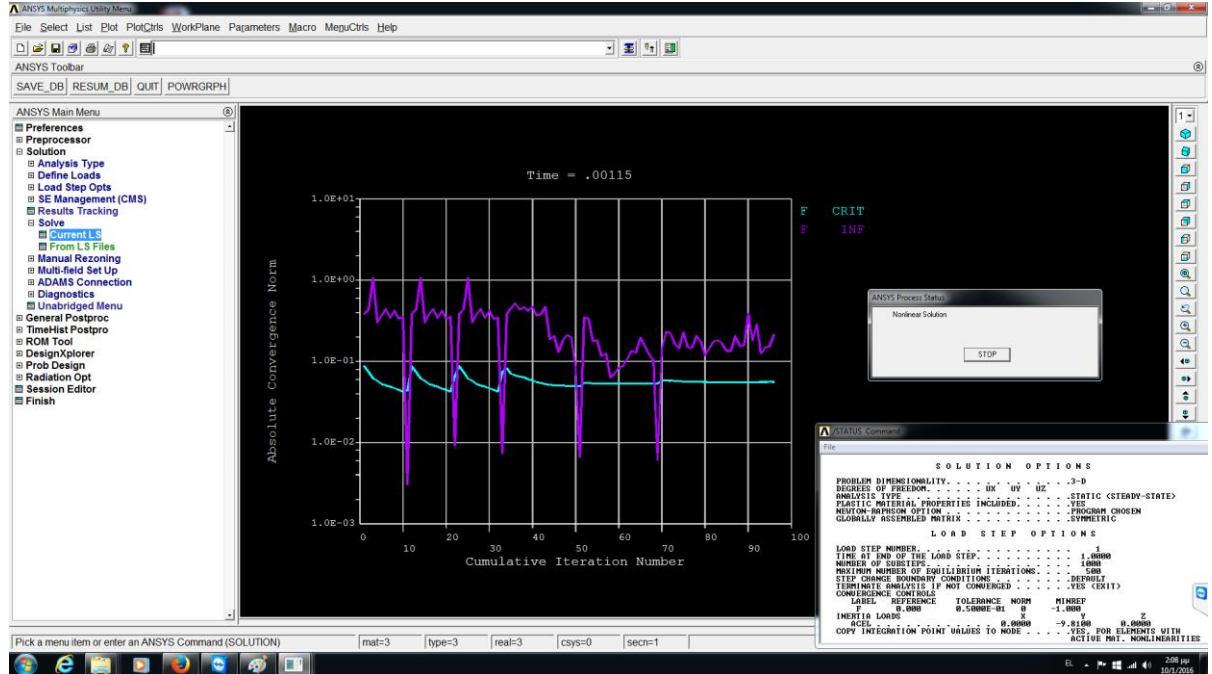
Η τρέση ανάλυσης είναι δυναμική ανάλυση γραμμική και μη γραμμική. Δηλαδή η επιβολή φορτίων και η παραμόρφωση της δοκού είναι συνάρτηση του χρόνου. Οι παράμετροι που ρυθμίζουν την ανάλυση είναι περίπλοκοι όπως ο χρόνος στο τέλος της επίλυσης, η καταγραφή των εκ τελεσθέντων βημάτων κ.α. τα οποία ρυθμίστηκαν βιάση του εγχειριδίου του προγράμματος.



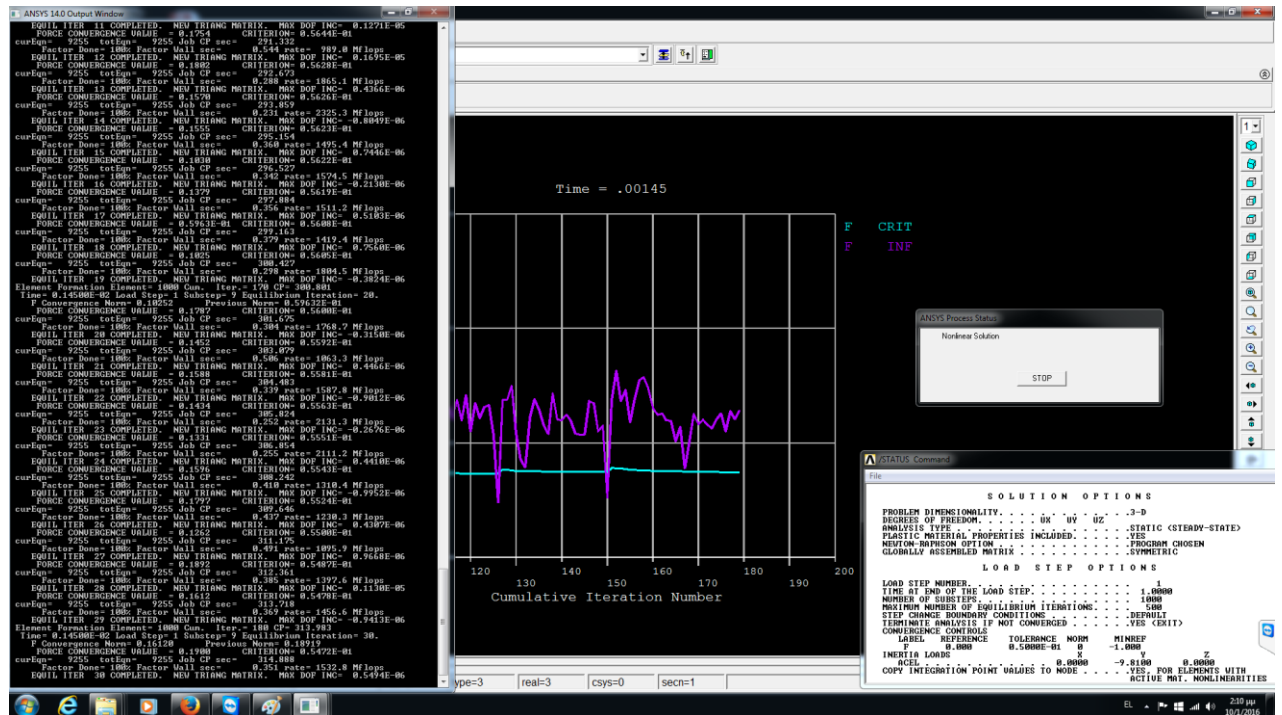
Εικόνα 33: Περιβάλλον προγράμματος, καθορισμός των παραγόντων της επίλυσης

στ') επίλυση

Η επίλυση σταματάει όταν η δοκός αστοχεί. Κατά την διάρκεια της επίλυσης καταγράφεται ο κώδικας με βάση του οποίου έγινε η επίλυση.



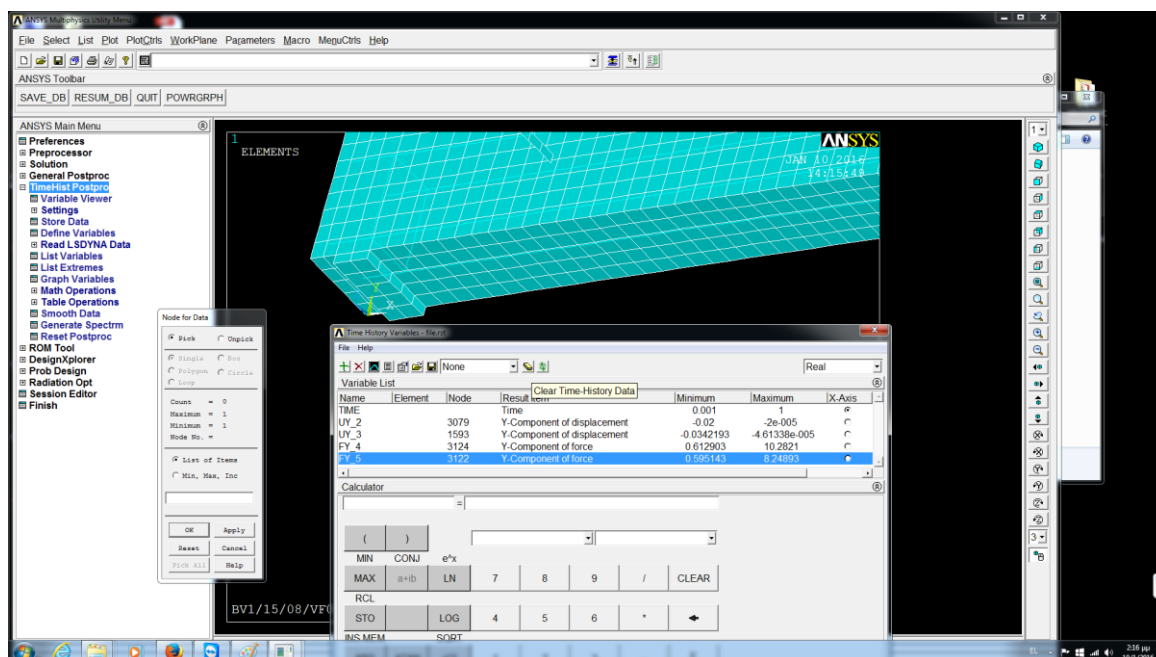
Εικόνα 34: Περιβάλλον προγράμματος, μη γραμμική ανάλυση



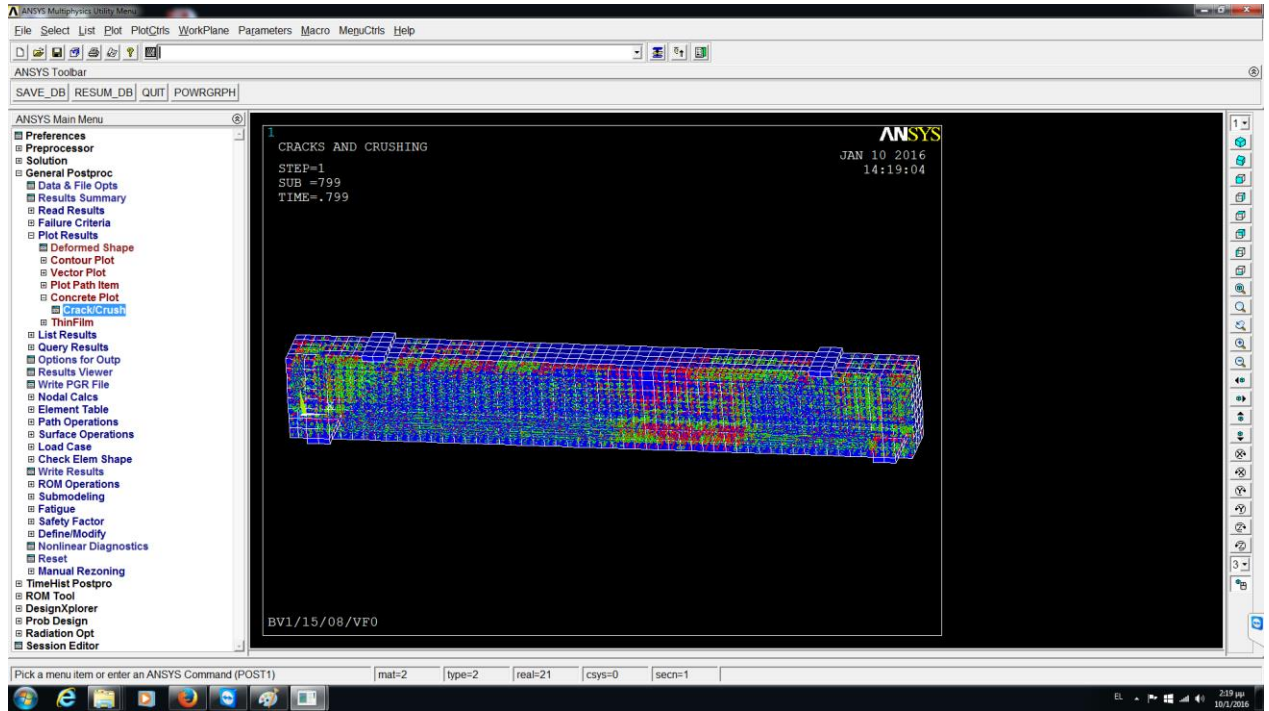
Εικόνα 35: Περιβάλλον προγράμματος, καταγραφή του κώδικα

ζ) συλλογή αποτελεσμάτων

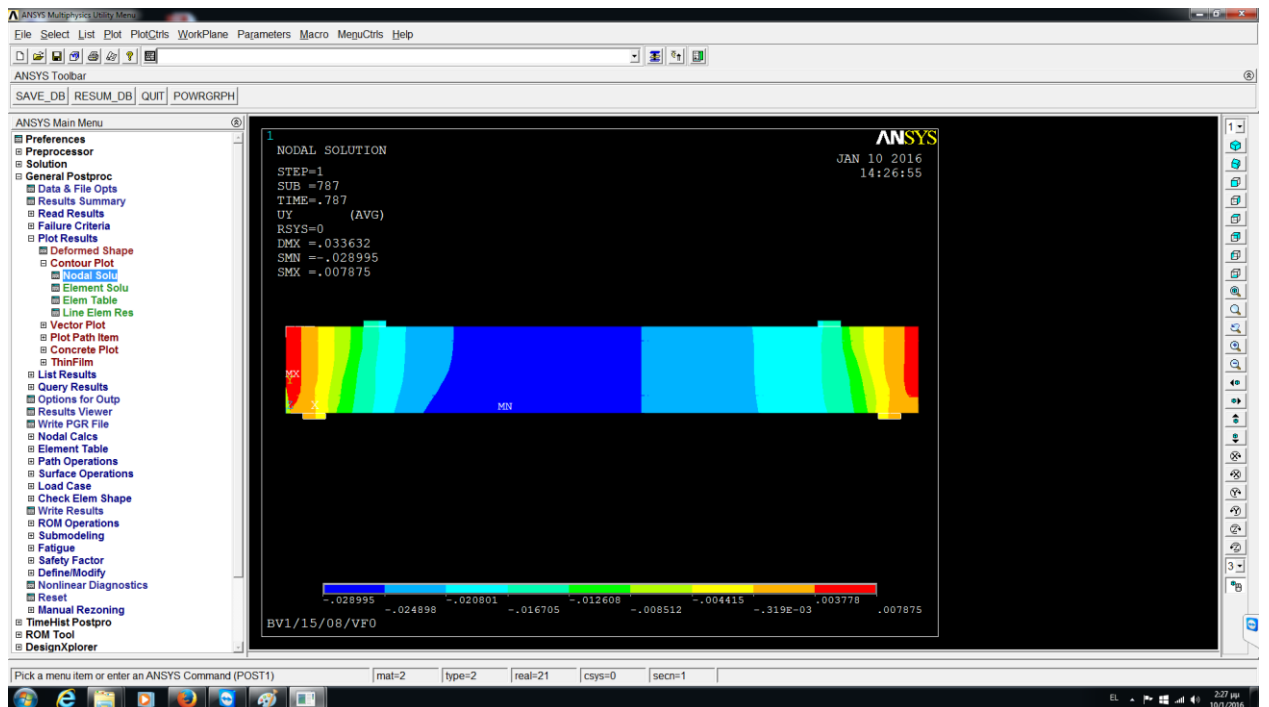
Με το πέρας της επίλυσης το επόμενο βήμα είναι η συλλογή των αποτελεσμάτων. Άπο το πρόγραμμα υπάρχει δυνατότητα να εξαγάγουμε έμμεσα το διάγραμμα φορτίου-βύθισης(στο μέσον). Έτσι για κάθε δοκό κατασκευάζεται το διάγραμμα αυτό που ουσιαστικά απεικονίζει την θεωρητικώς αναμενόμενη συμπεριφορά της δοκού. Άλλες πληροφορίες που μπορούμε να αντλήσουμε είναι ,η παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού στην αστοχία αλλά και σε κάθε χρονική στιγμή της επίλυσης, Οι ρωγμές στο σκυρόδεμα, οι εσωτερικές πιέσεις στην δοκό κ.α.



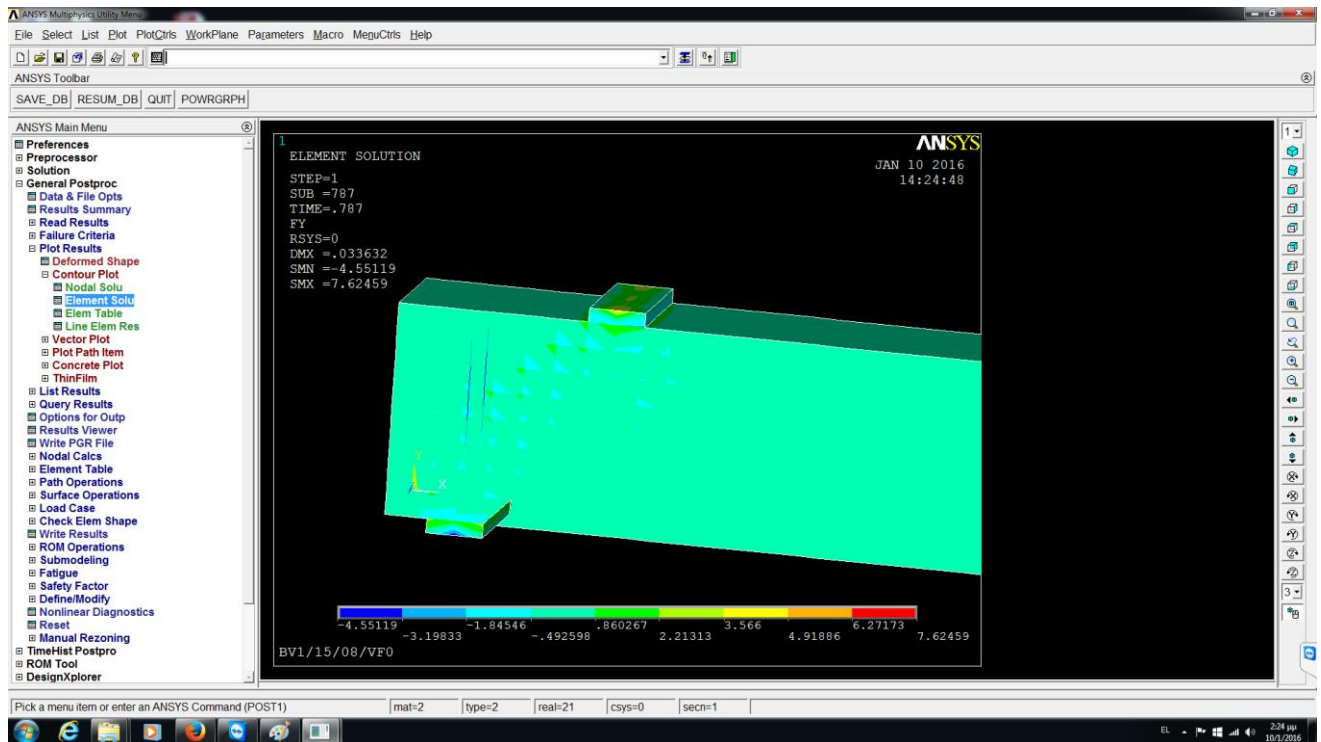
Εικόνα 36: Περιβάλλον προγράμματος, κατασκευή-εξαγωγή διαγραμμάτων



Εικόνα 37: Περιβάλλον προγράμματος, ρωγμές στο σκυρόδεμα



Εικόνα 38: Περιβάλλον προγράμματος, κατανομή παραμορφώσεων



Εικόνα 39: Περιβάλλον προγράμματος, κατανομή φορτίου

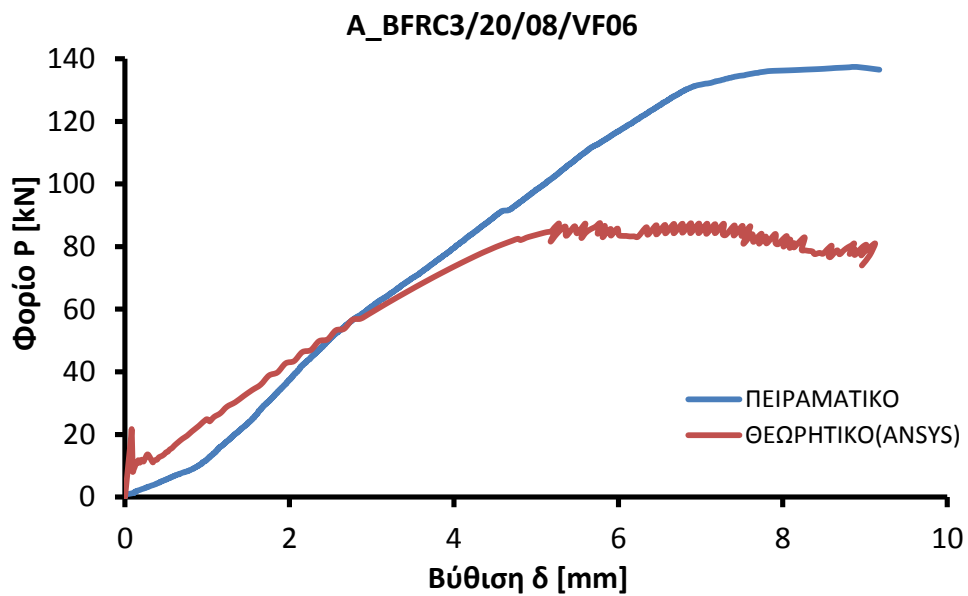
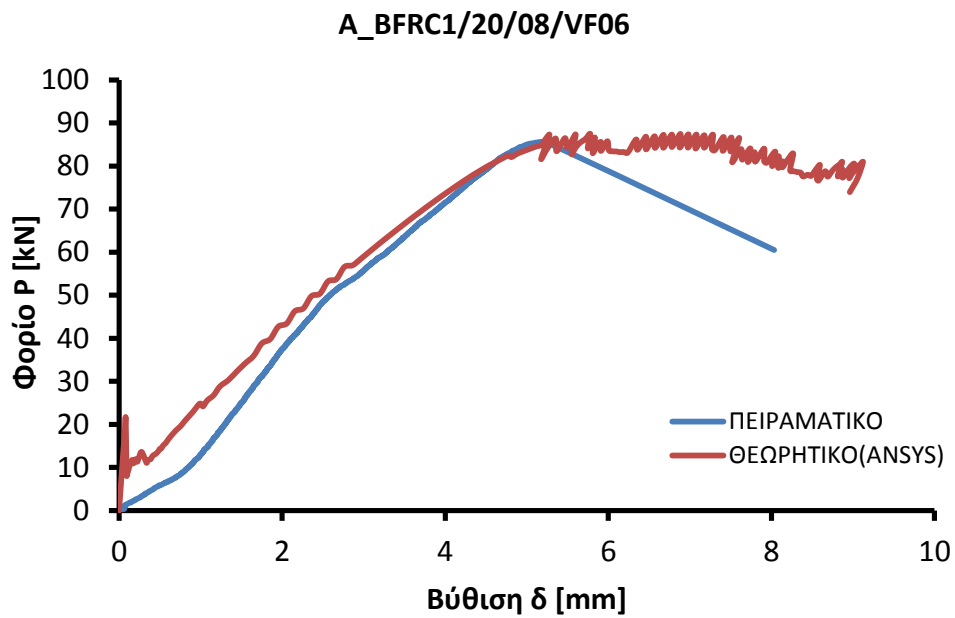
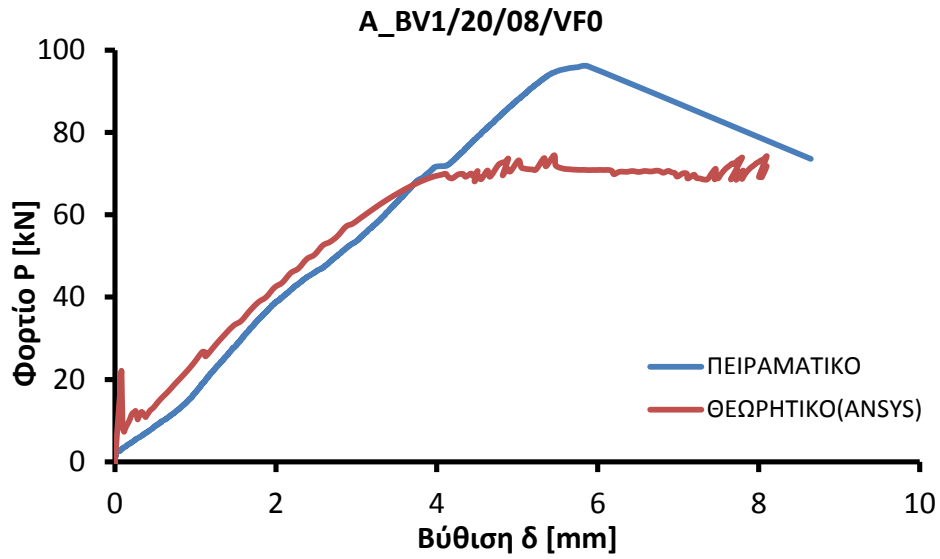
5.2 Παρουσίαση θεωρητικών αποτελεσμάτων

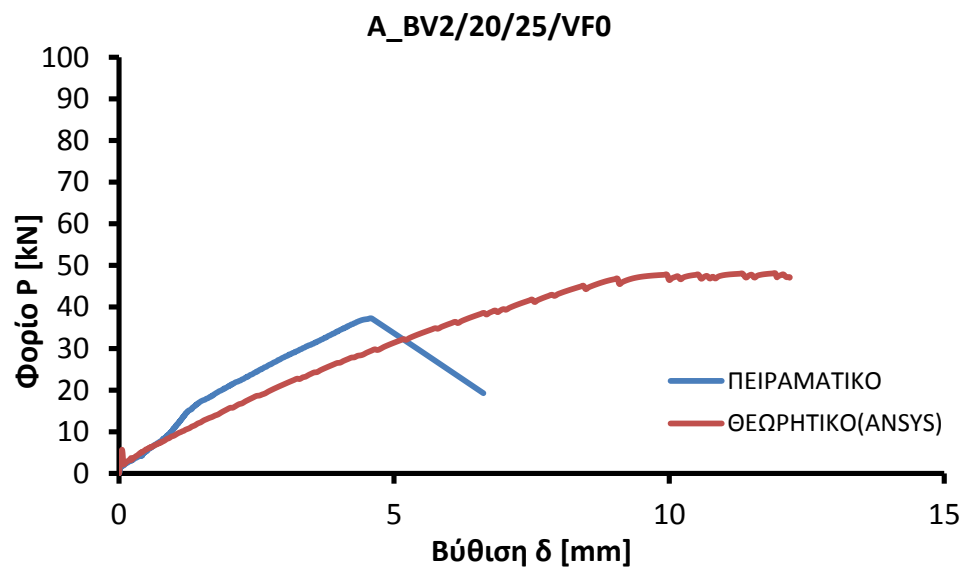
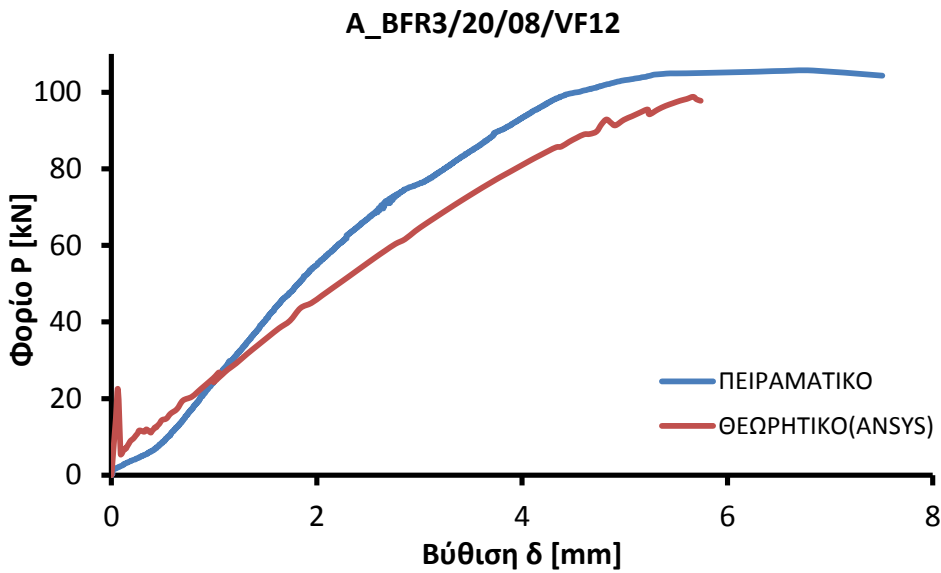
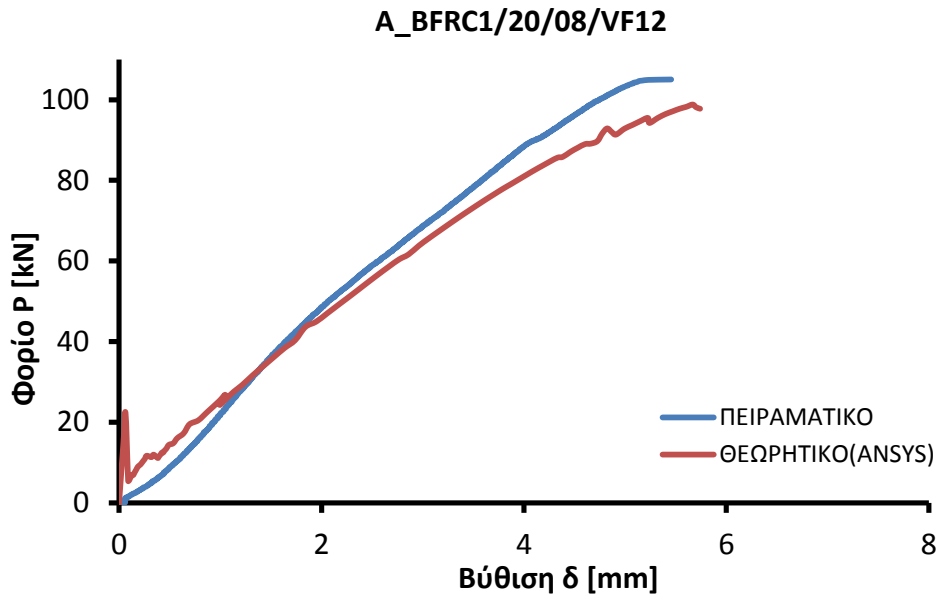
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές με το πρόγραμμα ANSYS. Αρχικά παρατίθενται οι πίνακες με τα χαρακτηριστικά των δοκιμών και τα αποτελέσματά τους, στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-βέλους κάμψης για κάθε εκ τελεσθείσα δοκιμή.

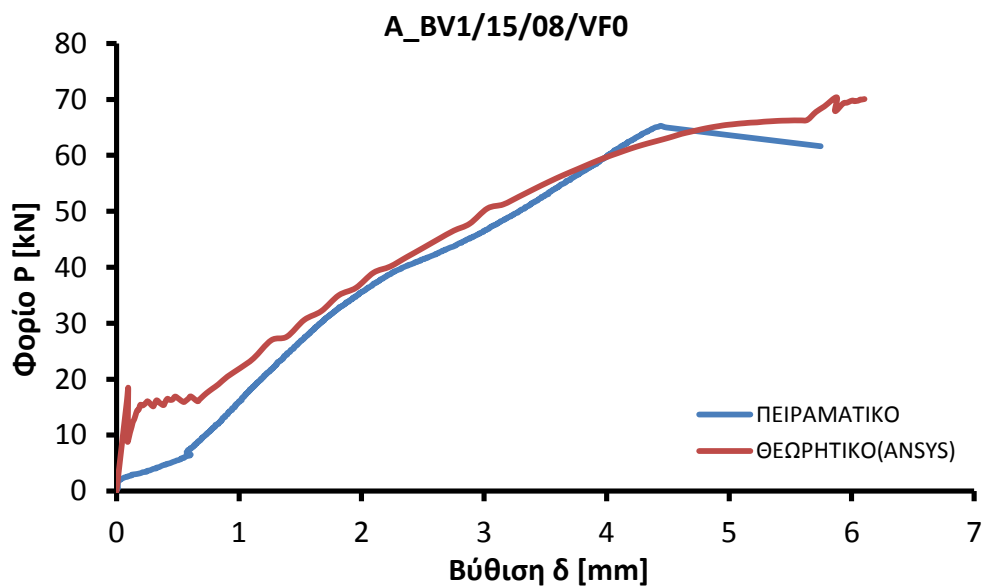
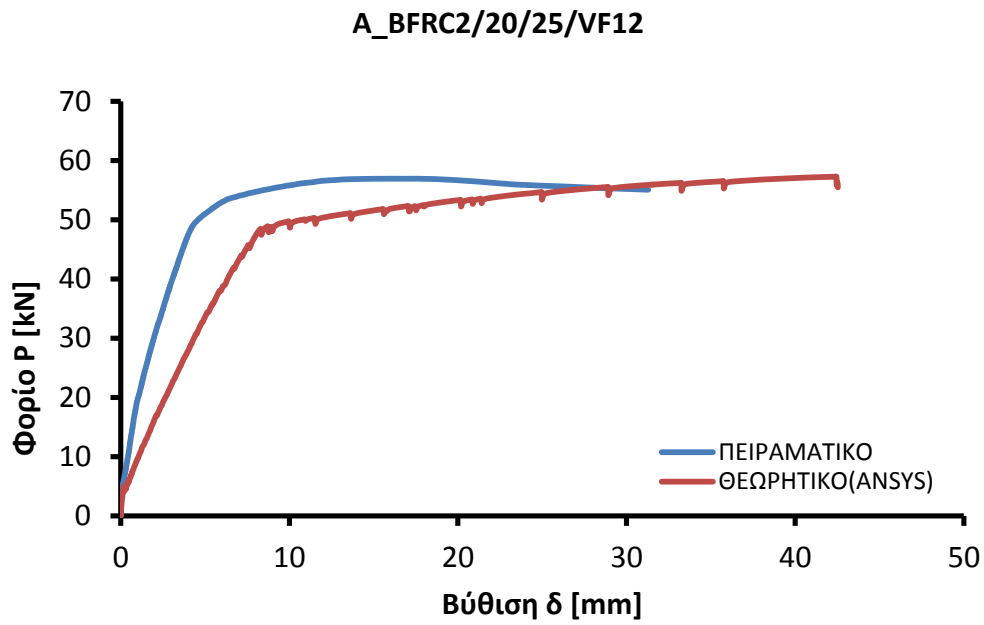
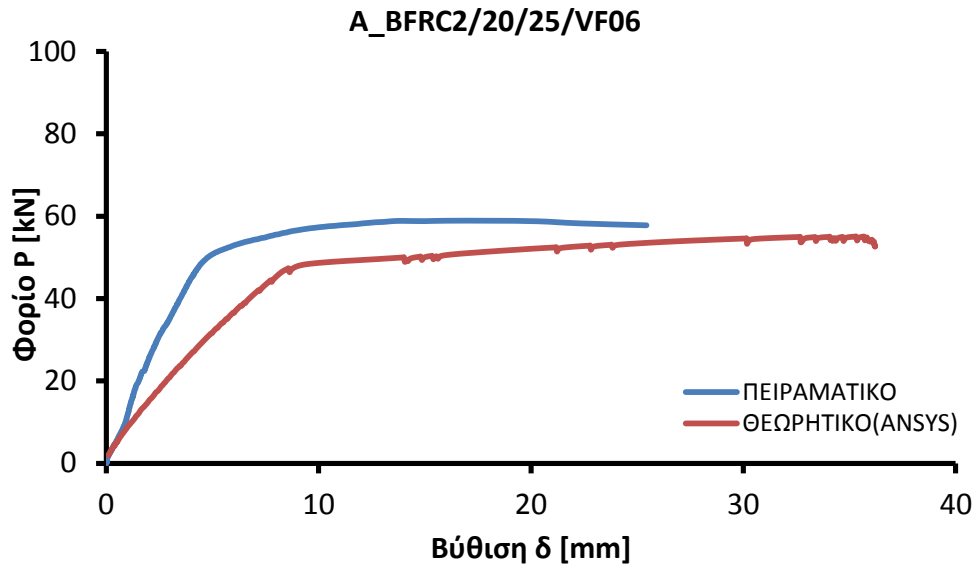
Ονομασία Δοκού	Ποσοστό Ινών (Vf) [%]	Λόγος Διάτμησης (a/d)	Βύθιση* (δ) [mm]	Φορτίο Θραύσης [kN]	Καμπτική Αντοχή [Mpa]
A_BV1/20/08/VF0	0.0%	0.8	8.10	74.49	7.60
A_BFRC1/20/08/VF06	0.6%	0.8	9.12	87.46	8.92
A_BFRC3/20/08/VF06	0.6%	0.8	9.12	87.46	8.92
A_BFRC1/20/08/VF12	1.2%	0.8	5.74	98.81	10.08
A_BFRC3/20/08/VF12	1.2%	0.8	5.74	98.81	10.08
A_BV2/20/25/VF0	0.0%	2.5	12.19	48.10	15.33
A_BFRC2/20/25/VF06	0.6%	2.5	36.21	55.05	17.55
A_BFRC2/20/25/VF12	1.2%	2.5	42.53	57.28	18.26

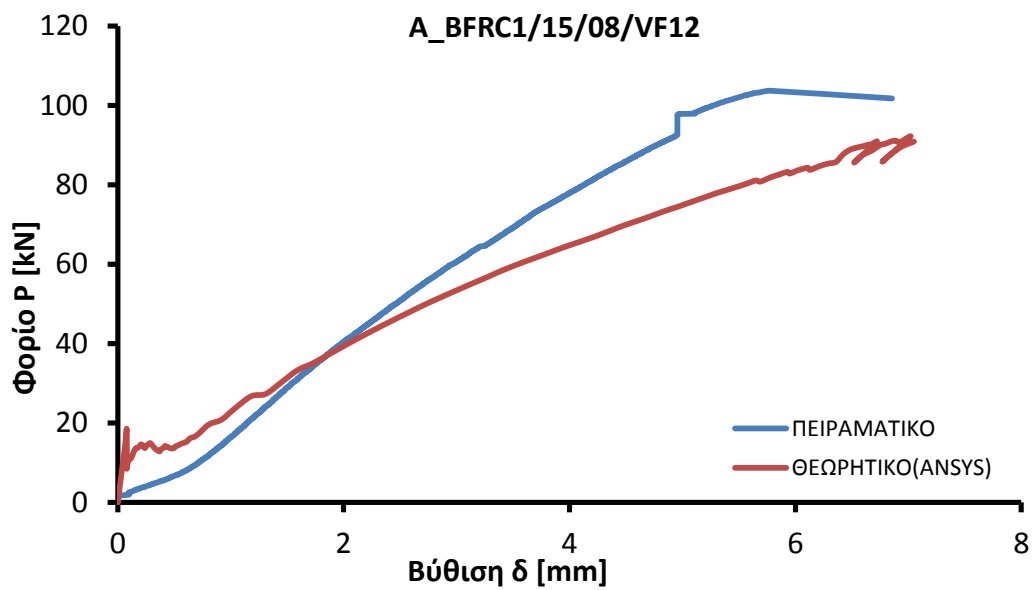
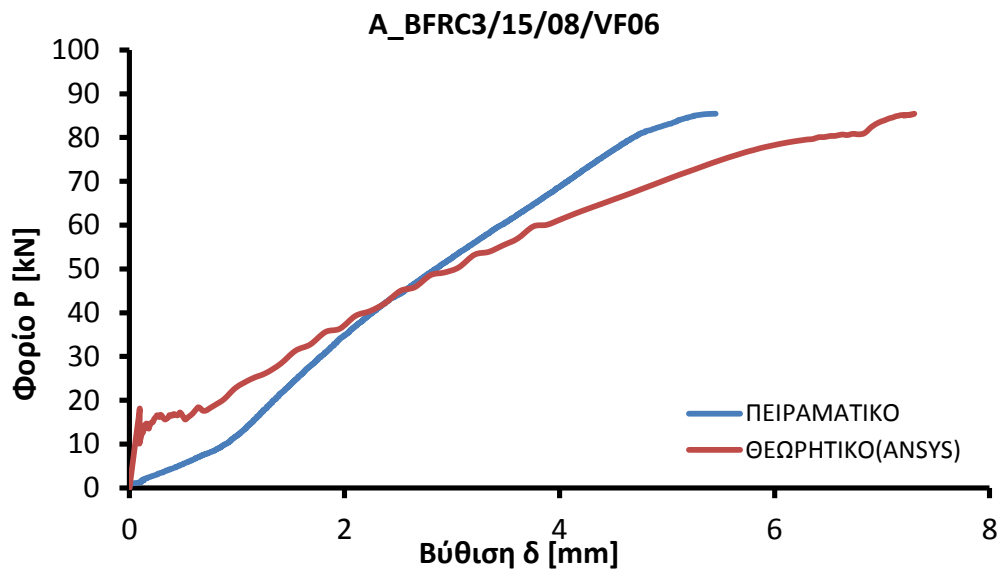
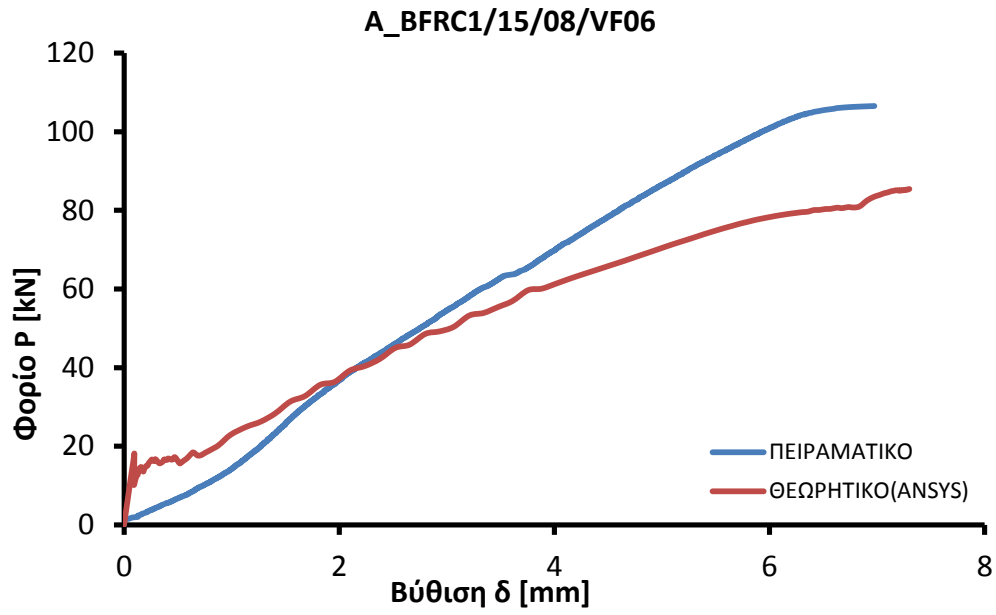
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πρισματικών δοκιμών ύψους $H=20\text{cm}$

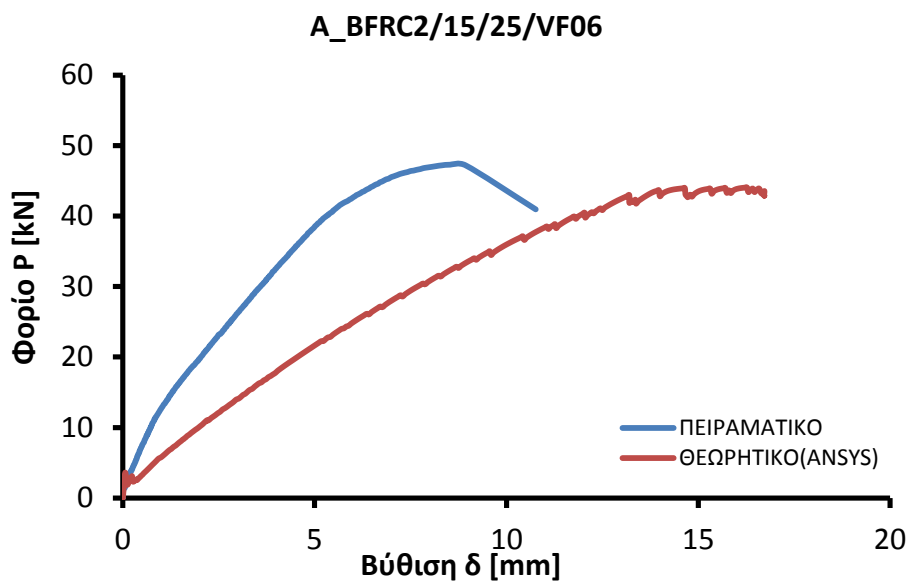
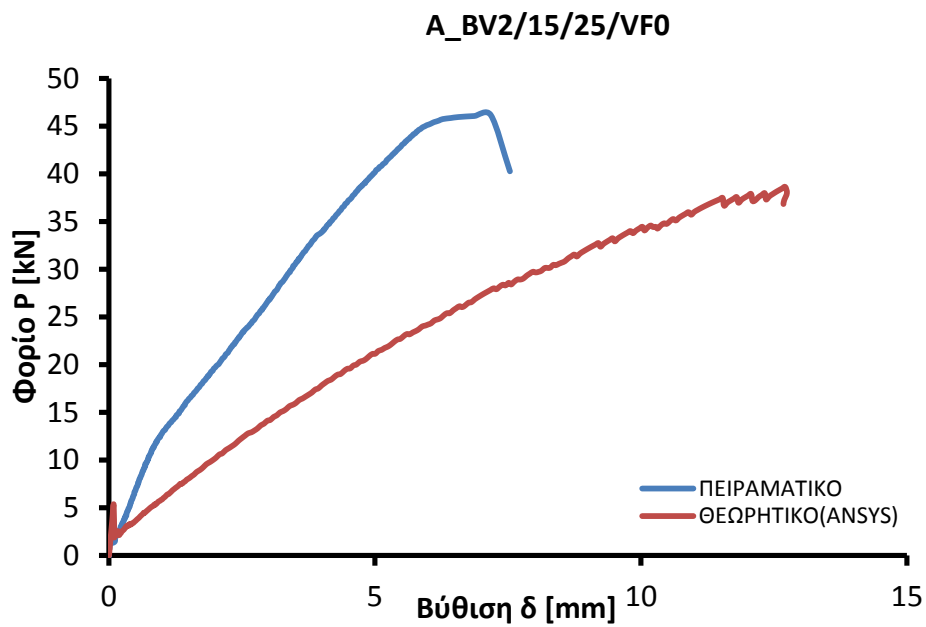
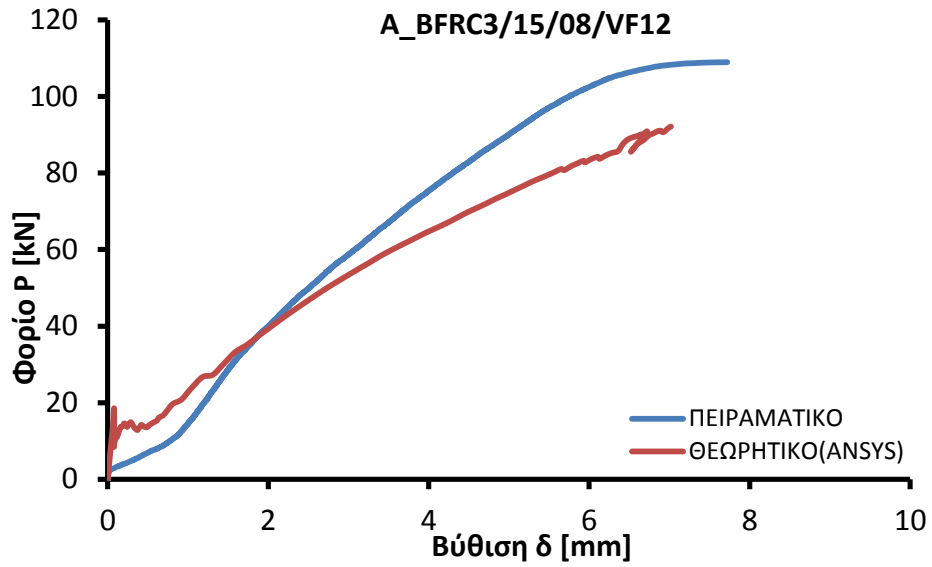
Ονομασία Δοκού	Ποσοστό Ινών (Vf) [%]	Λόγος Διάτμησης (a/d)	Βύθιση* (δ) [mm]	Φορτίο Θραύσης [kN]	Καμπτική Αντοχή [Mpa]
A_BV1/15/08/VF0	0.0%	0.8	6.10	70.38	9.85
A_BFRC1/15/08/VF06	0.6%	0.8	7.30	85.44	11.96
A_BFRC3/15/08/VF06	0.6%	0.8	7.30	85.44	11.96
A_BFRC1/15/08/VF12	1.2%	0.8	7.05	92.15	12.90
A_BFRC3/15/08/VF12	1.2%	2.5	7.05	92.15	12.90
A_BV2/15/25/VF0	0.0%	2.5	12.75	38.64	16.74
A_BFRC2/15/25/VF06	0.6%	2.5	16.73	44.06	19.09
A_BFRC2/15/25/VF12	1.2%	2.5	14.46	44.78	19.40

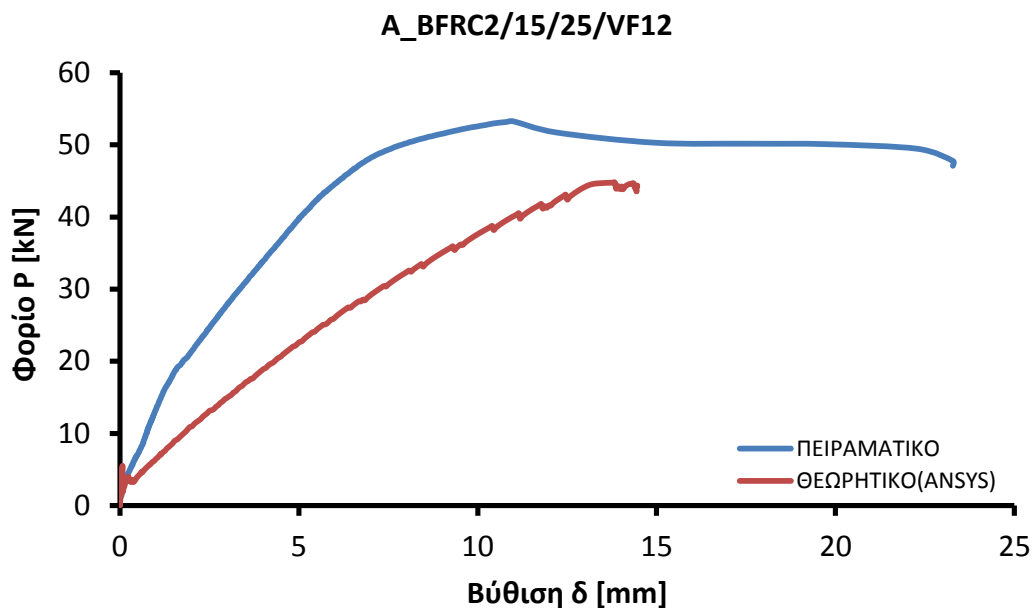












5.3 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Ο βασικός λόγος για την θεωρητική διερεύνηση(ANSYS) ήταν να εξετάσουμε κατά πόσο η πειραματική συμπεριφορά των δοκαριών συμπίπτει με την θεωρητικώς αναμενόμενη συμπεριφορά ή όχι και ποιοι παράγοντες τελικά επηρέασαν την συμπεριφορά αυτή. Έτσι μπορούμε να καταλάβουμε αν τα πειράματα εκτελέστηκαν ορθά. Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα υπάρχουν δοκάρια τα οποία είναι αξιοποιήσιμα και το αντίθετο. Εάν προσέξουμε τα διαγράμματα είναι εύκολο κανείς να καταλάβει ότι τα δοκάρια με λόγο διάτμησης $AR=0.8$ είναι πιο 'κοντά' στα πειραματικά από αυτά με $AR=2.5$. Αυτό οφείλεται διότι στο ansys η ανάλυση έλαβε υπόψη τον διατμητικό σπλισμό ενώ πειραματικά ο διατμητικός σπλισμός επηρέασε περισσότερο τα δοκάρια με λόγο διάτμησης 0.8 σε σχέση με τα 2.5 και εκεί οφείλεται η απόκλιση αυτή. Σε γενικές γραμμές οι αποκλίσεις είναι δεκτές εάν λάβουμε υπόψη ότι τα πειράματα στις δοκούς επηρεάστηκαν από πολλαπλούς παράγοντες.

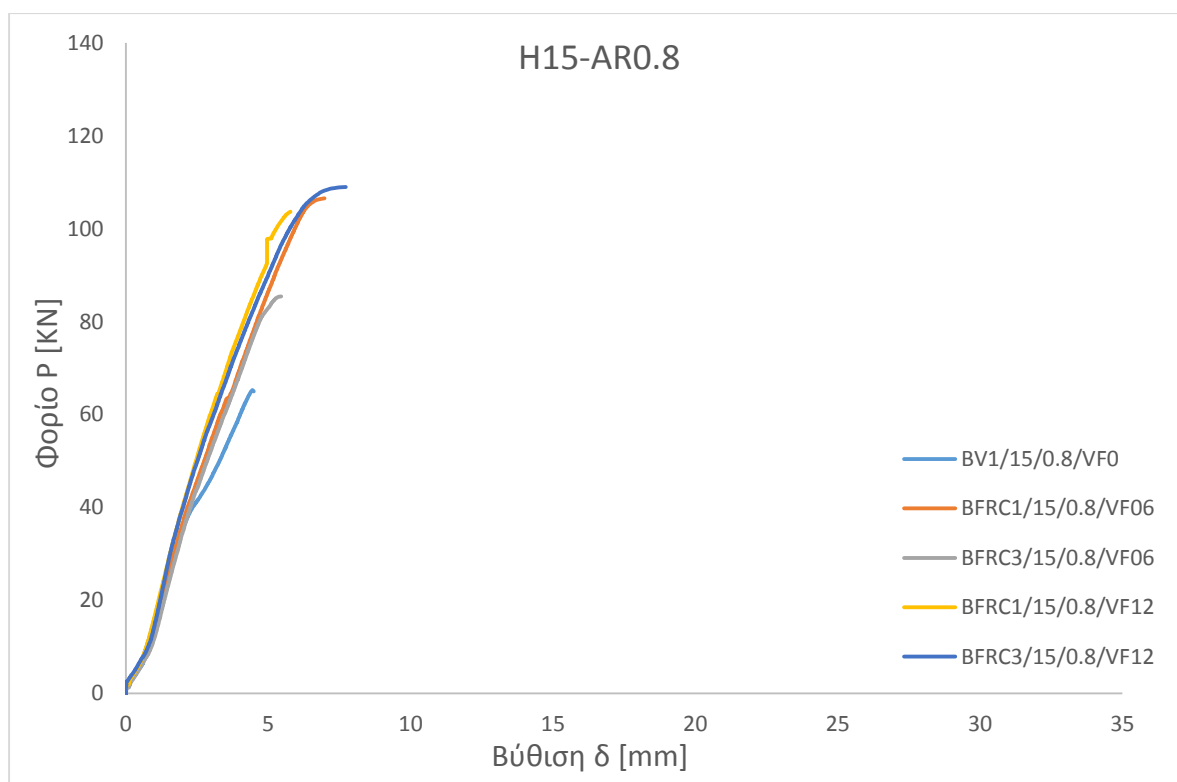
Κεφάλαιο 6

Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

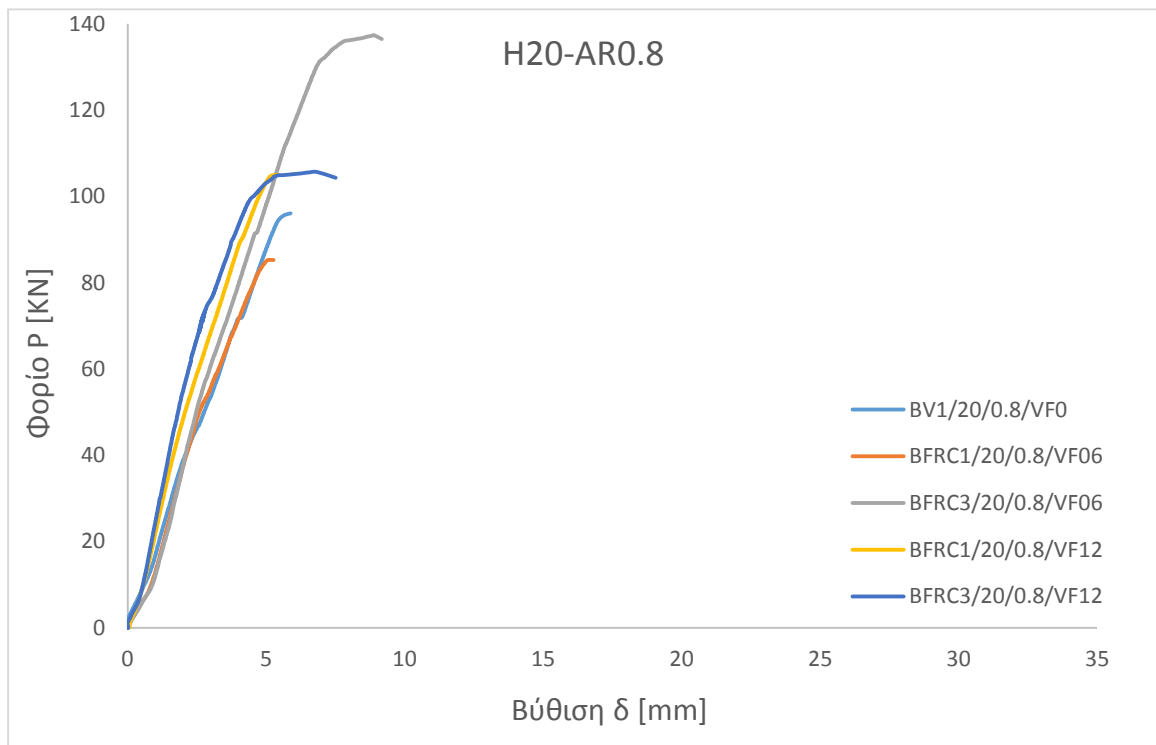
6.1 Σύγκριση Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

Τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε επηρεάζονταν από πολλαπλούς παράγοντες, οι κυριότεροι εξ' αυτών είναι ο λόγος διάτμησης AR (aspect Ratio) και το ποσοστό ινών VF. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα υπο σταθερό λόγο διάτμησης εξετάζουμε την επιρροή του ποσοστού ινών και αντίστροφα.

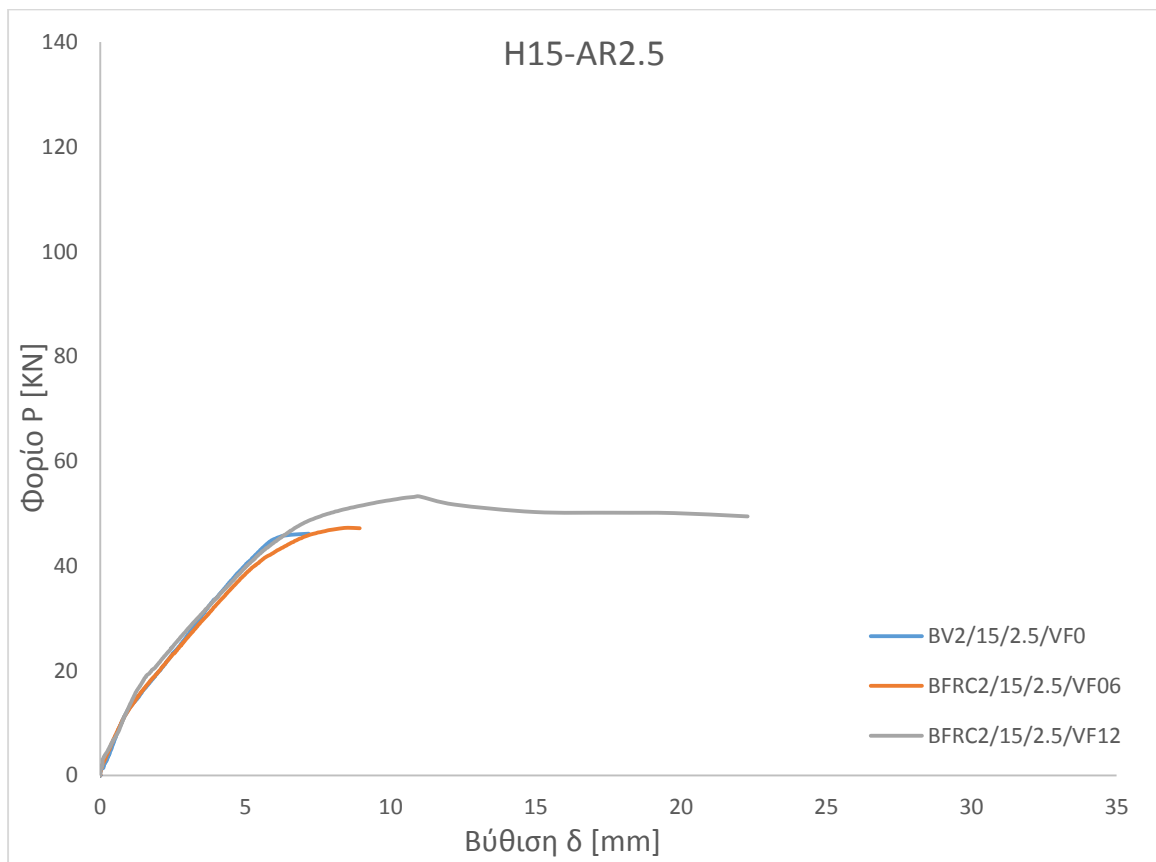
6.1.1 Επιρροή ποσοστού ινών-VF



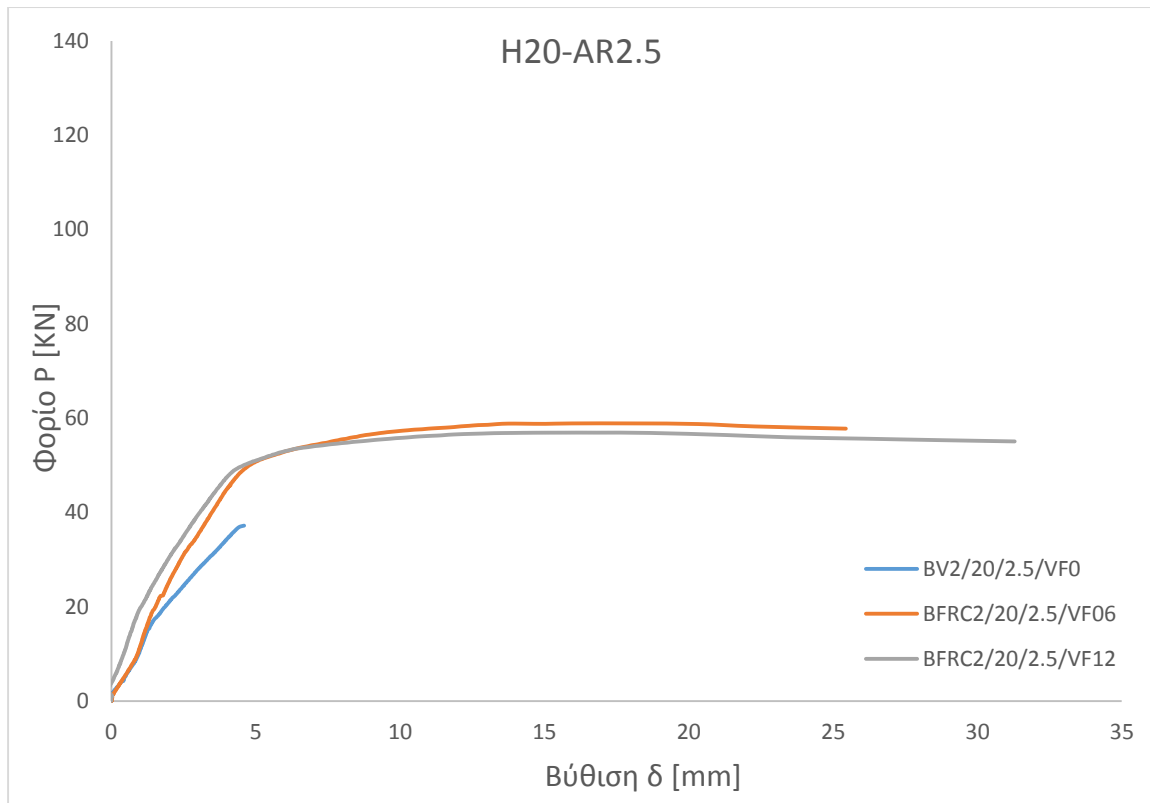
Διάγραμμα 13: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P-δ) για την επιρροή του ποσοστού ινών (vf), για δοκούς H15-AR0.8



Διάγραμμα 14: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-θύθισης ($P-\delta$) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H20-AR0.8



Διάγραμμα 15: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-θύθισης ($P-\delta$) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H15-AR2.5

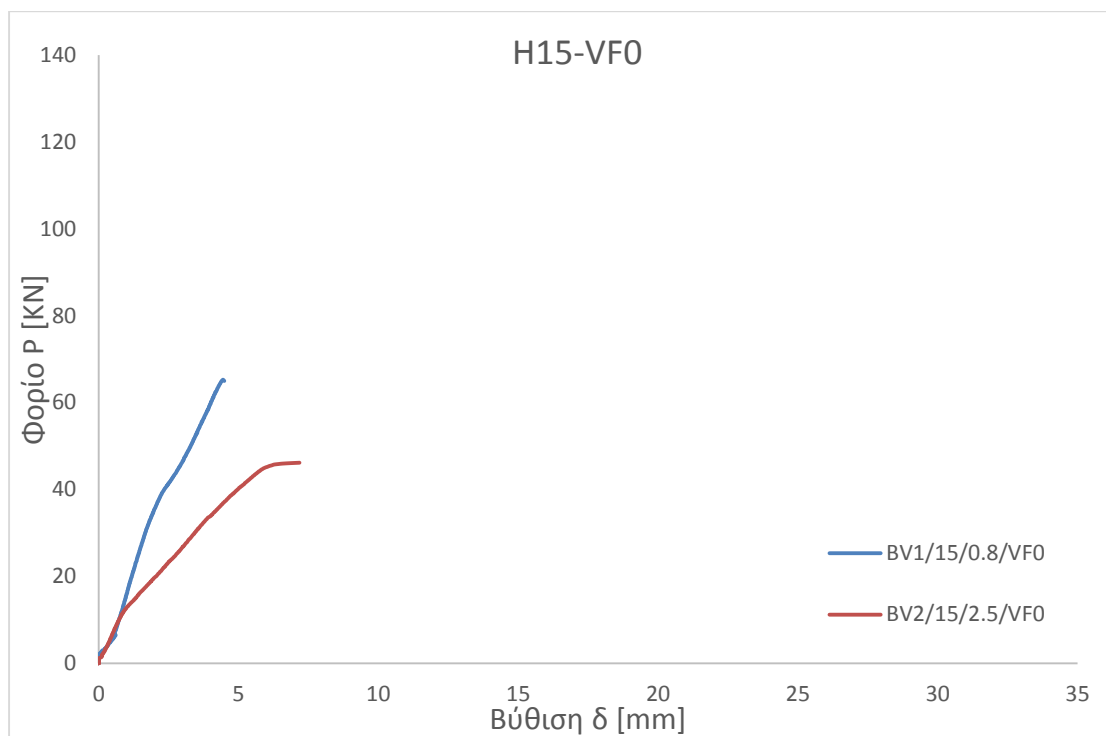


Διάγραμμα 16: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης ($P-\delta$) για την επιρροή του ποσοστού ινών (v_f), για δοκούς H20-AR2.5

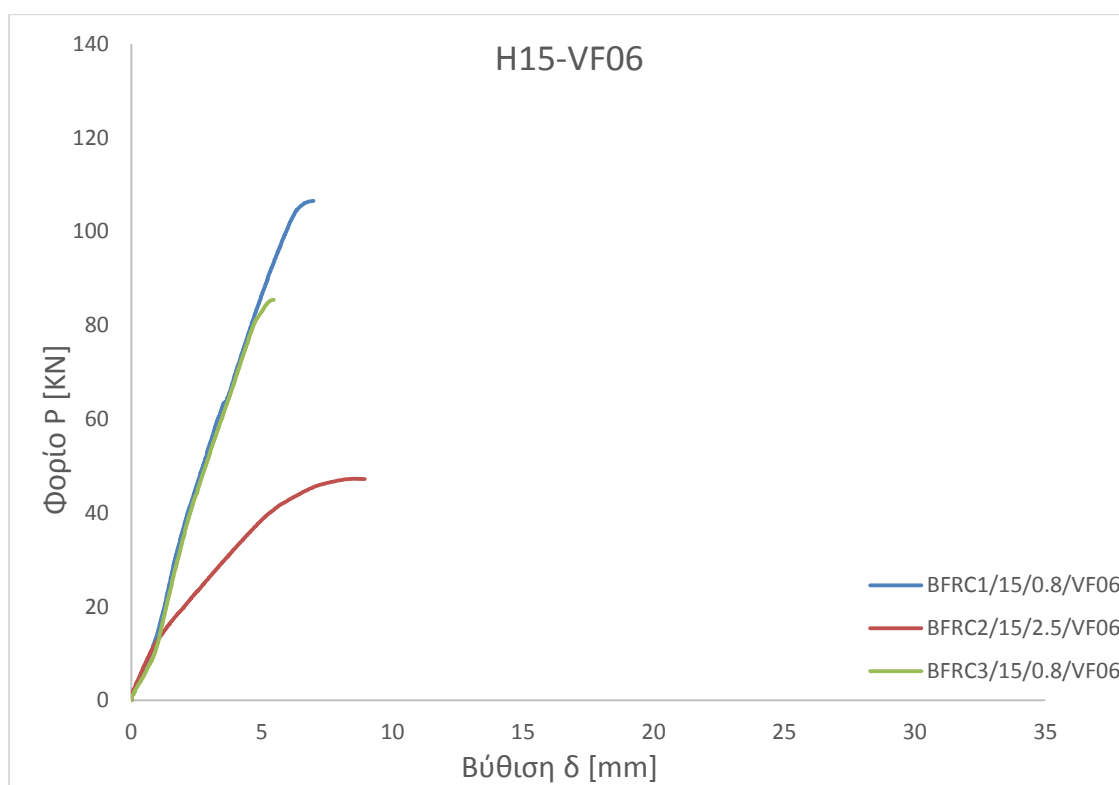
6.1.2 Συμπεράσματα-Επιρροή Ποσοστού Ινών

Η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα επιφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι μπορεί να αποβεί πιο αποδοτική σε χαμηλά ποσοστά περιεκτικότητας κ.ο. Πιο συγκεκριμένα, από τις δοκιμές στα πρισματικά δοκίμια, οι δοκοί με ποσοστό ινών 0,6% παραλαμβάνουν κατά μέσο όρο 30,92% μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο ($v_f=0\%$), ενώ δοκίμια με διπλάσιο ποσοστό ινών 1,2% παρέλαβαν κατά μέσο όρο 4,11% μεγαλύτερο φορτίο έναντι των $v_f=0.6\%$ κ.ο.. Να επισημάνουμε ωστόσο ότι σε ορισμένα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 1,2% κ.ο. παρατηρήθηκε μείωση του φορτίου έως και 5,37% σε σχέση με αυτά των $v_f=0.6\%$.

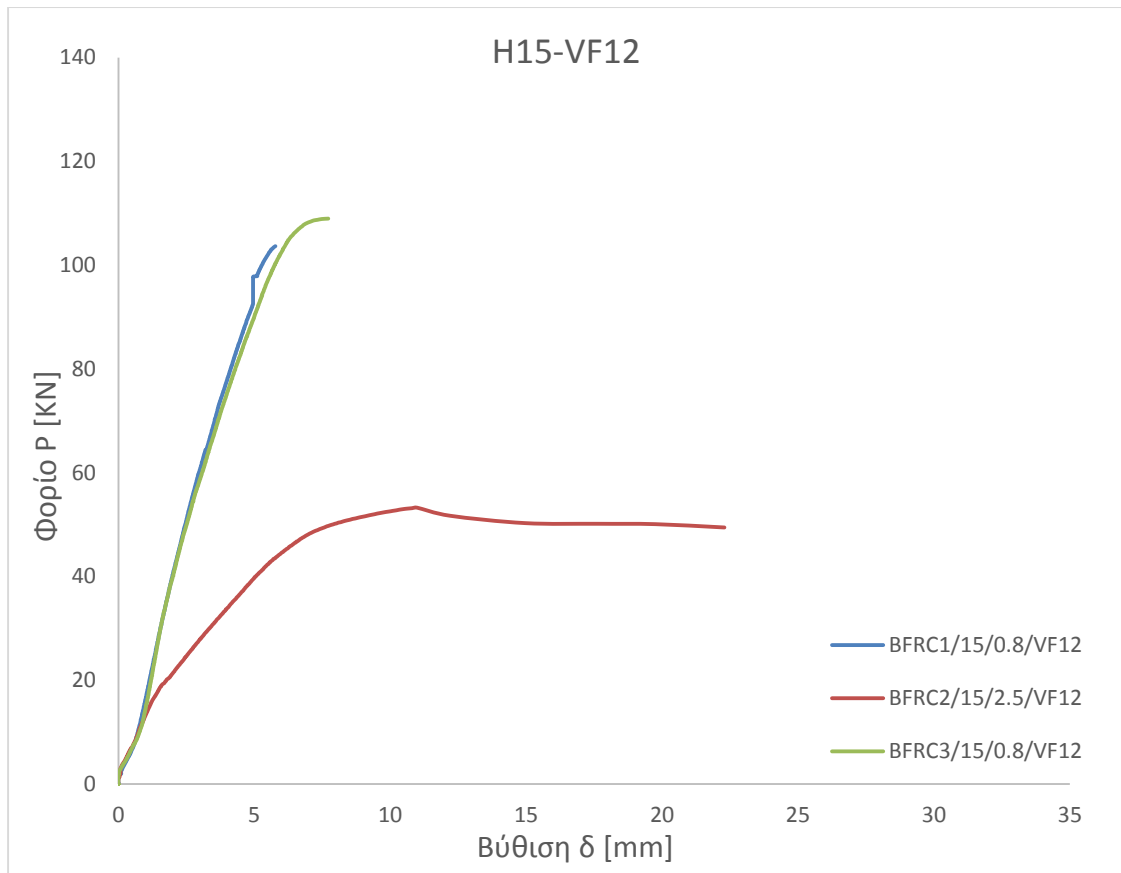
6.1.3 Επιρροή διατμητικού λόγου-AR



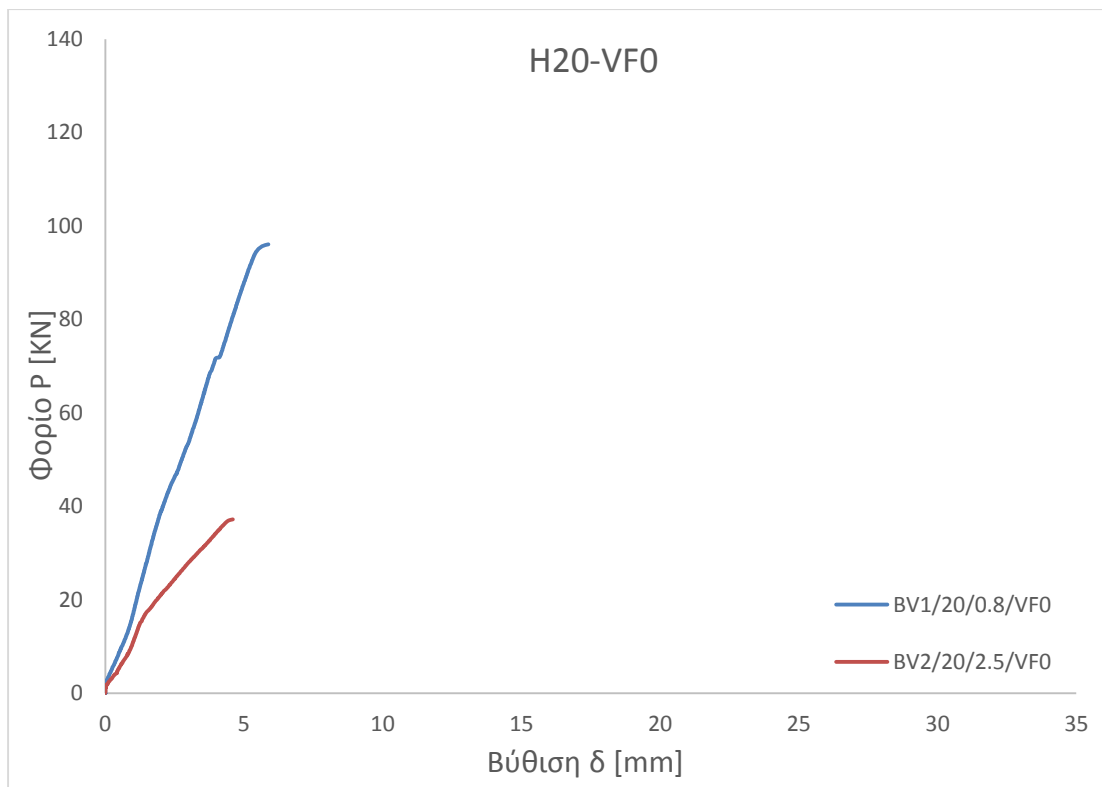
Διάγραμμα 17: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P - δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H15-VF0



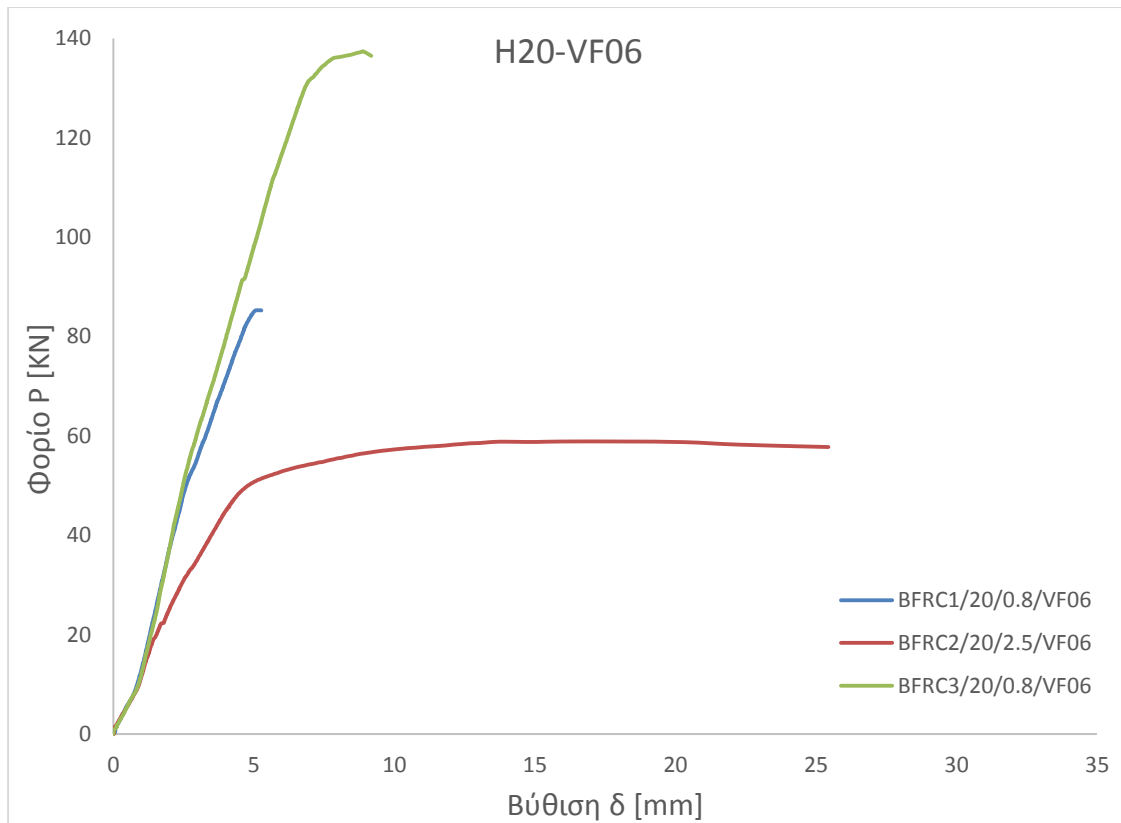
Διάγραμμα 18: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P - δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H15-VF06



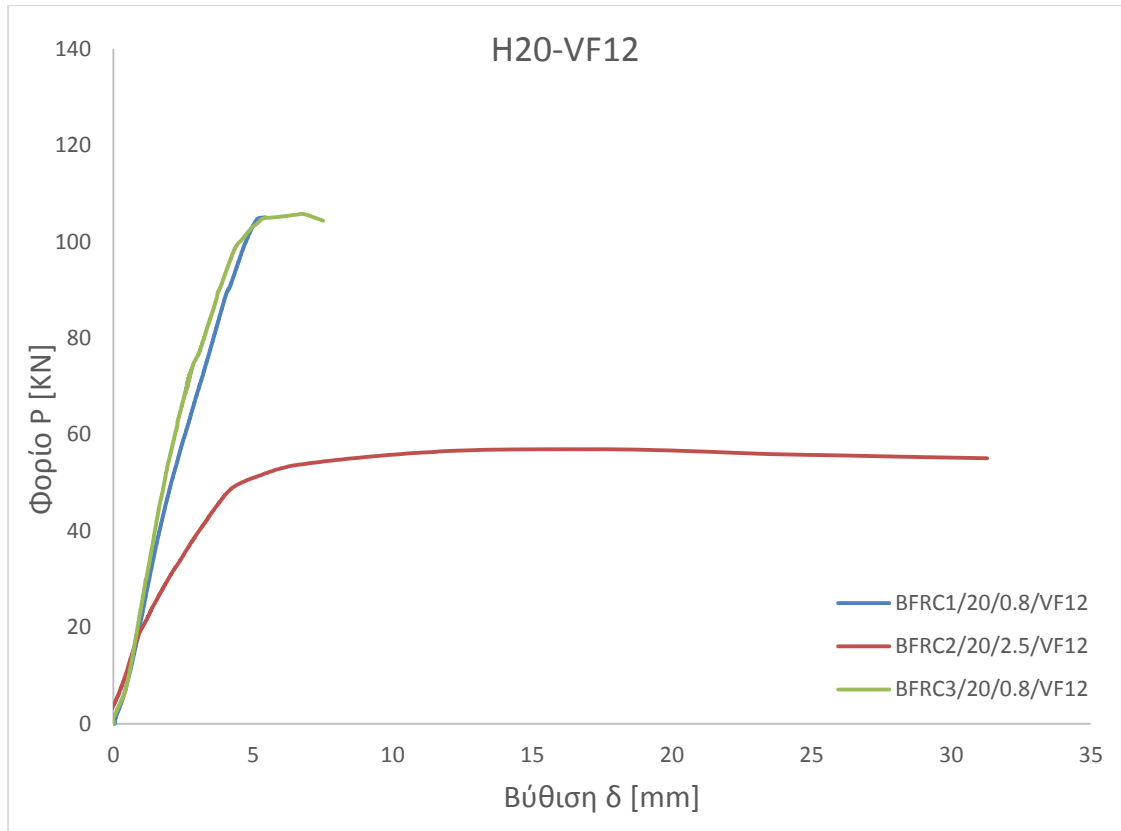
Διάγραμμα 19: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης ($P-\delta$) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H15-VF12



Διάγραμμα 20: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης ($P-\delta$) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H20-VF0



Διάγραμμα 21: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P - δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H20-VF06



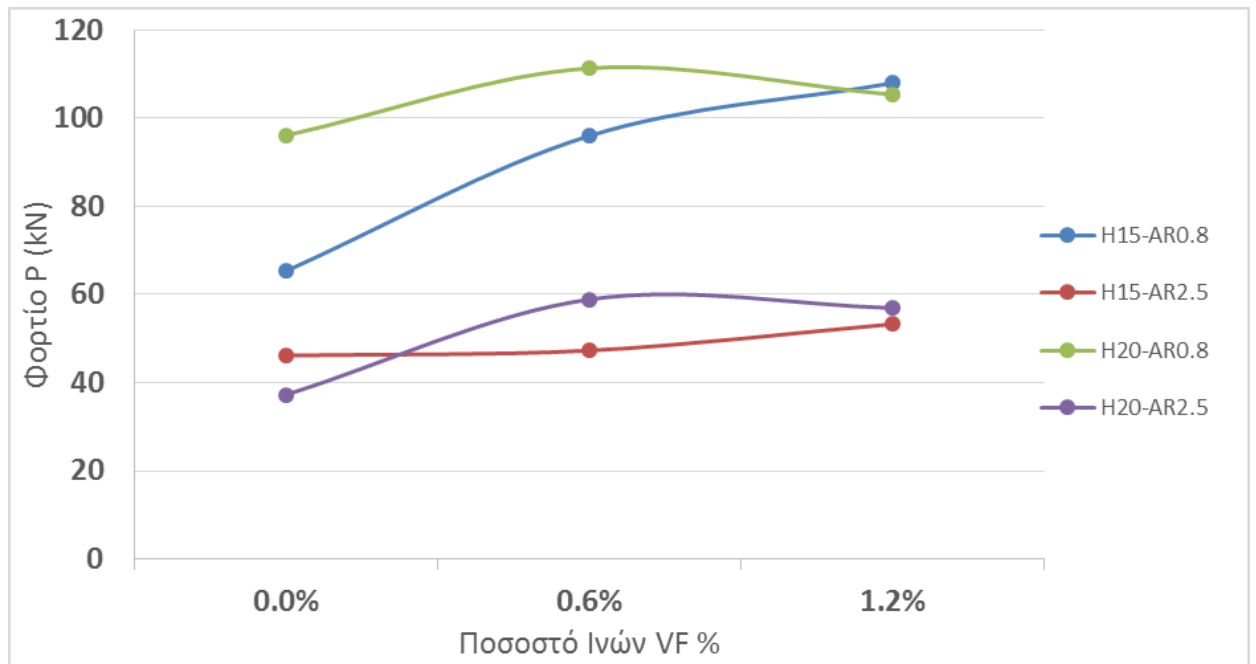
Διάγραμμα 22: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (P - δ) για την επιρροή του διατμητικού λόγου (AR), για δοκούς H20-VF12

6.1.4 Συμπεράσματα-Επιρροή Διατμητικού Λόγου-AR

Για την διερεύνηση της επιρροής του διατμητικού λόγου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα κάμψης των πρισματικών δοκιμών. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι η αύξηση του διατμητικού λόγου είχε ως συνέπεια την μείωση του μέγιστου φορτίου και αύξηση της πλαστιμότητας (μεγαλύτερες τιμές βύθισης) όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα φορτίου-Βύθισης (P-δ). Επίσης η μορφή αστοχίας επηρεάζεται από τον διατμητικό άνοιγμα δεδομένου ότι μικρός διατμητικός λόγος οδήγησε σε διατμητικές αστοχίες, με εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος ενώ αντίστροφα μεγαλύτερος μας έδωσε κυρίως καμπτικές αστοχίες. Βέβαια σε κάποια δοκίμια με λόγο διάτμησης 2,5 παρατηρήσαμε διατμητικές αλλά και καμπτοδιατμητικές μορφές αστοχίας.

		Vf	a/d	Pmax (kN)	σmax' (Mpa)
H15-AR0.8	BV1/15/08/VF0	0.0%	0.8	65.28	7.55
	BFRC1/15/08/VF06	0.6%	0.8	106.55	14.15
	BFRC3/15/08/VF06	0.6%	0.8	85.43	11.20
	BFRC1/15/08/VF12	1.20%	0.8	106.98	14.03
	BFRC3/15/08/VF12	1.2%	0.8	108.98	14.66
H15-AR2.5	BV2/15/25/VFO	0.0%	2.5	46.16	17.58
	BFRC2/15/25/VF06	0.6%	2.5	47.29	19.19
	BFRC2/15/25/VF12	1.20%	2.5	53.28	20.81
H20-AR0.8	BV1/20/08/VFO	0.0%	0.8	96.08	10.31
	BFRC1/20/08/VF06	0.6%	0.8	85.3	8.70
	BFRC3/20/08/VF06	0.6%	0.8	137.37	14.01
	BFRC1/20/08/VF12	1.2%	0.8	105.03	10.71
	BFRC3/20/08/VF12	1.2%	0.8	105.68	10.78
H20-AR2.5	BV2/20/25/VFO	0.0%	2.5	37.2	11.86
	BFRC2/20/25/VF06	0.6%	2.5	58.89	17.87
	BFRC2/20/25/VF12	1.2%	2.5	56.93	18.15

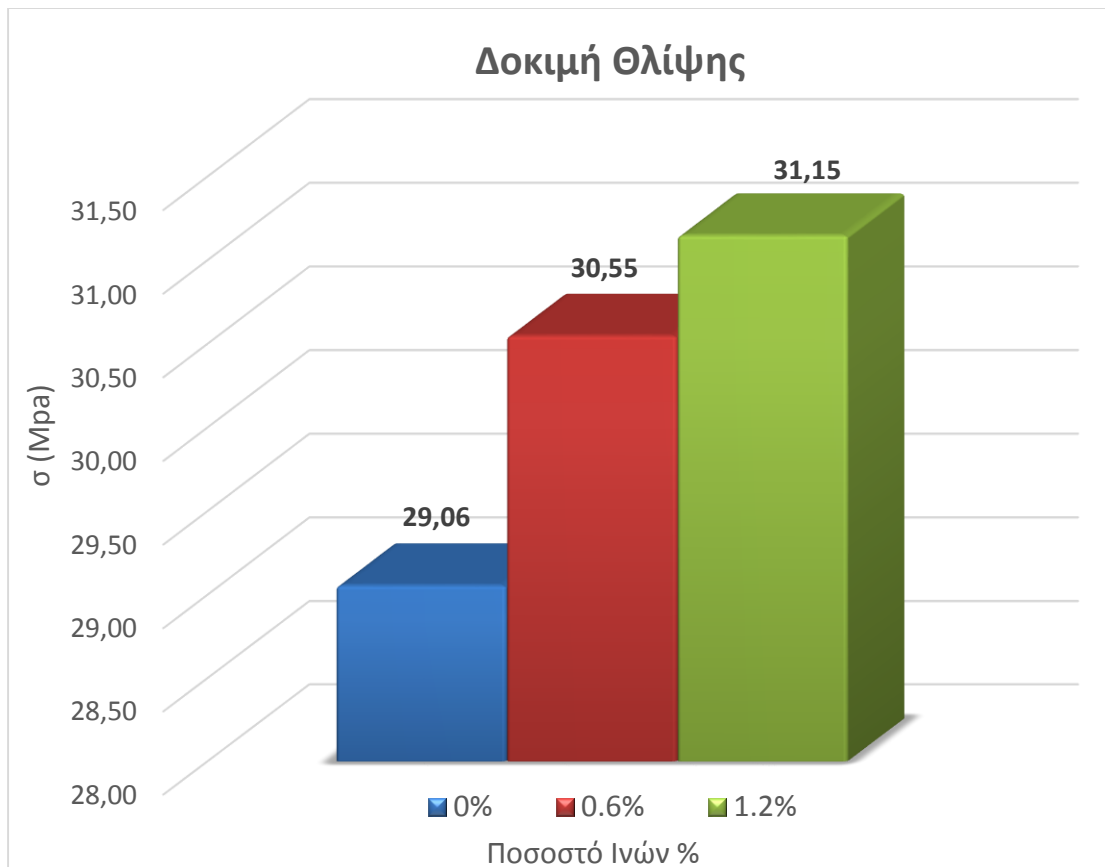
Πίνακας 24: Αναλυτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών κάμψης



Διάγραμμα 23: Γενικό συγκριτικό διάγραμμα δοκιμής κάμψης φορτίου-ποσοστού ινών (P-vf)

6.2 Συμπεράσματα- Αποτελέσματα Θλίψης-Εφελκυσμού (Διάρρηξη)

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης-Εφελκυσμού έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πλήθος δοκιμών, στις συνθήκες καταπόνησης που ήταν κοινές για όλα τα δοκίμια. Μπορούμε λοιπόν να χαρακτηρίσουμε τα αποτελέσματα πιο ακριβή και αντιπροσωπευτικά.



Διάγραμμα 24: Γενικό συγκριτικό διάγραμμα δοκιμής θλίψης, τάσης-ποσοστού ινών (σ - ν_f)

Για την δοκιμή θλίψης παρατηρούμε μικρή αύξηση της αντοχής σύναρτησης της αύξησης του ποσοστού ινών που περιέχονται στην μάζα του σκυροδέματος. Η αύξηση δεν είναι αναλογική το ποσοστό της μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των ινών. Αναλυτικότερα για περιεκτικότητα σε ίνες από 0% σε 0,6% κ.ο αυξάνεται η αντοχή κατά 5,13%. Ενώ για περιεκτικότητα από 0,6% σε 1,2% αυξάνεται η αντοχή κατά 1,96%.



Διάγραμμα 25: Γενικό συγκριτικό διάγραμμα δοκιμής διάρρηξης, τάσης-ποσοστού ινών (σ - v_f)

Για την δοκιμή εφελκυσμού (διάρρηξης), έχουμε:

Αύξηση εφελκυστικής αντοχής κατά 16% για την μεταβολή της περιεκτικότητας των ινών από 0% σε 0,6% κ.ο. Ενώ για περιεκτικότητα από 0,6% σε 1,2% κ.ο αυξάνεται η αντοχή κατά 40%.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι σε κάθε περίπτωση αυξάνονται οι αντοχές, με την μόνη διαφορά ότι ο ρυθμός αύξηση είναι διαφορετικός.

Βιβλιογραφία

- [1] ACI Committee 544.1R, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Detroit, 2002.
- [2] ASTM A 820/A820M, Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, 2004.
- [3] ACI Committee 544.2R, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, ACI Detroit, 1989.
- [4] ASTM C 1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete, 1997.
- [5] Dr. Nguyen Van CHANH, Steel Fiber Reinforced Concrete
- [6] English Version of Standard Specifications for Concrete Structures - Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2007.
- [7] BISFA, Terminology of man-made fibers, Bruxelles, 1997.
- [8] Kobayashi K., Development of Fiber Reinforced Concrete in Japan, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 5, 1983.
- [9] Maidl B., "Steel Fibre Reinforced Concrete", Ernst & Sohn, Berlin, 1995.
- [10] Zollo R., Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development, 1995.
- [11] Βουθούνης Π.Α., τεχνική μηχανική Αντοχή των Υλικών, Εκδοση ζ, Αθήνα, 2011.
- [12] Γεωργίου Ρ.Γ., Ωπλισμένο Σκυρόδεμα κατα τον Ελληνικό Κανονισμό, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2000.
- [13] Γιατζίδης Γ., Πειραματική Διερεύνηση Θλιπτικής και Καμπτικής Αντοχής Ινοπλισμένου και Θερμικά Καταπονημένου Σκυροδέματος, ΕΜΠ, 2010.
- [14] Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 1997.

- [15] Κατσικογιάννη Π. Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, Εφαρμογές στην Ελλάδα, ΕΜΠ, 2004.
- [16] Κορδή Ρ., Πειραματική Διερεύνηση Θλιπτικής και Καμπτικής Αντοχής Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, ΑΠΘ, 2012
- [17] Πανταζής Δ.Γ., Επίδραση του Διατμητικού Λόγου στη Συμπεριφορά Καμπτόμενης Ινοπλισμένης Δοκού Σκυροδέματος, ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ, Αθήνα, 2015.
- [18] Ρουσάκης, Γ., Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ, 2010.
- [19] Σοφιανός, Α.Ι. , Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων, Αθήνα 2010
- [20] Τριανταφύλλου Α.Χ., Δομικά Υλικά, Έκδοση 9η, Πάτρα, 2011
- [21] Χουλιάρης Ι.Γ., Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα , Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2003.
- [22] Βιτάλης Σαρρής, Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονοτονική φόρτιση, ΕΜΠ, 2008.
- [23] 9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003)

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΣΙΝΓΚ ΤΖΑΣΚΙΡΑΤ, του ΣΙΝΓΚ ΤΖΑΣΒΙΡ

φοιτητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε

του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλών

Ημερομηνία

16/3/2016



ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΜΗΛΙΩΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ φοιτητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλών



Ημερομηνία

16/3/2016