



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ- ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΠΜΣ: ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Γ. Καραγιαννάκη

Τίτλος:

**Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση
ινών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων**



Επιβλέποντες: Ευστράτιος Μπαδογιάννης

Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Εμμανουήλ Βουγιούκας

Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2021

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η συμπεριφορά δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ινών προς μερική αντικατάσταση του διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων). Η χρήση του ελαφροσκυροδέματος είναι πλέον διαδεδομένη λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει έναντι του συμβατικού σκυροδέματος, όπως αξιόλογη αντοχή και ανθεκτικότητα σε σχέση με το μειωμένο του βάρος, σε συνδυασμό με βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα. Παρόλα αυτά παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως μικρή παραμένουσα αντοχή (post peak residual strength) και φθιτό μετελαστικό κλάδο τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη, ψαθυρότητα αλλά και σημαντική ρηγμάτωση ειδικά στο αρχικό στάδιο της ωρίμανσης του. Για τους παραπάνω λόγους αναπτύχθηκε το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα, με τη χρήση διάφορων τύπων ινών (double hooked, ring type, straight, crimped, κ.α.) με ποικίλες ιδιότητες και από διαφορετικά υλικά (χάλυβα, πλαστικές, πολυπροπυλαινίου, άνθρακα κ.α.). Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει μελετηθεί η συμπεριφορά ινοπλισμένων δοκών από ελαφροσκυρόδεμα. Έμφαση έχει δοθεί στη δυνατότητα αντικατάστασης μέρος του συμβατικού οπλισμού έναντι τέμνουσας με ίνες, προκειμένου να αποφευχθεί ο συνωστισμός οπλισμού που προκαλεί δυσκολίες στη σκυροδέτηση. Ωστόσο, στις περισσότερες εργασίες μελετώνται και προτείνονται μεγάλα ποσοστά ινών στο μείγμα του σκυροδέματος, κάτι το οποίο αφενός είναι αντιοικονομικό αφετέρου δύναται να προκαλέσει δυσχερείς συνθήκες κατά τη σκυροδέτηση, αναφορικά με τη συμπίκνωση του σκυροδέματος. Οι παραπάνω δυσχέρειες συμβάλλουν στην αδυναμία εδραίωσης του υλικού στην πράξη τόσο για οικονομικούς όσο και για πρακτικούς λόγους. Για όλους τους παραπάνω λόγους, στην παρούσα μεταπτυχιακή αποτιμάται η επίδραση μικρών ποσοστών ινών στη συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας, με στόχο τη μερική αντικατάσταση συνδετήρων.

Στο πλαίσιο της εργασίας, εκτός από λεπτομερή βιβλιογραφική ανασκόπηση, πραγματοποιείται επίσης σειρά πειραματικών δοκιμών σε δοκούς ελαφροσκυροδέματος που περιλαμβάνουν διάφορα ποσοστά τόσο διατμητικού οπλισμού όσο και μεταλλικών ινών. Με τον τρόπο αυτόν θα αποτιμηθεί η συμπεριφορά των δοκών έναντι τέμνουσας σε όρους αντοχής και παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται και συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας με στόχο την διατύπωση σχετικών σχέσεων υπολογισμού.

Από τις δοκιμές σε επίπεδο υλικού προέκυψε ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στα μηχανικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συνθέσεων σκυροδέματος και της αποτελεσματικότητας των ινών με την ποσότητα του περιεχόμενου αέρα και με την τιμή της κάθισης. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών τεσσάρων σημείων των δοκών προέκυψε το συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η αντικατάσταση του μισού ποσοστού των απαιτούμενων από τον κανονισμό συνδετήρων με ποσοστό ινών 0,50% ούτως ώστε να επιτευχθεί το καμπτικό φορτίο αστοχίας των δοκών καθώς επίσης και μία ικανοποιητική βελτίωση της πλαστιμότητάς τους. Απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση των συνθέσεων σε επίπεδο υλικού καθώς και των διαστάσεων των ινών προκειμένου να προσεγγίσουν οι δοκοί με τον μισό εγκάρσιο οπλισμό, από αυτόν που απαιτείται από τον κανονισμό, την πλαστιμότητα και την εικόνα ρηγμάτωσης που προέκυψε για τα δοκίμια που ήταν οπλισμένα με βάση τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα. Τέλος, ανέκυψε η ανάγκη για αναπροσαρμογή του τύπου εκτίμησης της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου συμβατικού σκυροδέματος κατά Model Code (2010) προκειμένου να προσεγγίζει την μειωμένη απόκριση των μηχανισμών παραλαβής τέμνουσας στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος.

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα, ίνες, μηχανικές ιδιότητες, κάμψη τεσσάρων σημείων, δοκοί, διατμητική αντοχή

Abstract

The current thesis investigates the behavior of steel fiber reinforced lightweight concrete beams targeting the partial replacement of the required amount of stirrups for preventing shear failure. The use of lightweight concrete is very common due to its multiple advantages over normal weight concrete, which can be summarized as follows: the higher strength-to-weight ratio, the lower coefficient of thermal conductivity and the improved durability properties. However, disadvantages were also detected which refer to the poor post-peak behaviour in both tension and compression, the brittleness and the significant cracking especially at early ages. The combination of using lightweight aggregates together with reinforcing fibers has been introduced in order to improve the material and mechanical characteristics of the lightweight concrete in both fresh and hardened state and has led to the development of the fiber reinforced lightweight concrete whose application has been reported in several experimental and real case studies. Large variety of fiber shapes (double hooked, ring type, straight, crimped etc.), with various characteristics and materials (steel, polypropylene, carbon, plastic, etc.) have been reported. The aim of the aforementioned studies was the replacement of the stirrups needed for preventing shear failure by adding fibers in the concrete mix. Large amount of stirrups can cause defects during construction and especially during concrete casting and condensation. However, large percentages of fibers are usually proposed by researchers which are neither economically efficient nor effective during construction, taking into account the aforementioned possible defects. For all the aforementioned reasons, the current thesis evaluates the effect of small fiber percentages in the shear behavior of lightweight concrete beams, targeting to the partial replacement of the required stirrups.

The current dissertation consists of two main parts: (a) an extended literature review, referring to the effect of fibers addition to the mechanical properties (compressive, flexural & shear strength) and ductility of lightweight concrete specimens and (b) an experimental part, which consists of testing steel fiber reinforced lightweight concrete beams under four point bending loading, with different amounts of stirrups and percentages of fibers. Thus, these experimental results will be assessed in terms of load bearing capacity and deformation values. They will also be compared with the corresponding experimental result of the literature. Last but not least, the available models for calculating the shear capacity of fiber reinforced beams are evaluated in order to propose possible modifications.

Strong correlation between the mechanical properties of the examined lightweight concrete mixes and the effectiveness of the added fibers, with the amount of entrapped air and slump was observed. Furthermore, through four point bending testing of beams, the potential of replacing half the amount of stirrups required according to Eurocodes, with 0,50% of fibers, is proved to be possible, as these beams managed to reach their flexural capacity and increase their ductility. Further optimization of the characteristics of the concrete mixes and the dimensions of fibers is required, in order to approach the behaviour of the beams that are adequately reinforced against shear according to Eurocodes. The formula for the calculation of the shear resistance of beams according to Model Code 2010 needs to be modified in order to give safe predictions of the shear capacity of steel fiber reinforced lightweight concrete beams.

Keywords: steel fiber reinforced lightweight concrete, fibers, mechanical properties, four point bending, beams, shear resistance

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής μου εργασίας, κο Ευστράτιο Μπαδογιάννη και κο Εμμανουήλ Βουγιούκα, για την συνεχή τους βοήθεια και συμβολή καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Συνεισέφεραν ουσιαστικά τόσο κατά τον σχεδιασμό του πειραματικού μέρους της εργασίας, όσο και κατά την διάρκεια κατασκευής των δοκιμών των δοκών, προσφέροντας ακόμα και προσωπική εργασία. Οι συμβουλές τους και η καθοδήγηση τους καθ'όλη την διάρκεια αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας ήταν καθοριστική για την εξέλιξη και διεκπεραίωσης της εργασίας. Ήταν πάντα πρόθυμοι να συζητήσουν μαζί μου όποια απορία μου προέκυπτε και με την εμπειρία τους πάνω στο θέμα του σκυροδέματος με βοήθησαν να κατανοήσω την συμπεριφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος καθώς και των μηχανισμών που αποκρίνεται έναντι τέμνουσας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο Κωνσταντίνο Χριστίδη, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή στο εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π., ο οποίος συνέβαλε έμπρακτα στο θεωρητικό υπόβαθρο της έρευνας, στον σχεδιασμό, στην κατασκευή και στην πειραματική διαδικασία των δοκών-δοκιμών αλλά και στην αξιολόγηση των συμπερασμάτων της παρούσας έρευνας.

Ευχαριστώ θερμά την κα Μαρία Στρατουρά, Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την βοήθεια της κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων σε επίπεδο υλικού αλλά και σε επίπεδο δοκών, καθώς και τον κο Αλέξανδρο Φερεντζάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π.. Ευχαριστώ επίσης, τον κο Ανδρέα Κουνάδη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., που ήταν παρών σε όλες τις σκυροδετήσεις και βοήθησε έμπρακτα στην κατασκευή των δοκών.

Εξαιρετικά σημαντική ήταν η βοήθεια του κου Ξενοφώντα Λιγνού, ο οποίος ανέλαβε να δοκιμάσει σε εφελκυσμό τις ράβδους οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών των δοκών. Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τον κο Γεώργιο Παπαντωνόπουλο, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Ε.Μ.Π. που ανήκει στο Εργαστηριακό Διδακτικό προσωπικό της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών ο οποίος μας παρείχε τον πειραματικό εξοπλισμό και συνέβαλε ουσιαστικά στο να πραγματοποιηθούν τα πειράματα κάμψης τριών σημείων πρισμάτων και μονοαξονικής θλίψης κυλίνδρων. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν εξαιρετικά σημαντικά για την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις των σχέσεων της βιβλιογραφίας λαμβάνοντας υπόψη τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων υλικών.

Ευχαριστώ θερμά την εταιρεία Lafarge για την παροχή του σκυροδέματος για την παρασκευή των δοκών καθώς και την Τσάκας Ε.Π.Ε. για την παροχή των μεταλλικών κεκαμμένων ινών.

Χωρίς την υποστήριξη και συμπαράσταση των γονιών μου και του αδερφού μου τίποτα δεν θα ήταν εφικτό.

Περιεχόμενα	
Περίληψη.....	i
Abstract	ii
Ευχαριστίες	iii
1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	3
2.1. Ελαφροσκυρόδεμα-Ορισμός	3
2.1.1. Υλικά ελαφροσκυροδέματος	3
2.1.2. Μηχανισμός αστοχίας ελαφροσκυροδέματος	4
2.2. Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα	6
2.3. Θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από την διατμητική συνεισφορά σκυροδέματος.....	8
2.4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τα πειραματικά αποτελέσματα ινοπλισμένων δοκών σκυροδέματος.....	12
2.4.1. Διάτμηση.....	12
2.4.2. Καμπτική συμπεριφορά.....	32
2.5. Τύποι πρόβλεψης διατμητικής αντοχής δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	34
2.5.1. Συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα	34
2.5.2. Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα.....	37
2.6. Συμπεράσματα- στόχος έρευνας.....	44
3. Πειραματικό μέρος-Σύνθεση εξεταζόμενων συνθέσεων σκυροδέματος	47
3.1. Υλικά συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος.....	47
3.2. Αναλογίες υλικών εξεταζόμενων συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος	47
3.3. Αξιολόγηση ιδιοτήτων σκυροδέματος.....	48
3.3.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	48
3.3.2. Αποτελέσματα δοκιμών σκυροδέματος	53
3.4. Αξιολόγηση ιδιοτήτων στοιχείων Ω/Σ.....	75
3.4.1. Σχεδιασμός δοκών	75
3.4.2. Περιγραφή δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων δοκών.....	84
3.4.3. Δοκιμή εφελκυσμού χαλύβδινων ράβδων σπλισμού δοκών	86
3.4.4. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων δοκών.....	89
4. Συμπεράσματα	117
5. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	120
Βιβλιογραφία	121
Παράρτημα Α	126
Παράρτημα Β.....	134
Παράρτημα Γ	138

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ινών προς μερική αντικατάσταση
συνδετήρων

1. Εισαγωγή

Το ωπλισμένο σκυρόδεμα (Ω/Σ) είναι το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Χαρακτηριστικά εξαιτίας της ευρύτατης εφαρμογής του σε κάθε μορφή δόμησης, η κατανάλωση σε τσιμέντο μίας χώρας (σε τον ανά κάτοικο) αποτελεί δείκτη ανάπτυξης της χώρας αυτής. Ωστόσο, από σχετικά νωρίς, ξεκίνησε η προσπάθεια για την βελτιστοποίηση αυτού του δομικού υλικού, μιας και το βασικό του μειονέκτημα είναι το υψηλό του ίδιο βάρος, το οποίο οδηγεί στον περιορισμό των δυνατοτήτων του μελετητή στο σχεδιασμό των κατασκευών ή την απαίτηση υψηλών ποσοστών οπλισμού των δομικών στοιχείων.

Συνεπώς, η ανάγκη για βελτιστοποίηση του ωπλισμένου σκυροδέματος οδήγησε στην ανάπτυξη τύπων σκυροδέματος με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως το αυτοσυμπυκνούμενο, τα σκυροδέματα μεγάλης αντοχής, το ελαφροσκυρόδεμα και το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Το ελαφροσκυρόδεμα αναπτύχθηκε ακριβώς για την εξάλειψη του παραπάνω μειονεκτήματος, με σκοπό την μείωση της μάζας της κατασκευής άρα και την μείωση των αντίστοιχων σεισμικών φορτίων, τα οποία είναι ανάλογα με την μάζα της κατασκευής. Η μείωση των σεισμικών φορτίων οδηγεί στην μείωση των διαστάσεων των διατομών των στοιχείων Ω/Σ και κατεπέκταση του κόστους της κατασκευής, χωρίς να επηρεάζει την ακεραιότητα της κατασκευής και την αντοχή της έναντι των σεισμικών φορτίων [1]. Εκτός των παραπάνω, το ελαφροσκυρόδεμα εμφανίζει σημαντικώς βελτιωμένα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά κι αντίσταση έναντι πυρκαγιάς. Επομένως, τα βασικά πλεονεκτήματα του ελαφροσκυροδέματος έναντι του συμβατικού σκυροδέματος συνοψίζονται στα εξής: (α) μεγαλύτερος λόγος αντοχής/ίδιο βάρος [2], (β) μικρότερος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [3], [4] και (γ) βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας [5].

Ωστόσο, εκτός από τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα του, εμφανίζει και κάποια μειονεκτήματα. Το ελαφροσκυρόδεμα, αποτελείται κυρίως από τσιμέντο και ελαφροβαρή αδρανή. Εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού του, εμφανίζει κάποια μειονεκτήματα που συνδέονται με το γεγονός ότι τα αδρανή που το αποτελούν έχουν ίση ή ακόμα και μικρότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με την τσιμεντόπαστα του. Επομένως, εμφανίζει πιο ψαθυρή συμπεριφορά από το συμβατικό σκυρόδεμα καθώς και σημαντικές ρηγματώσεις ειδικά στο πρώτο διάστημα ωρίμανσης του, εξαιτίας του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας που αναπτύσσει λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας των αδρανών του [6]. Επιπροσθέτως, παρουσιάζει «φτωχή» μετελαστική συμπεριφορά κι όχι σημαντική πλαστιμότητα, τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη.

Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα. Η προσθήκη ινών στο μίγμα του ελαφροσκυροδέματος στοχεύει στην βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος τόσο στην υγρή όσο και την σκληρυμένη του κατάσταση. Τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά αφορούν τα εξής: (α) τις ιδιότητες του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος σε επίπεδο υλικού, (β) τα μηχανικά χαρακτηριστικά του, (γ) την πλαστιμότητα, εφόσον οδηγεί σε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και (δ) τον έλεγχο της ανάπτυξης ρηγματώσεων, με την ανάπτυξη περισσότερων αλλά μικρότερου εύρους ρωγμών, σε μεγαλύτερα επίπεδα φορτίου. Η έρευνα γύρω από αυτό το είδος σκυροδέματος στην διεθνή βιβλιογραφία, τόσο πειραματικά όσο και στο πλαίσιο κατασκευών, είναι μεγάλη [7], [8], [9], [10]. Επιπροσθέτως, έχουν αναπτυχθεί και διάφοροι τύποι ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, με τις περισσότερες διαφορές να αφορούν το είδος των αδρανών (διογκώμενη άργιλος, κίσηρης, περλίτης, κ.ο.κ.) ή το υλικό (μεταλλικές, άνθρακα, πολυπροπυλαινίου) και το σχήμα των ινών (ίσιες, κεκαμμένες, στρογγυλές κ.ο.κ), προκειμένου να εξυπηρετήσουν τις διαφορετικές ανάγκες της εκάστοτε κατασκευής.

Πέρα από τα παραπάνω θετικά χαρακτηριστικά και βελτιώσεις που προσφέρει η εισαγωγή ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος, η έρευνα που έχει αναπτυχθεί γύρω από αυτό το πεδίο προτείνει υψηλά ποσοστά ινών στο μίγμα, κάτι το οποίο δυσχεραίνει τα χαρακτηριστικά του νωπού υλικού καθώς και τις συνθήκες σκυροδέτησης (διαδικασίες διάστρωσης, συμπύκνωσης κ.ο.κ). Το παραπάνω γεγονός καθιστά την χρήση του μη ευρέως διαδεδομένη, εφόσον τελικώς αυξάνει τις απαιτήσεις στην φάση

της κατασκευής και ενέχει και τον κίνδυνο σε περίπτωση που δεν ικανοποιηθούν οι παραπάνω να εμφανιστούν αστοχίες, εξαιτίας κακών συνθηκών σκυροδέτησης.

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, εξετάζεται η συνεισφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος στην διατμητική αντοχή δοκών, οι οποίες δοκιμάζονται υπό κάμψη τεσσάρων σημείων. Δοκιμάζονται δοκοί μη ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με δοκούς ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με δύο διαφορετικά ποσοστά ινών, τα οποία είναι πιο χαμηλά από αυτά που προτείνονται στην βιβλιογραφία, για τους προαναφερθέντες λόγους. Μελετώνται οι ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων από τις οποίες θα κατασκευαστούν οι δοκοί. Τέλος, θα μελετάται και το μοτίβο ρηγμάτωσης των δοκών το οποίο συνδέεται με εκείνες τις παραμέτρους που έχει αποδειχθεί ότι το επηρεάζουν.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Ελαφροσκυρόδεμα-Ορισμός

Πολλές φορές, η ανάγκη για μείωση του βάρους ενός φέροντος στοιχείου μιας κατασκευής μπορεί να είναι τόσο σημαντική όσο και η αύξηση της αντοχής του, κυρίως σε ογκώδεις κατασκευές, όπως κτίρια μεγάλου ύψους και γέφυρες. Στις συγκεκριμένες κατασκευές ο σχεδιασμός τους σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το ίδιο βάρος τους, εφόσον τα δυναμικά φορτία, όπως είναι μία σεισμική διέγερση, είναι αλληλένδετα με τη μάζα της κατασκευής. Η απάντηση στο συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να είναι η αντικατάσταση των συνήθων αδρανών από αδρανή μικρότερου βάρους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή σκυροδεμάτων τα οποία αναφέρονται ως ελαφροσκυροδέματα (lightweight concrete-LWC). Συγκεκριμένα έχει αποδειχθεί πως η υιοθέτηση του ελαφροσκυροδέματος στην κατασκευή παρέχει μείωση του ίδιου βάρους της κατασκευής κατά 10-14% σε σύγκριση με το συμβατικό ελαφροσκυρόδεμα.

Οι ορισμοί που δίνονται για το ελαφροσκυρόδεμα στους περισσότερους κανονισμούς σκυροδέματος έχουν ως κοινά στοιχεία την πυκνότητα και τον τύπο του αδρανούς, καθώς και την τελική πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος. Ο EC2 [11] ορίζει ως ελαφροσκυρόδεμα το σκυρόδεμα με πυκνότητα όχι μεγαλύτερη από 2000 kg/m^3 ή πυκνότητα αδρανούς όχι μεγαλύτερη από 1200 kg/m^3 , ενώ τα αδρανή μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης με ή χωρίς επεξεργασία, βιομηχανικά παραπροϊόντα με ή χωρίς επεξεργασία και αδρανή προερχόμενα από ανακύκλωση. Αντίστοιχα, ο ACI 213 [12], ορίζει ως άνω όριο πυκνότητας αδρανούς τα 1120 kg/m^3 , με τους περισσότερους κανονισμούς να υιοθετούν τιμές άνω ορίου μεταξύ 1000 και 1200 kg/m^3 , ενώ για το άνω όριο της πυκνότητας του ελαφροσκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ 800 και 2000 kg/m^3 .

Το ελαφροσκυρόδεμα, με κριτήριο τον τρόπο λειτουργίας του διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- Δομικό ελαφροσκυρόδεμα ικανοποιητικής αντοχής, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό φερόντων δομικών στοιχείων.
- Μονωτικό ελαφροσκυρόδεμα, το οποίο χρησιμοποιείται ως ηχομονωτικό – θερμομονωτικό υλικό, χωρίς να έχει τη δυνατότητα να φέρει φορτία λόγω της αμελητέας αντοχής του.
- Δομικό – Μονωτικό ελαφροσκυρόδεμα με μειωμένη αντοχή, το οποίο είναι μονωτικό και μπορεί να φέρει μικρά μόνο φορτία (ίδιο βάρος).

Τα αδρανή που συνήθως χρησιμοποιούνται στο φέρον ελαφροσκυρόδεμα είναι η κίσηρης (pumice), ο διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale), η διογκωμένη άργιλος (expanded clay) κι ο περλίτης. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα μελετηθούν δοκοί κατασκευασμένες από ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα που αποτελείται από κίσηρη και περλίτη, ως εκ τούτου, παρακάτω θα δοθεί μία σύντομη περιγραφή για αυτά τα υλικά μόνο.

2.1.1. Υλικά ελαφροσκυροδέματος

2.1.1.1. Κίσηρης

Η κίσηρης, είναι ηφαιστειογενές πέτρωμα το οποίο χαρακτηρίζεται από τη σπογγώδη υφή του (Εικόνα 1). Σε μερικές περιπτώσεις, ο όγκος των πόρων μπορεί να φτάσει το 50% του συνολικού. Η παρουσία των πόρων αυτών οφείλεται στην ταυτόχρονη ταχεία ψύξη του μάγματος και τη ταχεία αποσυμπίεση που προκάλεσε την ταχεία επίσης αποβολή των πτητικών ουσιών, στη θέση των οποίων απέμειναν τα κενά των φυσαλίδων.

Η κίσηρης, είναι άκαυστη, ηχοαπορροφητική, φιλική προς το περιβάλλον με χαμηλό ειδικό βάρος, μεγάλη μηχανική αντοχή και καλές θερμομονωτικές ιδιότητες.

Η πυκνότητά της κυμαίνεται γύρω στα $400-800 \text{ kg/m}^3$, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων. Αποτελείται (προσεγγιστικά) από 70% SiO_2 , 12% Al_2O_3 , 2,5% CaO , 4% K_2O , 3,5% Na_2O και άλλα οξείδια σε μικρότερη περιεκτικότητα (LAVA). Συναντάται στα νησιά της Δωδεκανήσου Γυαλί (από το οποίο εξορύσσεται σε μεγάλες ποσότητες), Νίσηρο, Θήρα και Μήλο, ενώ εξάγεται σε μεγάλες ποσότητες στο εξωτερικό.



Εικόνα 1. Τυπική μορφή κίσηρης

Η κίσηρης είναι κατάλληλη για την παραγωγή ελαφροβαρών δομικών στοιχείων (κίσηρολίθων), ελαφροσκυροδέματος (δομικού και πληρώσεως) ελαφροβαρών προκατασκευασμένων στοιχείων και ελαφροβαρών μονωτικών επιχρισμάτων. Καθώς είναι ισχυρά απορροφητικό υλικό προσφέρεται για την εξυγίανση χαλαρών εδαφών και υπογείων υδάτων σε έργα οδοποιίας, κατασκευή λιμένων, γηπέδων κλπ..

Τα γενικά φυσικά χαρακτηριστικά της είναι: (α) χαμηλό ειδικό βάρος, (β) σταθερό ομοιόμορφο χρώμα, (γ) θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες και (δ) μεγάλη μηχανική αντοχή.

2.1.1.2. Περλίτης

Ο περλίτης είναι άμορφο ηφαιστειακό γυαλί με σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε νερό. Βρίσκεται στη φύση και έχει την ασυνήθιστη ιδιότητα να διογκώνεται όταν βρεθεί σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία. Η φαινόμενη πυκνότητα του αδιόγκωτου περλίτη είναι περίπου 1100 kg/m^3 . Αντίστοιχα η φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου περλίτη είναι μεταξύ των τιμών $30\text{--}150 \text{ kg/m}^3$. Η χημική του σύσταση είναι προσεγγιστικά η παρακάτω: 70-75% SiO_2 , 12-15% Al_2O_3 , 3-4% Na_2O , 3-5% K_2O , 0,5-2% Fe_2O_3 , 0,2-0,7% MgO , 0,5-1,5% CaO κ.α..

Λόγω της χαμηλής φαινόμενης πυκνότητας του διογκωμένου περλίτη, έχουν αναπτυχθεί πολλές εμπορικές εφαρμογές του. Σε οικοδομικά υλικά χρησιμοποιείται σε ελαφροβαρή κονιάματα, μονωτικά υλικά, θερμο-ηχομονωτικές πλάκες οροφής και ως βοηθητικό υλικό φίλτρων.

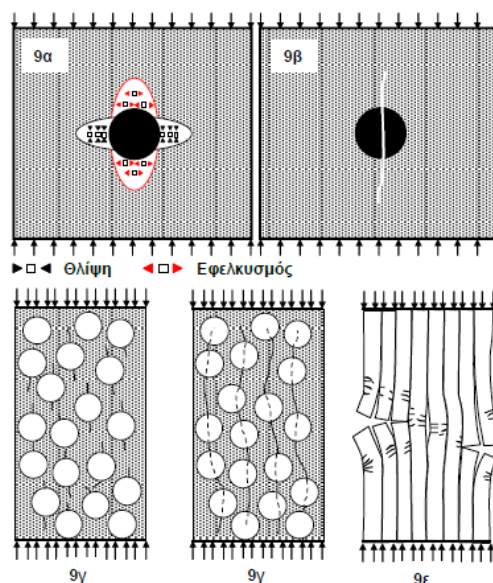
2.1.1.3. Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί βασικό συστατικό για την παραγωγή του ελαφροσκυροδέματος. Γενικά όλα τα τσιμέντα που συμμορφώνονται με το πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ 197-1 έχουν αποδειχθεί κατάλληλα για την παραγωγή του ελαφροσκυροδέματος. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κυρίως τσιμέντο τύπου Portland, που παράγεται από την άλεση κλίνκερ, προϊόν του σύγχρονου ψησίματος ασβεστόλιθου και αργίλου (που αποτελούν τις απαραίτητες πρώτες ύλες για την παρασκευή των κυρίων συστατικών του τσιμέντου).

2.1.2. Μηχανισμός αστοχίας ελαφροσκυροδέματος

Το ελαφροσκυρόδεμα εμφανίζει σημαντικές διαφορές ως προς τις ιδιότητες του και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η βασική διαφορά των δύο τύπων σκυροδέματος αφορά στο ότι τα ελαφροβαρή αδρανή έχουν μεγαλύτερο πορώδες σε σχέση με τα συμβατικά αδρανή, άρα και μεγαλύτερη απορροφητικότητα νερού. Σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με τον ACI-213R-03 [12] τα μέλη από ελαφροσκυρόδεμα συμπεριφέρονται με τους ίδιους μηχανισμούς σε κάμψη και διάτμηση όπως και το συμβατικό σκυρόδεμα. Ωστόσο, εξαιτίας των χαμηλότερων μηχανικών χαρακτηριστικών των αδρανών και του σφαιρικού τους σχήματος, εμφανίζουν μειωμένη απόκριση έναντι διατμητικών και εφελκυστικών δυνάμεων σε σχέση με την αντίστοιχη αντοχή που εμφανίζει συμβατικό σκυρόδεμα ίδιας θλιπτικής αντοχής.

Χαρακτηριστικό της μηχανικής συμπεριφοράς του ελαφροβαρούς σκυροδέματος είναι ότι οι ρωγμές, που σχηματίζονται κάθετα στη διεύθυνση των εγκάρσιων έμμεσων εφελκυστικών δυνάμεων, διαπερνούν τα ίδια τα αδρανή κι όχι τη διεπιφάνεια των αδρανών με την τσιμεντόπαστα. Στο συμβατικό σκυροδέμα η διεπιφανειακή ζώνη ανάμεσα στην τσιμεντόπαστα και την επιφάνεια των αδρανών, αποτελεί σημαντικό αδύναμο σημείο του, άρα και περιοχή από την οποία περνούν κι οι ρωγμές. Χαρακτηρίζεται από σημαντικές μικρορηγματώσεις και μεγάλο πορώδες, εφόσον έχει μικρότερη πυκνότητα, μικρότερη περιεκτικότητα σε ένυδρο πυριτικό ασβέστιο C-S-H και μεγαλύτερη συγκέντρωση προσανατολισμένων κρυστάλλων υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)_2 , οι οποίοι έχουν μικρότερη αντοχή από τους κρυστάλλους C-S-H. Ωστόσο, στο ελαφροσκυρόδεμα αυτή η ζώνη δεν αποτελεί ασθενές σημείο του σκυροδέματος, αλλά τις περισσότερες φορές έχει μεγαλύτερη αντοχή από τα ελαφροβαρή αδρανή που το αποτελούν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου εισχωρούν στους πόρους των πορώδων ελαφροβαρών αδρανών, ενισχύοντας έτσι τον χημικό δεσμό ανάμεσα στην τσιμεντόπαστα και τα αδρανή άρα και την αντοχή της διεπιφανειακής τους ζώνης. Ως εκ τούτου, εφόσον τα ελαφροβαρή αδρανή έχουν μικρότερες τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών σε σχέση με την τσιμεντόπαστα τους (αντοχή και μέτρο ελαστικότητας) τότε οι ρωγμές διαπερνούν τα αδρανή, δημιουργώντας έτσι πιο λείες επιφάνειες αστοχίας εξαιτίας της φύσης των αδρανών, αλλά και πιο ψαθυρή μορφή αστοχίας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Επομένως, το γεγονός ότι το ελαφροβαρές σκυρόδεμα εμφανίζει μειωμένες αντοχές σε κάμψη και τέμνουσα οφείλεται στον παραπάνω μηχανισμό κι αναλύεται παρακάτω: (α) εμφανίζει λιγότερο καλή συνάφεια σε σχέση με τον εφελκυσμένο διαμήκη σπλισμό, πράγμα που δυσχεραίνει την καμπτική αντοχή του σε σχέση με την αντίστοιχη του συμβατικού σκυροδέματος καθώς και την συνεισφορά της δράσης βλήτρου στην διατμητική του αντοχή και (β) εμφανίζει λείες επιφάνειες αστοχίας δυσχεραίνοντας την αλληλεμπλοκή αδρανών, μηχανισμός που επίσης συνεισφέρει στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος.



Εικόνα 2. Μηχανισμός αστοχίας ελαφροσκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη (Σημειώσεις ΔΠΜΣ για το μάθημα Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος) [16]

Ως αποτέλεσμα της μικρής διαφοράς ανάμεσα στο μέτρο ελαστικότητας των ελαφροβαρών αδρανών και της τσιμεντόπαστας είναι η γραμμική-ελαστική συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος μέχρι περίπου το 90% του μέγιστου του φορτίου. Αυτή η γραμμική-ελαστική συμπεριφορά μέχρι τέτοια τιμή του φορτίου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην καλύτερη συνάφεια ανάμεσα στα ελαφροβαρή αδρανή και την τσιμεντόπαστα, εξαιτίας των παρακάτω παραγόντων: (α) της πιο τραχειάς επιφάνειας των αδρανών που ενισχύει την δράση της αλληλεμπλοκής των προϊόντων της ενυδάτωσης με τα αδρανή [13], (β) του μεγαλύτερου πορώδους των ελαφροβαρών αδρανών το οποίο βοηθά την εισχώρηση των

προϊόντων της ενυδάτωσης άρα και στον καλύτερο χημικό δεσμό ανάμεσα στην τσιμεντόπαστα και τα αδρανή, (γ) του γεγονότος ότι τα ελαφροβαρή αδρανή συγκρατούν στο εσωτερικό τους ποσότητα νερού που οδηγεί στην ενδιάμεση απελευθέρωση του κατά την διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος άρα και στην αποτελεσματικότερη ενυδάτωση του [14] και (δ) στην πρόσθετη ποζολανική αντίδραση που ευνοείται από την μεθύτερη διάθεση νερού των αδρανών και την ποζολανική φύση κάποιων ελαφροβαρών αδρανών, όπως η κίσηρης [15].

Παρόλα αυτά, ο ACI 318 [17] εισάγει έναν μειωτικό συντελεστή, ο οποίος εκφράζει τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικού σκυροδέματος της ίδιας θλιπτικής αντοχής. Αυτός ο συντελεστής εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα ελαφροβαρή αδρανή και προκύπτει από τον πίνακα 19.2.4.2 του [17]. Από τον πίνακα 19.2.4.2 του [17], ως κάτω όριο του παραπάνω συντελεστή ορίζεται η τιμή 0,75. Εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (2.1) [17]:

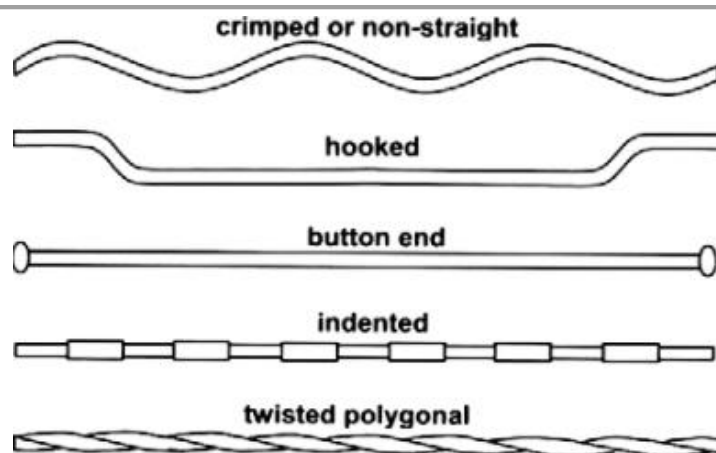
$$\lambda = \frac{f_{ct}}{6,7 * f_{cm}} \quad (2.1)$$

όπου f_{ct} είναι η αντοχή του ελαφροσκυροδέματος σε διάρρηξη και f_{cm} η αντοχή σε θλίψη του αντίστοιχου ελαφροσκυροδέματος. Χαρακτηριστικά οι Kang & Hong (2011) [18] ότι οι συνθέσεις ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος που εξέτασε εμφανίζουν τους παρακάτω λόγους αντοχών για τις μηχανικές τους ιδιότητες: (α) λόγοι θλιπτικής αντοχής ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος 0,78, (β) λόγοι καμπτικής αντοχής ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος 0,75, (γ) λόγοι αντοχής σε διάρρηξη ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος 0,88 και (δ) λόγοι μέτρων ελαστικότητας ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος 0,83. Επομένως επιβεβαιώνεται πως για το λ η τιμή 0,75, αποτελεί μία αντιπροσωπευτική τιμή σχεδιασμού, υπέρ της ασφαλείας, για όλες τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών του ελαφροσκυροδέματος.

2.2. Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αναπτύχθηκε προκειμένου να αντιμετωπιστούν μερικά από τα βασικά μειονεκτήματα του ελαφροσκυροδέματος που αφορούν στην πρώιμη ρηγμάτωση, στον φτωχό μεταλαστικό κλάδο και στη γενικότερη ψαθυρή του συμπεριφορά [9]. Έχει αποδειχθεί επίσης πως οι ίνες συνεισφέρουν εξίσου αποδοτικά στη μηχανική συμπεριφορά και στις ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος όπως και στο συμβατικό σκυρόδεμα [6]. Η χρήση ινών στο ελαφροσκυρόδεμα αυξάνει την πυκνότητα του προσεγγίζοντας την αντίστοιχη του συμβατικού σκυροδέματος, χωρίς να αυξάνει το βάρος του, πράγμα που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την χρήση του έναντι άλλων τύπων σκυροδέματος. Λόγω των παραπάνω θετικών του χαρακτηριστικών αναφέρονται ενδεικτικά μερικές από τις χρήσεις του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος παγκοσμίως που αφορούν: την κατασκευή αυτοκινητοδρομών, επενδύσεις σηράγγων, πασσάλους σκυροδέματος, δομικά στοιχεία κτιρίων, στο προεντεταμένο σκυρόδεμα, σε ουρανοξύστες, κελυφωτές στέγες και γενικότερα κατασκευές καθώς και θολωτές κατασκευές [6]. Επιπλέον, το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα και συμβατικό σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον κλάδο της προκατασκευής, μιας και βελτιώνει την συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι της ρηγμάτωσης, κάτι που αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμο στην μεταφορά και στην τοποθέτηση των εν λόγω μελών [18], [19], [20].

Εξαιτίας των παραπάνω χαρακτηριστικών, η επιρροή των ινών, διαφόρων υλικών και σχημάτων (Εικόνα 3), στις μηχανικές ιδιότητες του συμβατικού και του ελαφροβαρούς σκυροδέματος έχει μελετηθεί ευρέως στην διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο, η μεγάλη διασπορά των εξεταζόμενων παραμέτρων, όπως είναι το επίπεδο αντοχής του σκυροδέματος (σκυρόδεμα συμβατικής αντοχής ή υψηλής αντοχής), ο τύπος αδρανούς του σκυροδέματος (φυσικά, ανακυκλωμένα, τεχνητά κ.ο.κ.), οι διαστάσεις των εξεταζόμενων δοκιμών και οι τύποι των ινών, έχει οδηγήσει σε αντικρουόμενα συμπεράσματα.



Εικόνα 3. Ενδεικτικά σχήματα ινών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα

Ιδιαίτερα όσον αφορά την συνεισφορά των ινών στην θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, υπάρχουν έρευνες στις οποίες δεν έχει σημειωθεί καμία επιρροή στη θλιπτική αντοχή σε σχέση με την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος [21], [22], [23], [24], [25], αλλά και έρευνες στις οποίες έχει παρατηρηθεί αρνητική επίδραση των ινών στην συγκεκριμένη ιδιότητα [26],[27],[28]. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί μείωση της θλιπτικής αντοχής ή μειωμένη συνεισφορά των ινών στη θλιπτική αντοχή όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών στο μίγμα. Σχετικά με το παραπάνω, οι Li et al. [29] τόνισαν πως η συνάφεια ινών με την τσιμεντόπαστα είναι ασθενέστερη από την συνάφεια των ελαφροβαρών αδρανών με την τσιμεντόπαστα. Ως εκ τούτου, όταν αυξάνεται το ποσοστό των ινών στο μίγμα, αυξάνονται και οι ασθενείς διεπιφάνειες και περιοχές μέσα στο σκυρόδεμα, συνεπώς η επιρροή των ινών είναι μειωμένη ή ακόμα και δυσμενής. Επίσης, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών στο μίγμα, είναι δύσκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή τους στο σκυρόδεμα καθώς και να γίνει επιτυχής διάστρωση και συμπύκνωση του, καταστάσεις οι οποίες απομειώνουν την ποιότητα της κατασκευής, αφού επιδρούν αρνητικά στην εργασιμότητα, ρευστότητα και πυκνότητα του σκυροδέματος. Ωστόσο, στην περίπτωση των Libre et al. [30], στην οποία εξετάστηκε η επιρροή μεταλλικών ινών σε ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη, σημειώθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε ποσοστό 60% (για $V_f \cdot l_f / d_f = 0,64$) σε σύγκριση με το μη ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα. Η παραπάνω αύξηση της θλιπτικής αντοχής εξαιτίας της πρόσθεσης ινών στο μίγμα, αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες, μαζί με την έρευνα που διεξάχθηκε από τους Badogiannis et al. [31] στην οποία για ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη σημειώθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής μέχρι και 76% με την προσθήκη ίδιας ποσότητας ινών στο μίγμα, όπως και παραπάνω. Τονίζεται πως τα παραπάνω δεδομένα παρατίθενται και συγκρίνονται μεταξύ τους για παρόμοιους λόγους $V_f \cdot l_f / d_f$ (V_f ογκομετρικό ποσοστό ινών, l_f μήκος ινών, d_f διάμετρος ινών). Με θετική συνεισφορά των ινών στην θλιπτική αντοχή ελαφροσκυροδέματος, αλλά με μικρότερα ποσοστά, ακολουθούν οι Gao et al. [32] (20%), Chen and Liu [33] (10%), Zhao et al. [34] (20%) και Hassanpour et al. [35] (24-32%), ακόμα και για μεγαλύτερα ογκομετρικά ποσοστά ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος. Αξίζει να σημειωθεί πως έχει παρατηρηθεί ότι σημαντικό ρόλο στην επίδραση των ινών στην θλιπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος παίζουν τα χαρακτηριστικά των αδρανών του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, οι Campione et al. [36] σημείωσαν πως η χρήση μεταλλικών ινών σε ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη δεν επηρέασε καθόλου την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, αλλά οδήγησε σε αύξηση 30% σε περίπτωση ελαφροσκυροδέματος που περιείχε διογκώμενη άργιλο. Εκτός αυτού, σύμφωνα με τον Duzgun et al. [37], η αποτελεσματικότητα των ινών αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των ελαφροβαρών αδρανών στο μίγμα του σκυροδέματος. Οι Kang and Hong [18] με κεκαμμένες ίνες μήκους 50mm και διαμέτρου 0,80mm σημείωσαν αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος κατά 13% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% και αύξηση 20% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,75%. Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα τους σε συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα ή σε ελαφροσκυρόδεμα που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο ελαφροβαρή αδρανή, στα οποία η αύξηση της θλιπτικής αντοχής εξαιτίας της

εισαγωγής ινών στο μίγμα δεν ήταν αξιοσημείωτη. Στην περίπτωση εισαγωγής ινών στο σκυρόδεμα από άλλο υλικό όπως ίνες πολυπροπυλαινίου [23],[26],[28],[30],[33], ή polyvinyl acetate (PVA) και polyamide (PA) ίνες, δεν σημειώνεται κάποια αξιόλογη επιρροή τους στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [38],[39].

Αδιαμφισβήτητη, ωστόσο, είναι η αύξηση της καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος με την εισαγωγή των ινών στο μίγμα τους, εν αντιθέσει με την ιδιότητα της θλιπτικής αντοχής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα οι Libre et al. [30] ανέφεραν αύξηση της καμπτικής αντοχής σε ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη έως και 200% και 284% σε μεταλλικές και πολυπροπυλαινίου ίνες, αντίστοιχα. Όπως και σε σχέση με την ιδιότητα της θλιπτικής αντοχής, έτσι και στην περίπτωση της καμπτικής αντοχής οι Campione et al. [36] τόνισαν πως η αύξηση της καμπτικής αντοχής σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα με διογκούμενη άργιλο μετρήθηκε περί τα 117% ενώ σε σκυρόδεμα με κίσηρη είναι το πολύ μέχρι 42%. Εκτεταμένη πειραματική έρευνα με την προσθήκη μεταλλικών και πολυπροπυλαινίου ινών από τους Choi et al. [28], επιβεβαίωσε τα παραπάνω, υπολογίζοντας αύξηση της καμπτικής αντοχής περί τα 127% και 122% για ογκομετρικά ποσοστά ινών 0,80-1% και 107% και 194% για ογκομετρικά ποσοστά ινών μέχρι και 1,50%, για μεταλλικές ίνες και πολυπροπυλαινίου αντιστοιχώς. Αντίστοιχα υψηλά ποσοστά αύξησης της καμπτικής αντοχής σημειώθηκαν από τους Gao et al. [32] περί τα 90%, από Domogala [40] περί τα 61%, από Zhao et al. [41] περί τα 90%. Οι Kang and Hong [18] κατέγραψαν αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά 40% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% και 68% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,75%. Πέραν της αύξησης της τιμής της καμπτικής αντοχής, σε όλες τις έρευνες σημειώνεται και η σημαντική βελτίωση της μετελαστικής συμπεριφοράς υπό κάμψη του σκυροδέματος, στις οποίες αναπτύχθηκε σημαντικά βελτιωμένη πλαστιμότητα και παραμένουσα αντοχή, μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου [9],[42],[43],[44]. Από του Kang and Hong [18] σημειώθηκε κι αύξηση της αντοχής σε διάρρηξη κατά 40% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% και 104% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,75%. Επιπλέον, από τους ίδιους υπολογίστηκε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 6% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% και 44% για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,75%.

Εκτός από την θετική επίδραση που έχει η προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος σημαντικά οφέλη έχουν σημειωθεί και στην συμπεριφορά του έναντι στον ερπυσμό [43], συστολή ξήρανσης ([41] ,[43] βελτίωση έως και 15%) και στην αντοχή έναντι κρούσης [8]. Επίσης, σημειώνεται πως η απορρόφηση ενέργειας του ελαφροσκυροδέματος αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των ινών [31]. Οι Zhao et al. [41] τονίζουν πως το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα εμφανίζει εμφανώς βελτιωμένη συμπεριφορά έναντι κύκλων ψύξης-απόψυξης.

2.3. Θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από την διατμητική συνεισφορά σκυροδέματος

Στην παρούσα έρευνα θα δοθεί βάση στην συνεισφορά των ινών στην απόκριση του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι μηχανισμοί με τους οποίους αντιστέκεται το σκυρόδεμα σε διατμητικές δυνάμεις, η διαφορά στην εν λόγω απόκριση ανάμεσα στο ελαφροσκυρόδεμα και στο συμβατικό σκυρόδεμα καθώς και σε ινοπλισμένο και μη. Ανεξάρτητα ωστόσο, από την ύπαρξη ινών στο μίγμα σκυροδέματος ή όχι και την διάκριση ανάμεσα σε ελαφροβαρές και συμβατικό σκυρόδεμα, οι διαστάσεις των διατομών των δοκών σε αναλογία με το διατμητικό τους μήκος ορίζουν σε καθοριστικό βαθμό τον τρόπο αστοχίας τους και την φέρουσα ικανότητά τους.

Σύμφωνα με τους Kotsoinos [45] και Li et al. (2019) [19], οι δοκοί συμπεριφέρονται διαφορετικά ανάλογα με τον λόγο διατμητικού μήκους τους προς στατικό ύψος. Αυτός ο λόγος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό αν μία δοκός θα αστοχήσει πλάστιμα ή ψαθυρά (Εικόνα 4). Τα όρια του παραπάνω λόγου ανάμεσα στους δύο συγγραφείς, διαφέρουν λίγο, με το νόημα παρόλα αυτά να παραμένει το ίδιο. Παρακάτω παρατίθενται τα όρια όπως έχουν παρουσιαστεί από τον Kotsoinos [45]:

(α) οι δοκοί με λόγο a_v/d μεγαλύτερο του 5 (δοκοί που αστοχούν με μορφή αστοχίας Τύπου Ι) εμφανίζουν καμπτική συμπεριφορά, με καμπτικές ρωγμές στο κεντρικό τμήμα της δοκού όπου

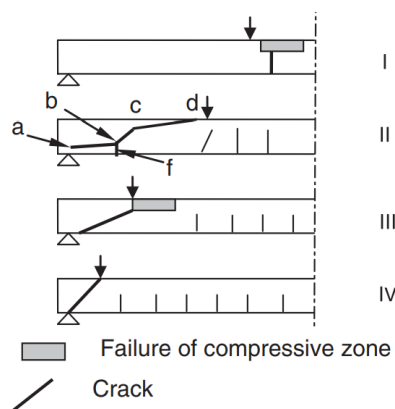
ασκείται η μέγιστη ένταση στην δοκό. Η αστοχία της δοκού, καθορίζεται τελικώς, από την αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.

(β) οι δοκοί με λόγο a_w/d που ανήκει στο διάστημα $2,50 < a_w/d < 5$, ανήκουν στην κατηγορία Τύπου II. Η μορφή αστοχίας Τύπου II αποτελεί μία ψαθυρή μορφή αστοχίας, η οποία σχετίζεται με την μόρφωση μίας βαθιάς κεκλιμένης ρωγμής εντός του διατμητικού μήκους της δοκού. Ψαθυρή αστοχία μπορεί να προκληθεί κι εξαιτίας της οριζόντιας αποκόλλησης της θλιβόμενης ζώνης, η οποία εκτείνεται μέχρι το σημείο άσκησης του φορτίου, και συμβαίνει ανεξάρτητα από την διατμητική ρηγμάτωση στον κορμό της δοκού. Αμέσως μετά τον σχηματισμό της, η κεκλιμένη ρωγμή (συνήθως εμφανίζεται για δοκούς οι οποίες χαρακτηρίζονται από a_w/d που προσεγγίζει το 2,50), η οποία είναι προέκταση καμπτικής ρωγμής που σχηματίζεται πλησίον της στήριξης, εκτείνεται σχεδόν οριζόντια στην θλιβόμενη ζώνη προς το σημείο που ασκείται το φορτίο, με ασταθή τρόπο, οδηγώντας σε απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας. Αυτή η κεκλιμένη ρωγμή είναι δυνατόν να επεκταθεί μέχρι τις στηρίξεις, κατά μήκος της διεπιφάνειας σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού, καταστρέφοντας την συνάφεια των δύο υλικών. Τέτοια μορφή αστοχίας μπορεί να αποφευχθεί μέσω της επαρκούς αγκύρωσης των ράβδων οπλισμού. Σε αυτή την μορφή αστοχίας η πρώτη ρωγμή σχηματίζεται ακριβώς πριν την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, κι εξαπλώνεται ξαφνικά, οδηγώντας σε ψαθυρή μορφή αστοχίας. Σύμφωνα με τους Li et al. (2019) [19], αυτή την μορφή αστοχίας την παρατήρησαν για δοκούς με λόγο a_w/d μεγαλύτερο του 3. Αυτή η μορφή αστοχίας οφείλεται στις εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται εξαιτίας της αλλαγής της διεύθυνσης της θλιπτικής τροχιάς που οφείλεται στην κάμψη της δοκού. Αυτές οι εφελκυστικές δυνάμεις οδηγούν στην αστοχία της θλιβόμενης ζώνης της δοκού. Η αλλαγή της διεύθυνσης της θλιπτικής τροχιάς συμβαίνει σε απόσταση $2,50 \cdot d$ από την στήριξη της δοκού, και μπορεί να αποφευχθεί με επαρκή εγκάρσιο οπλισμό στην εν λόγω περιοχή. Το σημείο αλλαγής της διεύθυνσης της θλιπτικής τροχιάς συμπίπτει με την «κορυφή» της κεκλιμένης ρωγμής που σχηματίζεται στο διατμητικό μήκος της δοκού. Στις δοκούς Τύπου II, στο σημείο όπου εμφανίζεται τόσο η μέγιστη ροπή αλλά κι η μέγιστη τέμνουσα (σημείο επιβολής των φορτίων), μπορεί να συμβεί ταυτόχρονη αστοχία της θλιβόμενης ζώνης και διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού. Αυτή η μορφή αστοχίας εξελίσσεται με βάση τον παρακάτω μηχανισμό: εξαιτίας της διαρροής του εφελκυσμένου οπλισμού άρα και της επερχόμενης απώλειας της συνάφειας του με το σκυρόδεμα, μειώνεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης λόγω της επέκτασης της βαθιάς καμπτικής ρωγμής προς αυτήν, δημιουργώντας έτσι πιο έντονο εντατικό πεδίο τοπικά στην περιοχή αυτή, αλλά και εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις που οδηγούν εν τέλει και στην ταυτόχρονη αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.

(γ) για λόγο από 1,50 έως 2,50 (δοκοί που αστοχούν με μορφή αστοχίας Τύπου III) η αστοχία καθορίζεται από τις διατμητικές ρωγμές που αναπτύσσονται ανάμεσα στο σημείο επιβολής του φορτίου και την στήριξη της δοκού, με μία από αυτές να είναι η κύρια. Σε αυτόν τον τύπο δοκών συνεισφέρει διατμητικά το αρηγμάτωτο θλιβόμενο σκυρόδεμα καθώς κι ο μηχανισμός τόξου, μέσω της απόκρισης του διαγώνιου θλιπτήρα [19]. Οι ρωγμές αναπτύσσονται σταδιακά με την αύξηση του φορτίου, κι όχι με ασταθή τρόπο [19]. Σύμφωνα με τον Kotsovos [45] η διαγώνια ρηγμάτωση στο διατμητικό μήκος της δοκού συμβαίνει ανεξάρτητα από την όποια προγενέστερη καμπτική ή διατμητική ρηγμάτωση της και η δημιουργία αυτής της ρωγμής δεν ταυτίζεται με την άμεση αστοχία της δοκού, αλλά απαιτείται περαιτέρω αύξηση του φορτίου. Επιπροσθέτως, τονίζεται πως η δοκός δεν αστοχεί εντός του διατμητικού της μήκους, αλλά εντός του «καμπτικού μήκους» της, στο οποίο επεκτείνεται η διαγώνια ρωγμή και προκαλεί αστοχία της θλιβόμενης ζώνης πριν την διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού με βάση τον παρακάτω μηχανισμό: η θλιβόμενη ζώνη της δοκού στο σημείο επιβολής το φορτίου εμφανίζει μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή εξαιτίας των τριαξονικών συνθηκών που επικρατούν στο σημείο αυτό, επομένως, αλλάζει τροχιά και κατευθύνεται προς την θλιβόμενη ζώνη του καμπτικού μήκους της δοκού στην οποία δεν επικρατούν τριαξονικές συνθήκες, κι αποτελεί την πιο ασθενή διαδρομή. Στην περιοχή που ασκείται το φορτίο το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσιως, κάτι το οποίο προκαλεί εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις στο παρακείμενο σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης του καμπτικού μήκους, μειώνοντας σημαντικά την αντοχή του.

(δ) δοκοί με λόγο a_w/d μικρότερο ή ίσο με 1, μπορεί να εμφανίσουν είτε καμπτική ή διατμητική μορφή αστοχίας, ανάλογα με τις διαστάσεις της δοκού. Συγκεκριμένα οι δοκοί που έχουν μεγαλύτερες

διαστάσεις, αστοχούν πλαστικά. Ωστόσο, ο τρόπος αστοχίας δεν επιφέρει σημαντική διαφορά στην τιμή της αντοχής της δοκού.



Εικόνα 4. Σκαριφηματική αναπαράσταση του τρόπου αστοχίας δοκών υπό κάμψη τεσσάρων σημείων ανάλογα με τον Τύπο αστοχίας δοκού που αντιστοιχούν σε σχέση με τον λόγο διατμητικού τους μήκους προς στατικό τους ύψος (a/d) [45]

Όπως αναφέρονται συγκεντρωτικά από τους Li et al (2019) [19] τέσσερις είναι οι μηχανισμοί διατμητικής αντίστασης του ίδιου του σκυροδέματος [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52]:

(α) συνεισφορά του αρηγμάτωτου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης έναντι τέμνουσας. Η παραπάνω συνεισφορά ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος της δοκού, εφόσον το σύστημα μεταφοράς της δύναμης μετατρέπεται από διαγώνια θλίψη, σε διατμητική θλίψη και διαγώνιο εφελκυσμό. Σύμφωνα με την Lantsoght [43] ο παραπάνω μηχανισμός συνεισφέρει 20% [53] με 40% [54] στη συνολική συνεισφορά του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας,

(β) η αλληλεμπλοκή των αδρανών κατά μήκος των ρηγματωμένων επιφανειών του σκυροδέματος. Αφορά στην αντίσταση που προσφέρουν τα προεξέχοντα αδρανή από τις δύο σχηματιζόμενες επιφάνειες σκυροδέματος που δημιουργούνται από την ρωγμή. Αυτός ο μηχανισμός εξαρτάται από τον τύπο των αδρανών, από την κλίση των ρωγμών και από την αντοχή του τσιμέντου,

(γ) η δράση βλήτρου του εφελκυσμένου σπλισμού. Ο εφελκυσμένος σπλισμός αποτελεί τον μοναδικό σύνδεσμο ανάμεσα στα ρηγματωμένα τμήματα σκυροδέματος, ο οποίος αναλαμβάνει να μεταβιβάσει τις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτός ο μηχανισμός εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης του σκυροδέματος, εφόσον είναι αυτή που αστοχεί όταν η δράση βλήτρου γίνεται μεγάλη. Σύμφωνα με την Lantsoght [43] ο παραπάνω μηχανισμός συνεισφέρει 10-35% στη συνολική συνεισφορά του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας,

(δ) η ταυτόχρονη ανάπτυξη του μηχανισμού τόξου και δοκού. Ο μηχανισμός τόξου αφορά στην συνεισφορά του διαγώνιου θλιπτήρα ανάμεσα στο σημείο επιβολής του φορτίου και την στήριξη της δοκού για δοκούς με λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος μικρότερου του 2,50 κι ο μηχανισμός δοκού αφορά κυρίως δοκούς με λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος μεγαλύτερους του 2,50. Συνήθως, η αυξημένη συνεισφορά του μηχανισμού τόξου δεν λαμβάνεται υπόψη στους τύπους της βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, κάτι το οποίο οδηγεί σε πολύ συντηρητικά αποτελέσματα [43].

Παρακάτω σημειώνεται η συνεισφορά των ινών στους παραπάνω μηχανισμούς αντίστασης του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας σύμφωνα με την Lantsoght [43]:

(α) συνεισφορά του αρηγμάτωτου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης έναντι τέμνουσας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί οι ίνες να μην προσφέρουν σαφή βελτίωση της θλιπτικής αντοχής στο ινοπλισμένο σκυροδέμα, ωστόσο εφόσον στην ισοδυναμία εσωτερικών κι εξωτερικών δυνάμεων που δρουν στην διατομή, στον όρο των εφελκυστικών δυνάμεων προστίθεται ο όρος των εφελκυστικών δυνάμεων που παραλαμβάνουν οι ίνες, τότε αναγκαστικά για να τηρείται αυτή η ισοδυναμία θα

πρέπει να μεγαλώσει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης. Κατεπέκταση, αυξάνεται κι η συνεισφορά της θλιβόμενης ζώνης στην απόκριση της δοκού γενικότερα.

(β) η αλληλεμπλοκή των αδρανών κατά μήκος των ρηγματωμένων επιφανειών του σκυροδέματος. Η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος, μειώνει το άνοιγμα των ρωγμών κάτι το οποίο διατηρεί ενεργό τον παραπάνω μηχανισμό, ακόμα και για μεγαλύτερες τιμές φορτίου.

(γ) η δράση βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού. Με την προσθήκη ινών στο μίγμα βελτιώνεται σημαντικά η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (κατεπέκταση και της επικάλυψης του σκυροδέματος), άρα κι η συνεισφορά της δράσης βλήτρου. Επίσης, βελτιώνεται και η συνάφεια ανάμεσα στον εφελκόμενο διαμήκη οπλισμό και το σκυρόδεμα, κάτι το οποίο επιδρά θετικά στον μηχανισμό της δράσης βλήτρου [55]. Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η ανάπτυξη κι επέκταση ρωγμών είναι πιο αργή, άρα κι η δράση βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού γίνεται μεγαλύτερη [56].

(δ) η ταυτόχρονη ανάπτυξη του μηχανισμού τόξου και δοκού. Μέσα από την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος ο μηχανισμός τόξου ενισχύεται εφόσον ασκείται επιπρόσθετη θλίψη κατά μήκος της ρωγμής μέσω των ινών, κάτι το οποίο διατηρεί την μεταφορά της διατμητικής δύναμης κατά μήκος της κύριας διατμητικής ρωγμής.

(ε) η μεταφορά εφελκυστικών δυνάμεων κάθετα στην διεύθυνση της ρωγμής. Αυτός ο μηχανισμός αφορά κατ' αποκλειστικότητα τις ίνες, οι οποίες σε ρωγμές μικρού σχετικά ανοίγματος, αναλαμβάνουν τον ρόλο της γεφύρωσης των εφελκυστικών δυνάμεων στα τμήματα σκυροδέματος εκατέρωθεν της ρωγμής. Οι ίνες ενεργοποιούνται διαμέσου της εξόλκευσης τους από το σκυρόδεμα, κι η απόκριση της στις παραπάνω εφελκυστικές δυνάμεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συνάφεια της με το περιβάλλον σκυρόδεμα, από το σχήμα τους, τον προσανατολισμό τους σε σχέση με την διεύθυνση της ρωγμής, το ποσοστό των ινών κ.ο.κ.. Ο παραπάνω μηχανισμός έχει αποδειχθεί πως συνεισφέρει στην διατμητική απόκριση του σκυροδέματος *περί το 20% της συνολικής του αντίστασης σε τέμνουσα* [43].

Σχετικά με την συνεισφορά των παραπάνω μηχανισμών στην διατμητική αντίσταση του σκυροδέματος σε τέμνουσα, υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις στην βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα αναφέρεται πως ο μηχανισμός βλήτρων και αλληλεμπλοκής των αδρανών συνεισφέρουν ανεπαίσθητα στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος, κι κατ' επέκταση οι ίνες δεν επιδρούν καθόλου στην δράση αυτών των μηχανισμών. Όλη η βελτίωση της διατμητικής αντοχής που προκύπτει εξαιτίας της εισαγωγής των ινών στο μίγμα σκυροδέματος προκύπτει από το γεγονός πως οι ίνες καθυστερούν την εξέλιξη και επέκταση των ρωγμών, μειώνουν το άνοιγμα τους ακόμα και για μεγαλύτερες τιμές φορτίου, με αποτέλεσμα να διατηρείται ένα μεγάλο ύψος αρηγμάτωτης θλιβόμενης ζώνης ακόμα και για μεγάλες τιμές φορτίου [57]. Επίσης, αναφέρεται από κάποιους ερευνητές πως ο μηχανισμός αλληλεμπλοκής των αδρανών αντικαθίσταται από τον μηχανισμό τόξου για δοκούς με λόγο διατμητικού μήκους προς ύψος μικρότερο από 2,50 και χάνει εντελώς την ισχύ του [43].

Οι παραπάνω μηχανισμοί κι οι παράμετροι που τους καθορίζουν πρέπει πάντα να λαμβάνονται στους εμπειρικούς κι ημιεμπειρικούς τύπους που αναπτύσσονται στην βιβλιογραφία για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής, και να προσαρμόζονται στα πειραματικά δεδομένα μέσα από συντελεστές [58], [59], [60], [61]. Εν προκειμένω, για το ελαφροσκυρόδεμα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο διαφορετικός τρόπος αστοχίας του, εφόσον οι ρωγμές διαπερνούν τα αδρανή του και δεν σχηματίζονται στην διεπιφάνεια αδρανών και τσιμεντόπαστας, εξαιτίας των μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών των αδρανών του σε σύγκριση με της τσιμεντόπαστας. Επομένως, σχηματίζονται λείες διεπιφάνειες ανάμεσα στα ρηγματωμένα τμήματα σκυροδέματος, κάτι το οποίο μειώνει και την συνεισφορά της αλληλεμπλοκής των αδρανών, αφού μειώνεται η τριβή μεταξύ τους. Κατ' αντιστοιχία στην βιβλιογραφία έχει αποδειχθεί πως το ελαφροσκυρόδεμα έχει μειωμένη συνάφεια με τον εφελκόμενο διαμήκη οπλισμό σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, κάτι το οποίο μειώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού της δράσης βλήτρου. Τέλος, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος είναι μειωμένα σε σχέση με του συμβατικού σκυροδέματος, κάτι το οποίο αντικατοπτρίζεται όσον αφορά την απόκριση του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας, στους μηχανισμούς που βασίζονται στην συνεισφορά του αρηγμάτωτου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης καθώς και στον μηχανισμό τόξου που αφορά την συνεισφορά του διαγώνιου θλιπτήρα.

Στην βιβλιογραφία, η συνεισφορά των ινών έναντι τέμνουσας σε δοκούς χωρίς συμβατικό διατμητικό οπλισμό, στους εμπειρικούς και ημιεμπειρικούς τύπους ποσοτικοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους: (α) ως συνεισφορά πρόσθετου οπλισμού έναντι τέμνουσας, υπολογίζεται ξεχωριστά και προστίθεται στην απόκριση του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας [18],[20],[47],[56],[62], (β) ως βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, επομένως η συνεισφορά των ινών σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη μέσα από τα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά (θλιπτική, καμπτική αντοχή) του σκυροδέματος στην ίδια την συνεισφορά του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας [41],[47],[49].

2.4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τα πειραματικά αποτελέσματα ινοπλισμένων δοκών σκυροδέματος

Εκτεταμένη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί στην διεθνή βιβλιογραφία γύρω από την συμπεριφορά δοκών συμβατικού οπλισμένου σκυροδέματος υπό κάμψη τριών/τεσσάρων σημείων, αποτιμώντας την συμπεριφορά τους, την καμπτική τους αντοχή (ενδεικτικά [63],[64]) ή διατμητική (ενδεικτικά [42],[65],[66]) τους αντοχή ανάλογα με τον συνδυασμό των εξεταζόμενων παραμέτρων της εκάστοτε έρευνας. Σε αυτές τις έρευνες αξιολογούνται τα πειραματικά αποτελέσματα, διαμορφώνονται και προσαρμόζονται εμπειρικοί ή ημιεμπειρικοί τύποι για την πρόβλεψη της καμπτικής και διατμητικής αντοχής των δοκών και διαμορφώνονται μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη της αντοχής [67]. Σε αυτές τις έρευνες έχει τονιστεί η σπουδαιότητα του μοτίβου ρηγμάτωσης για την αποτίμηση της συνεισφοράς των ινών στην αντοχή και πλαστιμότητα των δοκών, εφόσον οι ίνες ενεργοποιούνται αμέσως μετά την ρηγμάτωση μέσω της εξόγκωσης τους.

Παρακάτω, περιγράφονται κι οι αντίστοιχες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε ελαφροσκυροδέμα -οι οποίες είναι σημαντικά λιγότερες- με τις βασικές εξεταζόμενες παραμέτρους και τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν. Παρατίθενται επίσης, συγκεντρωτικά διαγράμματα και οι τύποι πρόβλεψης της αντοχής που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία και συγκρίνονται μεταξύ τους. Μέσα από τα συμπεράσματα και τις ελλείψεις που παρατηρούνται στα δεδομένα της βιβλιογραφίας, θα τεθούν οι βάσεις για την πειραματική έρευνα που θα διεξαχθεί στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας.

2.4.1. Διάτμηση

Γενικά στην βιβλιογραφία έχει αποδειχθεί πως οι ίνες συνεισφέρουν περισσότερο στην διατμητική αντοχή των δοκών παρά στην καμπτική [64]. Έχει αποδειχθεί ακόμα και με ένα ελάχιστο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού, οι ίνες καθυστερούν την ρηγμάτωση καθώς και την εξέλιξη της. Επίσης, η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος μπορεί να μετατρέψει την αστοχία από ψαθυρή σε πιο πλαστική [64]. Επιβεβαιώνεται και από κανονισμούς ότι οι συνδετήρες μπορούν να αντικατασταθούν εξ ολοκλήρου από κεκαμμένες μεταλλικές ίνες σε ογκομετρικό ποσοστό τουλάχιστον 0,75% [17], [55]. Στις παρακάτω παραγράφους σχολιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας που σχετίζονται με την διατμητική αντοχή δοκών χωρίς συνδετήρες. Επίσης, συγκεντρώνονται σε διαγράμματα πειραματικά αποτελέσματα δοκών όπως είναι η διατμητική τάση στο μέγιστο φορτίο τ_u , η διατμητική τάση στην πρώτη ρηγμάτωση τ_{cr} και η πλαστιμότητα των δοκών, που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία αναλύονται παρακάτω, σε σύγκριση με βασικές παραμέτρους ή συνδυασμό παραμέτρων που έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν την συνεισφορά του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας. Αποτέλεσμα των παραπάνω διαγραμμάτων είναι ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, της επιρροής των εκάστοτε παραμέτρων στην διατμητική απόκριση του σκυροδέματος κι η παραγωγή τύπων για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται και μετά για την σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας.

2.4.1.1. Συμβατικό ινοπλισμένο σκυροδέμα

Έχουν γίνει πολυάριθμες μελέτες για την μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών κι ιδιοτήτων του ινοπλισμένου συμβατικού σκυροδέματος στην βιβλιογραφία. Έχει μελετηθεί τόσο η καμπτική όσο και η διατμητική συμπεριφορά του σκυροδέματος σε δοκίμια μικρής και μεσαίας κλίμακας. Στο παρόν

κεφάλαιο θα παρατεθούν και σχολιαστούν τα αποτελέσματα ερευνών σε δοκάρια ινοπλισμένου και μη συμβατικού σκυροδέματος που πληρούν τα παρακάτω κριτήρια: (α) τιμή λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος από 2 έως 4, αποκλείοντας τις ακραίες περιπτώσεις μεγέθους και διαστάσεων δοκών, (β) θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος 24 έως 49 MPa, αποκλείοντας έτσι τα σκυροδέματα πολύ χαμηλών ή πολύ υψηλών αντοχών και επικεντρώνοντας την προσοχή σε σκυροδέματα συμβατικών αντοχών, (γ) ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού από 1,40 έως και 2,70%, κατοχυρώνοντας έτσι ότι οι δοκοί είναι σχεδιασμένες ώστε να μπορούν να φτάσουν την καμπτική τους αντοχή, (δ) ογκομετρικό ποσοστό ινών μέχρι 1,50%, ούτως ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα ομοιόμορφης διασποράς των ινών στο σκυρόδεμα κι επαρκούς ανάμειξης του σκυροδέματος, λόγω μεγάλης συγκέντρωσης ινών στην μάζα του, (ε) λόγο μήκους προς διάμετρο ινών από 55 έως 80, προκειμένου να υπάρχει επαρκής αγκύρωση των ινών στο σκυρόδεμα αλλά και να μην δημιουργούνται προβλήματα στην ομοιόμορφη διασπορά των ινών στο σκυρόδεμα, εξαιτίας του μεγάλου τους μήκους, και (στ) οι δοκοί δεν έχουν εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες). Το τελευταίο κριτήριο αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο, εφόσον είναι αυτή που επιτρέπει το να ληφθεί η τιμή της καθαρής συνεισφοράς του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας. Τονίζεται πως εφόσον το αντικείμενο της παρούσας έρευνας είναι η μελέτη της διατμητικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος παρακάτω παρατίθενται κάποια ποιοτικά συμπεράσματα των ερευνών και πειραματικά αποτελέσματα τα οποία θα βοηθήσουν στον σχολιασμό και μελέτη των αποτελεσμάτων του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος.

Οι Kwak et al. (2002) διενέργησαν πειράματα κάμψης τεσσάρων σημείων σε 12 δοκούς χωρίς διατμητικό οπλισμό με διάφορες τιμές λόγων διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος (2-4), διαφορετικά ποσοστά εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού, ινών (0,50 & 0,75%) καθώς και διαφορετικές αντοχές σκυροδέματος. Οι ίνες που χρησιμοποίησαν ήταν μεταλλικές κεκαμμένες ίνες, με λόγο μήκους προς διάμετρο 62,50. Συμπέραναν πως η αντοχή των δοκών με λόγο $a/d=2$, εξαιτίας της παρουσίας των ινών, αυξήθηκε από 69-80% για ποσοστά ινών 0,50% και 0,75%, αντίστοιχα. Οι δοκοί με λόγο $a/d=2$ αστόχησαν συνδυαστικά σε κάμψη και διάτμηση. Η αύξηση της διατμητικής αντοχής λόγω της εισαγωγής των ινών στο μίγμα σκυροδέματος ήταν αρκετά μικρότερη (22-38%) για μεγαλύτερους λόγους a/d (3,4), αλλά οι δοκοί αστόχησαν καμπτικά, άρα και πιο πλαστικά. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, παρατηρήθηκε πως η παρουσία των ινών στο μίγμα σκυροδέματος μείωσε το άνοιγμα και την απόσταση των ρωγμών, αύξησε την δυνατότητα μετακίνησης των δοκών και άλλαξε τον τρόπο αστοχίας από ψαθυρό σε περισσότερο πλαστικό.

Οι Dihn et al. (2010) [55] δοκίμασαν 28 δοκούς, με λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος περί τα 3,50, ινοπλισμένου και μη σκυροδέματος σε κάμψη τεσσάρων σημείων εξετάζοντας διάφορες παραμέτρους ως προς την διατμητική αντοχή των δοκών, όπως είναι: (α) η αντοχή των ινών (1100 και 2300 MPa), (β) οι διαστάσεις των ινών, ο λόγος μήκους προς διάμετρο κυμαινόταν από 55 έως 80, (γ) το ποσοστό των ινών (0,75, 1, 1,50%), (δ) το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού (1,60, 2, 2,10, 2,70%) και (ε) η αντοχή του σκυροδέματος (29,60-49,20 MPa). Επιβεβαιώθηκε ότι ποσοστό ινών 0,75% βελτιώνει σημαντικά την διαγώνια ρηγμάτωση δοκών χωρίς συνδετήρες, αυξάνοντας το πλήθος τους και μειώνοντας το άνοιγμα τους. Οι ίνες με το μεγαλύτερο μήκος επέτρεψαν μεγαλύτερο άνοιγμα ρωγμής πριν την αστοχία, ωστόσο οι ίνες με μεγαλύτερο μήκος οδήγησαν σε προβλήματα στην διασπορά των ινών στο μίγμα σκυροδέματος και σε συσσωμάτωση τους, πράγμα που μείωσε την ποιότητα της διάστρωσης και συμπύκνωσης του σκυροδέματος. Επομένως, τέθηκε σαν όριο, να χρησιμοποιούνται ίνες με μήκος ίσο ή μικρότερο από την καθαρή απόσταση των διαμήκων ράβδων μεταξύ τους. Ως όρια για το μέγιστο άνοιγμα ρωγμής και μέγιστη παραμόρφωση της δοκού επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν εκφράσεις που έχουν ως συνάρτηση τους το μήκος των χρησιμοποιούμενων ινών ως εξής: (α) μέγιστο άνοιγμα ρωγμής 5% του μήκους των ινών (L_f), (β) μέγιστη μετατόπιση το μέσον της δοκού $L_f/24$, (γ) τιμές φορτίου 75% και 40% του φορτίου στην πρώτη ρηγμάτωση αντιστοιχούν σε μετακινήσεις του μέσου της δοκού ίσες με $L_f/24$ και $1/150$ του διατμητικού μήκους της δοκού, αντίστοιχα. Τέλος, η προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος σε ποσοστό 0,75% οδήγησε σε αύξηση της διατμητικής αντοχής μεγαλύτερη ή ίση από $\frac{1}{3} * \sqrt{f_c}$. Συνοπτικά οι ποσοστιαίες αυξήσεις της διατμητικής αντοχής με την μεταβολή των διάφορων εξεταζόμενων

παραμέτρων είναι οι παρακάτω: (α) για προσθήκη ινών σε ποσοστό 1 και 1,50% με λόγο μήκους προς διάμετρο ίσο με 55 και όριο διαρροής 1100MPa η αντοχή αυξήθηκε κατά 137%, (β) για προσθήκη ινών σε ποσοστό 1% με λόγο μήκους προς διάμετρο ίσο με 55 και 80 και όριο διαρροής 2300 MPa και 1100MPa, αντίστοιχα, η αντοχή αυξήθηκε πάνω από 200%, (γ) για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,75% και 1% με λόγο μήκους προς διάμετρο ίσο με 80 και όριο διαρροής 1100MPa η αντοχή αυξήθηκε κατά 58% και 98%, αντίστοιχα. Όπως παρατηρήθηκε από τα παραπάνω αποτελέσματα, η αύξηση του ποσοστού των ινών σε 1,50% δεν οδήγησε σε σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής των δοκών.

Οι Sahoo & Sharma (2014) [65] διενέργησαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε 12 μη ινοπλισμένες και ινοπλισμένες δοκούς. Οι ίνες που χρησιμοποιήσαν ήταν κεκαμμένες μεταλλικές ίνες με λόγο μήκους προς διάμετρο 80. Εξετάστηκε η επιρροή διάφορων παραμέτρων όπως το ογκομετρικό ποσοστό των ινών (0, 0,50, 1, 1,50%), το ποσοστό του εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού (0,87, 1,15, 1,95%), η ποσότητα του εγκάρσιου οπλισμού ($\Phi 8/150$, $\Phi 8/180$, $\Phi 8/120$), ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος (2,30, 3,45) και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Μέσα από αυτήν την έρευνα προέκυψε πως η προσθήκη ινών σε ογκομετρικό ποσοστό 0,75% σε δοκούς με λόγο $a/d=3,45$ χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό είναι αρκετή ούτως ώστε να επιτευχθεί η ίδια αντοχή που θα αναπτυσσόταν σε δοκούς με εγκάρσιο οπλισμό. Ωστόσο, προκειμένου να επιτευχθεί ένα επαρκές επίπεδο πλαστικότητας ένα ελάχιστο ογκομετρικό ποσοστό ινών 1% απαιτείται. Σε δοκούς με $a/d=2,30$, με επαρκή ποσότητα συνδετήρων στο διατμητικό τους μήκος, φαίνεται να μην αυξάνει σημαντικά την καμπτική αντοχή των δοκών (όχι πάνω από 5-7%), ωστόσο αυτό το ποσοστό φαίνεται να είναι αρκετό ώστε να αλλάξει την μορφή αστοχίας από διατμητική σε καμπτική. Συνοπτικά οι ποσοστιαίες αυξήσεις της διατμητικής αντοχής με την μεταβολή των διάφορων εξεταζόμενων παραμέτρων είναι οι παρακάτω: (α) σε δοκούς με $a/d=3,45$, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,75, 1 και 1,50% η αντοχή αυξήθηκε κατά 13, 0 και 8,10%, αντίστοιχα, (β) σε δοκούς με $a/d=2,30$, με εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,50, 1 και 1,50% η αντοχή αυξήθηκε κατά 5-7, 8-9 και 5-7%, αντίστοιχα (σε όλες τις περιπτώσεις όχι πάνω από 10%).

Οι Folino et al. (2020) [64] εξέτασαν 27 δοκούς με διαφορετικά ποσοστά εφελκυσμένου, εγκάρσιου οπλισμού κι ογκομετρικά ποσοστά ινών. Χρησιμοποίησαν κεκαμμένες μεταλλικές ίνες με λόγο μήκους προς διάμετρο ίσο με 67. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκαν και συμπεριλήφθησαν στα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα μόνο τα αποτελέσματα των 9 δοκών, που αφορούν στο Layout 2, στο οποίο οι δοκοί δεν έχουν καθόλου εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, ως εκ τούτου αστόχησαν διατμητικά. Οι ίνες σε αυτόν τον τύπο δοκών αύξησαν την διατμητική αντοχή των δοκών κι άλλαξαν τον τρόπο αστοχίας από έναν διατμητικό ψαθυρό σε έναν πιο καμπτικό-πλάστιμο. Το φορτίο στο οποίο ξεκίνησε η ρηγμάτωση δεν έδειξε να επηρεάζεται ιδιαίτερα από την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος. Ωστόσο, η εξέλιξη της ρηγμάτωσης αποδείχθηκε να μην είναι ασταθής, όπως στις περιπτώσεις ψαθυρής αστοχίας. Αποδείχθηκε πως τα μικρότερα πλάτη ρωγμών προέκυψαν στις δοκούς με το υψηλότερο ποσοστό εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού. Τέλος, αποδείχθηκε πως στις περιπτώσεις των δοκών που αστόχησαν διατμητικά ο τύπος του Model Code [68] οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα, σε όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο χρήζει τροποποίησης. Συνοπτικά, σε δοκούς με $a/d=2,6$, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,50 και 0,75% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 29 και 28%, αντίστοιχα.

Στο παράρτημα Β παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των ερευνών των οποίων τα συμπεράσματα ανεφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και όσα πληρούσαν τα κριτήρια που τέθηκαν στην αρχή αυτής της ενότητας.

2.4.1.2. Ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα

Αξιοσημείωτη έρευνα έχει σημειωθεί όσον αφορά την μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος στην βιβλιογραφία, κυρίως, όμως, σε δοκίμια μικρής κλίμακας. Ωστόσο έχει, επίσης, μελετηθεί τόσο η καμπτική όσο και η διατμητική συμπεριφορά του σκυροδέματος, σε δοκίμια δοκών μεγαλύτερης κλίμακας, τα οποία προσεγγίζουν την φυσική κλίμακα. Εφόσον αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της διατμητικής

αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος δοκών, στο παρόν κεφάλαιο θα παρατεθούν και σχολιαστούν τα αποτελέσματα ερευνών που σχετίζονται με την διατμητική αντοχή δοκών από ινοπλισμένο και μη ελαφροσκυροδέμα. Τα πειραματικά αποτελέσματα που θα χρησιμοποιηθούν για την διαμόρφωση των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων πληρούν τα παρακάτω κριτήρια: (α) τιμή λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος από 1 έως 4,9, αποκλείοντας τις ακραίες περιπτώσεις μεγέθους και διαστάσεων δοκών, (β) θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος 17 έως 57 MPa, αποκλείοντας έτσι τα σκυροδέματα πολύ χαμηλών ή πολύ υψηλών αντοχών και επικεντρώνοντας την προσοχή σε σκυροδέματα συμβατικών αντοχών, (γ) ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού από 0,45 έως και 4,30%, κατοχυρώνοντας έτσι ότι οι δοκοί είναι σχεδιασμένες ώστε να μπορούν να προσεγγίσουν την καμπτική τους αντοχή, (δ) ογκομετρικό ποσοστό ινών μέχρι 1,20%, ούτως ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα ανομοιόμορφης διασποράς των ινών στο σκυρόδεμα κι ανεπαρκούς ανάμειξης του σκυροδέματος, λόγω μεγάλης συγκέντρωσης ινών στην μάζα του, (ε) λόγο μήκους προς διάμετρο ινών από 37,50 έως 100, προκειμένου να υπάρχει επαρκής αγκύρωση των ινών στο σκυρόδεμα αλλά και να μην δημιουργούνται προβλήματα στην ομοιόμορφη διασπορά των ινών στο σκυρόδεμα, εξαιτίας του μεγάλου τους μήκους, και (στ) οι δοκοί δεν έχουν εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες). Το τελευταίο κριτήριο αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο, εφόσον είναι αυτό που επιτρέπει να ληφθεί η τιμή της καθαρής συνεισφοράς του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας.

Οι Swamy et al. [56] πραγματοποίησαν δοκιμές σε 18 δοκούς με γεωμετρία διατομής «I» με διάφορους λόγους διατμητικού μήκους και στατικού ύψους (2, 3,43, 4,91), εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού (1,55, 2,76, 4,31%) και ογκομετρικό ποσοστό κυματοειδών ινών 1%, μήκους 50mm και διαμέτρου 0,50mm (λόγος μήκους προς διάμετρο 100), και χωρίς συμβατικό διατμητικό οπλισμό. Τα ινοπλισμένα δοκίμια ελαφροσκυροδέματος ανέπτυξαν αυξημένη διατμητική αντοχή κατά 60 - 210%, και καμπτική αντοχή κατά 40%, ανάλογα με το εξεταζόμενο λόγο διατμητικού μήκους και στατικού ύψους καθώς και εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού, μείωσαν τις παραμορφώσεις σε όλα τα επίπεδα φορτίου κι αύξησαν σημαντικά την πλαστιμότητα των δοκών. Επίσης, αυξήθηκε το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η καμπτική ή η διατμητική ρωγμή, κάτι το οποίο αποδίδεται γενικότερα στα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος λόγω της προσθήκης των ινών. Η συνεισφορά των ινών στο φορτίο αστοχίας των δοκών ήταν πιο εμφανής στις δοκούς με λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ίσο με 2. Σημειώνεται πως η συνεισφορά των ινών σε όρους μετακίνησης έγινε πιο αισθητή μετά την ρηγμάτωση του σκυροδέματος, όπου κι ενεργοποιήθηκαν μέσω της εξόλκευσης τους. Όσον αφορά την ρηγμάτωση, αύξησαν την ποσότητα των ρωγμών, μειώνοντας την απόσταση και το άνοιγμα τους, καθώς και εμποδίζοντας και περιορίζοντας την επέκταση τους προς τις στηρίξεις, κάτι το οποίο ευνόησε την συνάφεια του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού και σκυροδέματος. Η αποφλοίωση της επικάλυψης του σκυροδέματος περιορίστηκε εμφανώς, ειδικά προς τα σημεία επιβολής των φορτίων. Επίσης, ενισχύθηκε κι η ακεραιότητα της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος. Σημειώνεται πως η καμπτική αντοχή κατάφερε να επιτευχθεί μόνο σε δοκούς με ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού 1,55% και για δοκούς με ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού 2,76% και μεγαλύτερους λόγους διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος. Συνοπτικά, σε δοκούς με: (α) $a/d=2, 3,43$ και $4,91$ χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, και με ποσοστό εφελκόμενου ποσοστού $\rho_s=4,31\%$ για προσθήκη ινών σε ποσοστό 1% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 63, 212 και 143%, αντίστοιχα, (β) $a/d=2$ και $3,43$ χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, και με ποσοστό εφελκόμενου ποσοστού $\rho_s=2,76\%$ για προσθήκη ινών σε ποσοστό 1% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 97 και 157%, αντίστοιχα, (γ) $a/d=4,91$ χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, και με ποσοστό εφελκόμενου ποσοστού $\rho_s=2,76\%$ για προσθήκη ινών σε ποσοστό 1% η καμπτική αντοχή αυξήθηκε κατά 177,4%, και (δ) $a/d=2, 3,43$ και $4,91$ χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, και με ποσοστό εφελκόμενου ποσοστού $\rho_s=1,55\%$ για προσθήκη ινών σε ποσοστό 1% η καμπτική αντοχή αυξήθηκε κατά 115, 177 και 94%, αντίστοιχα.

Ο Kang & Hong (2010) [69] πραγματοποίησαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε 12 δοκούς, 3 ινοπλισμένου συμβατικού σκυροδέματος και 9 ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Στα αποτελέσματα των 9 δοκών ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος θα δοθεί βάση σε αυτή την ενότητα. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν κεκαμμένες μεταλλικές ίνες με λόγο μήκους προς

διάμετρο ίση με 62,50. Οι συγγραφείς αναφέρουν πως η συνεισφορά των ινών στην μηχανική συμπεριφορά κι ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος είναι το ίδιο αποδοτική όπως και στο συμβατικό σκυροδέμα. Επομένως, προτείνουν μαζί με την εισαγωγή μίας ευμενέστερης τιμής του μειωτικού συντελεστή λ , αφού ληφθεί υπόψη η θετική συνεισφορά των ινών, να χρησιμοποιηθούν τύποι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της αντοχής έναντι τέμνουσας του συμβατικού σκυροδέματος, για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος. Συγκεκριμένα προτείνουν τους τύπους που αναπτύχθηκαν από τους Ashour et al. (model A; 1992) [70] και Kwak et al. (2002) [42] με τις παρακάτω τροποποιήσεις που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2. Επίσης, διαπίστωσαν πως τα μοντέλα των Narayanan & Darwish (1987) [71], Ashour et al. (model B; 1992) [70], Shin et al. (1994) [72] δεν είναι κατάλληλα για σχεδιασμό, αφού υπερεκτιμούν την διατμητική αντοχή των δοκών. Τα μοντέλα των Khuntia et al. (1999) [73], Sharma et al. (1986) [74], Choi et al. (2007) [75] θεωρούνται εξαιρετικά συντηρητικά για τον σχεδιασμό των δοκών έναντι τέμνουσας, επομένως δεν μελετήθηκαν περαιτέρω. Τα παραπάνω συμπεράσματα προέκυψαν μετά από επεξεργασία των παραπάνω τύπων σύμφωνα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Η πειραματική τους έρευνα [18], [69] αφορούσε σε δοκούς από ινοπλισμένο και μη συμβατικό και ελαφροβαρές σκυροδέμα, που δοκιμάστηκαν υπό φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων με παραμέτρους το λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος και το ογκομετρικό ποσοστό των ινών. Απέδειξαν πως η προσθήκη ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος προσέφερε αύξηση της διατμητικής αντοχής των δοκών κατά 18-45% αυξανόμενου του ογκομετρικού ποσοστού ινών στο μίγμα, ανάλογα με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της σύνθεσης του σκυροδέματος και την γεωμετρία των δοκών. Η αύξηση της διατμητικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος εν προκειμένου, αιτιολογείται εξαιτίας της αύξησης της θλιπτικής του αντοχής, που συμμετέχει στους μηχανισμούς έναντι τέμνουσας μέσα από την θλιπτική αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα. Επίσης, η τιμή του φορτίου την στιγμή της ανάπτυξης της πρώτης διαγώνιας ρωγμής εμφανίστηκε μεγαλύτερη κατά 35% σε σχέση με το μη ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα, εξαιτίας της βελτιωμένης καμπτικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος.

Ός προς την πλαστιμότητα, οι Kang and Hong (2011) [18], αναφέρουν πως η πλειοψηφία των ινοπλισμένων τους δοκιμών αστόχησαν με πλάστιμο τρόπο, αναπτύσσοντας τιμές πλαστιμότητας πλησίον της τιμής 3,50. Η κατάταξη του δείκτη πλαστιμότητας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια: (α) δοκίμια που ανέπτυξαν δείκτη πλαστιμότητα από 2 έως 3,50 χαρακτηρίζονται από πλαστική διατμητική-καμπτική συμπεριφορά, (β) δοκίμια που ανέπτυξαν δείκτη πλαστιμότητα μικρότερο από 2 χαρακτηρίζονται από ψαθυρή διατμητική συμπεριφορά και (γ) δοκίμια που ανέπτυξαν δείκτη πλαστιμότητα μεγαλύτερο από 3,50 χαρακτηρίζονται από πλαστική καμπτική συμπεριφορά. Οι παραπάνω τιμές των δεικτών επιβεβαιώνονται κι από την εικόνα της ρηγμάτωσης των δοκιμών και αποδεικνύουν πως στα δοκίμια ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος η έκταση των ρωγμών ελαττώθηκε, το πλήθος τους αυξήθηκε και το πλάτος τους μειώθηκε, οδηγώντας σε πιο πλαστική συμπεριφορά σε σχέση με τα μη ινοπλισμένα δοκίμια ελαφροσκυροδέματος. Συνεπώς, η αστοχία του διαγώνιου θλιπτήρα δεν συμβαίνει πριν την διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, άρα η δοκός αστοχεί καμπτικά. Παρόλα αυτά, τα δοκίμια ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος ανέπτυξαν μικρότερη πλαστιμότητα και περισσότερο ψαθυρή συμπεριφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικού ινοπλισμένου σκυροδέματος, επιβεβαιώνοντας πως το ελαφροσκυροδέμα αναπτύσσει μικρότερη διατμητική αντοχή από το συμβατικό σκυροδέμα, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τον Campione [20]. Επομένως, προτείνουν ως ελάχιστο ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,75% για δοκούς ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, βάζοντας τον ελάχιστο απαιτούμενο διατμητικό οπλισμό, προκειμένου να καθυστερείται η ανάπτυξη ρηγμάτωσης. Έτσι, αποδεικνύεται πως το όριο του ελάχιστου ογκομετρικού ποσοστού ινών 0,75% για ινοπλισμένο συμβατικό σκυροδέμα που έχει τεθεί από τον ACI-318 [17] μπορεί να εφαρμοστεί και για ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα. Συνοπτικά, σε δοκούς με: (α) $a/d=2$, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,50 και 0,75% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 16 και 18%, αντίστοιχα, (β) $a/d=3$, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,50 και 0,75% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 0,7 και 7%, αντίστοιχα και (γ) $a/d=4$, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,50 και 0,75% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 38 και 63%, αντίστοιχα.

Η έρευνα των Li et al. (2019) [19] επικεντρώθηκε γύρω από την έρευνα της συνεισφοράς των ινών στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος, εξετάζοντας 26 δοκούς -χωρίς συμβατικό διατμητικό οπλισμό- υπό κάμψη τεσσάρων σημείων μεταβάλλοντας το ποσοστό του εφελκούμενου οπλισμού, το ογκομετρικό ποσοστό των ινών και τον λόγο του διατμητικού μήκους προς το στατικό ύψος της δοκού. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν κεκαμμένες μεταλλικές ίνες με λόγο μήκους προς διάμετρο 37,50. Ως προς την μορφή αστοχίας των δοκών, καθοριστικό ρόλο έπαιξε ο λόγος διατμητικού μήκους προς το στατικό ύψος της δοκού, ενώ η συνεισφορά των ινών έγινε εμφανής κυρίως στην εξέλιξη του μοτίβου της ρηγμάτωσης, την απόσταση των ρωγμών, το πλάτος των ρωγμών και γενικότερα την πλαστιμότητα των δοκών. Η εισαγωγή ινών στο μίγμα, στο κατάλληλο ποσοστό, μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερη ψαθυρή μορφή διατμητική μορφή αστοχίας, με περισσότερες ρωγμές μικρότερου εύρους. Συνοπτικά οι δοκοί, ανάλογα με τον λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος, εμφανίζουν την παρακάτω συμπεριφορά: (α) για λόγο από 1,50 έως 2,50 εμφανίζονται δύο διατμητικές ρωγμές ανάμεσα στο σημείο επιβολής του φορτίου και στην στήριξη, κι ανάλογα με το ποσοστό των ινών εμφανίζονται και άλλες ρωγμές διατμητικές ή και καμπτικές, οι οποίες εξαπλώνονται σταθερά με την αύξηση του φορτίου κι όχι ψαθυρά, (β) για λόγο ίσο με 1, εμφανίζονται δυο διατμητικές ρωγμές μικρού πλάτους και καμπτικές ρωγμές στο μήκος της δοκού, με τον τρόπο αστοχίας να χαρακτηρίζεται κυρίως ως καμπτικός και (γ) για λόγο μεγαλύτερο του 3, σχηματίζονται δύο βασικές διατμητικές ρωγμές στο διατμητικό μήκος της δοκού, σχεδόν παράλληλες με τον άξονα της, οι οποίες εμφανίζονται λίγο πριν την αστοχία της δοκού, κι εξαπλώνονται σε μήκος και πλάτος απότομα και ψαθυρά. Στις δοκούς ως γενική παρατήρηση, σχηματίστηκαν διατμητικές ρωγμές διαμέσου των ελαφροβαρών αδρανών, με μία εξ αυτών να είναι η κύρια ρωγμή που να καθορίζει την διατμητική αστοχία. Μετά των σχηματισμό των ρωγμών, ακολούθησε η ενεργοποίηση της συνεισφοράς των ινών, οι οποίες ανέλαβαν την μεταβίβαση των εφελκυστικών δυνάμεων από το ένα τεμάχιο σκυροδέματος στο άλλο, μέσα από την εξόλκευση τους. Σχηματίστηκαν και καμπτικές ρωγμές, οι οποίες ήταν δευτερεύουσες και μικρότερου ανοίγματος, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι δοκοί είχαν οπλιστεί εξ αρχής επαρκώς για κάμψη, προκειμένου να καθοδηγήσουν την αστοχία να είναι διατμητική. Για δοκούς με λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ίσο με 2, αποδείχθηκε ότι η διατμητική αντοχή των δοκών ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος αυξήθηκε κατά 25,10%, 35,90% και 43,60% για ογκομετρικά ποσοστά ινών 0,40%, 0,80% και 1,20% αντίστοιχα. Με την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού των ινών αυξήθηκε η συνεισφορά του μηχανισμού της δράσης βλήτρου, μέσω της μείωσης της έκτασης και του πλάτους της διατμητικής ρωγμής κατά μήκος του διαμήκους εφελκούμενου οπλισμού, ενισχύθηκε κι ο μηχανισμός αλληλεμπλοκής αδρανών, αυξάνοντας την τριβή στις λείες επιφάνειες θραύσης των αδρανών, και αυξήθηκε η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος άρα κι οι συνεισφορά του αρηγμάτωσης θλιβόμενου σκυροδέματος και του μηχανισμού τόξου. Επίσης, η βασική διατμητική ρωγμή διαμορφώθηκε μακριά από τις στηρίξεις και αναπτύχθηκαν περισσότερες καμπτικές ρωγμές εντός του διατμητικού μήκους της δοκού. Συνεπώς, με την χρήση υψηλού ογκομετρικού ποσοστού ινών ($V_f=1,20\%$) στην σύνθεση ελαφροσκυροδέματος είναι δυνατόν να μεταβληθεί η μορφή αστοχίας από διατμητική σε καμπτική. Δεν σημειώθηκε καμία επιρροή των ινών στο φορτίο στο οποίο εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή, αλλά παρουσιάστηκε σημαντική βελτίωση ως προς την εξάπλωση των ρωγμών καθώς το πλάτος των ρωγμών αυξανόταν σταθερά με την αύξηση του φορτίου, με πιο έντονη αύξηση του πλάτους τους σε αρκετά μεγάλες τιμές φορτίου, σε σύγκριση με τις μη ινοπλισμένες δοκούς. Σημειώνεται πως με την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού των ινών, η μετακίνηση του μέσου της δοκού μειώθηκε διότι με την εισαγωγή των ινών στο μίγμα του σκυροδέματος αυξήθηκε η δυσκαμψία της. Συνοπτικά, σε δοκούς με: (α) $a/d=2$, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, για προσθήκη ινών σε ποσοστό 0,40, 0,80 και 1,20% η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 21, 32 και 44%, αντίστοιχα, και (β) ποσοστό ινών 0,80%, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό, με $a/d= 1,50, 3$ και 3,50 η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 62% και μειώθηκε κατά 20% και 28% αντίστοιχα σε σχέση με την αντίστοιχη διατμητική αντοχή που αναπτύχθηκε σε δοκούς με λόγο $a/d=2$ για το ίδιο ποσοστό ινών.

Παρακάτω παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των ερευνών των οποίων τα συμπεράσματα ανεφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και όσα πληρούσαν τα κριτήρια που τέθηκαν στην αρχή αυτής της ενότητας. Αποτελούν 83 δοκούς ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό

οπλισμό. Παρακάτω παρατίθενται δεδομένα για την διατμητική τάση των δοκών στο μέγιστο αναπτυσσόμενο τους φορτίο τ_u , την διατμητική τάση στην οποία εμφανίστηκαν οι πρώτες ρωγμές τ_{cr} και η πλαστιμότητα των δοκών μ , όπου υπήρχαν δεδομένα. Επίσης, οι τύποι που δίνονται μαζί με τον συντελεστή συσχέτισης σε κάποια διαγράμματα συγκεντρώνονται στο Κεφάλαιο 2.5 με τους τύπους για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος. Επίσης, παρατίθενται επικουρικά σε αυτό το σημείο για την ποσοτικοποίηση της συσχέτισης της ιδιότητας της διατμητικής αντοχής με τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Στο Κεφάλαιο 2.5 παρατίθενται οι τύποι που παρείχαν τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης. Επαρκής τιμή του συντελεστή συσχέτισης θεωρείται από 75% κι άνω.

Διατμητική αντοχή σκυροδέματος

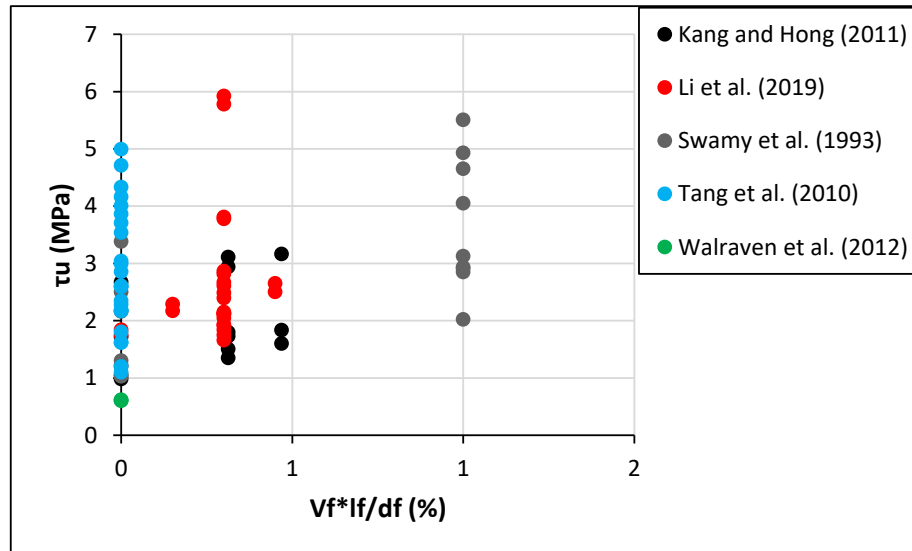
Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά διαγράμματα του μέγιστου διατμητικού φορτίου κανονικοποιημένου με το πλάτος και το στατικό ύψος της εκάστοτε δοκού προκειμένου να εξαλειφθούν οι όποιες επιρροές των διαφορετικών διαστάσεων των δοκών των διαφορετικών ερευνών. Η παραπάνω ενέργεια ήταν απαραίτητη εφόσον δεν υπάρχει συγκεκριμένο πρότυπο για την διενέργεια των δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων των δοκών, ως εκ τούτου ούτε προδιαγραφές για τις διαστάσεις των δοκιμών, πράγμα που οδηγεί σε μεγάλη διασπορά των διαστάσεων των εξεταζόμενων δοκών.

Στην Εικόνα 5 (α)-(δ) παρατίθενται συγκεντρωτικά διαγράμματα πειραματικών αποτελεσμάτων των ερευνών που αναλύθηκαν παραπάνω στην ίδια ενότητα, σε σύγκριση με τις μεμονωμένες παραμέτρους που έχει αποδειχθεί από την βιβλιογραφία ότι επηρεάζουν την διατμητική αντοχή των δοκών μέσα από την συμμετοχή τους στους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως είναι: (α) το γινόμενο ογκομετρικού ποσοστού ινών με τον λόγο μήκους προς διάμετρο τους $V_f \cdot l_f / d_f$, (β) την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c , (γ) τον λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος a_v / d και (δ) το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού ρ_s . Όπως είναι εμφανές, δεν μπορεί να σχηματιστεί κάποια σαφής τάση για την επίδραση αυτών των παραμέτρων στην διατμητική αντοχή των δοκών, καθώς επιδρούν όλες μαζί με διαφορετική βαρύτητα η κάθε μία σε αυτήν την ιδιότητα. Ωστόσο επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα των Swamy et al. [56] και Li et al. [19]; ότι ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος αποτελεί σημαντική παράμετρο καθώς καθορίζει τον τρόπο αστοχίας των δοκών. Επίσης, όσο μικρότερος είναι ο λόγος a_v / d τόσο μεγαλύτερη είναι κι η διατμητική αντοχή των δοκών, κάτι το οποίο προκύπτει από το γεγονός ότι για μικρότερους λόγους a_v / d συνεισφέρει περισσότερο ο μηχανισμός τόξου στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος (Εικόνα 5 (γ)). Επίσης, σημειώνεται αυξητική τάση της διατμητικής αντοχής των δοκών όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών κάτι το οποίο έχει αναφερθεί και τεκμηριωθεί από όλους τους προαναφερθέντες ερευνητές [18], [19], [56] μέσα από την συνεισφορά των ινών στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του διαγωνίου θλιπτήρα που επιδρά θετικά στον αναπτυσσόμενο μηχανισμό τόξου καθώς και στην αύξηση της αντοχής του αρηγμάτωτου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης. Επιπροσθέτως, αυξανόμενου του ποσοστού ινών στις δοκούς, βελτιώνεται η συνάφεια του εφελκόμενου οπλισμού με το σκυροδέμα άρα και η δράση βλήτρου, αλλά και μειώνεται και το άνοιγμα των ρωγμών ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού της αλληλεμπλοκής των αδρανών (Εικόνα 5 (α) & (β)). Επίσης, βελτιώνεται η διατμητική αντοχή αυξανόμενου του εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού καθώς αυξάνεται η συνεισφορά της δράσης βλήτρου (Εικόνα 5 (δ)).

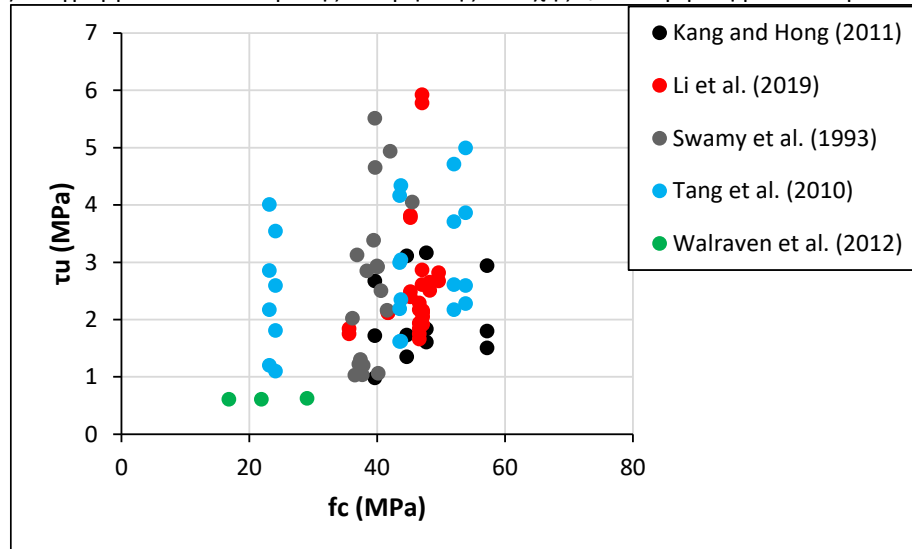
Η διατμητική αντοχή συγκρίθηκε με τους όρους $(1+V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d)$ (Εικόνα 5 (ε)) και $(1+V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d) \cdot \rho_s$ (Εικόνα 5 (στ)), προκειμένου να εξεταστεί η συνολική συνεισφορά αυτών των παραμέτρων στην διατμητική αντοχή των δοκών. Όπως γίνεται εμφανές βελτιώνεται σημαντικά η συσχέτιση της διατμητικής αντοχής των δοκών ειδικότερα στην περίπτωση που αφαιρούνται οι έρευνες των Tang et al. (2010) [52] και Walraven et al. (2012) [58], οι οποίες εμπεριέχουν μόνο αποτελέσματα διατμητικής αντοχής μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος (Εικόνα 5 (ζ)). Η συσχέτιση των τύπων είναι 0,66 (Εικόνα 5 (ε)), 0,57 (Εικόνα 5 (στ)) και 0,75 (Εικόνα 5 (ζ)). Κατ' αντιστοιχία με την προηγούμενη προσέγγιση εξαιρέθηκαν τα αποτελέσματα μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και συσχετίστηκε η διατμητική αντοχή των δοκών με τους όρους $(V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d) \cdot \rho_s$ (Εικόνα 6 (α)) και $(V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d)$ (Εικόνα 6 (β)) με συσχέτιση 0,68 και 0,72 αντίστοιχα. Συνολικά για τις παραπάνω προσεγγίσεις οι συντελεστές

συσχέτισης θεωρούνται σχετικά ικανοποιητικοί και οι εκτιμήσεις των τύπων αυτών θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Οι τύποι παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 1.

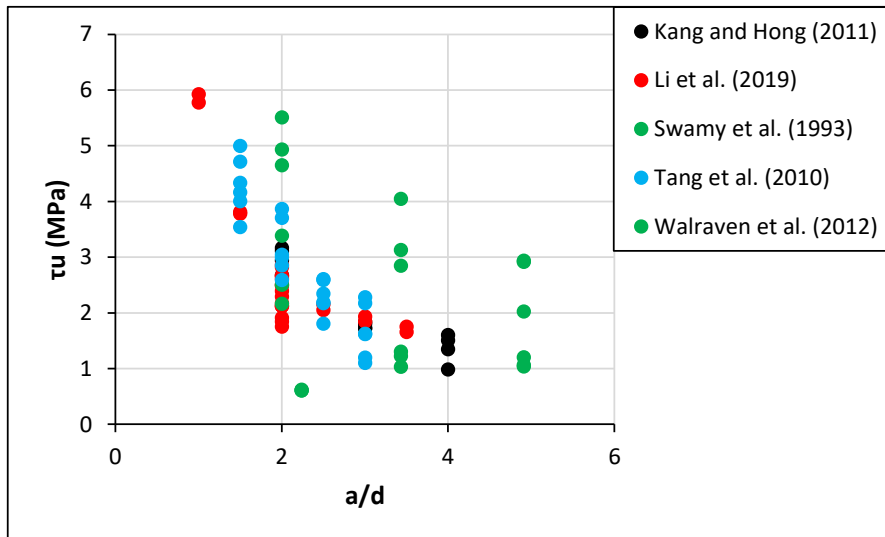
Στην συνέχεια οι πειραματικές τιμές της διατμητικής αντοχής των δοκών κανονικοποιήθηκαν με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, με σκοπό να εξαλειφθεί η επιρροή του συγκεκριμένου παράγοντα στην σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, η σύγκριση της κανονικοποιημένης διατμητικής αντοχής με τον όρο $(V_f \cdot I_f / d_f) / (a/d)$ δεν οδήγησε σε ικανοποιητική συσχέτιση (0,45- Εικόνα 7). Επιπλέον, εξετάστηκε κι η σύγκριση του λόγου της διατμητικής αντοχής των ινοπλισμένων δοκών με τις αντίστοιχες τιμές των δοκών αναφοράς τους (όπου υπήρχαν τέτοιοι συνδυασμοί δοκιμών) με τον όρο $V_f \cdot I_f / d_f$ από την οποία προέκυψε ικανοποιητική συσχέτιση της τάξης του 0,71 (Εικόνα 8).



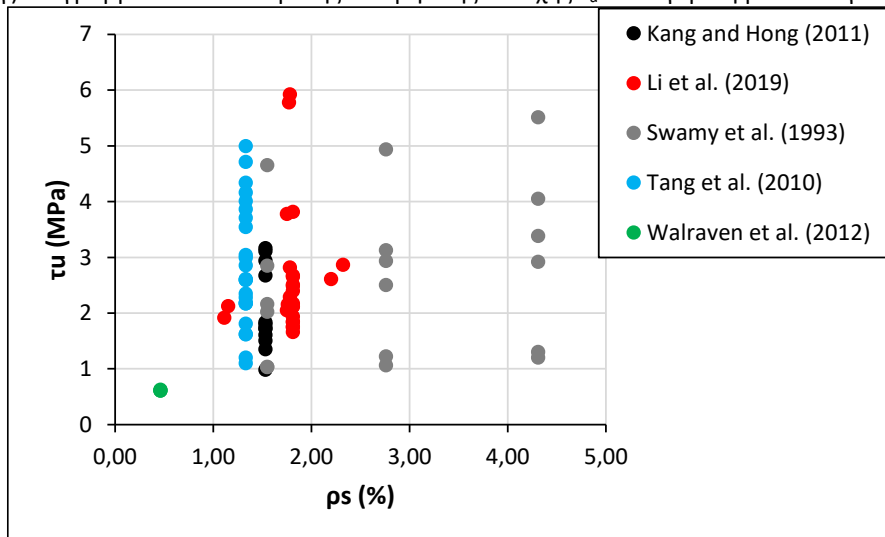
(α) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $V_f \cdot I_f / d_f$



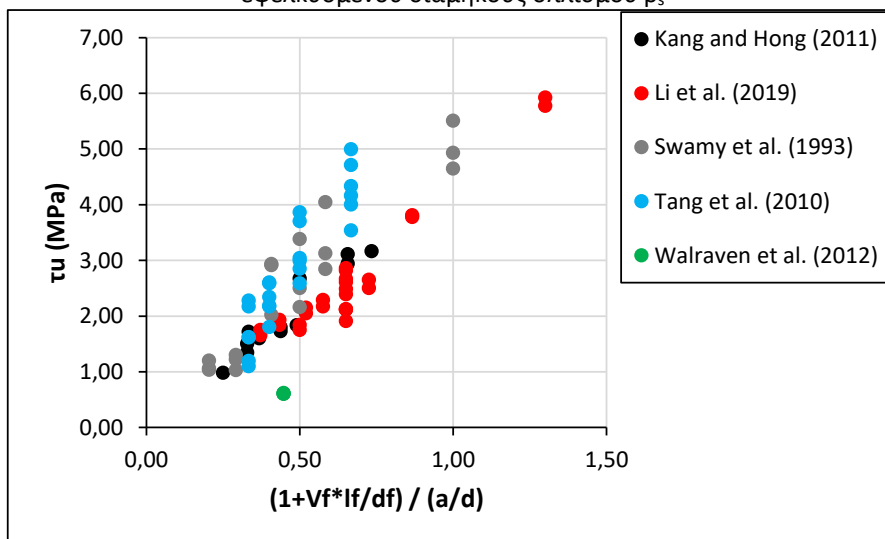
(β) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c



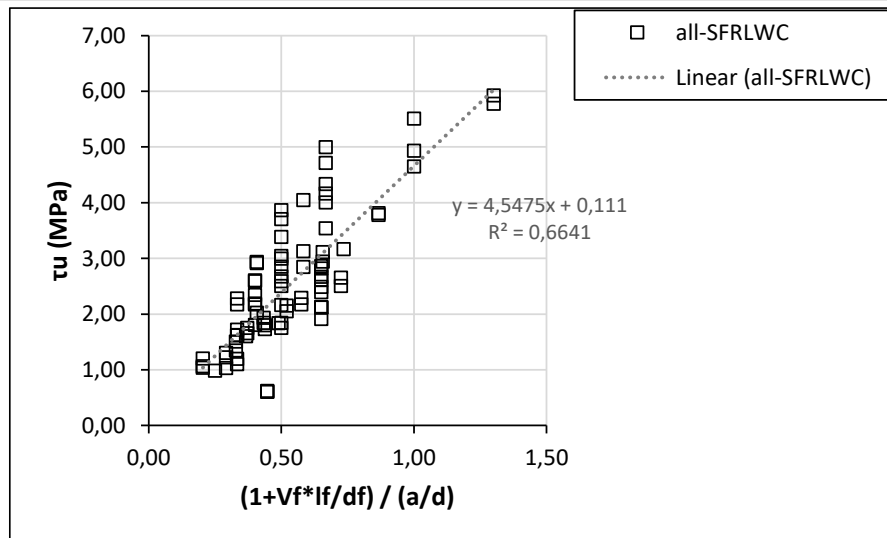
(γ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διαμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο a/d



(δ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διαμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού ρ_s

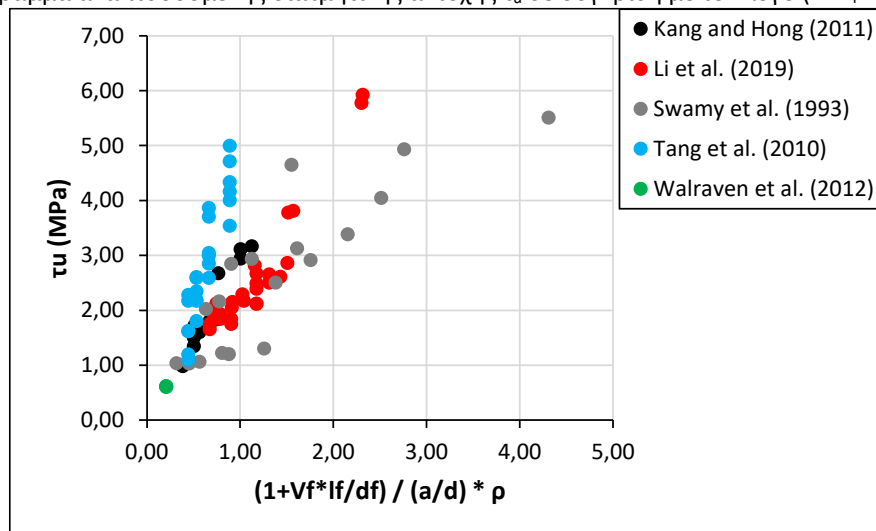


Σημ. 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διαμητικής αντοχής ανά έρευνα

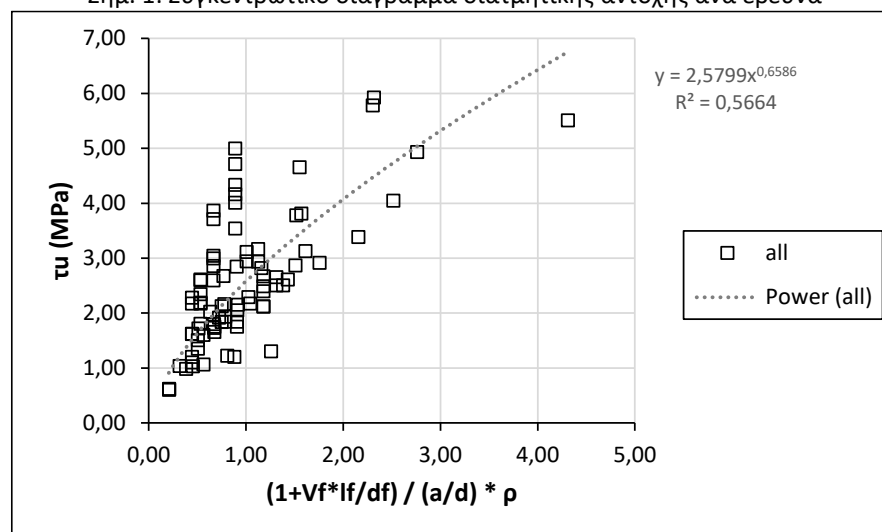


Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

(ε) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(1+V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d)$

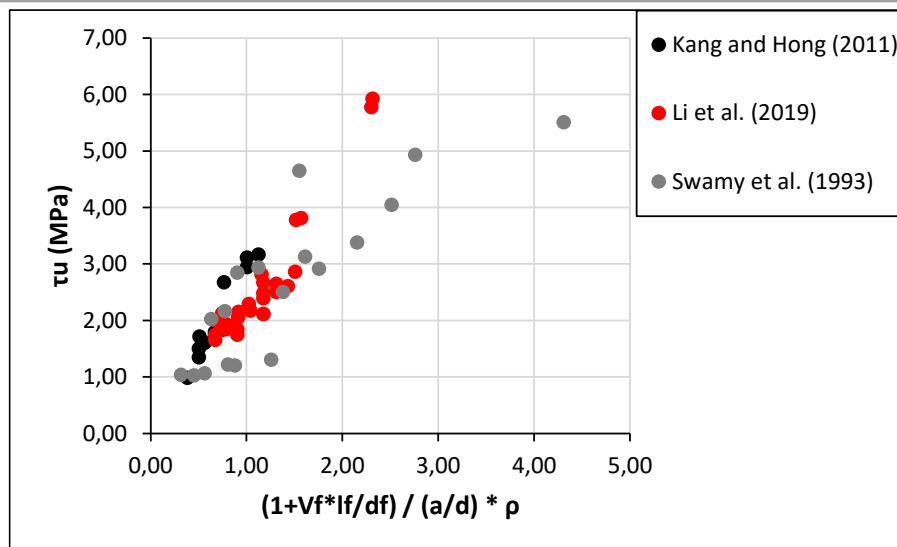


Σημ. 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής ανά έρευνα

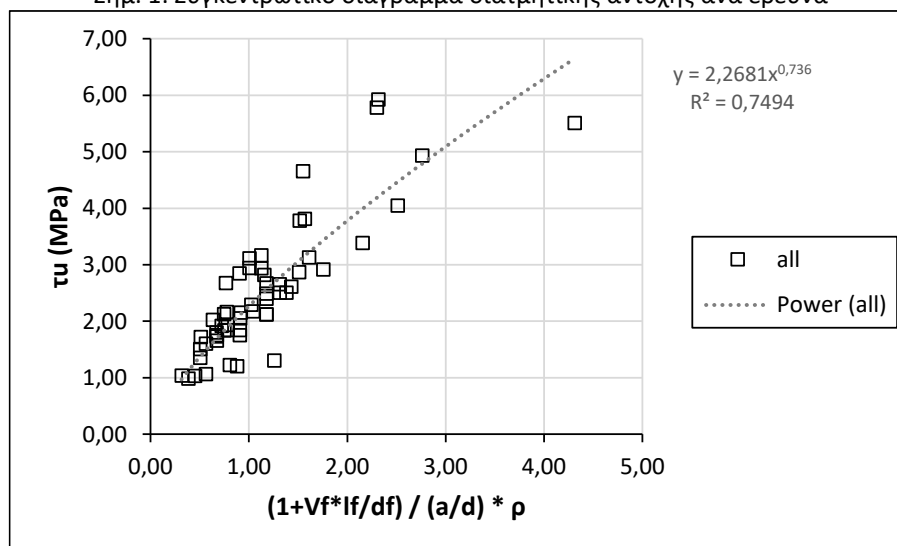


Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

(στ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(1+V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d) \cdot \rho_s$



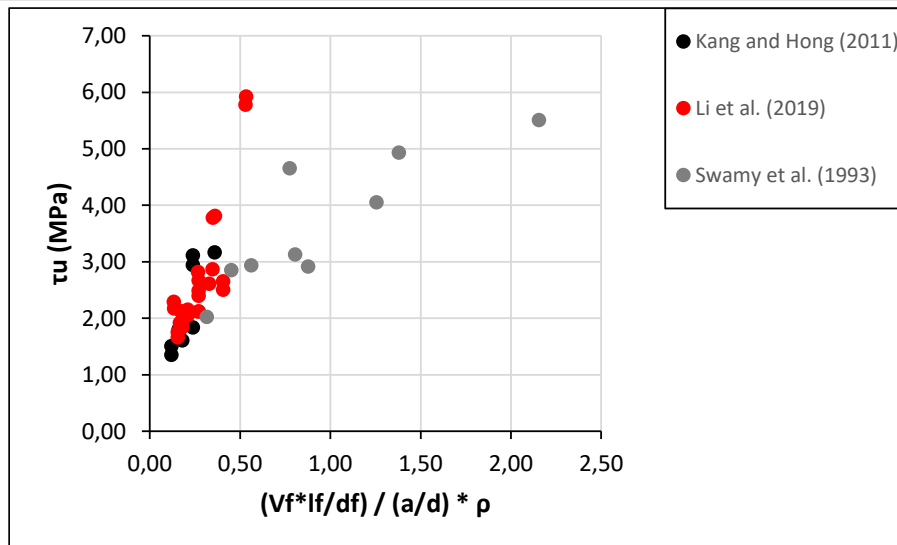
Σημ. 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής ανά έρευνα



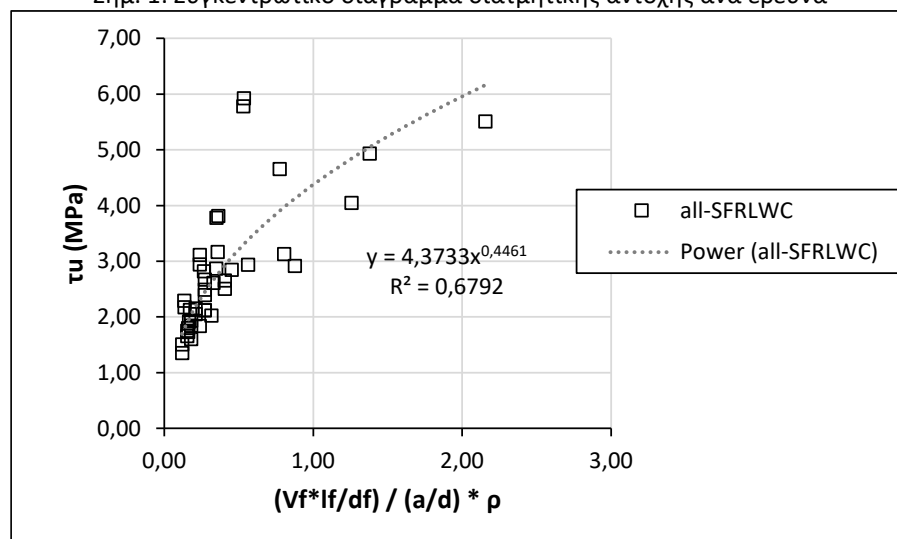
Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

(ζ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(1+V_f \cdot I_f/d_f)/(a/d) \cdot \rho_s$ (εκτός πειραματικών αποτελεσμάτων Tang et al. (2010) [52] και Walraven et al. (2012))

Εικόνα 5. Διαγράμματα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με διάφορες παραμέτρους και διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων (συμπεριλαμβάνονται και μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)

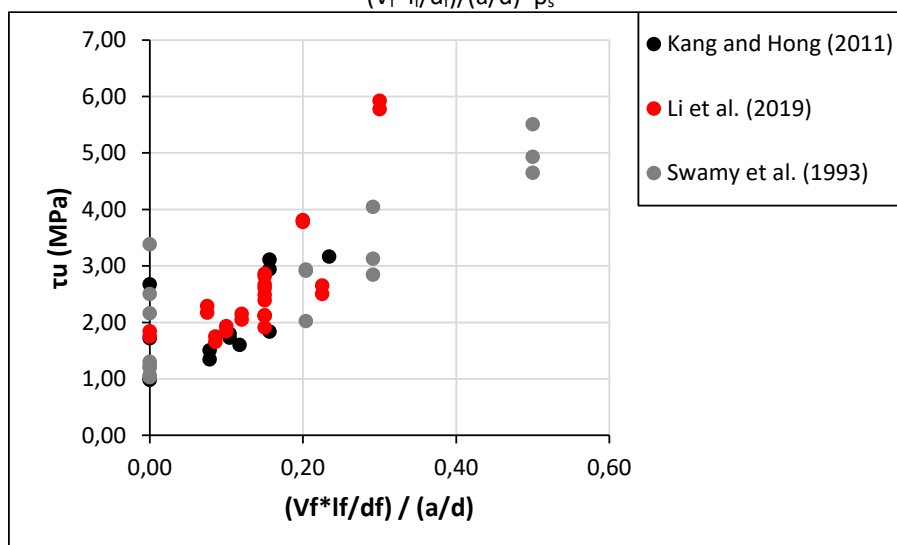


Σημ. 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής ανά έρευνα

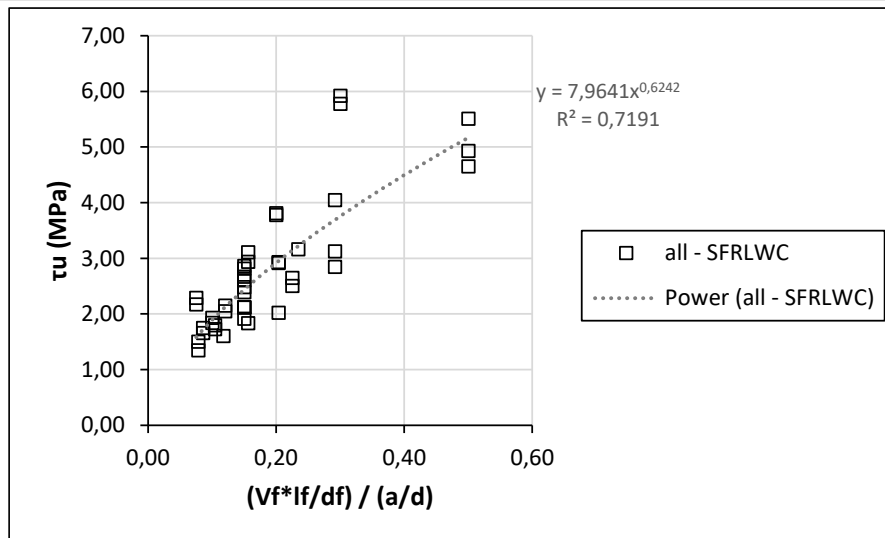


Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

(α) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(V_f * I_f / d_f) / (a/d) * \rho_s$



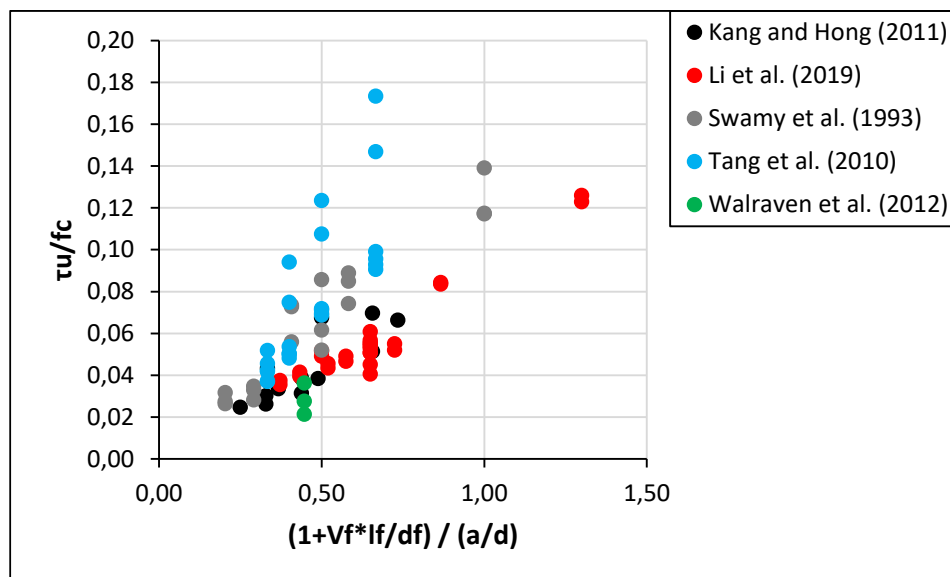
Σημ. 1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής ανά έρευνα



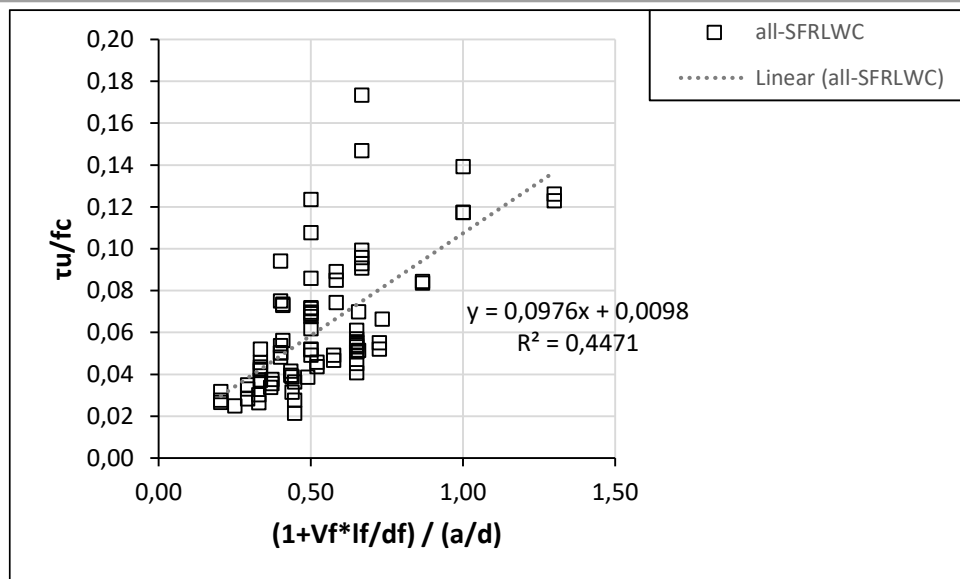
Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

(β) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d)$

Εικόνα 6. Διαγράμματα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με διάφορες παραμέτρους και διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων (δεν συμπεριλαμβάνονται μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)

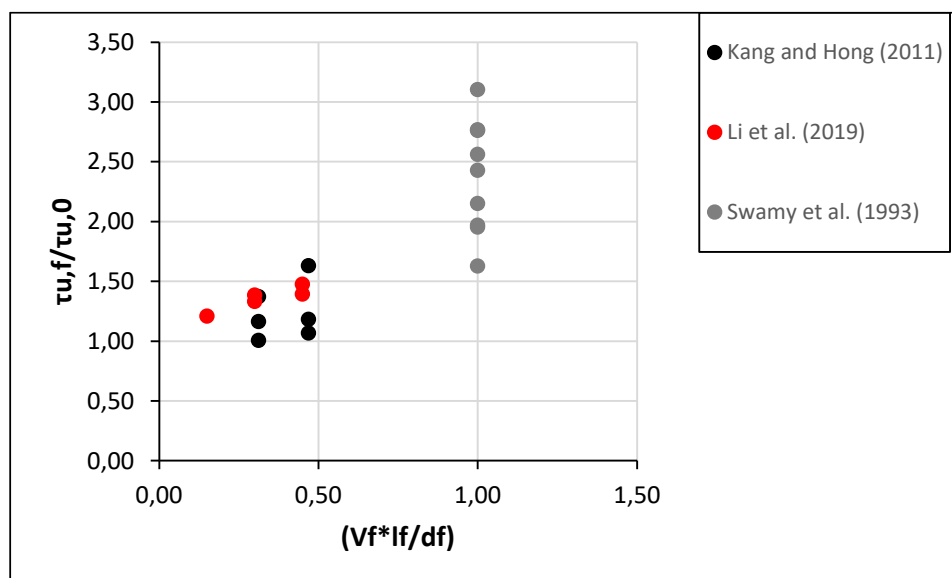


Σημ.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου διατμητικής αντοχής προς θλιπτική αντοχή εξεταζόμενου σκυροδέματος ανά έρευνα

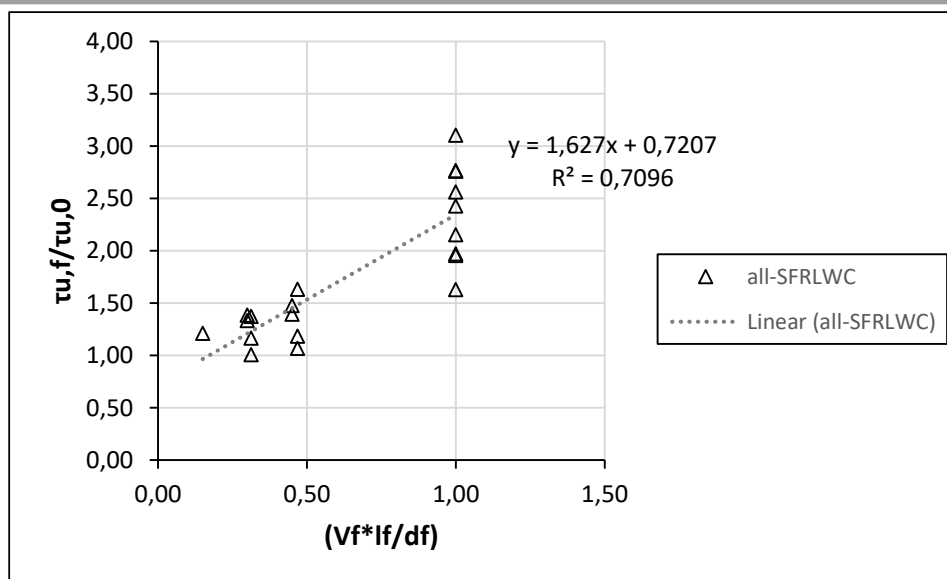


Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου διατμητικής αντοχής προς θλιπτική αντοχή εξεταζόμενου σκυροδέματος μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

Εικόνα 7. Διαγράμματα λόγου διατμητικής αντοχής προς την θλιπτική αντοχής σκυροδέματος τ_u/f_c πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με τον όρο $(1+V_f*I_f/d_f)/(a/d)$ (συμπεριλαμβάνονται και μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)



Σημ.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου προς διατμητική αντοχή μη ινοπλισμένου σκυροδέματος ανά έρευνα



Σημ.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου προς διατμητική αντοχή μη ινοπλισμένου σκυροδέματος μαζί με σχέση συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

Εικόνα 8. Διαγράμματα λόγου διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων και μη ινοπλισμένων δοκιμών δοκού τ_{u,f}/τ_{u,0} πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με τον όρο (V_f*l_f/d_f) (δεν συμπεριλαμβάνονται μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)

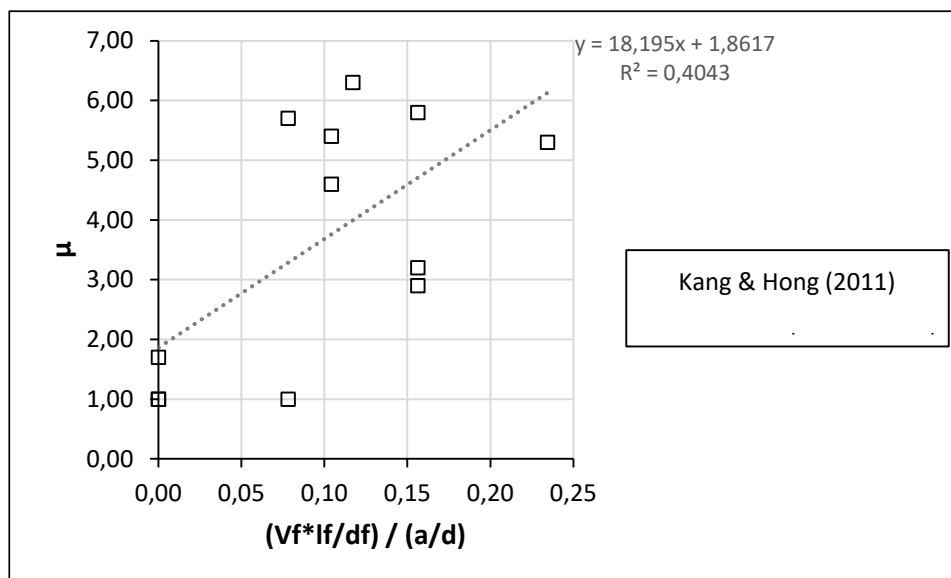
Πίνακας 1. Προτάσεις τύπων εκτίμησης της διατμητικής αντοχής δοκών

Όνομα Τύπου	Τύπος	Συντελεστής συσχέτισης
Formula 1 Εικόνα 5 (ε)	$v_u = \left[\left(1 + V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) * \frac{1}{\frac{a}{d}} \right] * 4,55 + 0,11$	0,66
Formula 2.1 Εικόνα 5 (στ)	$v_u = \left[\left(1 + V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) * \frac{1}{\frac{a}{d}} * \rho_s \right]^{0,66} * 2,58$	0,57
Formula 3.1 Εικόνα 5 (ζ)	$v_u = \left[\left(1 + V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) * \frac{1}{\frac{a}{d}} * \rho_s \right]^{0,74} * 2,27$	0,75
Formula 4.1 Εικόνα 6 (β)	$v_u = \left[\left(V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) * \frac{1}{\frac{a}{d}} \right]^{0,62} * 7,96$	0,72
Formula 5.1 Εικόνα 6 (α)	$v_u = \left[\left(V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) * \frac{1}{\frac{a}{d}} * \rho_s \right]^{0,45} * 4,37$	0,68
Formula 6 Εικόνα 7	$\frac{v_u}{f_c} = \left[\left(1 + V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) * \frac{1}{\frac{a}{d}} \right] * 0,098 + 0,01$	0,45
Formula 7 Εικόνα 8	$\frac{v_{u,f}}{v_{u,0}} = \left[\left(V_f * \frac{L_f}{d_f} \right) \right] * 1,63 + 0,72$	0,71

Πλαστικότητα

Αδιαμφισβήτητα, οι ίνες συνεισφέρουν σημαντικά στην πλαστικότητα των δοκών, κι είναι κι ένας από τους βασικότερους λόγους για τον οποίο εισάγονται στο μίγμα σκυροδέματος. Όπως τονίζουν οι Swamy et al. [56] οι ίνες εκτός από την σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, βελτιώνουν σημαντικά την πλαστικότητά τους, σε μεγαλύτερα ποσοστά είναι ικανές να μετατρέψουν τον τρόπο αστοχίας από πιο ψαθυρό σε πλάστιμο, αλλά και μειώνουν το εύρος των

ρωγμών, αυξάνουν το πλήθος τους και εμποδίζουν την επέκτασή τους, βελτιώνοντας έτσι την συνάφεια του διαμήκους εφελκόμενου σπλισμού με το σκυρόδεμα. Από το διάγραμμα της Εικόνας 9 επιβεβαιώνεται ότι αυξάνομενου του ποσοστού των ινών και των διαστάσεων τους αυξάνεται η πλαστιμότητα των δοκών. Επίσης, όσο μειώνεται ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος μειώνεται η πλαστιμότητα των δοκών.

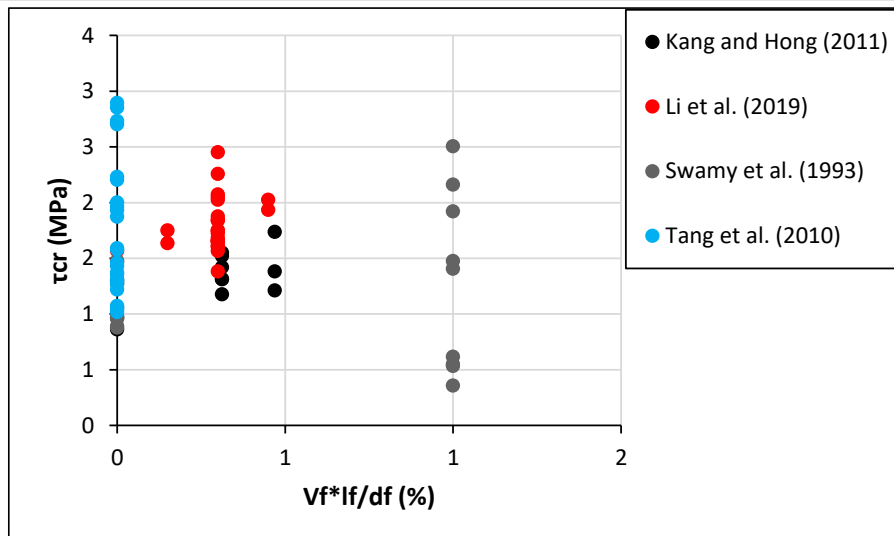


Εικόνα 9. Διάγραμμα δείκτη πλαστιμότητας μ ινοπλισμένων και μη ινοπλισμένων δοκιμών δοκών σε σύγκριση με τον όρο $(V_f \cdot l_f / d_f)$

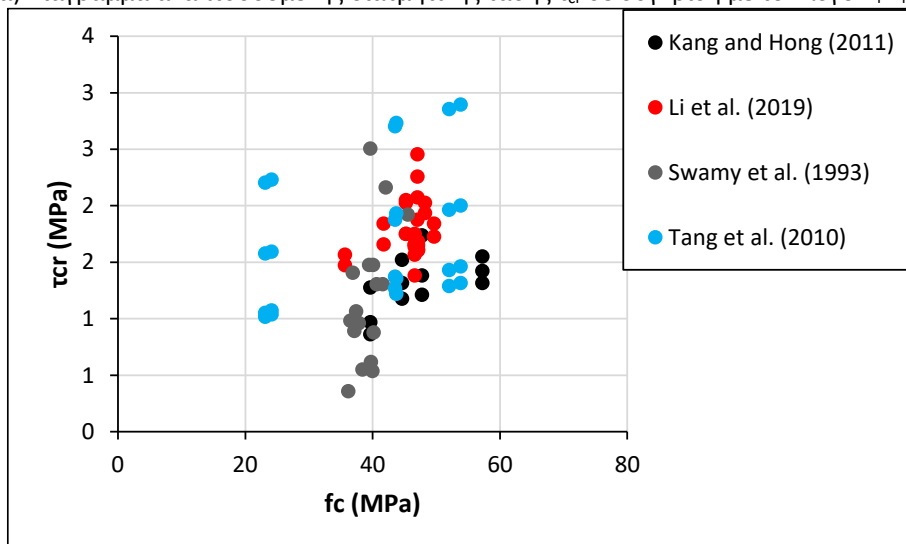
Τάση στην οποία εμφανίζεται η πρώτη ρηγμάτωση

Όπως αναφέρουν οι Swamy et al. [56], το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγή εμφανίζεται αυξημένο με την εισαγωγή ινών στο μίγμα, μέσω της βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Ωστόσο, η συνεισφορά των ινών είναι περισσότερο αισθητή μετά την ρηγμάτωση, εφόσον ενεργοποιούνται μέσω της εξόγκωσης τους από το σκυρόδεμα. Το ίδιο επιβεβαιώνουν οι Kang and Hong [69] σημειώνοντας αύξηση του φορτίου στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρηγμάτωση κατά 35%, ακριβώς για τον λόγο βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος κι ειδικά για την αύξηση της καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος εξαιτίας της προσθήκης των ινών στο μίγμα του. Ωστόσο οι Li et al. [19] δεν είδαν καμία επιρροή των ινών στο φορτίο που εμφανίζεται η πρώτη ρηγμάτωση, εξαιτίας του γεγονότος πως οι ίνες ενεργοποιήθηκαν κυρίως μετά την έναρξη της ρηγμάτωσης.

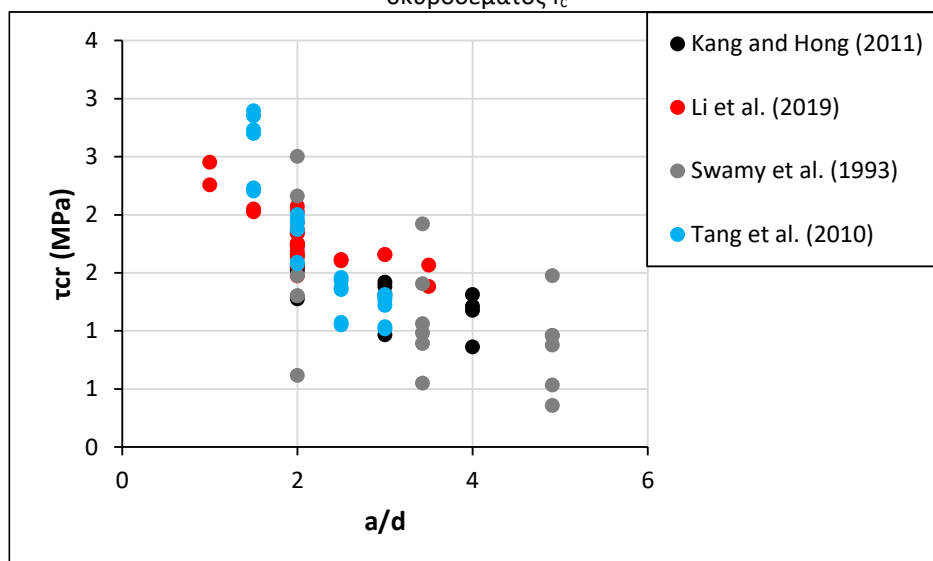
Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται κι από τα διαγράμματα της Εικόνας 10. Στο διάγραμμα της Εικόνας 10 (α) φαίνεται ξεκάθαρα ότι το ποσοστό των ινών και οι διαστάσεις των ινών δεν επιδρούν στο φορτίο που εμφανίζεται η πρώτη ρωγή. Οι παράμετροι που φαίνεται να έχουν κάποια επίδραση στο φορτίο που εμφανίζεται η πρώτη αστοχία είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (Εικόνα 10 (β)) και το ποσοστό του εφελκόμενου σπλισμού (Εικόνα 10 (δ)). Ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος επηρεάζει ακριβώς με την ίδια βαρύτητα και μορφή την τάση στην οποία εμφανίζεται η πρώτη ρωγή (Εικόνα 10 (γ)). Εφόσον πέρα από την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και το ποσοστό του εφελκόμενου σπλισμού οι άλλες παράμετροι δεν επηρεάζουν σημαντικά το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγή τότε και οι συνδυασμοί των παραμέτρων $V_f \cdot l_f / d_f$, f_c , ρ_s , a/d δεν οδηγεί σε τόσο καλή συσχέτιση όσο στην περίπτωση της διατμητικής τάσης στο μέγιστο φορτίο (Εικόνα 10 (ε), (στ), (ζ), Εικόνα 11 (α) και (β), Εικόνα 12 και Εικόνα 13).



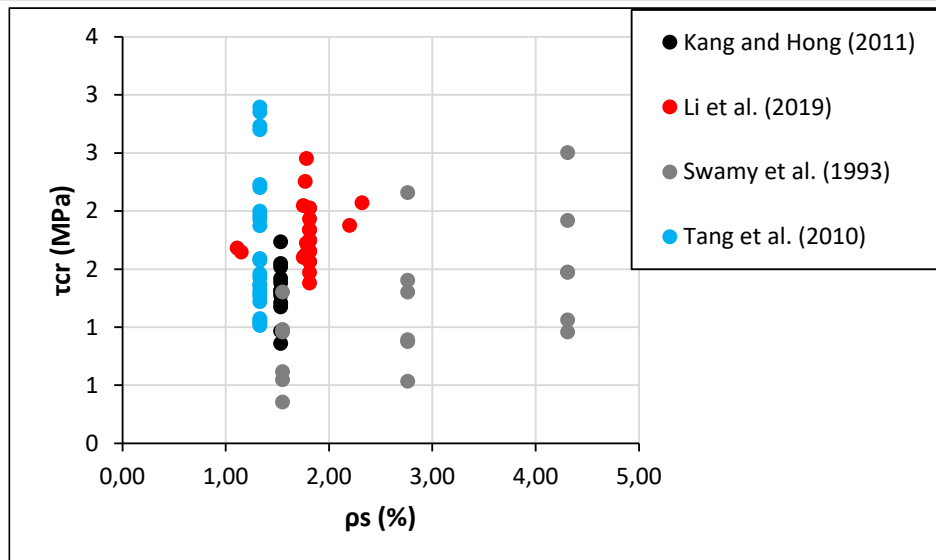
(α) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διαμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο $V_f \cdot l_f / d_f$



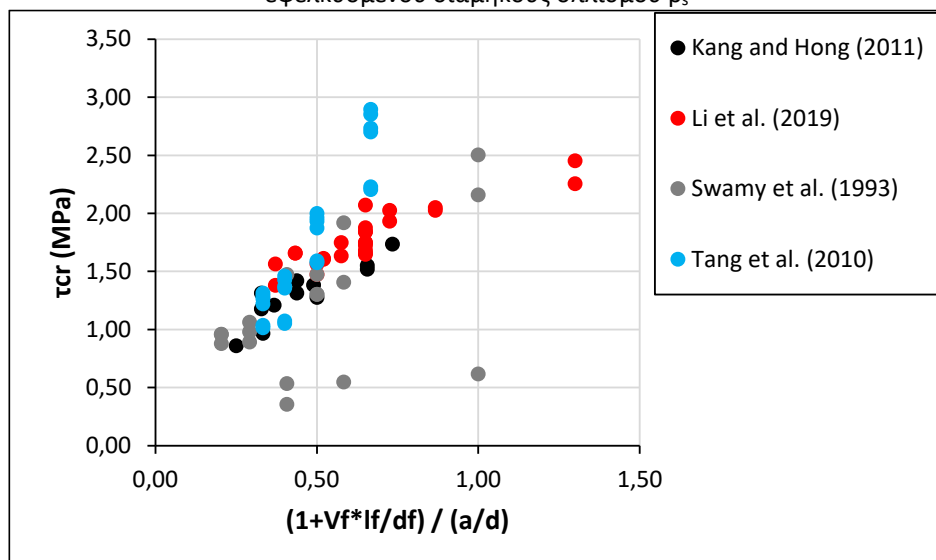
(β) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διαμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c



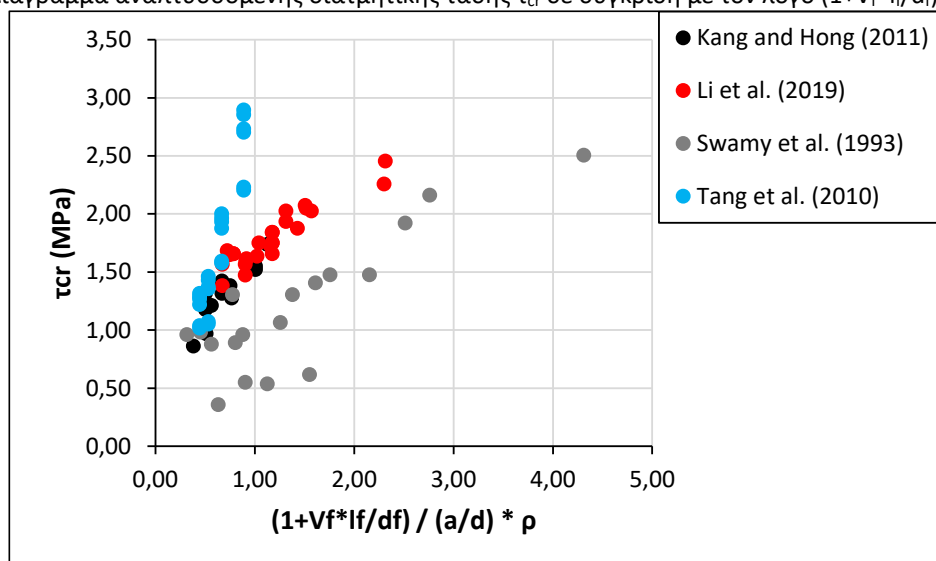
(γ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διαμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο a/d



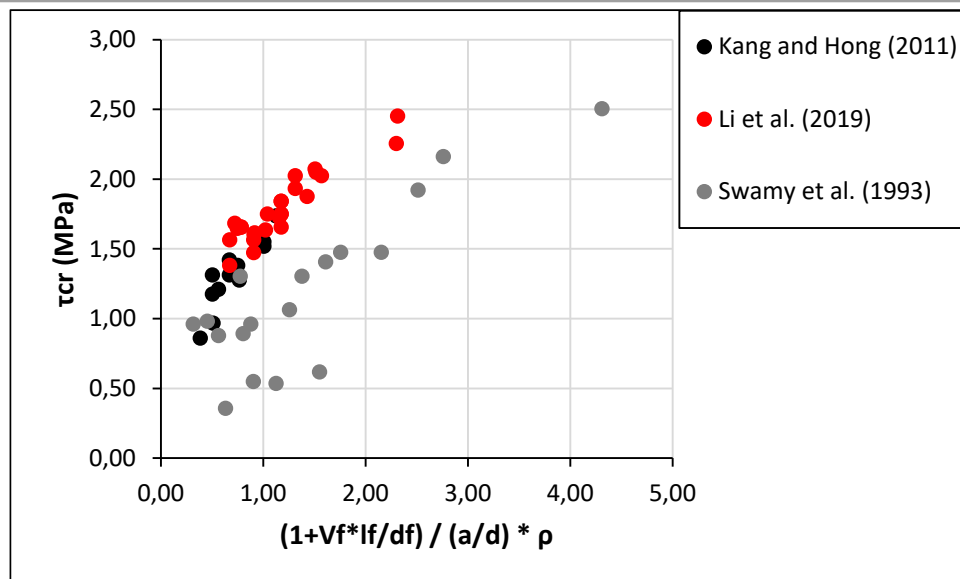
(δ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού ρ_s



(ε) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο $(1 + V_f * l_f / d_f) / (a/d)$

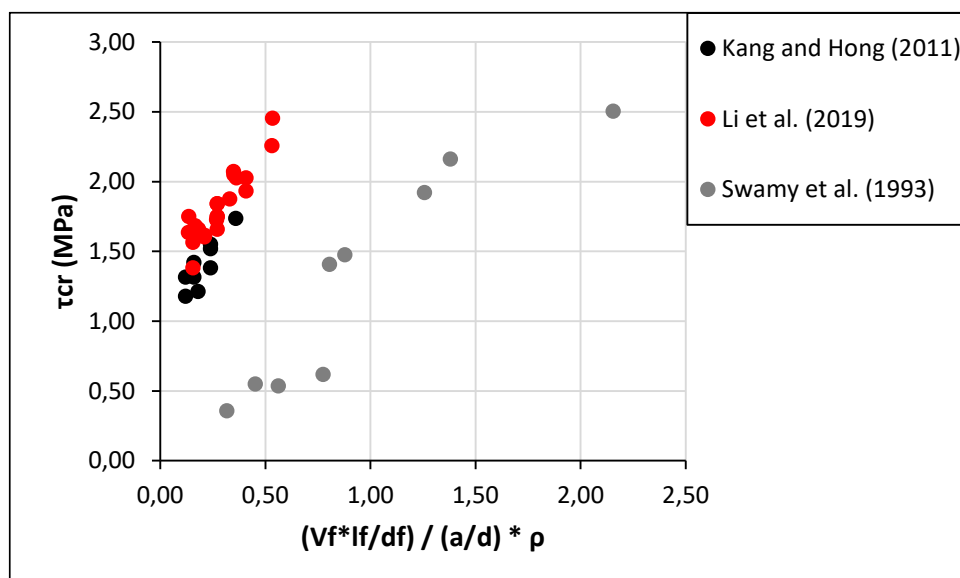


(στ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο $(1 + V_f * l_f / d_f) / (a/d) * \rho_s$

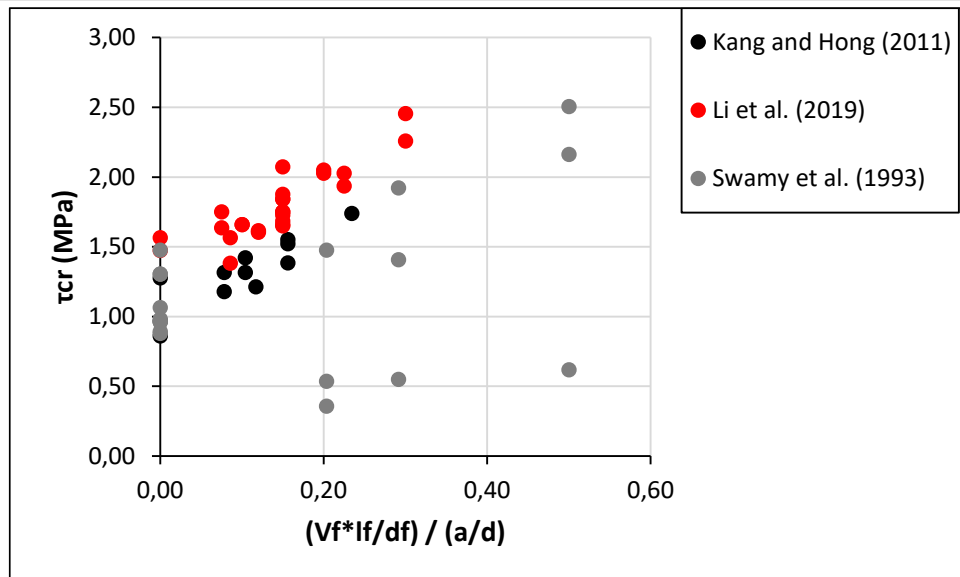


(ζ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο $(1+V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d) \cdot \rho_s$ (εκτός πειραματικών αποτελεσμάτων Tang et al. (2010) [52])

Εικόνα 10. Διαγράμματα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με διάφορες παραμέτρους και διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων (συμπεριλαμβάνονται και μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)

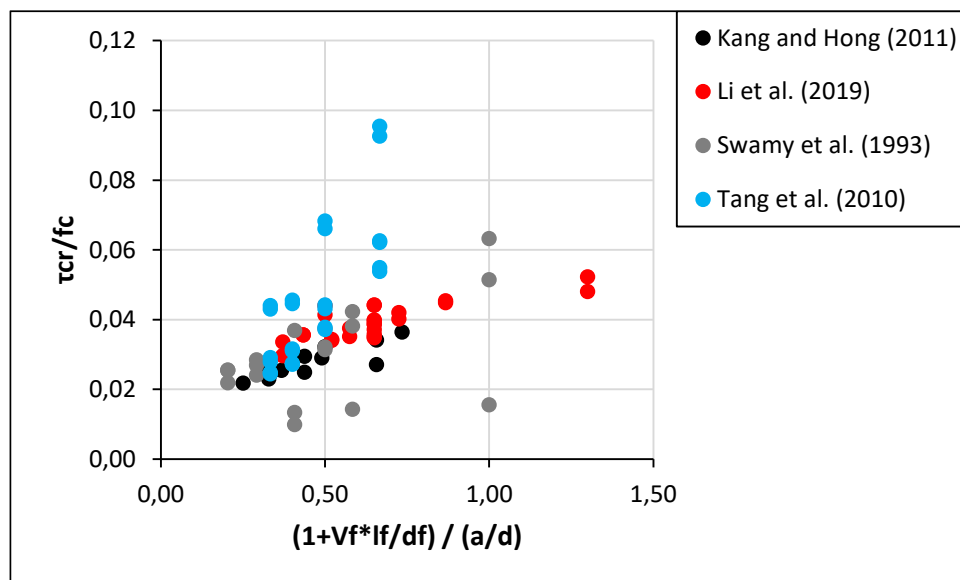


(α) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο $(V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d) \cdot \rho_s$

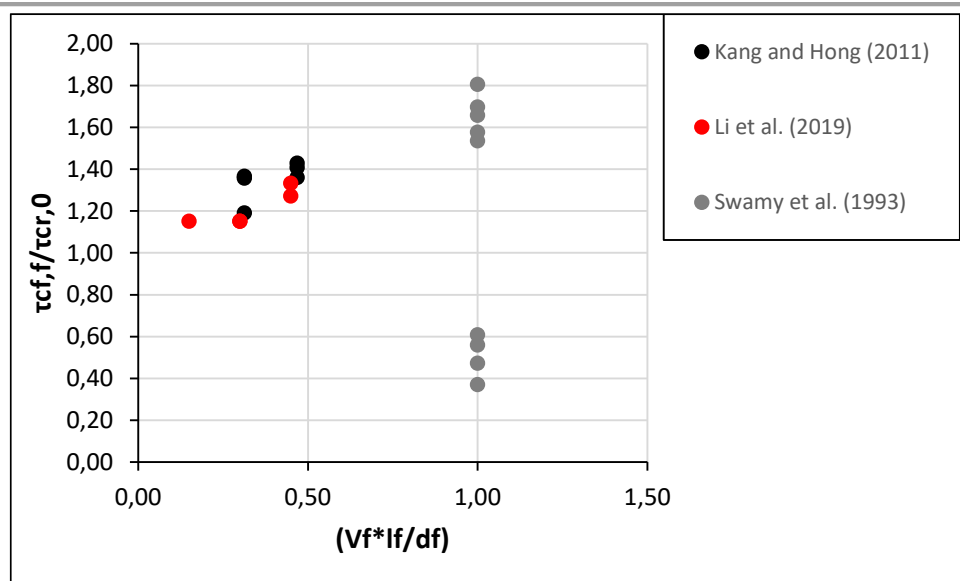


(β) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} σε σύγκριση με τον λόγο $(V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d)$

Εικόνα 11. Διαγράμματα αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης τ_{cr} πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με διάφορες παραμέτρους και διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων (δεν συμπεριλαμβάνονται μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)



Εικόνα 12. Διαγράμματα λόγου διατμητικής τάσης τ_{cr}/f_c πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με τον όρο $(1+V_f \cdot l_f / d_f) / (a/d)$ (συμπεριλαμβάνονται και μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)



Εικόνα 13. Διαγράμματα λόγου διατμητικής τάσης ινοπλισμένων και μη ινοπλισμένων δοκιμίων δοκού $\tau_{cr,i}/\tau_{cr,0}$ πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με τον όρο $(V_f \cdot l_f / d_f)$ (δεν συμπεριλαμβάνονται μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος)

2.4.2. Καμπτική συμπεριφορά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην παρούσα έρευνα θα δοθεί βάση στην μελέτη της συνεισφοράς ινών στην διατμητική συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος. Παρακάτω, παρατίθενται κάποια ενδεικτικά συμπεράσματα της βιβλιογραφίας από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για την μελέτη της καμπτικής συμπεριφοράς ινοπλισμένων δοκών συμβατικού κι ελαφροβαρούς σκυροδέματος, κυρίως για λόγους πληρότητας της γνώσης των μηχανισμών στους οποίους συνεισφέρουν οι ίνες.

Σε γενικές γραμμές, η συνεισφορά των ινών σε δοκούς που συμπεριφέρονται καμπτικά, αφορά στην βελτίωση της συμπεριφοράς της δοκού στην ρηγμάτωση. Η ύπαρξη των ινών στο μίγμα σκυροδέματος βελτιώνει την συνάφεια του διαμήκους εφελκυσμένου οπλισμού και του σκυροδέματος. Συνεπώς, μέσω της παραπάνω βελτιωμένης συμπεριφοράς αυξάνεται έως και διπλασιάζεται το φορτίο στο οποίο ξεκινά η ρηγμάτωση καθώς και μειώνονται και τα ανοίγματα των ρωγμών [64].

Οι Folino et al. (2020) [64] εξέτασαν 27 δοκούς με διαφορετικά ποσοστά εφελκυσμένου, εγκάρσιου οπλισμού κι ογκομετρικά ποσοστά ινών. Στην περίπτωση των δοκών οι οποίες είχαν επαρκές ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού και εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού ούτως ώστε να αστοχήσουν καμπτικά, η προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος δεν οδήγησε σε σημαντική αύξηση του φορτίου αστοχίας των δοκών. Η παραμόρφωση των δοκών έδειξε μία ελαφριά μείωση καθώς το ογκομετρικό ποσοστό των ινών αυξάνεται. Επίσης, μεγαλύτερο πλήθος ρωγμών με μικρότερο άνοιγμα εμφανίστηκε στις ινοπλισμένες δοκούς σε σχέση με τις μη ινοπλισμένες δοκούς. Τα ανοίγματα των ρωγμών μειώθηκαν στο 60% του μέγιστου φορτίου κατά 3,60% και 12,40% για ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού 0,50% και 0,75% αντίστοιχα [64].

Οι Sahoo & Sharma (2014) [65] διενέργησαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε 12 μη ινοπλισμένες και ινοπλισμένες δοκούς. Εξετάστηκε η επιρροή διάφορων παραμέτρων όπως το ογκομετρικό ποσοστό των ινών, το ποσοστό του εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού, η ποσότητα του εγκάρσιου οπλισμού, ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Μέσα από αυτήν την έρευνα προέκυψε ότι η προσθήκη μεταλλικών ινών βελτιώνει την καμπτική αντοχή και την πλαστιμότητα των ινοπλισμένων δοκών, οι οποίες είναι επαρκώς οπλισμένες με εγκάρσιο οπλισμό. Η προσθήκη ινών σε ποσοστό μεγαλύτερο από 0,50% δεν προκαλεί ιδιαίτερη αύξηση της καμπτικής αντοχής. Ωστόσο, τίθεται ως ελάχιστο ογκομετρικό ποσοστό ινών το 0,50% έτσι ώστε να μετατραπεί η μορφή αστοχίας από ψαθυρή-διατμητική σε καμπτική-πλάστιμη.

Οι Altun & Aktas (2013) [6] εξέτασαν την συμπεριφορά δοκών από ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Οι δοκοί ήταν σχεδιασμένες να αστοχούν σε κάμψη. Εξετάστηκαν δοκοί μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος αλλά και με δυο διαφορετικά ποσοστά ινών: (α) με ίνες σε 30kg/m^3 ποσότητα που αντιστοιχεί σε ογκομετρικό ποσοστό ινών περί τα 0,40% και (β) με ίνες σε 60kg/m^3 ποσότητα που αντιστοιχεί σε ογκομετρικό ποσοστό ινών περί τα 0,80%. Με την προσθήκη ινών στο μίγμα αυξήθηκε το φορτίο κατά 2,22 (ποσοστιαία αύξηση 122%) και 2,24 (ποσοστιαία αύξηση 124%) φορές αντίστοιχα. Επομένως διπλάσιο ποσοστό ινών στο μίγμα οδήγησε μόνο σε 1% αύξηση της αντοχής των δοκών, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μίγμα με τις λιγότερες ίνες ανέπτυξε την βέλτιστη αύξηση αντοχής, χωρίς να δημιουργηθεί η ανάγκη να χρησιμοποιήθουν περισσότερες ίνες στο μίγμα, κάτι το οποίο θα αύξανε το κόστος, αλλά και θα δυσχέραινε και τις συνθήκες σκυροδέτησης, άρα και την ποιότητα της κατασκευής. Επίσης, αυξήθηκε και το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή. Η εισαγωγή ινών στο μίγμα διπλασίασε επίσης και την απορρόφηση ενέργειας από την δοκό, ανεξάρτητα του ποσοστού των ινών που χρησιμοποιήθηκε. Επιπροσθέτως αποδείχθηκε πως η πλαστιμότητα των δοκών αυξάνεται αυξανόμενων των ποσοστών των ινών στο μίγμα. Για ποσοστό ινών 0,40% σημειώθηκε αύξηση της πλαστιμότητας σε σχέση με το μη ινοπλισμένο σκυρόδεμα από 18-64% ενώ για ποσοστό ινών 0,80% σημειώθηκε αύξηση 9-98%, ανάλογα με τις εξεταζόμενες συνθέσεις, στις οποίες μεταβαλλόταν το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα. Κάτι το οποίο αξίζει να σημειωθεί, είναι πως η εισαγωγή ινών στο μίγμα μπορεί να βοηθήσει στο γεγονός πως μπορούν να καλυφθούν αστοχίες σε επίπεδο σύνθεσης σκυροδέματος, επομένως να λειτουργήσει σαν μία δικλείδα ασφαλείας για την επίτευξη του απαιτούμενου φορτίου. Οι συγγραφείς, παρατήρησαν μείωση του βάρους των δοκών ελαφροσκυροδέματος κατά 42%, προτείνοντας ότι αυτή η μείωση στο ίδιο βάρος του σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό των κατασκευών.

Σύμφωνα με τους Huda et al. [76], Yap et al. [77], η εισαγωγή ινών, σε ογκομετρικό ποσοστό $V_f=0,25-1\%$, σε δοκούς ελαφροσκυροδέματος οδήγησε σε μείωση της μετακίνησης στο κεντρικό τους σημείο και αύξηση την πλαστιμότητα τους. Επίσης, οι Campione [20] και Sin et al. [78] τόνισαν πως η εισαγωγή ινών σε μίγμα ελαφροσκυροδέματος προσέφερε αύξηση της καμπτικής αντοχής μέχρι το πολύ 10%. Οι Zhao et al. [41] σημείωσαν ωστόσο πως αυξανόμενου του ποσοστού των ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος μειώνεται η απόσταση ανάμεσα στις ρωγμές κατά 23,60% σε σύγκριση με το μη ινοπλισμένο σκυρόδεμα, μέσω της δημιουργίας περισσότερων δευτερευόντων ρωγμών. Επίσης, μειώθηκε το ύψος και το άνοιγμα και γενικότερα η επέκταση της ρηγμάτωσης, εφόσον οι ίνες καταφέρνουν να εμποδίζουν την εξάπλωση τους. Όσον αφορά την συμπεριφορά της δοκού σε κάμψη, παρατήρησαν αύξηση της καμπτικής αντοχής και της ροπής στην οποία εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή κατά περίπου 6%, 16-20%, 14-18% και 23-34% για ογκομετρικά ποσοστά ινών 0,40%, 0,80%, 1,20% και 1,60% αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε πως το ποσοστό αύξηση της ροπής στην οποία εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή με την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού των ινών, είναι το ίδιο με το ποσοστό αύξησης της εφελκυστικής/καμπτικής αντοχής που προέκυψε από πρίσματα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Επομένως, παρατηρείται αναλογία ανάμεσα στην ροπή στην οποία εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, για το ίδιο ογκομετρικό ποσοστό ινών. Αυτά τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα με το περιεχόμενο ογκομετρικό ποσοστό ινών. Επίσης, με την εισαγωγή ινών στο μίγμα σε ογκομετρικό ποσοστό 1,60%, η δυσκαμψία αυξήθηκε και κατεπέκταση η μετακίνηση στο μέσον της δοκού μειώθηκε, για το ίδιο επίπεδο φορτίου, σε σχέση με το μη ινοπλισμένο σκυρόδεμα κατά 24,50%. Η συνεισφορά των ινών είναι καθοριστική μετά την επίτευξη του μέγιστου καμπτικού φορτίου, στον μεταλεστικό κλάδο, στον οποίο ενεργοποιούνται γεφυρώνοντας τα δύο τεμάχια σκυροδέματος εκατέρωθεν της ρωγμής και διατηρώντας έως έναν βαθμό την ακεραιότητα της θλιβόμενης ζώνης, προσφέροντας σε αυτό το επίπεδο φορτίου μία αύξηση της πλαστιμότητας κατά 88% και 262% για ογκομετρικά ποσοστά ινών $V_f=1,20\%$ και 1,60%.

Οι Catarelli et al. (2016) [9] για ογκομετρικό ποσοστό ινών $V_f=0,40\%$ σε δοκούς από ελαφροσκυρόδεμα, παρατήρησαν αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά 19% και της πλαστιμότητας κατά 65%. Επίσης, μακροσκοπικά, σημείωσαν βελτίωση του τρόπου αστοχίας, μετατρέποντας τον σε πιο πλαστικό. Οι δοκοί, ινοπλισμένες και μη, εξετάστηκαν τόσο σε μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων όσο και σε

ανακυκλιζόμενη. Οι ινοπλισμένες δοκοί έδειξαν αυξημένη καμπτική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σε σύγκριση με τις μη ινοπλισμένες δοκούς κατά 14%, καθώς και αυξημένη απορρόφηση ενέργειας κατά 20%.

2.5. Τύποι πρόβλεψης διατμητικής αντοχής δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Οι τύποι που αναπτύχθηκαν για την πρόβλεψη της συνεισφοράς του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας κατά την πλειοψηφία τους, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αναπτύχθηκαν για το συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Αφορούν κυρίως εμπειρικούς κι ημιεμπειρικούς τύπους που έχουν προσαρμοστεί πάνω σε πειραματικά αποτελέσματα. Αυτοί οι τύποι συνήθως λαμβάνουν ως παραμέτρους τους τον λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος της δοκού (a/d), το ποσοστό του εφελκόμενου σπλισμού (ρ_s), την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (f_c), το ποσοστό των ινών (V_f), τον λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών (L_f/d_f), τον τύπο και σχήμα (στρογγυλές, κεκαμμένες, ίσιες κ.ο.κ.) των ινών μέσω διάφορων συντελεστών. Όλες οι παραπάνω παράμετροι συνδέονται με τους επιμέρους μηχανισμούς που συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος όπως: (α) ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος της δοκού (a/d) σχετίζεται με τον μηχανισμό τόξου, (β) το ποσοστό του εφελκόμενου σπλισμού (ρ_s) σχετίζεται με την δράση βλήτρου, (γ) η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (f_c) η οποία συνεισφέρει μέσα από το αρηγμάτωτο σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης και την αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα και το (δ) ποσοστό, διαστάσεις και σχήμα των ινών συνδέεται με την ενίσχυση όλων των μηχανισμών που συνεισφέρουν σε τέμνουσα και στην βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος κ.ο.κ. Παρακάτω γίνεται αναλυτική περιγραφή του μηχανισμού και της λογικής διαμόρφωσης των τύπων. Όσον αφορά την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος, συνήθως αφορούν τροποποιημένους τύπους που είχαν αναπτυχθεί εξαρχής για συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων που περιγράφησαν και σχολιάστηκαν παραπάνω, σε σύγκριση με την θεωρητικώς εκτιμώμενη τιμή της αντίστασης του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας λαμβάνοντας υπόψη τα εκάστοτε στοιχεία (a/d , V_f , L_f/d_f , f_c , ρ_s , κ.ο.κ.). Κρίνεται ποιοι τύποι είναι κατάλληλοι για τον υπολογισμό της αντοχής του σκυροδέματος σε τέμνουσα για δοκούς με το εύρος χαρακτηριστικών που περιγράφησαν παραπάνω. Οι τύποι που κρίνονται κατάλληλοι θα χρησιμοποιηθούν και για αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας. Οι τύποι μαζί με τις τροποποιήσεις τους για το ελαφροσκυρόδεμα παρατίθενται στον Πίνακα 2.

2.5.1. Συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Ο τύπος από Sharma (1986) [74] είναι πολύ απλός στην εφαρμογή του, κάτι που τον καθιστά δημοφιλή. Ωστόσο, δεν λαμβάνει υπόψη του παράγοντες που είναι αρκετά σημαντικοί για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος, όπως είναι το ογκομετρικό ποσοστό των ινών V_f , το σχήμα των ινών, το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού ρ_s κ.ο.κ.. Επίσης, λαμβάνει μειωμένα την επιρροή του λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος (a/d), άρα παράγει συντηρητικά αποτελέσματα για μικρές τιμές του λόγου a/d , εφόσον λαμβάνει μειωμένη την συνεισφορά του μηχανισμού τόξου και αρκετά μη συντηρητικά αποτελέσματα για μεγαλύτερους λόγους a/d .

Ο τύπος από Narayanan and Darwish (1987) [71] αποτελείται από τρεις όρους, που σύμφωνα με τους συγγραφείς, εκφράζουν: (α) ο πρώτος όρος λαμβάνει υπόψη του την συνεισφορά των ινών μέσα από την αντοχή του σκυροδέματος (συνεισφορά διαγώνιου θλιπτήρα κι αρηγμάτωτου σκυροδέματος θλιβόμενης ζώνης), (β) ο δεύτερος όρος λαμβάνει υπόψη του την δράση βλήτρου μέσα από τον συνυπολογισμό του ποσοστού του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού και (γ) ο τρίτος όρος λαμβάνει υπόψη του την συνεισφορά των ινών κατά μήκος μίας κεκλιμμένης διαγώνιας ρωγμής. Ο όρος F εκτός από το ογκομετρικό ποσοστό των ινών και τις διαστάσεις των ινών, λαμβάνει υπόψη του και το σχήμα των ινών, εισάγοντας έτσι και την παράμετρο της αγκύρωσης των ινών. Ο όρος e , μέσα από τον λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος λαμβάνει υπόψη την συνεισφορά του μηχανισμού τόξου.

Είναι ένας τύπος που λαμβάνει υπόψη του τις πιο σημαντικές παραμέτρους που συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή, είναι υπέρ της ασφαλείας, αλλά κάποιες φορές αρκετά συντηρητικός.

Οι Ashour et al. [70] ανέπτυξαν δύο τύπους. Οι τύποι αφορούν τροποποιήσεις τύπων που είχε διαμορφώσει ο Zhutty [79] (Model A, [70]) και του ACI318 [17] (Model B [70]), έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των ινών. Και στα δύο μοντέλα, λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c , το ποσοστό του εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού ρ_s , ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος της δοκού a/d , το ογκομετρικό ποσοστό των ινών V_f , οι διαστάσεις L_f/d_f και το σχήμα τους, λαμβάνοντας έτσι υπόψη τους βασικούς μηχανισμούς που αντιστέκονται στην τέμνουσα όπως είναι ο μηχανισμός τόξου, η συνεισφορά του διαγώνιου θλιπτήρα, η συμβολή του αρηγγάτωτου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης κι η δράση βλήτρου. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, αυτοί οι τύποι προσφέρουν καλή συσχέτιση με αποτελέσματα δοκών που έχουν υψηλές αντοχές σκυροδέματος. Ωστόσο οι τύποι αυτοί έχουν προσαρμοστεί σε πειραματικά αποτελέσματα που έχουν μεγάλο εύρος τιμών παραμέτρων καθώς και έχουν συμπεριληφθεί και δοκοί που αστόχησαν σε κάμψη, κάτι το οποίο τους καθιστά λιγότερο ακριβείς σε σχέση με τον αντίστοιχο τύπο από Narayanan and Darwish (1987) [71].

Οι Imam et al. [80] τροποποίησαν έναν τύπο που αναπτύχθηκε από τους Bazant and Sun, στον οποίο λαμβάνεται υπόψη κι η επιρροή του μεγέθους του μέγιστου κόκκου αδρανούς στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος, καθώς και ο λόγος στατικού ύψους προς την διάμετρο του μέγιστου κόκκου αδρανούς. Αυτός ο τύπος λαμβάνει υπόψη του όλες τις βασικές παραμέτρους που λαμβάνουν κι οι παραπάνω τύποι, καθώς και την επιρροή του μεγέθους του μέγιστου κόκκου αδρανούς. Ωστόσο, επειδή είναι προϊόν προσαρμογής σε μικρό πλήθος πειραματικών τιμών έχει αποδειχθεί ότι είναι λιγότερο ακριβείς και σε πολλές περιπτώσεις μη συντηρητικός. Γενικά, υποεκτιμά την διατμητική αντοχή σε δοκούς μικρότερου ύψους, αλλά την υπερεκτιμά σε δοκούς μεγαλύτερου ύψους.

Ο τύπος από Kwak et al. (2002) [42] αποτελεί μία τροποποίηση του τύπου από Zsutty [79], λαμβάνοντας υπόψη την εφελκυστική αντοχή στον μηχανισμό τόξου, μαζί με έναν πρόσθετο παράγοντα που συμπεριλαμβάνει την άμεση συνεισφορά των ινών στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος λαμβάνει υπόψη του την επιρροή όλων των βασικών παραμέτρων που έχουν αναλυθεί παραπάνω (ποσοστό, διαστάσεις και σχήμα ινών, θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, ποσοστό εφελκυσμένου οπλισμού, λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος κ.ο.κ.). Επίσης, λαμβάνει υπόψη του πως η επιρροή του ύψους της δοκού μικραίνει λόγω της εισαγωγής των ινών στο σκυρόδεμα, εξαιτίας του γεγονότος πως οδηγούν εξ ορισμού σε πιο πλαστικές μορφές αστοχίας. Αποτελεί από τους τύπους που παράγουν σχετικά ακριβή και συντηρητικά αποτελέσματα.

Οι Sahoo and Sharma (2014) [65] αξιολόγησαν 84 δοκίμια μη ινοπλισμένων και ινοπλισμένων δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος χωρίς συνδετήρες, και προσαρμόσαν σε αυτά τύπο για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος. Οι δοκοί που εξετάστηκαν ικανοποιούσαν τα παρακάτω εύρη τιμών: (α) λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος $a/d > 2,50$, (β) ποσοστό εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού από 1,20 έως 4,50%, (γ) θλιπτική αντοχή σκυροδέματος από 20 έως 60 MPa, (δ) διπλά κεκαμμένες ίνες σε ογκομετρικό ποσοστό από 0 έως 1,50%, (ε) εφελκυστική αντοχή ινών μεγαλύτερη ή ίση από 1030MPa και (στ) λόγο μήκους προς διάμετρο ινών από 55 έως 100. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή του μεγέθους των δοκών, τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, σε δοκούς με στατικό ύψος μεγαλύτερο ή ίσο από 300mm και σε δοκούς με στατικό ύψος μικρότερο από 300mm. Χρησιμοποιήθηκε η ρίζα της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Μέσα από αυτόν τον τύπο δεν λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις και το σχήμα των ινών, που παίζουν σημαντικό ρόλο στην αγκύρωση των ινών άρα και στην συνολική συνεισφορά τους στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος. Ο συγκεκριμένος τύπος οδηγεί σε αρκετά συντηρητικά αποτελέσματα και δεν λαμβάνει υπόψη του σημαντικές παραμέτρους όπως αυτή του λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος και το ποσοστό εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού.

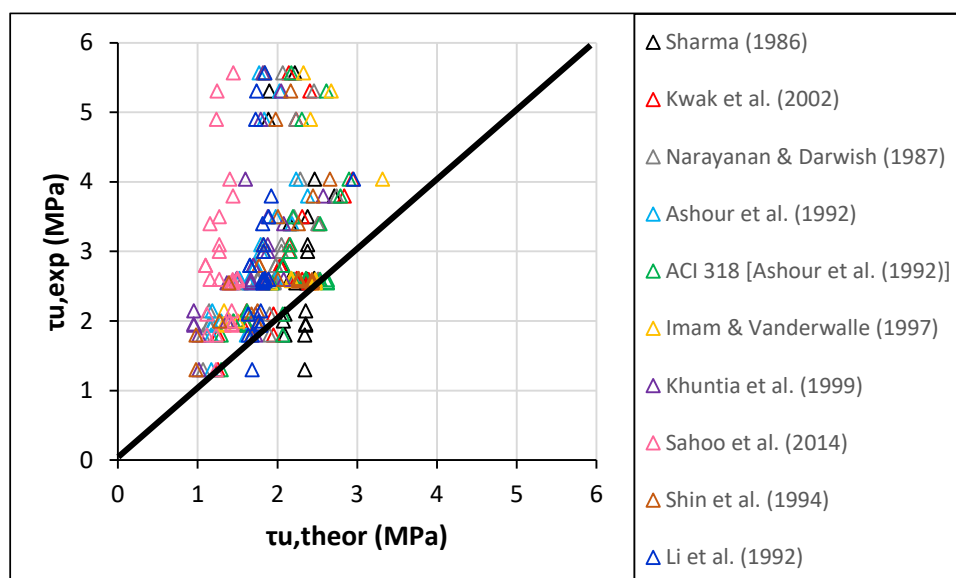
Το μοντέλο που προτείνεται από Khuntia et al. (1999) [73] περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος, εκτός του ποσοστού του

εφελκυσμένου οπλισμού. Εν γένει, αποτελεί έναν ασφαλή τύπο για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος, και σε κάποιες περιπτώσεις οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα.

Ο τύπος από τους Shin et al. (1994) [72] λαμβάνει υπόψη του όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που συνεισφέρουν στους μηχανισμούς που επιστρατεύει το σκυρόδεμα για να αντιστέκεται στις διατμητικές δυνάμεις: (α) ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος της δοκού (a/d) σχετίζεται με τον μηχανισμό τόξου, (β) το ποσοστό του εφελκυσμένου οπλισμού (ρ_s) σχετίζεται με την δράση βλήτρου, (γ) η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (f_c) η οποία συνεισφέρει μέσα από το αρηγματώτο σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης και την αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα και (δ) το ποσοστό, διαστάσεις και σχήμα των ινών συνδέεται με την ενίσχυση όλων των μηχανισμών που συνεισφέρουν σε τέμνουσα και στην βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Επίσης, συμπεριλαμβάνει έναν όρο ο οποίος αφορά την συνεισφορά των ινών κατά μήκος μίας κεκλιμένης διαγώνιας ρωγμής.

Ο τύπος από Li et al. (1992) [48] συμπεριλαμβάνει όλες τις βασικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν και παραπάνω στην περίπτωση του Shin et al. (1994) [72], εκτός από τον όρο που αφορά την συνεισφορά των ινών κατά μήκος μίας κεκλιμένης διαγώνιας ρωγμής. Επομένως, λαμβάνει υπόψη: (α) την επιρροή του μήκους διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος άρα και τον μηχανισμό τόξου, (β) το ποσοστό του εφελκυσμένου οπλισμού άρα και την δράση βλήτρου, (γ) τα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος λόγω της προσθήκης των ινών στο μίγμα σκυροδέματος, λαμβάνοντας έτσι υπόψη την συνεισφορά του αρηγματώτου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης και της συνεισφοράς του διαγώνιου θλιπτήρα.

Όλα τα παραπάνω αποτυπώνονται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της Εικόνας 14. Όπως φαίνεται όλοι οι τύποι οδηγούν σε συντηρητικά αποτελέσματα, εκτός από κάποιες εξαιρέσεις με τον τύπο από Sharma (1986) [74]. Εξαιρετικά συντηρητικοί αποδείχθηκαν οι τύποι από Khuntia et al. (1999) [73], Sahoo and Sharma (2014) [65] και Li et al. (1992) [48], εξαιτίας της μη ύπαρξης βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή του σκυροδέματος. Περισσότερο ακριβείς κρίνονται οι τύποι από Narayanan and Darwish (1987) [71], Kwak et al. (2002) [42], Ashour et al. [70], Imam et al. [80] και Shin et al. (1994) [72].



Εικόνα 14. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής (πειραματικά αποτελέσματα) σε σύγκριση με την εκτιμώμενη διατμητική αντοχή τύπων της βιβλιογραφίας για τις έρευνες που αναφέρθηκαν παραπάνω

Ο τύπος του Model Code (2010) [68] δεν μπορεί να εφαρμοστεί εν προκειμένω, διότι δεν δίνονται όλες οι καμπύλες της κάμψης τριών σημείων των πρισματικών δοκιμών σε όλες τις έρευνες. Γίνεται

εκτεταμένη αναφορά στο Κεφάλαιο 3.4.1 του σχεδιασμού του Πειραματικού Μέρους της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας.

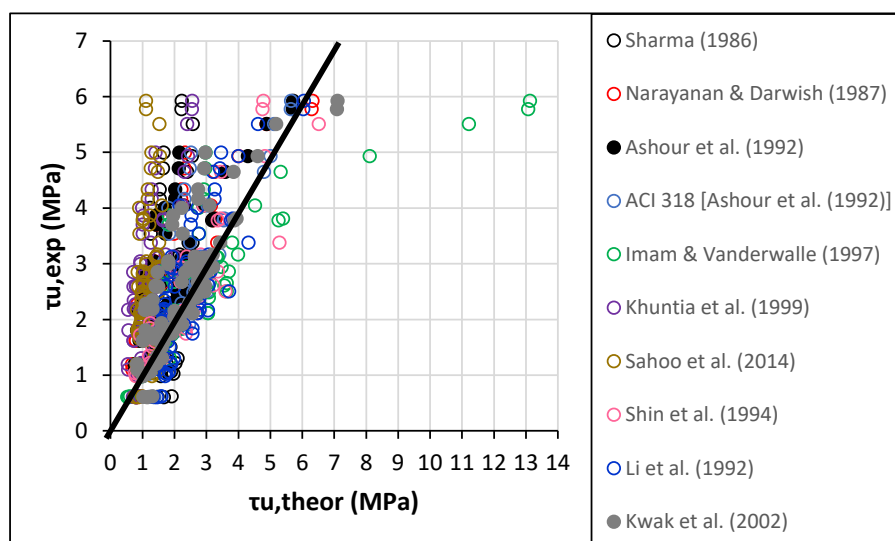
2.5.2. Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι τύποι για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος σε μεγάλο βαθμό αποτελούν τροποποίηση των ήδη υπάρχοντων τύπων που είχαν διαμορφωθεί για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του ινοπλισμένου συμβατικού σκυροδέματος.

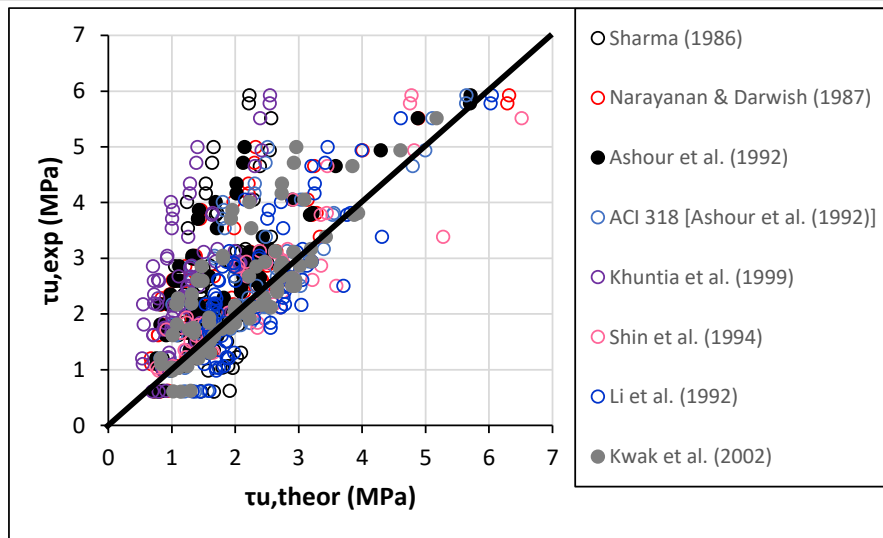
Αρχικά ένας τύπος τροποποίησης σύμφωνα με τους Kang and Hong [69] βασίζεται στην λογική του του ACI 318 [17], ο οποίος εισάγει έναν μειωτικό συντελεστή, που εκφράζει τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικού της ίδιας θλιπτικής αντοχής. Αυτός ο συντελεστής εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα ελαφροβαρή αδρανή και προκύπτει από τον πίνακα 19.2.4.2 του [17]. Από τον πίνακα 19.2.4.2 του [17], ως κάτω όριο του παραπάνω συντελεστή ορίζεται η τιμή 0,75. Ωστόσο οι Kang and Hong [69] αναφέρουν πως πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι με την εισαγωγή ινών στο μίγμα αυτός ο μειωτικός συντελεστής μπορεί να είναι λιγότερος συντηρητικός, εφόσον οι ίνες βελτιώνουν σημαντικά την απόκριση του ελαφροσκυροδέματος προσεγγίζοντας την συμπεριφορά του συμβατικού σκυροδέματος. Επομένως προτείνουν την τροποποίηση του τύπου του λ που προτείνει ο ACI 318 [17] που παρατίθεται παραπάνω με τον παρακάτω τύπο:

$$\lambda = \frac{C_3 * \sqrt{f'_c} + C_4 * \rho * \frac{d}{a} (\leq 0,292 * \sqrt{f'_c})}{0,158 * \sqrt{f'_c} + 17,24 * \rho * \frac{d}{a} (\leq 0,292 * \sqrt{f'_c})}$$

Όπου οι τύποι C3 και C4 προκύπτουν ανάλογα με τον τύπο του ελαφροβαρούς αδρανούς σύμφωνα με τον Πίνακα που παρατίθενται στην έρευνα των Kang and Hong [69]. Επομένως όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, η διαφορετική συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος σε τέμνουσα εισάγεται στους τύπους όσων ερευνητών παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 15 μέσα από τις παρακάτω αντικαταστάσεις: (α) όπου συμπεριλαμβάνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αντικαθίσταται με το γινόμενο $\lambda^2 * f'_c$ και όπου (β) υπάρχει ο όρος της συνάφειας των ινών με το σκυρόδεμα τ αντικαθίσταται από το γινόμενο $\lambda * \tau$. Σύμφωνα με την Εικόνα 15 (α) φαίνεται πως οι τύποι από Imam & Vanderwalle (1997) [80] και Li et al. (1992) [48] οδηγούν σε μη ασφαλή αποτελέσματα, επομένως εξαιρέθηκαν από περαιτέρω ανάλυση για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος. Οι τύποι από Sharma (1986) [74] και Khuntia et al. (1999) [73] οδηγούν σε αρκετά συντηρητικά αποτελέσματα.



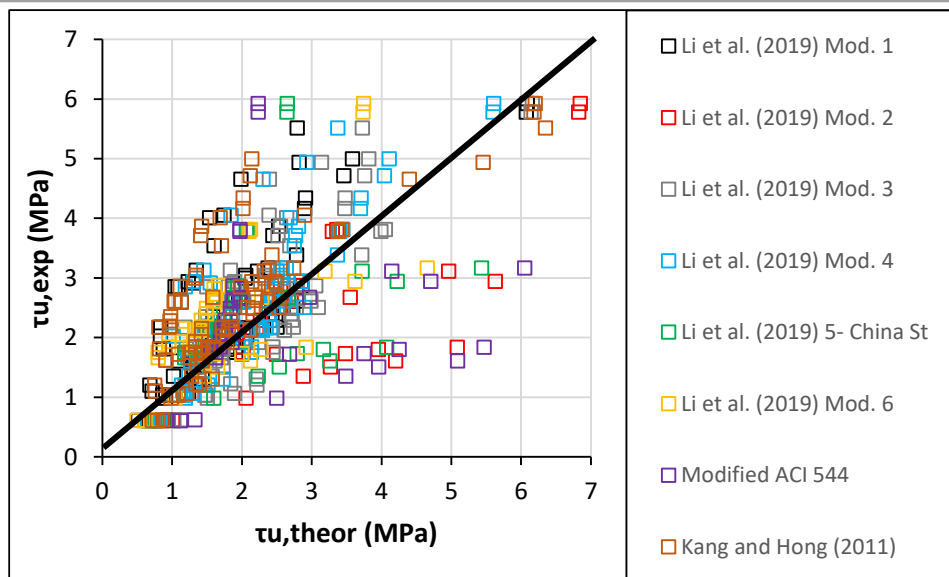
(α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων τύπων που αναλύθηκαν στην ενότητα του συμβατικού ινοπλισμένου σκυροδέματος



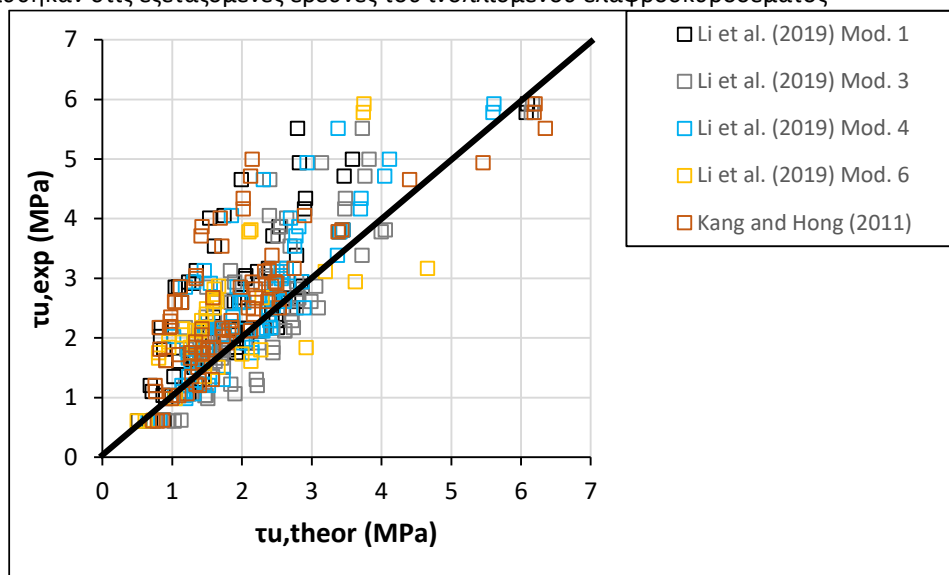
(β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα συμπεριλαμβανομένων των τύπων που έδειξαν μεγαλύτερη ακρίβεια για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος

Εικόνα 15. Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης πειραματικών τιμών διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και εκτιμώμενων τιμών διατμητικής αντοχής από τους τροποποιημένους τύπους που δημιουργήθηκαν για συμβατικό σκυρόδεμα

Όσον αφορά τους τύπους που προτείνονται από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκούς από ινοπλισμένο σκυρόδεμα από τους Kang and Hong [69] προτείνεται ο τύπος από Ashour et al. [70] με βάση την τροποποίηση που προτάθηκε παραπάνω με τον τροποποιημένο μειωτικό συντελεστή για να ληφθεί υπόψη η μειωμένη απόκριση του ελαφροσκυροδέματος σε τέμνουσα, ανάλογα με τον τύπο του ελαφροβαρούς αδρανούς. Οι Li et al. (2019) [19] προτείνουν με την σειρά τους τροποποιήσεις τύπων που διαμορφώθηκαν για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του συμβατικού ινοπλισμένου σκυροδέματος, συγκεκριμένα: (α) Modified 1, Li & Yu (1978), (β) Modified 2, Li et al (2003), (γ) Modified 3, Rebeiz (1999), (δ) Modified 4, Kim and Park (1996), (ε) Modified 5, China standard JGJ 12-2006, (στ) Modified 6, Yi et al. (2017), (ζ) Modified 7, ACI544. Σε όλους τους παραπάνω τύπους λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι του λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος, το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, εκτός από τον Modified 7, ACI544 στον οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού. Η επιρροή των ινών λαμβάνεται μέσα από την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Οι Modified 2, Li et al (2003), Modified 5, China standard JGJ 12-2006 και Modified 7, ACI544 κρίθηκαν εντελώς μη συντηρητικοί και μη ασφαλείς, επομένως αποκλείστηκαν από την περαιτέρω ανάλυση στην παρούσα έρευνα.



(α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων τύπων που αναλύθηκαν στις εξεταζόμενες έρευνες του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος



(β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα συμπεριλαμβανομένων των τύπων που έδειξαν μεγαλύτερη ακρίβεια για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Εικόνα 16. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής (πειραματικά αποτελέσματα) σε σύγκριση με την εκτιμώμενη διατμητική αντοχή από τους τύπους που προτείνονται από τις έρευνες ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος που αναφέρθηκαν παραπάνω

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας τύπων βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής δοκών

Formulae			
Authors	Type of loading	Normal weight concrete	Lightweight concrete
Sharma (1986) [74]	Shear-without stirrups	$v_u = k * f'_t * \left(\frac{d}{a}\right)^{0,25}$ <p>k=1 if ft' is obtained by direct tension test, 2/3 if ft' is obtained by indirect tension test, 4/9 if ft' is obtained by modulus of rupture ft'=split-cylinder tensile strength of concrete $f'_t = 0,79 * f_c^{0,50}$ fc=concrete cylinder compressive strength</p>	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$
Narayanan & Darwish (1987) [71]	Shear-without stirrups	$v_u = e * \left[0,24 * f_{spfc} + 80 * \rho_s * \frac{d}{a}\right] + v_b$ $v_b = 0,41 * \tau * F, \tau = 4,15MPa$ $f_{spfc} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0,70 + 1,0 * \sqrt{F}$ $f_{cuf} = \text{cube strength of concrete} = 1,20 * f_c,$ $F = \frac{L_f}{D_f} * V_f * d_f$ <p>ρs= flexural reinforcement ratio e=arch action factor: 1,0 for a/d>2,80, and 2,80 d/a for a/d≤2,80 df= bond factor=0,50 for round fibers, 0,75 for crimped fibers and 1 for indented</p>	$f_{cuf}' = 1,20 * \lambda^2 * f_c', \text{ cube compressive strength}$ $\tau' = \lambda \tau$
Ashour et al. (1992) [70]	Shear-without stirrups	$v_u = \left(2,11 * \sqrt[3]{f'_c + 7 * F}\right) * \left(\rho * \frac{d}{a}\right)^{0,33}, \frac{a}{d} \geq 2,50$	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$
		$v_u = \left(2,11 * \sqrt[3]{f'_c + 7 * F}\right) * \left(\rho * \frac{d}{a}\right)^{0,33} * \frac{2,50}{\frac{a}{d}} + v_b * \left(2,50 - \frac{a}{d}\right), \frac{a}{d} < 2,50$ <p>df=bond factor=0,50 for round fibers, 0,75 for crimped fibers and 1 for indented fibers</p>	$f_{cuf}' = 1,20 * \lambda^2 * f_c', \text{ cube compressive strength}$ $\tau' = \lambda \tau$
ACI318 Ashour et al. (1992) [70]	Shear-without stirrups	$v_u = \left(0,70 * \sqrt{f'_c + 7F}\right) * \frac{d}{a} + 17,20 * \rho * \frac{d}{a}$ <p>df=bond factor=0,50 for round fibers, 0,75 for crimped fibers and 1 for indented fibers</p>	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$
Imam & Vandewalle (1997) [80]	Shear-without stirrups	$v_u = 0,60 * \Psi * \sqrt[3]{\omega} * [f_c^{0,44} + 275 * \sqrt{\frac{\omega}{\left(\frac{a}{d}\right)^5}}]$	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$

		$\psi = \frac{1 + \sqrt{5,08/d_a}}{\sqrt{1 + d/(25*d_a)}} \text{ size effect factor}$ $d_a = \text{maximum aggregate diameter}$ $\omega = \rho_s * (1 + 4F), \text{ reinforcement factor}$ $d_f = \text{bond factor} = 0,50 \text{ for smooth fibers, } 0,90 \text{ for deformed fibers and } 1 \text{ for hooked fibers}$	
Kwak et al. (2002) [42]	Shear-without stirrups	$v_u = 3,70 * e * f_{sp} f_c^{\frac{2}{3}} * \left(\rho * \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} + 0,80 * v_b$ $e = 1 \text{ for } a/d > 3,40 \text{ and } 3,40 * d/a \text{ for } a/d \leq 3,40$ $d_f = \text{bond factor} = 0,50 \text{ for round fibers, } 0,75 \text{ for crimped fibers and } 1 \text{ for indented fibers}$	$f_{cuf}' = 1,20 * \lambda^2 * f_c'$, cube compressive strength $\tau' = \lambda \tau$
Khuntia et al. (1999) [73]	Shear-without stirrups	$v_u = (0,167 * e + 0,25 * F) \sqrt{f'_c}$ $e = 1 \text{ for } a/d > 2,50$ $e = 2,50d/a < 3 \text{ for } a/d < 2,5$ $F = \frac{L_f}{D_f} * V_f * \beta$ $\beta = \text{factor for fiber and concrete type} = 1 \text{ for hooked or crimped steel fibers, } 2/3 \text{ for plain or round steel fibers with normal concrete, } 3/4 \text{ for hooked or crimped steel fibers with lightweight concrete}$	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$
Sahoo et al. (2014) [65]	Shear-with & without stirrups	$v_u = (0,251 + 0,173 * V_f + 0,069 * V_f^2) * \sqrt{f'_c}, \text{ for } d < 300\text{mm}$ $v_u = (0,202 + 0,377 * V_f - 0,113 * V_f^2) * \sqrt{f'_c}, \text{ for } d \geq 300\text{mm}$	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$
Model code 2010 [68]/ ACI544 [62]	Without & With web reinforcement	$V_{FRC} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} * k_s * \left[100 * \rho * \left(1 + 7,50 * \frac{f_{ut-FRC}}{f_t} \right) * f_c \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 * \sigma_{cp} \right\} * b$ $* d$ $V_{FRC} > (v_{min} + 0,15 * \sigma_{cp}) * b * d$ $v_{min} = 0,035 * k_s^{\frac{3}{2}} * \sqrt{f'_c}$ $k_s = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ $\rho = \frac{A_s}{bd}$ $f_o, f_t = \text{plain concrete}$	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$

		$f_{tu-FRC} = 0,45 * f_{R,1} - \frac{w_u}{CMOD_3} * (0,45 * f_{R,1} - 0,50 * f_{R,3} + 0,20 * f_{R,1})$ $\geq 0, \text{ for } w_u = 1,50\text{mm}$ <p><i>CMOD3=crack mouth opening at displacement of 2,50mm</i></p> $f_{R1} = \frac{3 * F_j * l}{2 * b * h_{sp}^2}, \text{ for } w = 0,50\text{mm}$ $f_{R3} = \frac{3 * F_j * l}{2 * b * h_{sp}^2}, \text{ for } w = 2,50\text{mm}$ $f_L = \frac{3 * F_L * l}{2 * b * h_{sp}^2}, \text{ for } w = 0,050\text{mm}$ $V = V_{Rd,f} + V_{Rd,s}$	
Shin et al. (1994) [72]	Without & With web reinforcement	$v_n = 0,19 * f_{spfc} + 93 * \rho * \left(\frac{d}{a}\right) + 0,834 * v_b, \text{ for } \frac{a}{d} \geq 3$ $v_n = 0,22 * f_{spfc} + 217 * \rho * \left(\frac{d}{a}\right) + 0,834 * v_b, \text{ for } \frac{a}{d} < 3$ <p><i>d=bond factor=0,50 for round fibers, 0,75 for crimped fibers and 1 for indented fibers</i></p>	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$ $\tau' = \lambda \tau$
Li et al. (1992) [48]	Without & With web reinforcement	$v_n = 1,25 + 4,68 * \left[(f_f * f_t)^{\frac{2}{3}} * \left(\rho * \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} * d^{-\frac{1}{3}} \right], \text{ for } \frac{a}{d} \geq 2,50$ $v_n = 9,16 * \left[(f_f)^{\frac{2}{3}} * (\rho)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{d}{a} \right) \right], \text{ for } \frac{a}{d} < 2,50$ <p><i>f_f = modulus of rupture = 2,50 * f_{cc}</i></p> $f_{cc} = \text{tensile strength} = f_t * (1 - V_f) + \alpha_1 * \alpha_2 * \tau * V_f * \frac{L_f}{D_f}$ $f_t = \text{tensile strength of concrete} = 0,292 * \sqrt{f'_c}$ <p><i>α₁=0,50, α₂=0,10, τ=4,15MPa</i></p>	$f_c'' = \lambda^2 * f_c'$ $\tau' = \lambda \tau$
Li et al. (2019) Modified Li and Yu (1978) [19]	Without web reinforcement	-	$v_{cu} = \frac{0,024 * (2 + 100 * \rho_s)}{a/d - 0,30} * f_c$ <p><i>a/d=4 when a/d ≥ 4</i> <i>ρ=3% when ρ ≥ 3%</i></p>
Li et al. (2019) Modified Li et al. (2003) [19]	Without web reinforcement	-	$v_{cu} = \frac{0,115 + 0,192 * a/d + 28,70 * \rho_s}{a/d - 0,60} * f_{ft}$ <p><i>a/d=4,50 when a/d ≥ 4,50</i> <i>ρ=4% when ρ ≥ 4%</i></p>

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ινών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων

Li et al. (2019) Modified Rebeiz (1999) [19]	Without web reinforcement	-	$v_{cu} = 0,40 + \sqrt{f'_c} * \frac{\rho}{\lambda} * (10 - 3 * \alpha_d)$ $\alpha_d = \frac{a}{d} \text{ when } 1 < \frac{a}{d} < 2,50 \text{ and } \alpha_d = 2,50 \text{ when } \frac{a}{d} \geq 2,50$ $f'_c = 0,81 * f_{fc} \text{ (for reinforced)}$
Li et al. (2019) Modified Kim and Park (1996) [19]	Without web reinforcement	-	$v_{cu} = 3,5 * \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 0,008 * d}} + 0,18 \right) * f'^{\frac{a}{c}} * \rho^{\frac{3}{8}} * \left(0,40 + \frac{1}{a/d} \right)$ $\lambda = a/d$ $\alpha = \text{coefficient about the failure mode } \alpha = 2 - \frac{a/d}{3} \text{ when } 1 \leq a/d < 3, \text{ and } \alpha = 1 \text{ when } a/d \geq 3$ $f'_c = 0,81 * f_{fc} \text{ (for reinforced)}$
Li et al. (2019) Modified China standard JGJ 12-2006 [19]		-	$v_{cu} = \frac{1,50}{\lambda + 1,0} * \beta_p * f_t$ $\lambda = a/d$ $\beta_p = \text{influencing coefficient of longitudinal reinforcement ratio} = (0,70 + 20 * \rho)$
Li et al. (2019) Modified Yi et al. (2017) [19]		-	$v_{cu} = \frac{0,72}{\lambda - 0,32} * \beta_p * f_t$
Modified ACI 544 [19]		-	$v_{cu} = \frac{2}{3 * \lambda^{0,25}} * f_{ft}$
Kang and Hong (2011) [18]		-	$v_n = \left(2,11 * \sqrt[3]{\lambda^2 * f'_c + 7F} \right) * \sqrt[3]{\rho * \frac{d}{a}}, \text{ for } \frac{a}{d} \geq 2,50$ $v_n = \left[\left(2,11 * \sqrt[3]{\lambda^2 * f'_c + 7F} \right) * \sqrt[3]{\rho * \frac{d}{a}} \right] * \left(\frac{2,50}{\frac{a}{d}} + v_b * (2,50 - \frac{a}{d}) \right), \text{ for } \frac{a}{d} < 2,50$

2.6. Συμπεράσματα- στόχος έρευνας

Στο παρόν Κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα των ερευνών της βιβλιογραφίας που παρατέθηκαν και αναλύθηκαν σε βάθος παραπάνω. Με βάση αυτά τα συμπεράσματα, τίθεται η βάση για το πειραματικό μέρος της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας και παρατίθενται οι προβλεπόμενοι στόχοι της και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα της.

Όπως αναλύθηκε σε βάθος παραπάνω, η συνεισφορά των ινών είναι καθοριστική για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των δοκών χωρίς εγκάρσιο διατμητικό σπλισμό, εφόσον έχει σημειωθεί αύξηση σε ποσοστό μέχρι 210% για ογκομετρικό ποσοστό ινών $V_f=1\%$ από τους Swamy et al. [56]. Αντίστοιχα οι Kang and Hong [18],[69] και Li et al. [19] σημείωσαν ποσοστά αύξησης της διατμητικής αντοχής περί τα 18-45%,- για διάφορους συνδυασμούς συνθέσεων σκυροδέματος, λόγω διατμητικού μήκους προς στατικού ύψους και εφελκόμενου σπλισμού-, για ογκομετρικά ποσοστά ινών από 0,40-1,20%. Συγκεκριμένα, αναφέρουν πως οι ίνες ήταν πιο αποτελεσματικές σε δοκούς με λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψους περί το 2. Πιο αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 3, με αντιστοιχία της αύξησης της διατμητικής αντοχής των δοκών με βάση ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% και τις υπόλοιπες παραμέτρους που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή (a/d , ρ_s κ.ο.κ.). Αντιθέτως, σε όρους καμπτικής αντοχής, για τα παραπάνω ποσοστά ινών δεν σημειώθηκε αύξηση της παραπάνω από 10-20% σύμφωνα με τους Catarelli et al. [9], Zhao et al. [41] και Campione et al. [20]. Επομένως, σε όρους αντοχής, καθοριστικότερη θεωρείται η συνεισφορά των ινών στην διατμητική αντοχή των δοκών χωρίς εγκάρσιο διατμητικό σπλισμό, σε σχέση με την συνεισφορά τους στην καμπτική αντοχή των δοκών, για την οποία καθοριστικό ρόλο παίζει το ποσοστό του εφελκόμενου σπλισμού κυρίως.

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκίμων δοκών με τα αντίστοιχα μη ινοπλισμένα δοκίμια αναφοράς

Author	a_v/d	ρ_s	V_f (%)	l/d	f_y (MPa)	Stirrups	$(\tau_{u,f}-\tau_{u,0})/\tau_{u,0}$ (%)
Normal weight concrete							
Kwak et al. [42]	3 & 4	1,52	0,50	62,50	1079	0	22
	3 & 4	1,52	0,75	62,50	1079	0	34-38
	2	1,52	0,50	62,50	1079	0	69
	2	1,52	0,75	62,50	1079	0	80
Dihn et al. [55]	3,50	2,70	1	55	1100	0	137
	3,50	2,70	1,50	55	1100	0	137
	3,50	1,60-2	0,75	80	1100	0	58
	3,50	1,60-2	1	80	1100	0	98
	3,50	2,70	1	80	1100	0	>200
	3,50	2,70	1	55	2300	0	>200
Sahoo & Sharma [65]	3,45	1,95	0,75	80	1100	0	13
	3,45	1,95	1	80	1100	0	0
	3,45	1,95	1,50	80	1100	0	8,10
	2,30	1,15	0,50	80	1100	Φ8/180	5
	2,30	1,15	1	80	1100	Φ8/180	8
	2,30	1,15	1,50	80	1100	Φ8/180	5
	2,30	0,80	0,50	80	1100	Φ8/150	7
	2,30	0,80	1	80	1100	Φ8/150	9
	2,30	0,80	1,50	80	1100	Φ8/150	7,20
Folino et al. [64]	2,61	1,41	0,50	67	1100	0	29
	2,61	1,4	0,75	67	1100	0	28
Lightweight concrete							
Swamy et al. [56]	2	4,31	1	100	1570		63
	3,43	4,31	1	100	1570		212
	4,91	4,31	1	100	1570		143
	2	2,76	1	100	1570		97

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ινών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων

	3,43	2,76	1	100	1570	157
	4,91	2,76	1	100	1570	177
	2	1,55	1	100	1570	115
	3,43	1,55	1	100	1570	177
	4,91	1,55	1	100	1570	94
Kang & Hong [69]	2	1,53	0,50	100	1560	16,40
	2	1,53	0,75	100	1560	18,40
	3	1,53	0,50	100	1560	0,7
	3	1,53	0,75	100	1560	7
	4	1,53	0,50	100	1560	37
	4	1,53	0,75	100	1560	63
Li et al. [19]	2	1,81	0,40	37,50	800	21
	2	1,81	0,80	37,50	800	32
	2	1,81	1,20	37,50	800	44

*Σημείωση1: στον παραπάνω πίνακα έχουν συμπεριληφθεί τα αποτελέσματα των δοκών των ινοπλισμένων δοκίμων δοκών για τα οποία στις αντίστοιχες έρευνες υπάρχουν δοκίμια αναφοράς μη ινοπλισμένου σκυροδέματος

Σημείωση 2: Επισημαίνονται με κόκκινο τα πειραματικά αποτελέσματα που προσεγγίζουν τις παραμέτρους που πρόκειται να εξεταστούν στην παρούσα έρευνα

Οστόσο, το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή εμφανίζεται εμφανώς βελτιωμένο μετά την εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος κυρίως σε δοκούς που συμπεριφέρονται καμπτικά παρά διατμητικά. Συγκεκριμένα, οι Zhao et al. [41] σημείωσαν ότι υπάρχει αντιστοιχία της αύξησης του φορτίου στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο μίγμα σκυροδέματος, αντίστοιχη με την αύξηση της καμπτικής αντοχής πρισματικών δοκίμων σκυροδέματος σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών. Οι Folino et al. [64] σημείωσαν για ογκομετρικά ποσοστά ινών 0,50-0,75% μέχρι και διπλασιασμό του φορτίου στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή σε σχέση με τις μη ινοπλισμένες δοκούς. Στην περίπτωση δοκών που συμπεριφέρονται διατμητικά, σύμφωνα με τους Li et al. [19] δεν εμφανίστηκε κάποια σαφής επιρροή στο φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή, λόγω της εισαγωγής των ινών στο μίγμα σκυροδέματος, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ίνες ενεργοποιούνται μετά την ρηγμάτωση του σκυροδέματος, μέσω της εξόλκευσης του από αυτό. Οι Swamy et al. [56] και Kang and Hong [18],[69], δηλώνουν πως η όποια σχετική αύξηση στο φορτίο που εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή οφείλεται στα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος λόγω της εισαγωγής των ινών στο μίγμα. Συγκεκριμένα οι Kang and Hong [18],[69] σημείωσαν αύξηση του φορτίου στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή μέχρι 35%.

Και στις δύο περιπτώσεις απόκρισης των δοκών, σημειώθηκε σημαντική βελτίωση στην πλαστιμότητα τους, η οποία αποτελεί σημαντική παράμετρο στην οποία επιδρούν καθοριστικά οι ίνες. Τόσο στο ελαφροσκυρόδεμα όσο και στο συμβατικό σκυρόδεμα σημειώνεται σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας για δοκούς με: (α) διατμητική συμπεριφορά πάνω από 200% για ποσοστά ινών από 0,40-1,20% και (β) καμπτική συμπεριφορά ([6], [9], [41]) από 65 έως 262% για ποσοστά ινών από 0,40-1,60%. Και στις δύο περιπτώσεις, βελτιώνεται σημαντικά η εικόνα της ρηγμάτωσης, με περισσότερες ρωγμές μικρότερου εύρους και σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, πράγμα που οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και σε πιο πλαστική συμπεριφορά ([6], [9], [41]). Επίσης, μειώθηκε κι η επέκταση των ρωγμών προς τις στηρίξεις, πράγμα που βελτίωσε και την συνάφεια του εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού με το σκυρόδεμα [56]. Σημαντική βελτίωση και στις δύο περιπτώσεις απόκρισης, σημειώνεται και στην μεταλαστική συμπεριφορά των δοκών, με μεγαλύτερο παραμένον φορτίο καθώς και μεγαλύτερη αντοχή σε μετακίνηση [81]. Για να πληρούνται οι απαιτήσεις πλαστιμότητας και για να συμπεριφέρονται οι δοκοί περισσότερο πλαστικά στην περίπτωση όσον συμπεριφέρονται διατμητικά ορίστηκε ελάχιστο ποσοστό ινών για δοκούς χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό ίσο με 0,75%, επιβεβαιώνοντας της προτάσεις του ACI ([18],[69]), ενώ για δοκούς που συμπεριφέρονται καμπτικά το αντίστοιχο ελάχιστο ποσοστό ινών ορίζεται από τους Sahoo and Sharma

[65] στο 0,50%. Κατά Li et al. [19], το ποσοστό ινών το οποίο απαιτείται για την μετατροπή της αστοχίας της δοκού από ψαθυρή-διατμητική σε πλαστική-καμπτική είναι το 1,20% [19].

Όσον αφορά τις μετακινήσεις που αναπτύσσονται στις δοκούς εξαιτίας της κάμψης τους, τόσο για δοκούς που συμπεριφέρονται καμπτικά ([41], [76], [77]) όσο και διατμητικά ([19], [65]), εμφανίστηκαν μειωμένες σε όλες τις στάθμες φορτίου.

Όπως φαίνεται παραπάνω, από τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, είναι σαφές πως δόθηκε έμφαση μέχρι στιγμής στην μελέτη της επίδρασης μεγάλων ποσοστών ινών στις συνθέσεις σκυροδέματος. Ελάχιστες ήταν οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν ογκομετρικά ποσοστά ινών κάτω από 0,50%, ως εκ τούτου δεν έχει προκύψει καθόλου συζήτηση στην βιβλιογραφία για αυτήν την τάξη μεγέθους ογκομετρικών ποσοστών καθώς και την επιρροή αυτών στην διατμητική αντοχή και πλαστιμότητα δοκών από ελαφροβαρές ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά, η μελέτη μικρότερων ογκομετρικών ποσοστών ινών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την κατασκευαστική πλευρά του θέματος, εφόσον εκτός του ότι μειώνεται σημαντικά το κόστος παραγωγής, θα βελτιωθούν κι οι ιδιότητες του σκυροδέματος στην νωπή του κατάσταση (ρευσιμότητα, κάθιση) και θα βελτιωθεί η ποιότητα της διάσθρωσης και συμπίκνωσης του σκυροδέματος, αφού θα επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη διασπορά των ινών στο μίγμα του, χωρίς συσσωματώσεις και δημιουργία κενών.

Συνεπώς, μέσα από την πειραματική έρευνα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας στοχεύεται να μελετηθούν τα εξής:

- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των συνθέσεων ινοπλισμένου και μη ελαφροσκυροδέματος σε επίπεδο υλικού. Θα γίνουν δοκιμές κάθισης, αεροπεριεκτικότητας, μέτρηση πυκνότητας καθώς και δοκιμές κάμψης τριών σημείων και θλιπτικής αντοχής για μη ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα καθώς και ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με ογκομετρικά ποσοστά ινών $V_f=0,25\%$ και $V_f=0,50\%$. Τα παραπάνω αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας
- Τα αποτελέσματα της δοκιμής σε κάμψη τεσσάρων σημείων δοκών μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με ογκομετρικά ποσοστά ινών $V_f=0,25\%$ και $V_f=0,50\%$. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Επίσης, θα χρησιμοποιηθούν οι τύποι της βιβλιογραφίας που παρατέθηκαν παραπάνω για να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι σε θέση να προβλέψουν την αντοχή των εξεταζόμενων δοκών ελαφροσκυροδέματος. Θα σημειωθούν ποιες σχέσεις θεωρούνται κατάλληλες. Επιπροσθέτως θα σχολιαστεί κι η πλαστιμότητα των δοκών.
- Θα γίνει ένας μακροσκοπικός σχολιασμός του μοτίβου ρηγμάτωσης των δοκών και θα συγκριθεί με τις παραμέτρους που έχει αποδειχθεί πως το επηρεάζουν (όπως είναι το ογκομετρικό ποσοστό των ινών).

3. Πειραματικό μέρος-Σύνθεση εξεταζόμενων συνθέσεων σκυροδέματος

3.1. Υλικά συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος

Οι εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος αποτελούν αντικείμενο μελέτης εν εξελίξει Διδακτορικής Διατριβής [82]. Στις συνθέσεις σαν αδρανή χρησιμοποιήθηκαν κίσηρης και περλίτης στις αναλογίες που περιγράφονται στον Πίνακα 4. Επίσης, στον ίδιο πίνακα παρατίθενται και οι χρησιμοποιούμενες ποσότητες τσιμέντου, νερού και ρευστοποιητή.

Για την ανάπτυξη του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές ίνες διπλά κεκαμμένες μήκους 35mm και διαμέτρου 0,80mm (aspect ratio~43,75). Επιλέχθηκαν ίνες τέτοιου μήκους έτσι ώστε να ικανοποιείται σε όσο πιο ικανοποιητικό βαθμό γίνεται ο περιορισμός ότι το μήκος των ινών πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από την καθαρή απόσταση των διαμήκων εφελκυσμένων ράβδων, προκειμένου να αποφεύγεται η ανομοιόμορφη διασπορά τους στο μίγμα του σκυροδέματος και η συσσωμάτωση τους κατά την ανάμιξη, διάσπρωση και συμπύκνωση του σκυροδέματος. Οι συγκεκριμένες ίνες παρασκευάζονται από την εταιρεία MF Nassar Group και τις προμηθεύεται η εταιρεία Τσάκας Ε.Π.Ε..

3.2. Αναλογίες υλικών εξεταζόμενων συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος

Το ελαφροσκυρόδεμα από το οποίο κατασκευάστηκαν οι δοκοί και ελήφθησαν δοκίμια παρασκευάστηκε από την εταιρία Lafarge. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, οι οποίες είναι οι εξής: (α) μη-ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα (LWAC), (β) ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με χαλύβδινες διπλά κεκαμμένες ίνες με ογκομετρικό ποσοστό ινών $V_f=0,25\%$ (LWAC-0,25F) και (γ) ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με χαλύβδινες διπλά κεκαμμένες ίνες με ογκομετρικό ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$ (LWAC_0,50P&F). Σημειώνεται ότι η σύνθεση ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$ πραγματοποιήθηκε δύο φορές, γι αυτό και διαχωρίζονται οι συνθέσεις σε LWAC_0,50P (preliminary-προκαταρκτική σύνθεση) και LWAC_0,50F (final- τελική σύνθεση). Οι αναλογίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή όλων των συνθέσεων σκυροδέματος παρατίθενται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αναλογίες υλικών για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

Υλικά	LWAC	LWAC_0,25F	LWAC_0,50P	LWAC_0,50F
Τσιμέντο/Συνολική ποσότητα αδρανών (w/w)	0,27	0,27	0,27	0,27
Κίσηρης 8-16 (Pu)/Συνολική ποσότητα αδρανών (w/w)	0,41	0,36	0,36	0,36
Άμμος κίσηρης 0-8 (Pu)/Συνολική ποσότητα αδρανών (w/w)	0,18	0,16	0,17	0,17
Περλίτης (Pe)/Συνολική ποσότητα αδρανών (w/w)	0,14	0,13	0,13	0,20
Plastiment 20R/Τσιμέντο (% w/w)	0,15	0,20	0,60	0,20
Viscocrete Ultra 420/Τσιμέντο (% w/w)	0,81	1,34	1,62	0,40
Νερό/Τσιμέντο (w/w)	0,45	0,34	0,48	0,32
Ποσοστό ινών (% v/v)	0	0,25	0,50	0,50

Σημείωση w/w: αναλογίες και ποσοστά υλικών κατά βάρος

v/v: αναλογίες και ποσοστά υλικών κατ' όγκον

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στις ποσότητες αδρανών ανάμεσα στις διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, καθώς ούτε και στην ποσότητα του συνολικού νερού. Η υψηλή περιεκτικότητα σε ρευστοποιητή και νερό στην σύνθεση LWAC_0,50P μπορεί να είναι υπεύθυνη για την υψηλή κάθιση της σύνθεσης αυτής με όλες τις συνέπειες που περιγράφονται με λεπτομέρεια παρακάτω.

3.3. Αξιολόγηση ιδιοτήτων σκυροδέματος

3.3.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

3.3.1.1. Δοκιμές νωπού σκυροδέματος

3.3.1.1.1. Μέτρηση ειδικού βάρους

Κατά την διάρκεια της έγχυσης των συνθέσεων σκυροδέματος λήφθηκε δείγμα νωπού σκυροδέματος σε δοχείο γνωστού όγκου (Εικόνα 17), ούτως ώστε να μετρηθεί η καθαρή μάζα του δείγματος σε ζυγαριά και εν τέλει να υπολογιστεί το ειδικό του βάρος. Το δοχείο έχει όγκο 8000cm^3 .



Εικόνα 17. Δοχείο μέτρησης της μάζας και πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος

3.3.1.1.2. Μέτρηση περιεκτικότητας σε αέρα

Η περιεκτικότητα της εκάστοτε σύνθεσης σε αέρα μετράται με την ογκομετρική μέθοδο και με βάση τα πρότυπα ASTM C173 [83], το οποίο αναφέρεται σε μεθόδους αξιολόγησης συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος, και το EN12350-7 [84]. Στην ογκομετρική μέθοδο, δοχείο γνωστού όγκου (συσσκευή Mayer-Εικόνα 18) γεμίζεται με νωπό σκυρόδεμα μέχρι μια καθορισμένη στάθμη και το υπόλοιπο τμήμα του δοχείου γεμίζεται με νερό. Με συνεχή ανάδευση του συστήματος το νερό γεμίζει τους πόρους του σκυροδέματος και καταλαμβάνει τη θέση του αέρα. Από την ποσότητα του εξερχόμενου αέρα προσδιορίζεται η % περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε αέρα. Σημειώνεται ότι το δοχείο της συσκευής για την μέτρηση της αεροπεριεκτικότητας έχει όγκο 8000cm^3 . Ο λόγος της διαμέτρου προς το ύψος του δοχείου της συσκευής για την μέτρηση της αεροπεριεκτικότητας είναι 0,82, κάτι το οποίο ικανοποιεί τον παρακάτω περιορισμό που θέτει το πρότυπο ASTM C173 [83] $d=(0,75-1,25)*h$



Εικόνα 18. Συσσκευή μέτρησης της περιεκτικότητας σε αέρα

3.3.1.1.3. Κάθιση

Η δοκιμή κάθισης πραγματοποιείται προκειμένου να καταταχθεί το παραχθέν σκυροδέμα σε μία από τις κατηγορίες κάθισης κατά EN206 (Πίνακας 5), κάτι το οποίο θα δώσει πληροφορίες σχετικά με την εργασιμότητα και ρευστότητα του σκυροδέματος.



Εικόνα 19. Δοκιμή κάθισης [85]

Πίνακας 5. Κατηγορίες κάθισης σύμφωνα με τον EN206 [85]

Κατηγορία	Κάθιση (mm)
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	≥ 220

Η παραπάνω ιδιότητα είναι εξαιρετικά σημαντική για την αξιολόγηση της ποιότητας της σύνθεσης του σκυροδέματος γιατί καθορίζει σε μεγάλο βαθμό της ποιότητα της συμπίκνωσης αλλά και της εξέλιξης της ενυδάτωσης του σκυροδέματος.

Η παραπάνω διαδικασία κι εξοπλισμός είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις των προτύπων: EN 12350-2 [86] και ASTM C143 [87].

3.3.1.2. Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος

Κατά της διάρκεια της σκυροδέτησης, λήφθησαν δοκίμια προκειμένου να αξιολογηθούν οι μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό λόγω κάμψης τριών σημείων) της σύνθεσης σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού. Το πλήθος των δοκιμών ανά δοκιμή και εξεταζόμενη σύνθεση παρατίθενται στον Πίνακα 6. Σημειώνεται πως τα πρισματικά δοκίμια είχαν διαστάσεις 15x15x60cm και τα κυλινδρικά είχαν ύψος 30cm και διάμετρο 15cm.

Πίνακας 6. Πλήθος δοκιμών ανά εξεταζόμενη σύνθεση ελαφροσκυροδέματος

Τύπος δοκιμής	LWAC	LWAC_0,25F	LWAC_0,50P	LWAC_0,50F
Πρίσματα-κάμψη τριών σημείων	3	3	2	3
Κύλινδροι- μονοαξονική θλίψη	3	3	3	4

Τα δοκίμια αυτά αφαιρέθηκαν από το καλούπι τους 3 μέρες μετά την μέρα της σκυροδέτησης, σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν, για λόγους συνέπειας. Όσο ήταν στο καλούπι τους τα δοκίμια, διατηρήθηκαν με νωπές λινάτσες, έτσι ώστε να υποβοηθηθεί η διαδικασία της ενυδάτωσης και να διατηρηθεί ένα υψηλό επίπεδο σχετικής υγρασίας (RH). Μετά την αφαίρεση των δοκιμών απο τα καλούπια τους, τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες RH=100%, δηλαδή βυθισμένα

σε νερό, μέχρι την ημέρα της δοκιμής τους. Δοκιμές στο παραπάνω πλήθος κυλινδρικών και πρισματικών δοκιμών εκτελέστηκαν περί τις 34 ημέρες ωρίμανσης τους για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ινοπλισμένου και μη ελαφροσκυροδέματος.

3.3.1.2.1. Κάμψη τριών σημείων

Μέσω της δοκιμής της κάμψης τριών σημείων, προκύπτει η αντοχή σε εφελκυσμό η οποία προκαλείται από κάμψη. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για την συγκεκριμένη δοκιμή είναι διαστάσεων: μήκους 60cm, πλάτους και ύψους 15cm, σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο EN 14651 [88]. Τα δοκίμια, κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, τοποθετούνται σε προσανατολισμό 90° σε σχέση με την διεύθυνση έγχυσης, προκειμένου να εξαλειφθεί η τυχούσα επιρροή του προσανατολισμού. Επιπροσθέτως, στα δοκίμια διανοίγεται σχισμή (notch-Εικόνα 20), στην κάτω παρειά του δοκιμίου (ορισμός προσανατολισμού όπως είναι τοποθετημένο στην μηχανή) διαστάσεων πλάτους 150mm και ύψους 25mm. Ο σκοπός της σχισμής αυτής είναι να οδηγήσει την κεντρική καμπτική ρωγμή να ανοίξει σε εκείνο το σημείο. Στη θέση της σχισμής και σε απόσταση y από την κάτω παρειά του πρισματικού δοκιμίου τοποθετείται βελόμετρο, το οποίο λειτουργεί ως μετρητής του ανοίγματος της καμπτικής ρωγμής ($CMOD_y$) που διανοίγεται καθώς φορτίζεται το δοκίμιο στο κέντρο του. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 14651 [88], για την αξιολόγηση των δοκιμών κατασκευάζονται οι καμπύλες καμπτικής τάσης (f_i) και πραγματικού ανοίγματος της ρωγμής ($CMOD$). Για να προκύψει το πραγματικό άνοιγμα της ρωγμής ($CMOD$), εφόσον το παραπάνω βελόμετρο τοποθετείται και μετράει το άνοιγμα της ρωγμής σε απόσταση y από την κάτω παρειά του δοκιμίου, η μέτρηση του $CMOD_y$ πρέπει να διορθωθεί, όπως παρατίθεται παρακάτω.

$$CMOD = \frac{h}{h+y} * CMOD_y$$



Εικόνα 20. Διαμόρφωση της εγκοπής στο μέσον του πρισματικού δοκιμίου για την διενέργεια της δοκιμής της κάμψης τριών σημείων και την μέτρηση του $CMOD$

Η τάση στην διατομή στο μέσον του πρισματικού δοκιμίου εξαιτίας του φορτίου που ασκείται εκεί υπολογίζεται βάσει του παρακάτω τύπου:

$$f_i = \frac{3 * F_i * l}{2 * b * h_{sp}^2}$$

Όπου:

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ινών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων

F_i (N)= φορτίο που ασκείται στο μέσον του πρισματικού δοκιμίου σε συγκεκριμένη τιμή του ανοίγματος της ρωγμής (CMOD)

Χαρακτηριστικές τιμές ανοίγματος της ρωγμής (CMOD) είναι οι παρακάτω, κατά Model Code 10 [68]:

Limit of proportionality (όριο αναλογικότητας) f_i = το μέγιστο φορτίο που παρουσιάζεται από 0 έως 50μm άνοιγμα ρωγμής (CMOD)

CMOD_{R1}=500μm, f_{R1} (residual strength)

CMOD_{R2}=1500μm, f_{R2} (residual strength)

CMOD_{R3}=2500μm, f_{R3} (residual strength)

l (mm)= το άνοιγμα του πρισματικού δοκιμίου ανάμεσα στις δύο στηρίξεις, εν προκειμένω είναι 500mm

b (mm)= το πλάτος του πρισματικού δοκιμίου, εν προκειμένω είναι 150mm

h_{sp} = η απόσταση ανάμεσα στην κορυφή της σχισμής και της πάνω παρειάς του πρισματικού δοκιμίου, εν προκειμένω είναι 150-25= 125mm



Εικόνα 21. Συσκευή για την διενέργεια της δοκιμής της κάμψης τριών σημείων πρισμάτων

Σύμφωνα με τον Model Code (2010) [68] οι ίνες μπορούν να αντικαταστήσουν μέρος του εγκάρσιου διατμητικού οπλισμού αν ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} > 0,40$$

$$\frac{f_{R3k}}{f_{Lk}} > 0,50$$

3.3.1.2.2. Μονοαξονική θλίψη

Μέσω της δοκιμής της κεντρικής μονοαξονικής θλίψης, προκύπτει η αντοχή σε θλίψη του εξεταζόμενου σκυροδέματος. Τα κυλινδρικά δοκίμια που χρησιμοποιούνται για την συγκεκριμένη δοκιμή είναι διαστάσεων: διαμέτρου 15cm και ύψους 30cm, σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο ASTM

C 469 [89]. Για να αποφευχθούν τυχούσες εκκεντρότητες εξαιτίας της τραχειάς πάνω παρειάς των κυλινδρικών δοκιμίων, εκτραχύνεται η πάνω παρεία τους έτσι ώστε να είναι απολύτως επίπεδη και κάθετη με τις κατακόρυφες πλευρές του δοκιμίου. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 469 [89], κατά την διάρκεια της δοκιμής, λαμβάνονται μετρήσεις της κατακόρυφης μετακίνησης από τρία βελόμετρα καθώς επίσης και μέτρηση της διαμετρικής-περιμετρικής διόγκωσης του δοκιμίου, η οποία προκαλείται εξαιτίας του φαινομένου Poisson. Το βελόμετρο που μετρά την διαμετρική-περιμετρική διόγκωση του δοκιμίου τοποθετείται στο μέσον του ύψους του δοκιμίου, μέσω μίας αλυσίδας που τοποθετείται περιμετρικά του. Τα κατακόρυφα βελόμετρα τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο δακτυλίους, οι οποίοι απέχουν καθαρή απόσταση μεταξύ τους 11,6cm. Οι δακτύλιοι αυτοί τοποθετούνται κεντρικά στο δοκίμιο, δηλαδή σε απόσταση περίπου 9cm από την πάνω και την κάτω παρεία του κυλίνδρου, αντίστοιχα. Μέσω της παρούσας δοκιμής υπολογίζεται η αντοχή σε θλίψη του δοκιμίου, καθώς επίσης και η αξονική και διαμετρική παραμόρφωση με βάση τους παρακάτω τύπους:

Θλιπτική τάση

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

P= μέγιστο θλιπτικό φορτίο

A= εμβαδόν διατομής κυλινδρικού δοκιμίου= $\frac{\pi \cdot d^2}{4}$, όπου d η διάμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου, η οποία εν προκειμένω είναι 150mm

Αξονική παραμόρφωση

Η αξονική βράχυνση του κυλινδρικού δοκιμίου, προκύπτει από τον μέσο όρο των μετρήσεων των τριών κατακόρυφων βελομέτρων. Κατ'επέκταση η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου προκύπτει από το παρακάτω πηλίκο:

$\epsilon_{axial} = \frac{\Delta l}{l}$, όπου Δl ο μέσος όρος των τριών αξονικών βραχύνσεων και l η απόσταση των δακτυλίων όπου στηρίζονται τα αξονικά βελόμετρα, εν προκειμένω είναι 11,6cm

Διαμετρική-περιμετρική παραμόρφωση

Κατ'αντιστοιχία με την αξονική παραμόρφωση, η διαμετρική-περιμετρική παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής:

$\epsilon_d = \frac{\Delta l}{L}$, όπου Δl η μέτρηση της περιμετρικής διόγκωσης του κυλινδρικού δοκιμίου και L η περίμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου η οποία υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο: $L = \pi \cdot d$, όπου d η διάμετρος του δοκιμίου.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson μέσω της παρούσας δοκιμής, είναι απαραίτητη η εκτέλεση κύκλων φόρτισης (2 με 3 σε αριθμό) στο 40% του εκτιμώμενου μέγιστου φορτίου. Το 40% του εκτιμώμενου μέγιστου φορτίου, θεωρείται μία στάθμη φόρτισης η οποία είναι αντιπροσωπευτική του σημείου που μετά από αυτήν σταματάει το δοκίμιο να αποκρίνεται με βάση τον νόμο της ελαστικότητας, άρα κι η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης αρχίζει να χάνει την γραμμική της μορφή και αποκτά καμπύλη μορφή. Πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθως ο πρώτος κύκλος δεν θεωρείται ακριβής γι αυτό και αμελείται στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson. Επομένως λαμβάνεται ο μέσος όρος του δεύτερου και τρίτου κύκλου από τα σχετικά πειραματικά δεδομένα. Ο υπολογισμός των δύο παραπάνω μεγεθών πραγματοποιείται ως εξής:

Μέτρο ελαστικότητας (τέμνον)

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_{axial2} - 0,000050}$$

σ_2 =τάση που αντιστοιχεί στο 40% του μέγιστου φορτίου

σ_1 = τάση που αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση 0,000050

ϵ_{axial2} = αξονική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην τάση σ_2

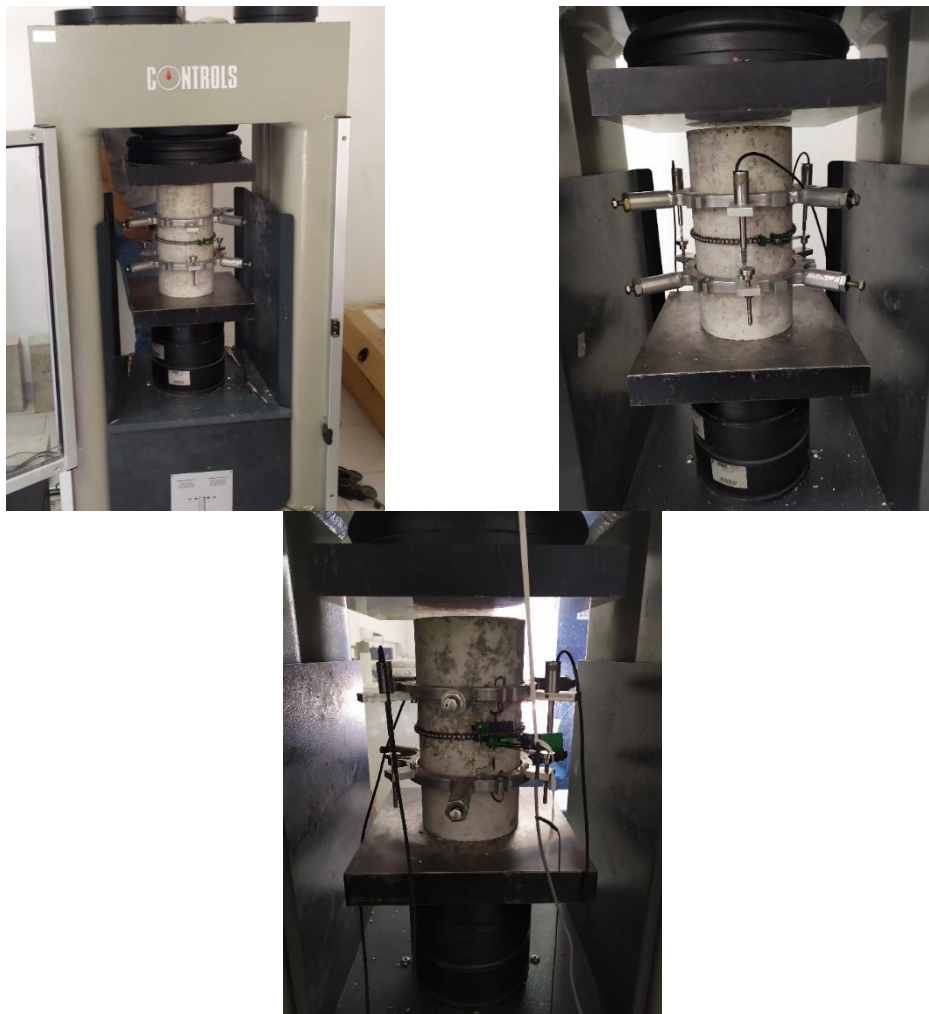
Λόγος Poisson

$$\nu = \frac{\epsilon_{d2} - \epsilon_{d1}}{\epsilon_{axial2} - 0,000050}$$

ϵ_{d2} = διαμετρική-περιμετρική παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί στην τάση σ_2

ϵ_{d1} = διαμετρική-περιμετρική παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί στην τάση σ_1

ϵ_{axial2} = αξονική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην τάση σ_2



Εικόνα 22. Μέτρηση θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμών

3.3.1.2.3. Μέτρηση πυκνότητας σκληρυμένου σκυροδέματος

Τα κυλινδρικά δοκίμια που ελήφθησαν από κάθε σύνθεση σκυροδέματος, ζυγίστηκαν σε ζυγαριά, πριν την δοκιμή τους σε κεντρική θλίψη, ούτως ώστε να υπολογιστεί το ειδικό βάρος του σκληρυμένου σκυροδέματος για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση.

3.3.2. Αποτελέσματα δοκιμών σκυροδέματος

3.3.2.1. Δοκιμές νωπού σκυροδέματος

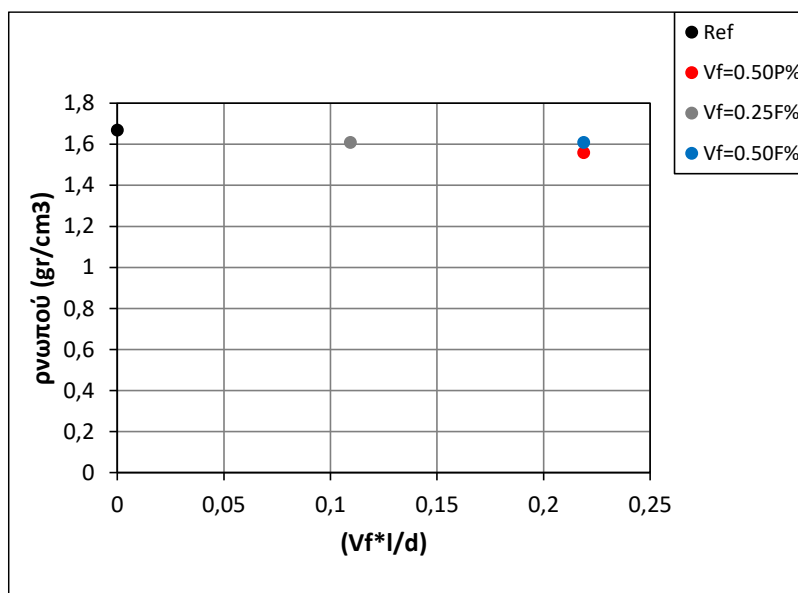
Στον Πίνακα 7 και τα διαγράμματα των Εικόνων 23-25 συγκεντρώνονται συνοπτικά τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κάθισης, περιεκτικότητας σε αερά και πυκνότητας νωπού σκυροδέματος.

Πίνακας 7. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος και κατηγοριοποίηση με βάση την κάθιση

Σύνθεση σκυροδέματος	Κάθιση (cm)	Κατηγορία κάθισης	Αεροπεριεκτικότητα (%)	Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος (gr/cm ³)
LWAC	10	S3	4,60	1,67
LWAC_0,50P	>22	S5	7,00	1,56
LWAC_0,25	8	S2	6,00	1,61
LWAC_0,50F	18	S4	7,00	1,61

3.3.2.1.1. Μέτρηση ειδικού βάρους

Σχετικά με την μέτρηση της μάζας και της πυκνότητας του νωπού ελαφροσκυροδέματος, παρατηρείται ότι ικανοποιούνται οι περιορισμοί του EC2 [11] (κάτω όριο πυκνότητας 0,80gr/cm³ και άνω όριο 2gr/cm³). Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τον Πίνακα 11.1 του EC2 [11] οι εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος κατατάσσονται στην κατηγορία 1,80 εκτός από την σύνθεση LWAC_0,50P, η οποία κατατάσσεται οριακά στην κατηγορία πυκνότητας 1,60 (Εικόνα 23).

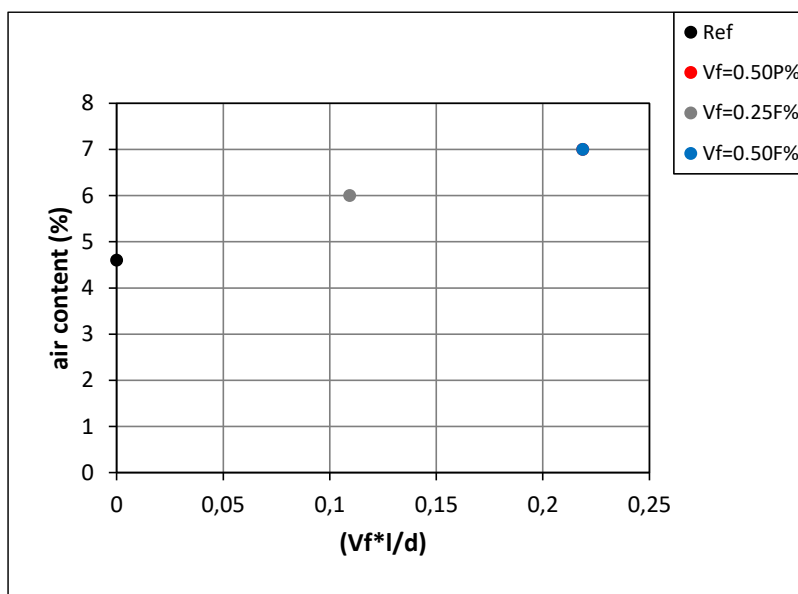


Εικόνα 23. Συγκεντρωτικό διάγραμμα πυκνότητας νωπού σκυροδέματος σε σύγκριση με τον όρο $V_f \cdot I / d$ για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις σκυροδέματος

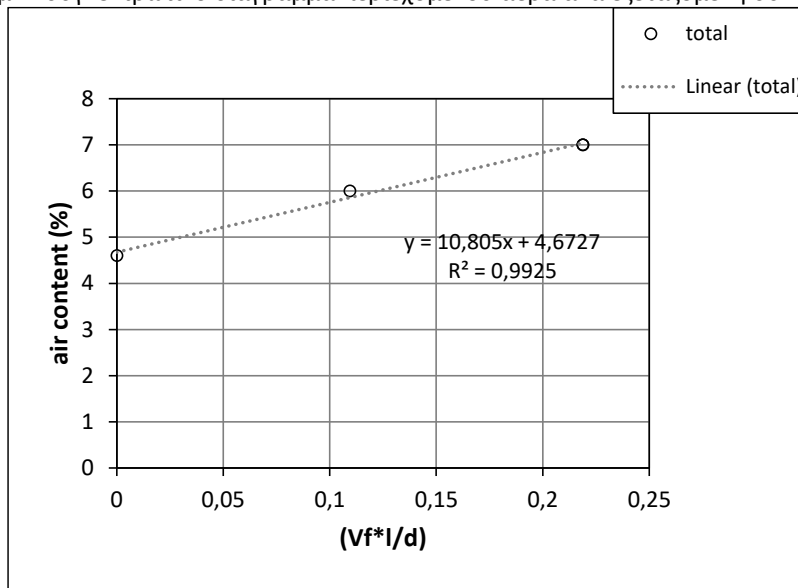
3.3.2.1.2. Μέτρηση περιεκτικότητας σε αέρα

Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε αέρα, έχει αποδειχθεί στην βιβλιογραφία, από τους Altabani et al. [90] και Gencil et al. [91], πως η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος αυξάνει την περιεκτικότητα του σε αέρα. Κατά την διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος και των ινών, καθώς και της συμπύκνωσης του σκυροδέματος εγκλωβίζεται αέρας στην επιφάνεια των ινών, κάτι το οποίο αυξάνει την περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε αέρα, μειώνει την πυκνότητα του (Εικόνα 23), αλλά μειώνει και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών οφείλεται στο γεγονός πως ο παγιδευμένος αέρας που δεν αποβάλλεται από το σκυροδέμα μέσω της συμπύκνωσης του, μετά την πήξη του, δημιουργεί κενά στην μάζα του, τα οποία αποτελούν σημεία εκκίνησης της μικρορηγματώσης του σκυροδέματος. Επίσης, μειώνουν και την αντοχή της διεπιφάνειας των ινών με το περιβάλλον σκυροδέμα, αλλά και δημιουργούν δυσμενείς συνθήκες αγκύρωσης των ινών (αντίστοιχο φαινόμενο με αυτό της συνίζησης του σκυροδέματος). Γενικότερα, το ελαφροσκυρόδεμα, σε σύγκριση με το συμβατικό σκυροδέμα, εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αέρα, κάτι το οποίο οφείλεται στην φύση των ελαφροβαρών αδρανών, τα οποία; χαρακτηρίζονται απο το υψηλό τους πορώδες και ποσοστό κενών αέρα (Stratoura et al. [92]). Αυτό φαίνεται και από το γεγονός πως ένα τυπικό συμβατικό σκυροδέμα παρουσιάζει ποσοστό αέρα μέχρι 2%, ενώ εν προκειμένω ακόμα

και για την σύνθεση αναφοράς, στην οποία δεν υπήρχαν ίνες, παρουσιάστηκε ποσοστό αέρα μεγαλύτερο του 4%. Στην πειραματική μελέτη που διενεργήθηκε από τους Stratoura et al. [92], επιβεβαιώνεται η διαφορά στην αεροπεριεκτικότητα ανάμεσα στο συμβατικό και ελαφροβαρές σκυρόδεμα, με αντίστοιχης τάξης μεγέθους περιεκτικότητες σε αέρα που σημειώθηκαν και στην παρούσα πειραματική εργασία. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό και ρευστοποιητή κατά τη διάρκεια της ανάμιξης υποβοηθάει την παγίδευση περισσότερου αέρα (όπως έγινε στην σύνθεση LWAC_0,50P- Πίνακας 4). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7 και στην Εικόνα 24, το ποσοστό αέρα στο νωπό σκυρόδεμα, αυξήθηκε, αυξανόμενης της ποσότητας των ινών στο μίγμα σκυροδέματος, σε τιμές που προσεγγίζουν τις τιμές που έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία από τους Stratoura et al. [92], Altabani et al. [90] και Gencel et al. [91]. Όπως φαίνεται σαφώς στην Εικόνα 24, η αύξηση της περιεκτικότητας σε αέρα είναι αναλογική με την αύξηση του όρου $V_f \cdot l/d$ με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,99$. Ωστόσο, απαιτούνται περισσότερα στοιχεία, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η εν λόγω συσχέτιση.



Σημ.1: συγκεντρωτικό διάγραμμα περιεχόμενου αέρα ανά εξεταζόμενη σύνθεση

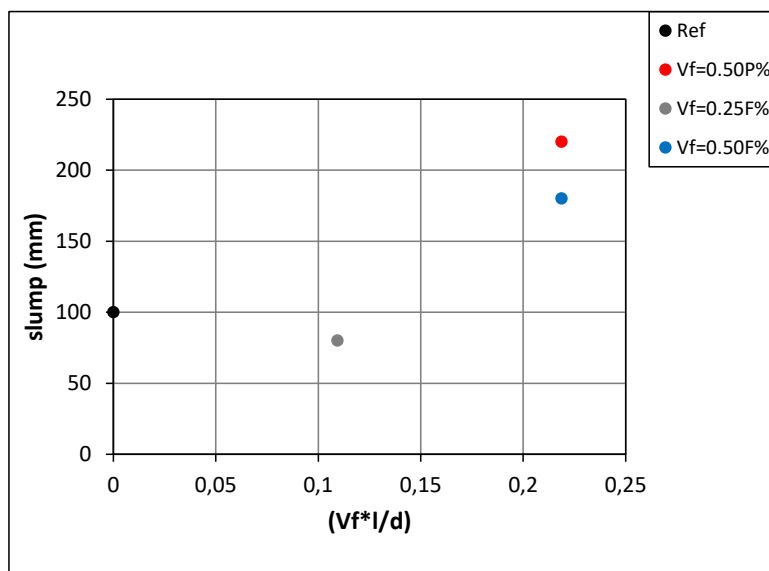


Σημ.2: συγκεντρωτικό διάγραμμα περιεχόμενου αέρα & εξαγωγή σχέσης συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

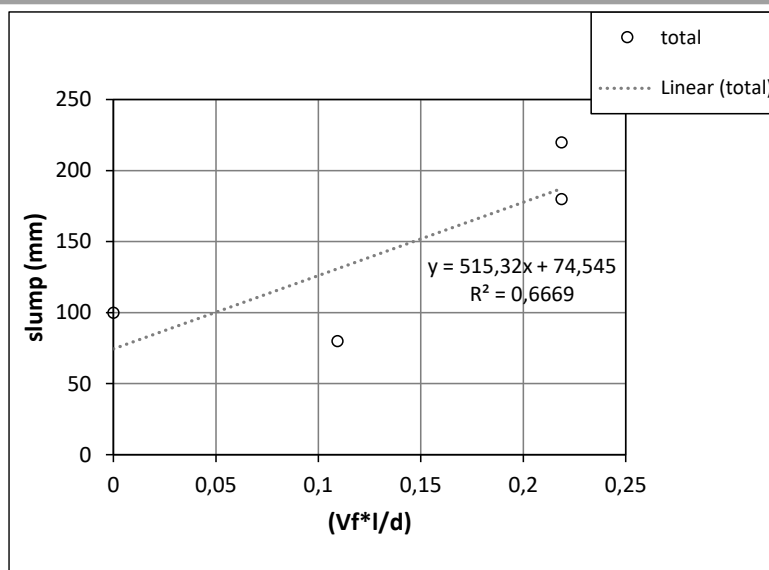
Εικόνα 24. Συγκεντρωτικό διάγραμμα περιεκτικότητας σε αέρα σε σύγκριση με τον όρο $V_f \cdot l/d$

3.3.2.1.3. Κάθιση

Όπως έχει αναφερθεί στην βιβλιογραφία ([66], [93]) η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος, οδηγεί σε μείωση της εργασιμότητας του, άρα και τελικώς σε δυσκολίες στην διάστρωση και συμπίκνωση του, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μείωση της ποιότητας της κατασκευής και των μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων σκυροδέματος. Η μειωμένη εργασιμότητα του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, ευνοεί επίσης την ανομοιόμορφη κατανομή των ινών στην μάζα του καθώς και τη συσσωμάτωση των ινών, μειώνοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό την επίδραση των ινών στα μηχανικά χαρακτηριστικά κι ιδιότητες του σκυροδέματος. Εν προκειμένω, είναι σημαντικό με την εισαγωγή ινών –ειδικά στην περίπτωση υψηλών ογκομετρικών ποσοστών ινών και ινών μεγάλων διαστάσεων- στο μίγμα να δοθεί βάση στην διατήρηση ικανοποιητικών επιπέδων εργασιμότητας και ρευστότητας στο σκυρόδεμα. Στην παρούσα έρευνα, προκειμένου να μην επηρεαστεί σημαντικά η εργασιμότητα του μίγματος, επιλέχθηκε να μελετηθούν σχετικά χαμηλά ποσοστά ινών στο μίγμα σκυροδέματος. Η στοχευόμενη τιμή κάθισης για όλες τις συνθέσεις ήταν η τιμή των 100mm, η οποία αντιστοιχεί σε κατηγορία κάθισης S3 κατά EN206 [85]. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, τροποποιήθηκε αναλόγως η ποσότητα νερού και ρευστοποιητή στα μίγματα σκυροδέματος. Αυτή η πρακτική αποτελεί εναλλακτική της συνήθους πρακτικής των ερευνών της διεθνούς βιβλιογραφίας, στις οποίες διατηρούνται σταθερές οι αναλογίες των υλικών σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος, επομένως η πρόσθηση ινών στο μίγμα οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας του και μείωση της ρευστότητας του, καθώς εμποδίζει την απρόσκοπτη ροή του. Με την διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, στις συνθέσεις σκυροδέματος με ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$ προέκυψαν υψηλές τιμές κάθισης όπως φαίνεται στον Πίνακα 7 και την Εικόνα 25. Οι μεγάλες τιμές κάθισης οφείλονται στα υψηλά ποσοστά ρευστοποιητή (0,50P) καθώς και στα υψηλά ποσοστά περιεχόμενου αέρα (0,50P & 0,50F) για τις δύο αυτές εξεταζόμενες συνθέσεις σκυροδέματος, αντίστοιχα. Η αυξημένη κάθιση σε αυτές τις συνθέσεις, είναι πιθανόν να οδήγησε σε ανομοιόμορφη διασπορά των ινών στο μίγμα του σκυροδέματος, καθώς οι ίνες ως πιο βαριές, συγκεντρώνονται στο κάτω μέρος των δοκιμίων. Η ανομοιογενής σύσταση του σκυροδέματος επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των μηχανικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων συνθέσεων σκυροδέματος, των φυσικών ιδιοτήτων τους καθώς και της γενικότερης ποιότητάς τους.



Σημ.1: συγκεντρωτικό διάγραμμα κάθισης ανά εξεταζόμενη σύνθεση



Σημ.2: συγκεντρωτικό διάγραμμα κάθισης & εξαγωγή σχέσης συσχέτισης και δείκτη συσχέτισης

Εικόνα 25. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κάθισης σε σύγκριση με τον όρο $V_f \cdot I/d$ (α)-(β), (β)

Ως εκ τούτου, για την επεξήγηση των αποτελεσμάτων των μηχανικών χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων συνθέσεων σκυροδέματος, τα χαρακτηριστικά της αεροπεριεκτικότητας και της κάθισης θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να ερμηνευτούν τυχούσες μη αναμενόμενες συμπεριφορές. Αυτό θα γίνει, εφόσον, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, υπάρχει άμεση σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος με τις ιδιότητες του περιεχόμενου αέρα και της κάθισης.

3.3.2.2. Σκληρυμένη κατάσταση

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης τριών σημείων και μονοαξονικής θλίψης στις οποίες υποβλήθηκαν τα δοκίμια σκυροδέματος που λήφθηκαν από κάθε εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος. Θα γίνει σχολιασμός των αποτελεσμάτων και σύγκριση αυτών με βάση τους τύπους της βιβλιογραφίας για κάθε εξεταζόμενη μηχανική ιδιότητα, θα ερμηνευτούν τα αποτελέσματα με βάση τα αποτελέσματα των συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος στην νωπή τους κατάσταση, προκειμένου να προκύψει μία σαφής εικόνα των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών σε επίπεδο υλικού, πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκών μεγαλύτερης κλίμακας.

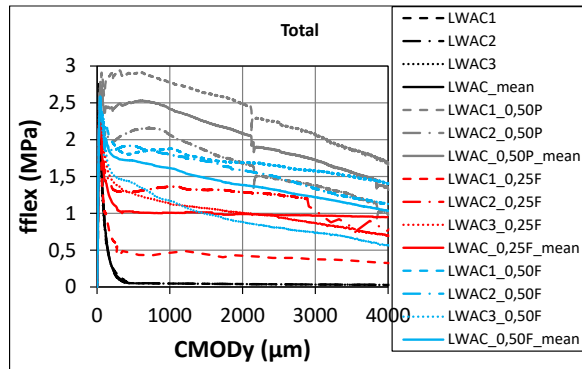
3.3.2.2.1. Κάμψη τριών σημείων

Στις Εικόνες 26 και 27 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσης και ανοίγματος ρωγμής, που προέκυψαν από την δοκιμή κάμψης τριών σημείων (EN 14651 [88]) των πρισματικών δοκιμών που λήφθηκαν κατά την διάρκεια σκυροδέτησης όλων των εξεταζόμενων συνθέσεων. Μαζί με τις καμπύλες κάθε δοκιμίου ανά εξεταζόμενη σύνθεση, στα ίδια διαγράμματα παρατίθενται και οι μέσες καμπύλες που προκύπτουν από τα δοκίμια κάθε σύνθεσης, προκειμένου να προκύψει μία μέση «εικόνα» για την συμπεριφορά κάθε σύνθεσης ινοπλισμένου και μη ελαφροσκυροδέματος.

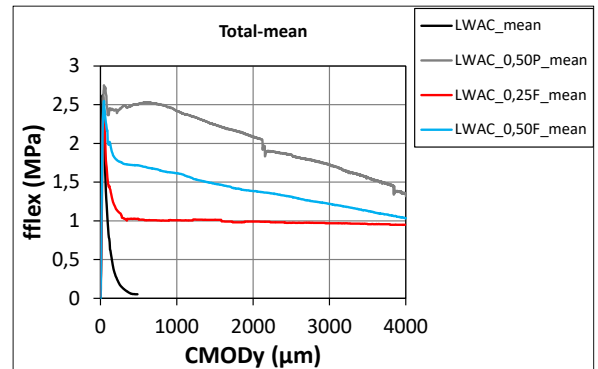
Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά των δοκιμών σε κάμψη μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικές περιοχές: πριν και μετά την επίτευξη της καμπτικής τους αντοχής, η οποία όπως έχει οριστεί και προηγουμένως αποτελεί το όριο αναλογικότητας f_{LOP} και είναι η μέγιστη τιμή της καμπτικής τάσης που εμφανίζεται στο διάστημα CMOD από 0 έως 50μm. Με την εισαγωγή ινών στο μίγμα, πέρα από αύξηση της καμπτικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος, επιδιώκεται και πιο πλάσιμη μεταλαστική συμπεριφορά. Σε όλες τις συνθέσεις με ίνες προέκυψε υψηλότερο παραμένον φορτίο, σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς, μετά την επίτευξη της καμπτικής αντοχής, ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις το απόλυτο μέγιστο φορτίο (f_{Ri}) συμπίπτει με το όριο αναλογικότητας (f_{LOP}). Σε αυτό υπάρχει μόνο μία εξαίρεση, που είναι το δοκίμιο LWAC1_0,50P. Αυτό σημαίνει πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου η δράση των ινών, εξαιτίας της εξόλκευσης τους, δεν ήταν σε θέση να συγκρατήσει το φορτίο σε αυτά τα επίπεδα. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βασικές τιμές των πειραματικών

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ιών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων

αποτελεσμάτων των δοκιμών κάμψης τριών σημείων, μαζί με τις μέσες τιμές τους (mean), την τυπική απόκλιση (st. dev) και τον συντελεστή μεταβλητότητας (con) τους ανά εξεταζόμενη σύνθεση ελαφροσκυροδέματος. Γενικότερα, τα πειραματικά αποτελέσματα δεν εμφάνισαν μεγάλη διασπορά, ανά εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος, και ειδικότερα σε όρους καμπτικής αντοχής (f_{fl}) και ορίου αναλογικότητας (f_{lop}) ο συντελεστής μεταβλητότητας παρουσιάζει τιμές αρκετά μικρότερες του 10%.

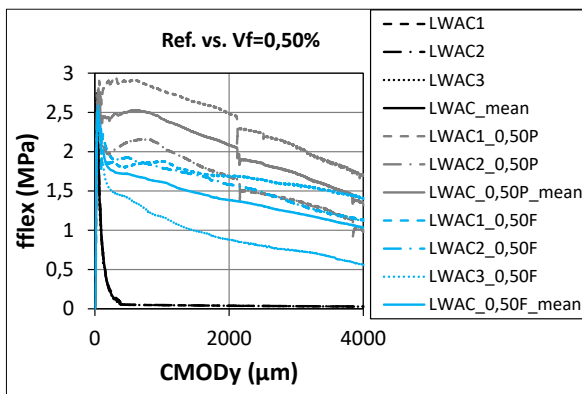


(α) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες όλων των δοκιμών των εξεταζόμενων συνθέσεων

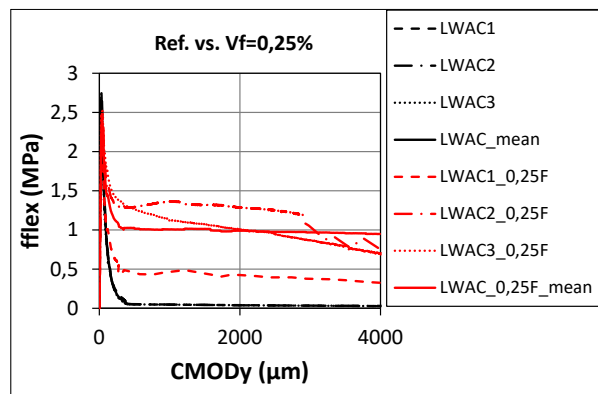


(α) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις μέσες καμπύλες των εξεταζόμενων συνθέσεων

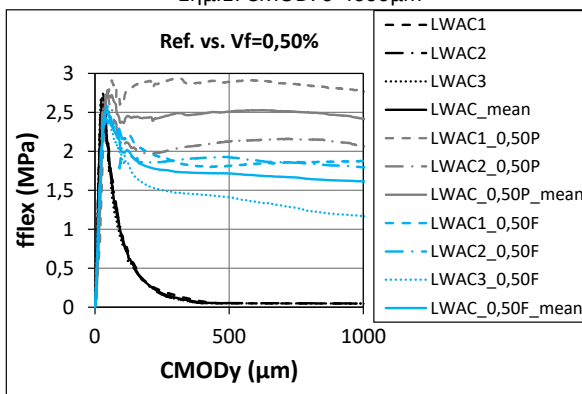
Εικόνα 26. Συγκεντρωτικά διαγράμματα καμπτικού φορτίου σε συνάρτηση με το άνοιγμα της ρωγμής στο κεντρικό σημείο (CMOD) του πρισματικού δοκιμίου για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος



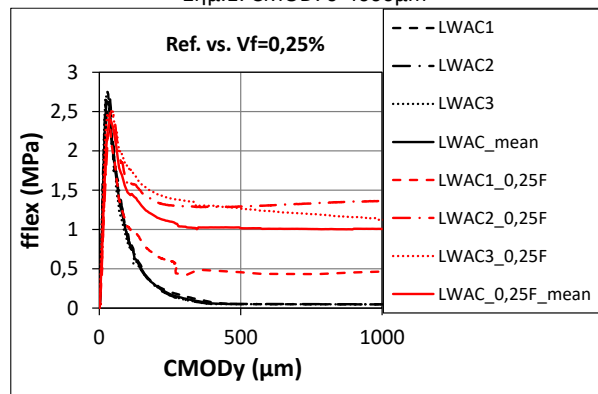
Σημ.1: CMOD: 0-4000μm



Σημ.1: CMOD: 0-4000μm



Σημ.2: CMOD: 0-1000μm



Σημ.2: CMOD: 0-1000μm

(α) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες των δοκιμών της σύνθεσης αναφοράς και των δύο συνθέσεων με ποσοστό ιών $V_f=0,50\%$

(α) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες των δοκιμών της σύνθεσης αναφοράς και της σύνθεσης με ποσοστό ιών $V_f=0,25\%$

Εικόνα 27. Συγκεντρωτικά διαγράμματα καμπτικού φορτίου σε συνάρτηση με το άνοιγμα της ρωγμής στο κεντρικό σημείο (CMOD) του πρισματικού δοκιμίου για τις εξεταζόμενες συνθέσεις ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και της σύνθεσης αναφοράς

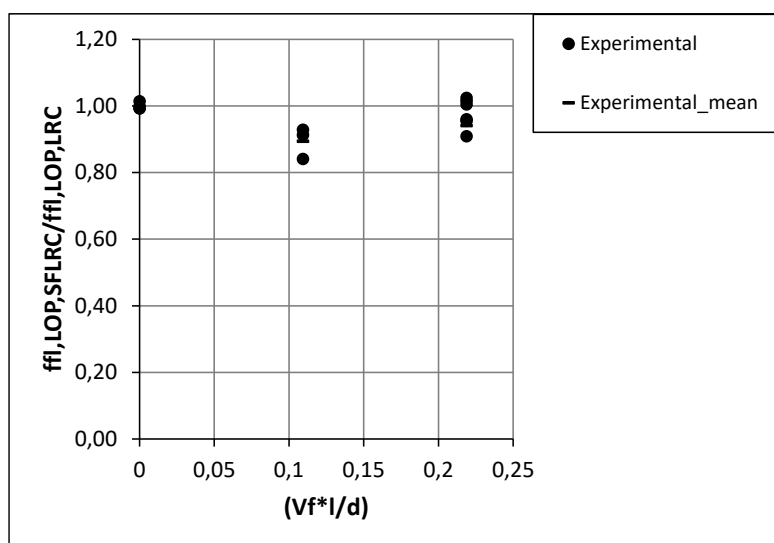
Πίνακας 8. Αποτελέσματα κάμψης τριών σημείων για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος

Δοκίμιο	f_{fl} (MPa)	CMOD v (mm)	f_{LOP} (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R1}/f_L	f_{R3}/f_{R1}	f_{Fts} (MPa)	f_{Ftu} (MPa)
LWAC1	2,76	27,60	2,76	0,05	0,04	0,04	0,02	0,75	0,02	0,01
LWAC2	2,70	35,80	2,70	0,05	0,05	0,04	0,02	0,71	0,02	0,01
LWAC3	2,70	23,20	2,70	0,05	0,04	0,05	0,02	1,00	0,02	0,02
LWAC_mean	2,72	28,87	2,72	0,05	0,04	0,04	0,02	0,80	0,02	0,02
LWAC_st.dev	0,033	6,39	0,03	0,00	0,00	0,01	-	-	0,00	0,00
LWAC_cov (%)	1,23	22,15	1,23	3,78	5,13	17,60	-	-	3,78	13,86
LWAC1_0,50P	2,94	305	2,78	2,89	2,63	2,23	1,04	0,77	1,30	0,84
LWAC2_0,50P	2,73	44,60	2,73	2,13	1,85	1,47	0,78	0,69	0,96	0,57
LWAC_0,50P_mean	2,83	174,80	2,76	2,51	2,24	1,85	0,91	0,74	1,13	0,71
LWAC_0,50P_st.dev	0,15	184,13	0,04	0,54	0,55	0,54	0,18	0,06	0,24	0,19
LWAC_0,50P_cov (%)	5,26	105,34	1,37	21,40	24,55	28,99	20,06	7,83	21,40	27,37
LWAC1_0,25F	2,29	37,90	2,29	0,46	0,49	0,39	0,20	0,86	0,21	0,15
LWAC2_0,25F	2,48	38,60	2,48	1,29	1,32	1,25	0,52	0,97	0,58	0,45
LWAC3_0,25F	2,52	46	2,52	1,27	1,07	0,95	0,50	0,75	0,57	0,36
LWAC_0,25F_mean	2,43	40,83	2,43	1,01	0,96	0,86	0,41	0,86	0,45	0,32
LWAC_0,25F_st.dev	0,13	4,49	0,13	0,48	0,43	0,43	0,18	0,11	0,21	0,16
LWAC_0,25F_cov (%)	5,24	10,99	5,24	47,30	44,42	50,24	44,21	12,85	47,30	49,29
LWAC1_0,50F	2,47	46	2,47	1,81	1,74	1,64	0,73	0,90	0,82	0,60
LWAC2_0,50F	2,60	47	2,60	1,92	1,70	1,49	0,74	0,77	0,87	0,56
LWAC3_0,50F	2,61	44,90	2,61	1,41	0,99	0,81	0,54	0,57	0,64	0,33
LWAC_0,50F_mean	2,56	45,97	2,56	1,72	1,48	1,31	0,67	0,76	0,77	0,50
LWAC_0,50F_st.dev	0,076	1,05	0,08	0,27	0,42	0,44	0,11	0,17	0,12	0,15
LWAC_0,50F_cov (%)	2,99	2,29	2,99	15,71	28,49	33,83	16,88	22,36	15,71	29,87

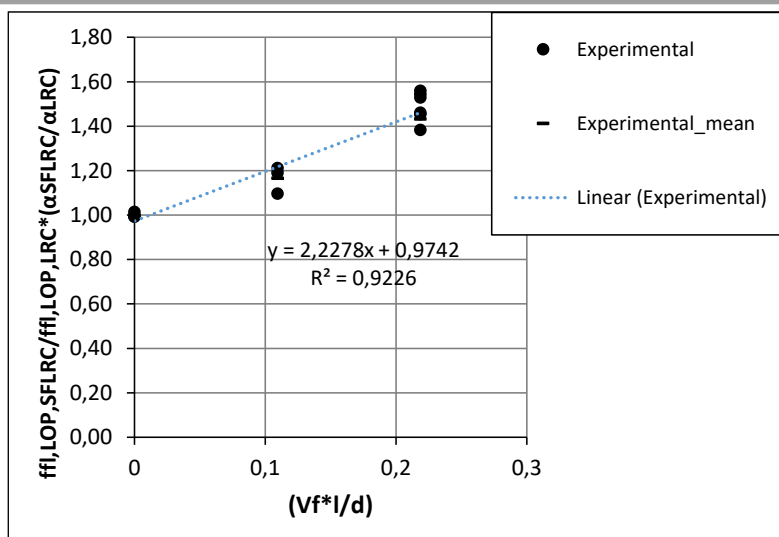
Όπως τονίζεται στο σύνολο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος οδηγεί σε σημαντική αύξηση της καμπτικής του αντοχής, σε ποσοστά που ξεπερνούν ακόμα και το 200% ανάλογα με τον συνδυασμό των εξεταζόμενων παραμέτρων κάθε έρευνας. Συγκεκριμένα, για ποσοστά ινών περί το 0,50%, σημειώθηκαν από τους Kang and Hong [18], Badogiannis et al. [31], Gao et al. [32] και Domagala [40] ποσοστά αύξησης της καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος περί το 40%, 50%, 10% και 30%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με αντίστοιχης αντοχής μη ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα. Σε κάθε περίπτωση, το σύνολο της βιβλιογραφίας έχει υιοθετήσει πως η καμπτική αντοχή πρισματικών δοκιμών ινοπλισμένου σκυροδέματος αυξάνεται σχεδόν αναλογικά με το γινόμενο του ογκομετρικού ποσοστού των ινών με τον λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών ($V_f \cdot l/d$). Με βάση πληθώρα πειραματικών αποτελεσμάτων, έχουν προκύψει εμπειρικές και ημιεμπειρικές σχέσεις που εκφράζουν την παραπάνω διαπίστωση. Κάποιες από αυτές τις σχέσεις θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας και παρατίθενται στον Πίνακα 9. Σύμφωνα με την Εικόνα 28 (α), παρατηρείται πως η εν λόγω διαπίστωση της βιβλιογραφίας δεν αποτυπώνεται στα παρόντα πειραματικά αποτελέσματα, εφόσον η καμπτική αντοχή παρουσιάζει μία σταθερή έως και πτωτική τάση με την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος. Τα παραπάνω αποτελέσματα θα μπορούσαν να ερμηνευθούν λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και τον σχολιασμό που έγινε όσον αφορά στην περιεκτικότητα σε αέρα του νωπού σκυροδέματος και την κάθιση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αυξημένη κάθιση και το αυξημένο ποσοστό αέρα στις συνθέσεις στις οποίες προστέθηκαν ίνες, οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών, εξαιτίας

της ανομοιόμορφης κατανομής των ινών στην μάζα του σκυροδέματος, της δημιουργίας κενών, κτλ. Η αύξηση της κάθισης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στο αυξημένο ποσοστό περιεχόμενου αέρα, εκτός των άλλων παραμέτρων που την επηρεάζουν. Παραπάνω (Εικόνα 24, Εικόνα 25), είχαν συσχετιστεί η κάθιση και το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα με το γινόμενο του ογκομετρικού ποσοστού των ινών με τον λόγο μήκους προς διαμέτρου των ινών ($V_f \cdot l/d$). Καλύτερη συσχέτιση με αυτόν τον όρο έδειξε το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα, με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,99$ εν αντιθέσει με την κάθιση που εμφάνισε συντελεστή συσχέτισης 0,67. Εφόσον η καμπτική αντοχή θα συγκριθεί κι αυτή με τον παραπάνω λόγο ($V_f \cdot l/d$), θα επιλεγεί μία κανονικοποίηση των τιμών της καμπτικής αντοχής με βάση το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα. Ως εκ τούτου, ο λόγος της καμπτικής αντοχής των συνθέσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος προς την καμπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος αναφοράς ($f_{fi,LOP,SFLRC}/f_{fi,LOP,LRC}$) αν πολλαπλασιαστεί με τον λόγο αεροπερικτικότητας της εκάστοτε σύνθεσης ινοπλισμένου σκυροδέματος προς την αεροπερικτικότητα του σκυροδέματος αναφοράς ($\alpha_{SFLRC}/\alpha_{LRC}$) οδηγεί σε σημαντικά βελτιωμένα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 (β). Συγκεκριμένα στην Εικόνα 28 (β) φαίνεται ότι η καμπτική αντοχή με την εισαγωγή 0,50% ογκομετρικό ποσοστό ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος αυξάνεται σε ποσοστό 40% σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση ελαφροσκυροδέματος, ποσοστό αύξησης που επιβεβαιώνεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από τους Kang and Hong [18] και Badogiannis et al. [31] για το ίδιο ογκομετρικό ποσοστό ινών. Συνεπώς, όπως αποδεικνύεται μέσω αυτής της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, το αυξημένο ποσοστό περιεχόμενου αέρα επηρέασε αρνητικά την καμπτική αντοχή των ινοπλισμένων συνθέσεων σκυροδέματος. Όπως φαίνεται, από τα αποτελέσματα και την μετέπειτα επεξεργασία τους, το γεγονός πως τα πρισματικά δοκίμια περιστράφηκαν κατά 90° σε σχέση με την διεύθυνση σκυροδέτησής τους, πριν την δοκιμή τους, δεν βοήθησε στο να περιοριστεί η επιρροή της ανομοιογενούς διασποράς των ινών στο μίγμα σκυροδέματος. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα θα μπορούσε να αποφευχθεί με αύξηση του χρόνου συμπύκνωσης των δοκιμίων, που ήδη –ωστόσο- πληρούσε τις απαιτήσεις του κανονισμού.



(α) πριν την κανονικοποίηση με βάση την περιεκτικότητα του περιεχόμενου αέρα



(β) μετά την κανονικοποίηση με τον λόγο περιεχόμενου αέρα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος προς περιεχόμενο αέρα μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Εικόνα 28. Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου αντοχής ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος σε σύγκριση με τον όρο $V_f \cdot I/d$

Σύμφωνα με τον Model Code (2010) [68] οι ίνες μπορούν να αντικαταστήσουν ένα μέρος ή το σύνολο του εγκάρσιου διατμητικού σπλισμού αν ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} > 0,40$$

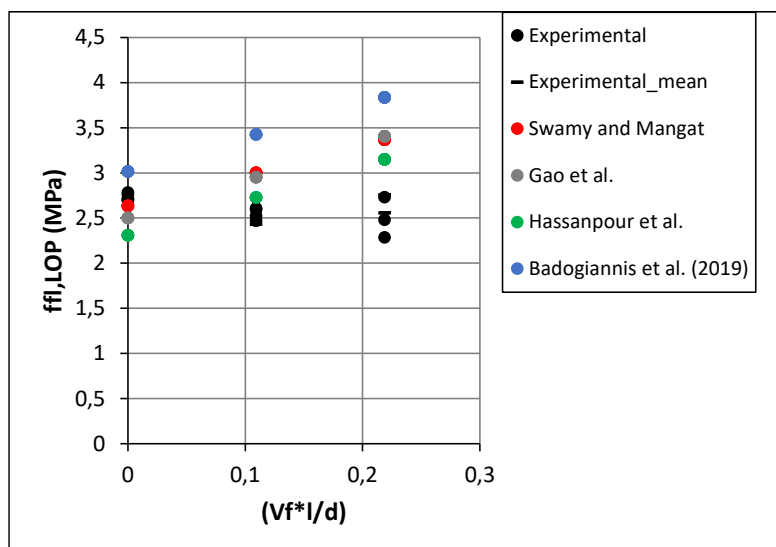
$$\frac{f_{R3k}}{f_{Lk}} > 0,50$$

Οι οποίες ικανοποιούνται για όλα τα δοκίμια σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 8, εκτός από το LWAC1_0,25F στο οποίο δεν ικανοποιείται ο πρώτος περιορισμός. Επομένως, τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται επαρκή, ακόμα και χωρίς την κανονικοποίηση τους με βάση το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα της εκάστοτε σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος, για την έρευνα που επρόκειτο να γίνει παρακάτω στις δοκούς με στόχο την μείωση του εγκάρσιου διατμητικού τους σπλισμού.

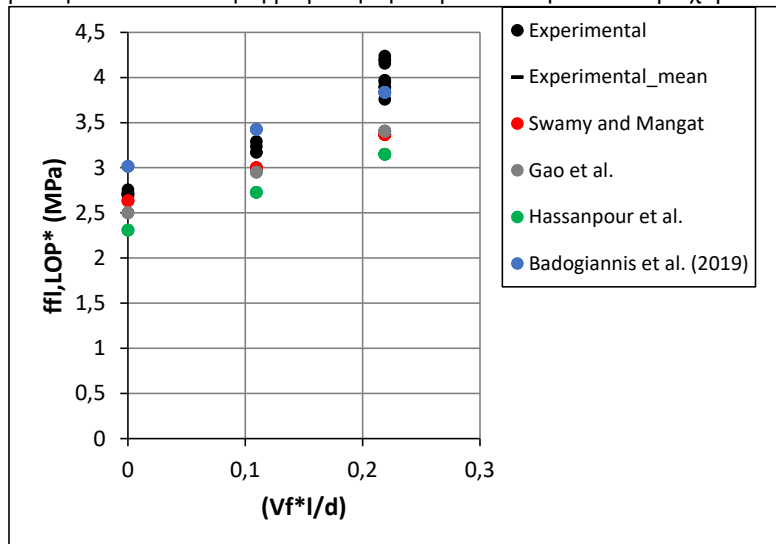
Τα πειραματικά αποτελέσματα του ορίου αναλογικότητας συγκρίνονται τόσο πριν την κανονικοποίηση τους με βάση την αεροπεριεκτικότητα τους, όσο και μετά την κανονικοποίηση τους με την εκτίμηση της καμπτικής αντοχής με βάση τους τύπους της βιβλιογραφίας που παρατίθενται στον Πίνακα 9. Οι τύποι αυτοί βασίζονται στην αναλογική σχέση της καμπτικής αντοχής με το γινόμενο του ογκομετρικού ποσοστού των ινών (V_f) επί τον λόγο μήκους προς διάμετρο τους (I/d), και λαμβάνουν υπόψη τους την αντοχή του ελαφροσκυροδέματος αναφοράς (ελαφροσκυροδέμα ίδιας σύνθεσης χωρίς την προσθήκη ινών). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία όπως προκύπτουν από την παρούσα πειραματική έρευνα προέκυψε η εκτίμηση της καμπτικής αντοχής με βάση τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 29. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω τα πειραματικά αποτελέσματα πριν την κανονικοποίηση τους με βάση το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα της εκάστοτε σύνθεσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος είναι κάτω από αυτές τις τιμές (Εικόνα 29 (α)), ενώ μετά την κανονικοποίηση τους προσεγγίζονται εξαιρετικά ικανοποιητικά από το σύνολο των σχέσεων, εκτός αυτής των Hassanpour et al. [35] που κρίνεται κάπως συντηρητική.

Πίνακας 9. Εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας για την εκτίμηση της καμπτικής αντοχής

Αναφορές	Σχέσεις εκτίμησης της καμπτικής αντοχής	Τύπος σκυροδέματος
Swamy and Mangat [94]	$f_{sw}=0,97*f_w*(1-V_f)+3,41*V_f*l/d$	Συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα
Gao et al. [32]	$f_{sw}=0,92*f_w*(1-V_f)+4,19*V_f*l/d$	Ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα υψηλής αντοχής
Hassanpour et al. [35]	$f_{sw}=0,85*f_w*(1-V_f)+3,89*V_f*l/d$	Ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα υψηλής αντοχής
Badogiannis et al. [31]	$f_{LOP}^{FRLWC} = 1,11*f_{LOP}^{LWC}*(1-V_f)+3,81*V_f*l/d$ $\frac{f_{LOP}^{FRLWC}}{f_{LOP}^{LWC}} = 1 + 1,53 * V_f*l/d$	Ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα με κίσηρη, συμβατικής αντοχής



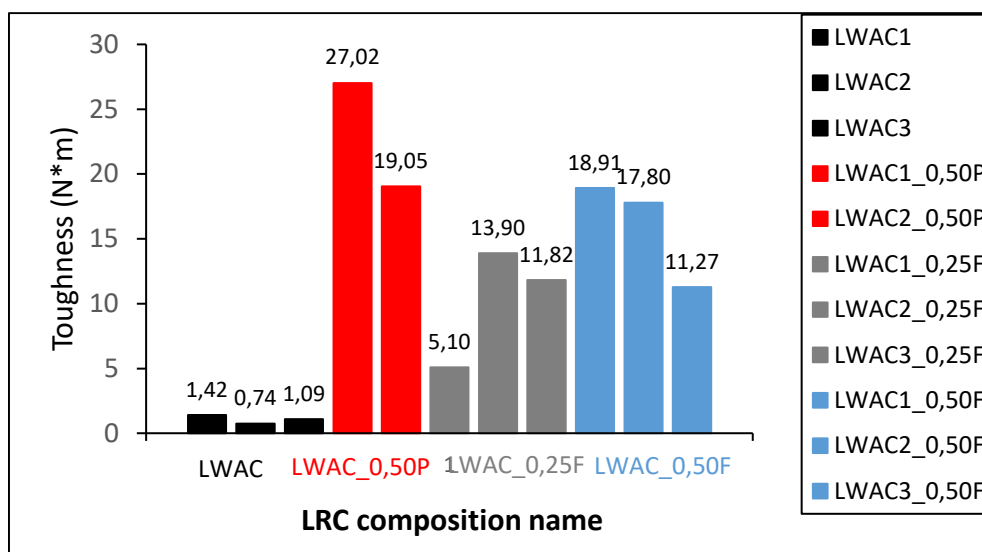
(α) πριν την κανονικοποίηση με βάση την περιεκτικότητα του περιεχόμενου αέρα



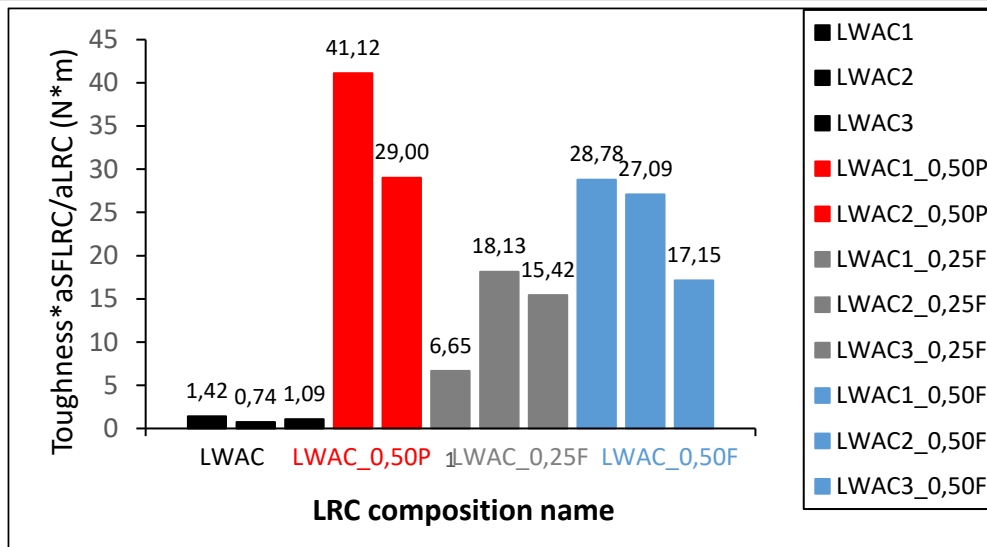
(β) $*f_{fi,LOP}^*$ μετά την κανονικοποίηση με τον λόγο περιεχόμενου αέρα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος προς περιεχόμενο αέρα μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Εικόνα 29. Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής όλων των συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος σε σύγκριση με τον όρο $V_f * l/d$ καθώς και εκτίμηση της καμπτικής αντοχής με βάση τους τύπους της βιβλιογραφίας

Σχετικά με την συμπεριφορά των εξεταζόμενων συνθέσεων σε όρους πλαστιμότητας, δηλαδή των λόγων της καμπτικής αντοχής προς το όριο αναλογικότητας και του λόγου του ανοίγματος της ρωγμής την στιγμή επίτευξη της καμπτικής αντοχής προς το άνοιγμα της ρωγμής στο όριο αναλογικότητας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν προέκυψε κάποια επίδραση των ινών, εφόσον κι οι δύο λόγοι για όλα τα δοκίμια είναι ίσοι με την μονάδα, εκτός από ένα δοκίμιο, που εμφάνισε καμπτική αντοχή λίγο μεγαλύτερη του ορίου αναλογικότητας του. Επομένως, όπως φαίνεται οι ίνες σε αυτό το ποσοστό και διαστάσεις δεν ήταν σε θέση μετά την πρώτη πτώση του φορτίου να ενεργοποιηθούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να οδηγήσουν σε μεγαλύτερο φορτίο από αυτό που αντιστοιχεί στο όριο αναλογικότητας. Ωστόσο, αυτό που είναι εμφανές είναι ότι στις συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος επιτεύχθηκε σημαντικά μεγαλύτερο παραμένον φορτίο μετά την επίτευξη του ορίου αναλογικότητας σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (χωρίς ίνες). Αυτό μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω της δυσθραυστότητας του σκυροδέματος (toughness) που εκτιμάται ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-CMOD, μέχρι την τιμή $CMOD=3500\mu m$. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 30, ακόμα και πριν την κανονικοποίηση των τιμών του φορτίου με βάση το ποσοστό του αέρα της εκάστοτε σύνθεσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, οι συνθέσεις σκυροδέματος κατά μέσο όρο εμφανίζουν αυξημένη δυσθραυστότητα σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς κατά 15-22 φορές ενώ η σύνθεση ινοπλισμένου σκυροδέματος με ποσοστό ινών στο 0,25% εμφανίζει αυξημένη δυσθραυστότητα κατά 10 φορές. Οι αυξήσεις της δυσθραυστότητας μετά την κανονικοποίηση των τιμών του φορτίου, αφορούν σε 23-33 φορές την δυσθραυστότητα του ελαφροσκυροδέματος αναφοράς για τις συνθέσεις με ογκομετρικό ποσοστό ινών ίσο με 0,50%, ενώ για τις συνθέσεις με ογκομετρικό ποσοστό ινών ίσο με 0,25% η αντίστοιχη αύξηση της δυσθραυστότητας υπολογίζεται στις 13 φορές. Η δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με ποσοστό ινών 0,50% είναι περίπου η διπλάσια της δυσθραυστότητας που προκύπτει για ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,25%.

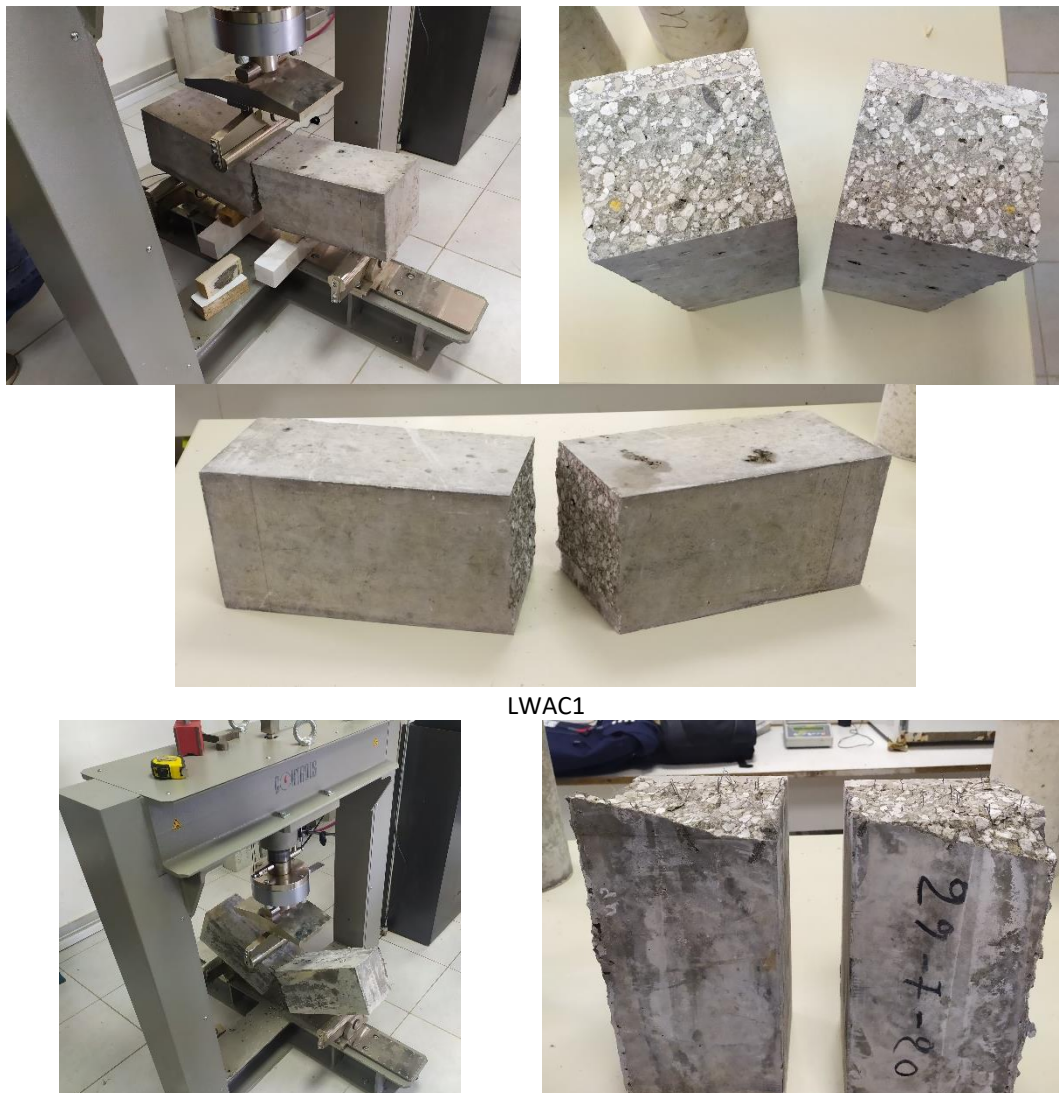


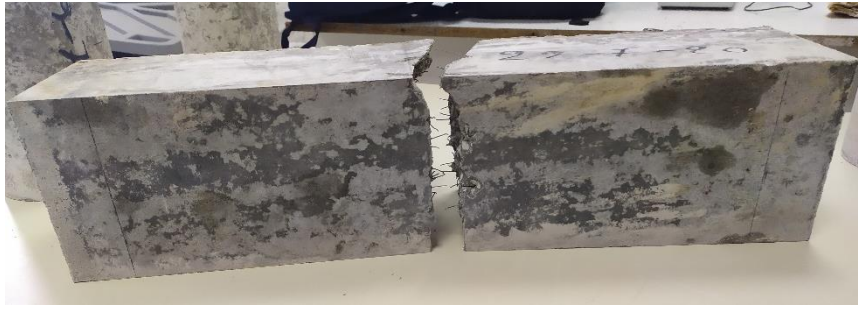
(α) πριν την κανονικοποίηση με βάση το ποσοστό της αεροπεριεκτικότητας



(β) μετά την κανονικοποίηση με βάση το ποσοστό της αεροπερικεκτικότητας

Εικόνα 30. Συγκεντρικό διάγραμμα δυσθραυστότητας για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος



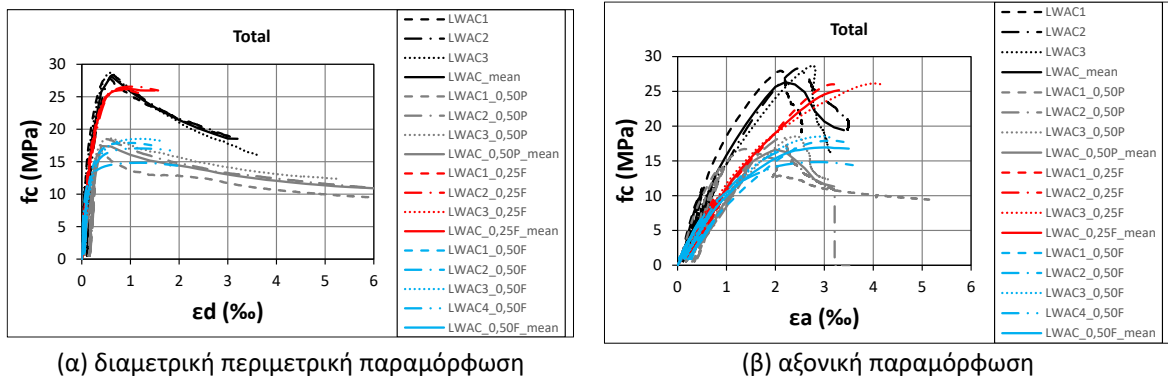


LWAC 1_0.50P

Εικόνα 31. Αστοχία δοκιμών σε κάμψη τριών σημείων μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

3.3.2.2.2. Μονοαξονική θλίψη

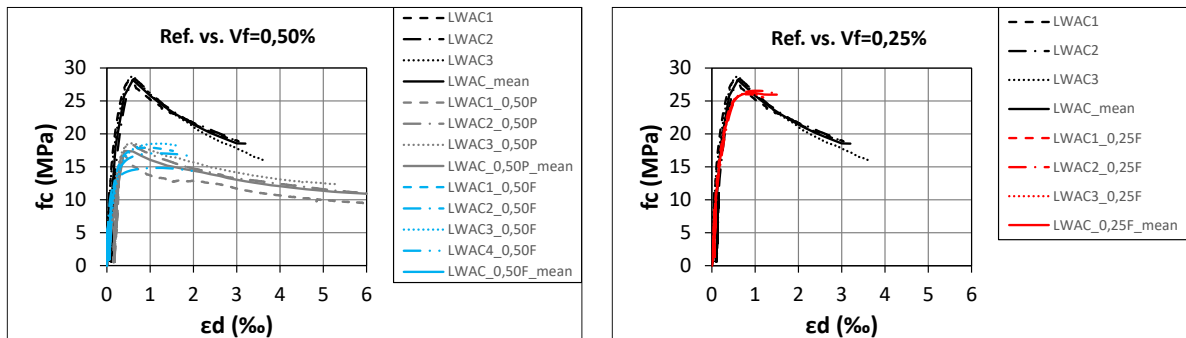
Στις Εικόνες 32-34 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι καμπύλες θλιπτικής τάσης και περιμετρικής/διαμετρικής και αξονικής παραμόρφωσης, που προέκυψαν από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (ASTM C469 [89]) των κυλινδρικών δοκιμών που λήφθηκαν κατά την διάρκεια σκυροδέτησης όλων των εξεταζόμενων συνθέσεων. Μαζί με τις καμπύλες κάθε δοκιμίου ανά εξεταζόμενη σύνθεση, στα ίδια διαγράμματα παρατίθενται και οι μέσες καμπύλες που προκύπτουν από τα δοκίμια κάθε σύνθεσης, προκειμένου να προκύψει μία μέση «εικόνα» για την συμπεριφορά κάθε σύνθεσης ινοπλισμένου και μη ελαφροσκυροδέματος.



(α) διαμετρική περιμετρική παραμόρφωση

(β) αξονική παραμόρφωση

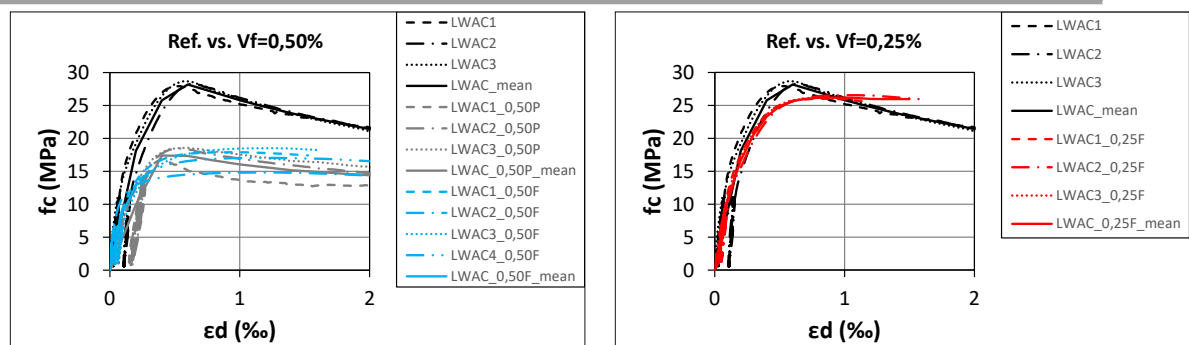
Εικόνα 32. Συγκεντρωτικά διαγράμματα θλιπτικής τάσης σε συνάρτηση με την (α) περιμετρική-διαμετρική και (β) αξονική παραμόρφωση κυλινδρικών δοκιμών για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος



Σημ.1: $\epsilon_d=0-6 \%$

Σημ.1: $\epsilon_d=0-6 \%$

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ιών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων



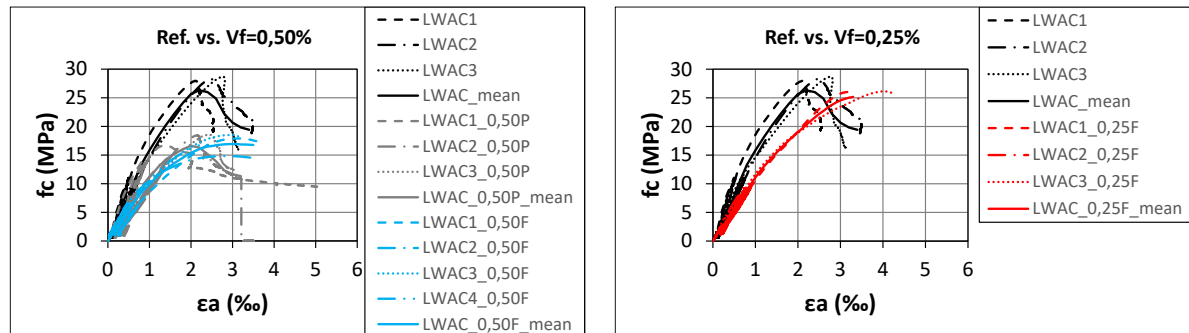
Σημ.2: $e_d=0-2\%$

(α) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες όλων των δοκιμών της σύνθεσης αναφοράς και των δύο συνθέσεων με ποσοστό ιών $V_f=0,50\%$

Σημ.2: $e_d=0-2\%$

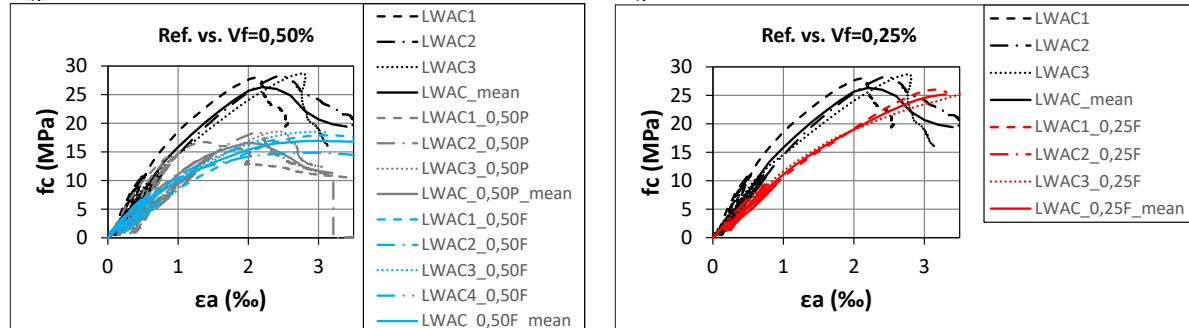
(β) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες όλων των δοκιμών της σύνθεσης αναφοράς και της σύνθεσης με ποσοστό ιών $V_f=0,25\%$

Εικόνα 33. Συγκεντρωτικά διαγράμματα θλιπτικού φορτίου σε συνάρτηση με την διαμετρική-περιμετρική παραμόρφωση των κυλινδρικών δοκιμών για τις εξεταζόμενες συνθέσεις ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και της σύνθεσης αναφοράς



Σημ.1: $e_a=0-6\%$

Σημ.1: $e_a=0-6\%$



Σημ.2: $e_a=0-3,50\%$

Σημ.2: $e_a=0-3,50\%$

(α) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες όλων των δοκιμών της σύνθεσης αναφοράς και των δύο συνθέσεων με ποσοστό ιών $V_f=0,50\%$

(β) συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις καμπύλες όλων των δοκιμών της σύνθεσης αναφοράς και της σύνθεσης με ποσοστό ιών $V_f=0,25\%$

Εικόνα 34. Συγκεντρωτικά διαγράμματα θλιπτικού φορτίου σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση των κυλινδρικών δοκιμών για τις εξεταζόμενες συνθέσεις ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και της σύνθεσης αναφοράς

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης των κυλινδρικών δοκιμών μαζί με τις μέσες τιμές τους (mean), την τυπική απόκλιση (st. dev) και τον συντελεστή μεταβλητότητας (con) τους ανά εξεταζόμενη σύνθεση ελαφροσκυροδέματος. Γενικότερα, τα πειραματικά αποτελέσματα δεν εμφάνισαν μεγάλη διασπορά, ανά εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος, και ειδικότερα σε όρους θλιπτικής αντοχής (f_{cm}), όπου ο συντελεστής μεταβλητότητας παρουσιάζει τιμές μικρότερες του 10%.

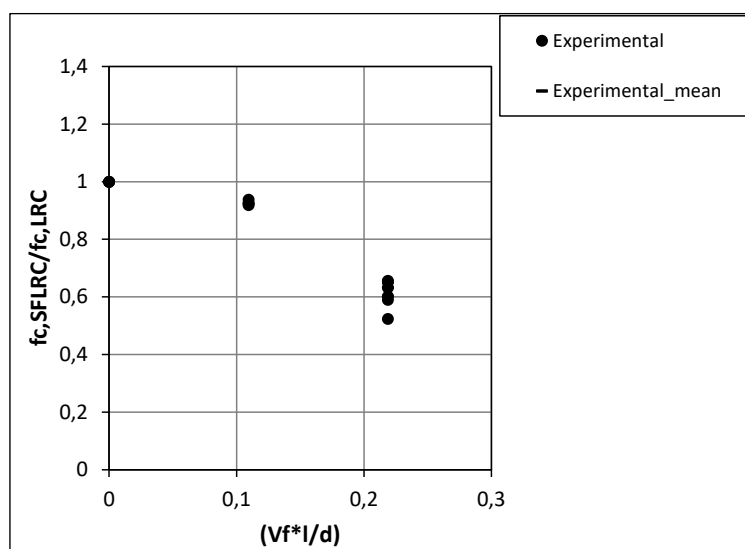
Πίνακας 10. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μονοαξονικής θλίψης, λόγου Poisson και μέτρου ελαστικότητας για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος

Όνομα δοκιμίου	f_{cm} (MPa)	e_d (‰)	e_a (‰)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	ν	E (MPa)
LWAC1	27,97	0,51	2,10	19,97	2,22	0,13	20870,78
LWAC2	28,33	0,63	2,47	20,33	2,25	0,20	14705,47
LWAC3	28,68	0,58	2,76	20,68	2,27	0,10	15695,35
LWAC_mean	28,33	0,57	2,44	20,33	2,25	0,14	17090,53
LWAC_st.dev	0,36	0,06	0,33	0,36	0,03	0,051	3310,99
LWAC_cov	1,26	10,62	13,63	1,75	1,17	35,80	19,37
LWAC1_0,50P	16,71	0,40	1,37	8,71	1,28	0,30	15161,39
LWAC2_0,50P	18,47	0,54	2,16	10,47	1,44	0,18	9604,26
LWAC3_0,50P	18,58	0,59	2,45	10,58	1,45	0,13	9408,60
LWAC_0,50P_mean	17,92	0,51	2,00	9,92	1,39	0,20	11391,42
LWAC_0,50P_st.dev	1,05	0,10	0,56	1,05	0,10	0,087	3266,36
LWAC_0,50P_cov	5,84	19,49	28,12	10,55	7,11	42,97	28,67
LWAC1_0,25F	26,02	0,81	3,16	18,02	2,07	0,09	12537,83
LWAC2_0,25F	26,55	0,98	-	18,55	2,11	0,13	13472,73
LWAC3_0,25F	26,14	0,83	4,03	18,14	2,08	0,11	13204,02
LWAC_0,25F_mean	26,24	0,87	2,40	18,24	2,09	0,11	13071,53
LWAC_0,25F_st.dev	0,28	0,09	2,12	0,28	0,02	0,02	481,33
LWAC_0,25F_cov	1,07	10,75	88,49	1,54	1,02	18,18	3,68
LWAC1_0,50F	17,90	0,99	3,17	9,90	1,39	0,09	8081,63
LWAC2_0,50F	14,83	1,17	2,87	6,83	1,09	0,09	13398,66
LWAC3_0,50F	18,52	1,19	2,96	10,52	1,45	0,16	10231,37
LWAC4_0,50F	17,04	1,11	2,36	9,04	1,31	0,12	10859,53
LWAC_0,50F_mean	17,07	1,12	3,00	9,07	1,31	0,11	10642,80
LWAC_0,50F_st.dev	1,61	0,09	0,34	1,61	0,16	0,033	2188,65
LWAC_0,50F_cov	9,44	8,23	12,13	17,76	12,10	28,84	20,56

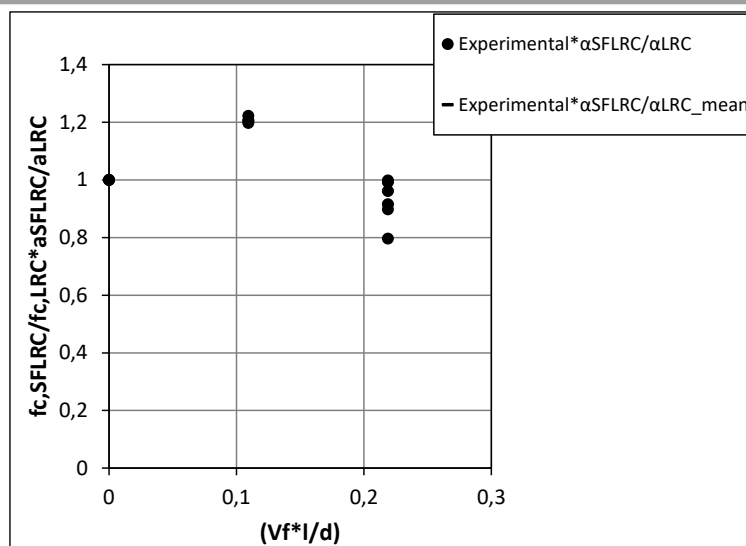
Όπως τονίζεται στο σύνολο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος επηρεάζει με αντικρούμενο τρόπο τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Σε κάποιες περιπτώσεις, έχει σημειωθεί αύξηση της θλιπτικής αντοχής μέχρι και 76% ([31], [30]) σε σχέση με ελαφροσκυρόδεμα χωρίς ίνες, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις δεν έχει παρατηρηθεί καμία επιρροή των ινών στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ([21], [22], [23], [24], [25]). Υπάρχουν βέβαια και οι περιπτώσεις που έχει σημειωθεί μέχρι και αρνητική επίδραση των ινών στην θλιπτική αντοχή των εξεταζόμενων συνθέσεων σκυροδέματος ([26],[27],[28]) κάτι το οποίο τεκμηριώνεται με βάση το γεγονός ότι η αντοχή της διεπιφάνειας των ινών με την τσιμεντόπαστα είναι μικρότερη από την αντοχή της διεπιφανειακής ζώνης των ελαφροβαρών αδρανών με το σκυρόδεμα. Ως εκ τούτου, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών τόσο αυξάνονται κι οι ασθενείς διεπιφάνειες στην μάζα του σκυροδέματος, επομένως μειώνεται κι η θλιπτική του αντοχή. Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος μειώνει την εργασιμότητα του, πράγμα που οδηγεί στην μη ομοιόμορφη κατανομή των ινών στην μάζα του σκυροδέματος άρα και στην μη ευεργετική συνεισφορά των ινών στα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Στην βιβλιογραφία, στις περιπτώσεις που έχει διαπιστωθεί ευεργετική επίδραση των ινών, ο μηχανισμός με τον οποίο οι ίνες επιδρούν θετικά στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αφορά στην ανάπτυξη εγκάρσιων θλιπτικών τάσεων μέσω της ενεργοποίησης των ινών, οι οποίες αυξάνονται σε αναλογία με τον όρο ογκομετρικού ποσοστού ινών επί τον λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών ($V_f \cdot l/d$). Οι σχετικές σχέσεις της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Σύμφωνα με την Εικόνα 35 (α), παρατηρείται πως η θλιπτική αντοχή των ινοπλισμένων κυλινδρικών δοκιμών μειώνεται με την αύξηση του όρου $V_f \cdot l/d$. Ωστόσο, η μείωση ειδικά στην περίπτωση της σύνθεσης σκυροδέματος με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% κρίνεται αρκετά υψηλή, επομένως οι τιμές της θλιπτικής αντοχής επιλέγεται να κανονικοποιηθούν με βάση το ποσοστό αέρα της εκάστοτε ινοπλισμένης σύνθεσης σκυροδέματος ως προς το ποσοστό αέρα της σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος αναφοράς (χωρίς ίνες). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αυξημένη κάθιση και το αυξημένο ποσοστό αέρα στις συνθέσεις στις οποίες προστέθηκαν ίνες, οδηγεί σε μείωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Η αύξηση της κάθισης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στο αυξημένο ποσοστό περιεχόμενου αέρα, εκτός των άλλων παραμέτρων που την επηρεάζουν. Παραπάνω, είχαν συσχετιστεί η κάθιση και το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα με το γινόμενο του ογκομετρικού ποσοστού των ινών με τον λόγο μήκους προς διαμέτρο των ινών ($V_f \cdot l/d$). Καλύτερη συσχέτιση με αυτόν τον όρο έδειξε το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα, με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,99$ εν αντιθέσει με την κάθιση που εμφάνισε συντελεστή συσχέτισης 0,67. Εφόσον η θλιπτική αντοχή θα συγκριθεί κι αυτή με τον παραπάνω λόγο ($V_f \cdot l/d$), θα επιλεγεί μία κανονικοποίηση των τιμών της θλιπτικής αντοχής με βάση το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα. Ως εκ τούτου, ο λόγος της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος προς την θλιπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος αναφοράς ($f_{c,SFLRC}/f_{c,LRC}$) αν πολλαπλασιαστεί με τον λόγο αεροπεριεκτικότητας της εκάστοτε σύνθεσης ινοπλισμένου σκυροδέματος προς την αεροπεριεκτικότητα του σκυροδέματος αναφοράς ($\alpha_{SFLRC}/\alpha_{LRC}$) οδηγεί σε βελτιωμένα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 (β). Συγκεκριμένα στην Εικόνα 35 (β) φαίνεται ότι η θλιπτική αντοχή με την εισαγωγή ινών σε ποσοστό 0,25% στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος αυξάνεται κατά 20%, ενώ μειώνεται κατά μέσο όρο 10% στην περίπτωση εισαγωγής ινών στο μίγμα κατά ποσοστό 0,50%. Επομένως, τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα κρίνονται πιο κατάλληλα για σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, εφόσον δείχνουν πως η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος κατά μέσο όρο δεν οδηγεί σε κάποια ουσιαστική επιρροή στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (ούτε καθοριστική αύξηση, αλλά ούτε και μείωση).

Συνεπώς, όπως αποδεικνύεται μέσω αυτής της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, το αυξημένο ποσοστό περιεχόμενου αέρα επηρέασε αρνητικά τόσο την καμπτική όσο και την θλιπτική αντοχή των ινοπλισμένων συνθέσεων σκυροδέματος. Αυτό ερμηνεύεται με βάση το γεγονός, πως τα μεγαλύτερα ποσοστά περιεχόμενου αέρα οδήγησαν σε αύξηση της κάθισης του σκυροδέματος, άρα και σε μη ομοιόμορφη κατανομή των ινών στην μάζα του σκυροδέματος, όπως αναλύθηκε και παραπάνω. Επίσης, η αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα, οδηγεί και στην δημιουργία κενών στην μάζα του σκυροδέματος, τα οποία αποτελούν σημεία εκκίνησης της μικρορηγμάτωσης της μάζας του σκυροδέματος, άρα και στην μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα θα μπορούσε να αποφευχθεί με αύξηση του χρόνου συμπύκνωσης των δοκιμών, που ήδη – ωστόσο- πληρούσε τις απαιτήσεις του κανονισμού.



(α) πριν την κανονικοποίηση με βάση την περιεκτικότητα του περιεχόμενου αέρα



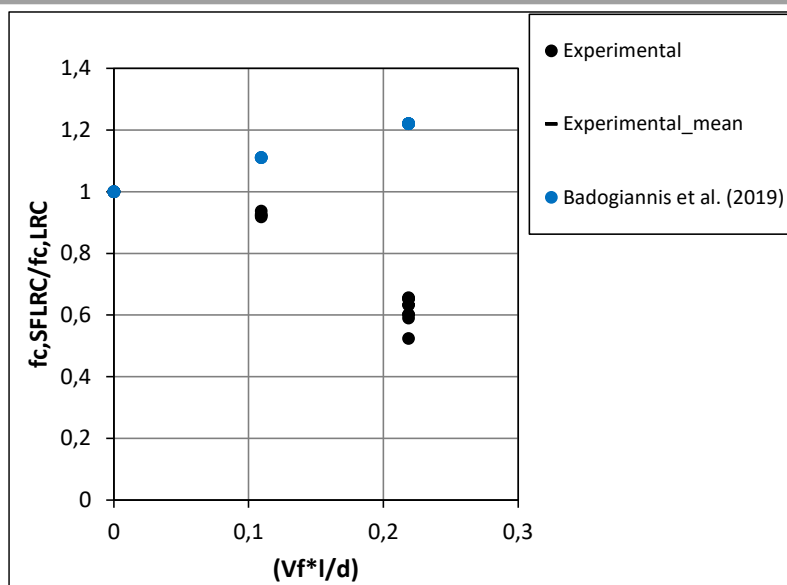
(β) μετά την κανονικοποίηση με τον λόγο περιεχόμενου αέρα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος προς περιεχόμενο αέρα μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Εικόνα 35. Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου θλιπτικής αντοχής ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέματος και μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος σε σύγκριση με τον όρο $V_f \cdot I/d$

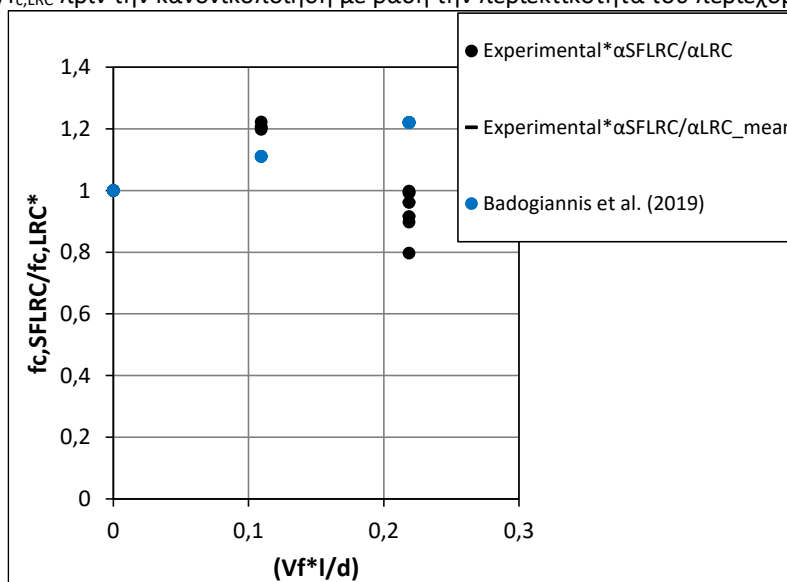
Τα πειραματικά αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής συγκρίνονται τόσο πριν την κανονικοποίηση τους με βάση την αεροπεριεκτικότητα τους, όσο και μετά την κανονικοποίηση τους με την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής με βάση την σχέση της βιβλιογραφίας που παρατίθεται στον Πίνακα 11. Ο τύπος αυτός βασίζεται στην αναλογική σχέση του λόγου της θλιπτικής αντοχής των ινοπλισμένων συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος προς την θλιπτική αντοχή της σύνθεσης αναφοράς (χωρίς ίνες) με το γινόμενο του ογκομετρικού ποσοστού των ινών επί τον λόγο μήκους προς διάμετρο τους. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία όπως προκύπτουν από την παρούσα πειραματική έρευνα προέκυψε η εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής με βάση την σχέση της βιβλιογραφίας, η οποία και παρουσιάζεται στην Εικόνα 36. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω τα πειραματικά αποτελέσματα πριν την κανονικοποίηση τους με βάση το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα της εκάστοτε σύνθεσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος είναι κάτω από αυτές τις τιμές (Εικόνα 36 (α)), ενώ μετά την κανονικοποίησή τους (Εικόνα 36 (β)) προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την σχέση των Badogiannis et al. [31] για ποσοστό ινών $V_f=0,25\%$.

Πίνακας 11. Πίνακας εμπειρικών σχέσεων βιβλιογραφίας για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής

Αναφορές	Σχέσεις εκτίμησης της καμπτικής αντοχής	Τύπος σκυροδέματος
Badogiannis et al. [31]	$\frac{f_c^{FRLWC}}{f_c^{LWC}} = 1 + 1,10 * V_f \cdot I/d$	Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη, συμβατικής αντοχής



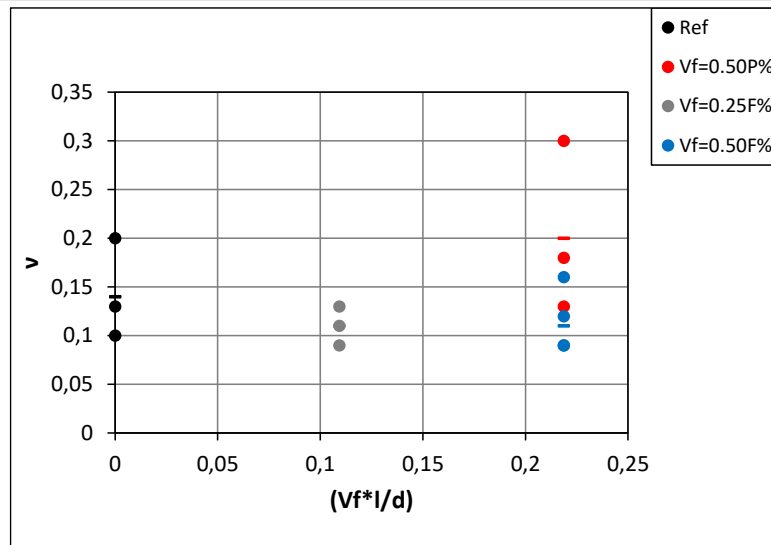
(α) $f_{c,SFLRC}/f_{c,LRC}$ πριν την κανονικοποίηση με βάση την περιεκτικότητα του περιεχόμενου αέρα



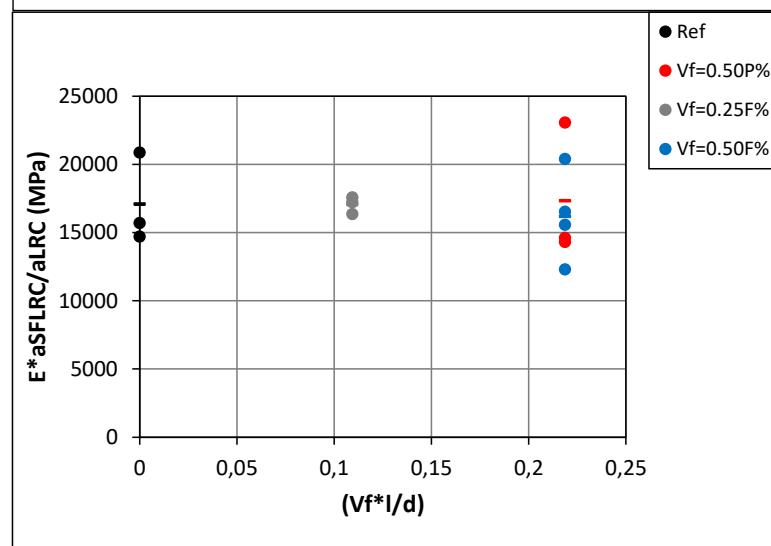
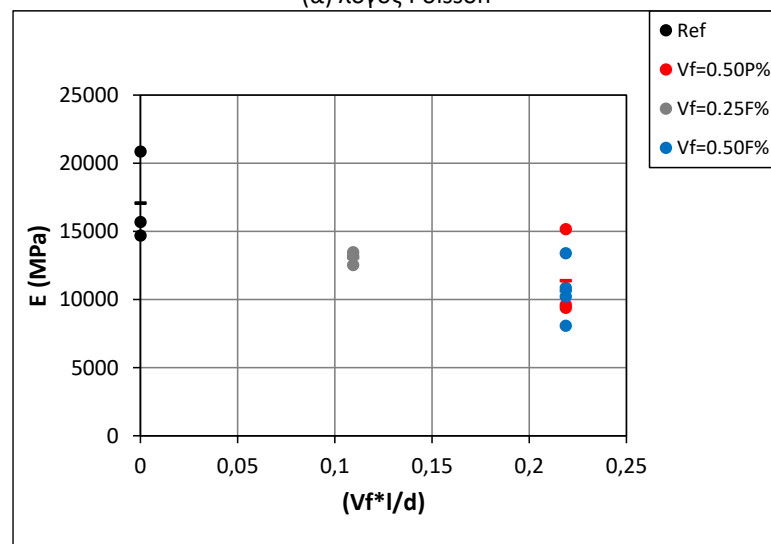
(β) $f_{c,SFLRC}/f_{c,LRC}^*$ μετά την κανονικοποίηση με τον λόγο περιεχόμενου αέρα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος προς περιεχόμενο αέρα μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Εικόνα 36. Συγκεντρωτικό διάγραμμα του λόγου της θλιπτικής αντοχής ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος προς την θλιπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος αναφοράς σε σύγκριση με τον όρο $V_f * l/d$ καθώς και εκτίμηση του παραπάνω λόγου των θλιπτικών αντοχών με βάση τους τύπους της βιβλιογραφίας

Ο λόγος Poisson, όπως αναμένονταν, με την αύξηση του ποσοστού των ιών στο μίγμα σκυροδέματος, εμφάνισε μία ελαφριά μείωση (Εικόνα 37 (α)). Ωστόσο, η μείωση αυτή είναι τόσο μικρή που μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμελητέα. Στην περίπτωση του μέτρου ελαστικότητας, μετά την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων με βάση το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα της εκάστοτε σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος προς το ποσοστό του αέρα της σύνθεσης αναφοράς, πρόεκυψε για κάποια δοκίμια με ποσοστό ιών 0,50% μία μικρή αύξηση του, που ωστόσο σε όρους μέσων τιμών κρίνεται αμελητέα. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται πως η προσθήκη ιών στα εξεταζόμενα μίγματα ελαφροσκυροδέματος δεν οδήγησε σε καμία επίδραση στις ιδιότητες του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson, κάτι που αναμενόταν σε γενικές γραμμές και από τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας.



(α) λόγος Poisson

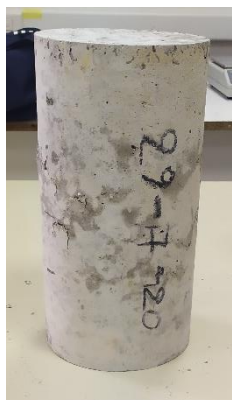


*Σημείωση: μετά την κανονικοποίηση με βάση το ποσοστό του αέρα (β) μέτρο ελαστικότητας

Εικόνα 37. Συγκεντρωτικά διαγράμματα (α) λόγου Poisson και (β) μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με τον όρο ογκομετρικού ποσοστού ινών επί τον λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος



LWAC1

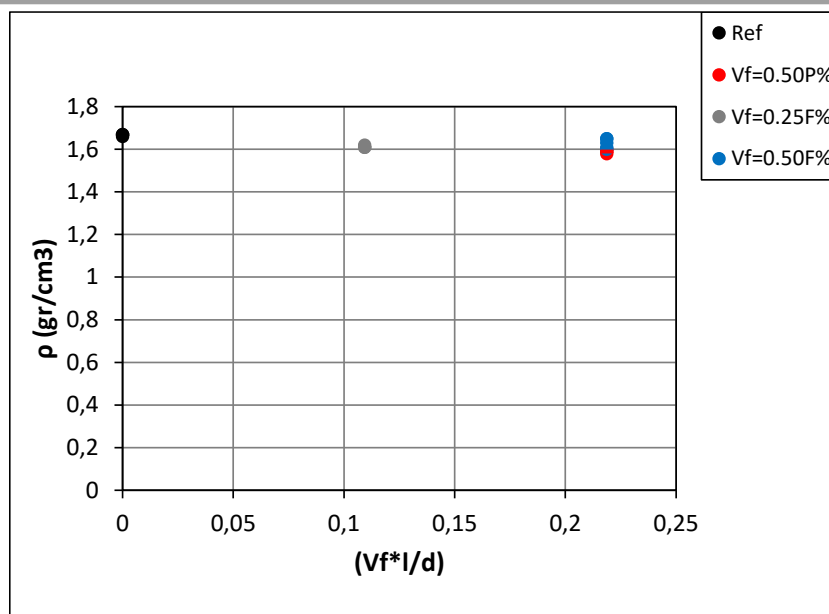


LWAC2_0,50P

Εικόνα 38. Αστοχία δοκιμίων σε θλίψη μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

3.3.2.2.3. Μέτρηση πυκνότητας σκληρυμένου σκυροδέματος

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 39 και τον Πίνακα 12, η πυκνότητα του σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος δεν μεταβλήθηκε λόγω της εισαγωγής ινών στο μίγμα του. Συνήθως, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία, η προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας του. Ωστόσο, εν προκειμένω αυτή η αυξητική τάση της πυκνότητας εξαιτίας της εισαγωγής των ινών, αντισταθμίζεται από το μεγαλύτερο ποσοστό αέρα στην μάζα του σκυροδέματος που μειώνει σημαντικά την πυκνότητα του. Η διασπορά των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39 και τον Πίνακα 12, είναι αμελητέα.



Εικόνα 39. Συγκεντρωτικό διάγραμμα πυκνότητας σκληρυμένου σκυροδέματος σε συνάρτηση με τον όρο ογκομετρικού ποσοστού ινών επί τον λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

Πίνακας 12. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μάζας και πυκνότητας κυλινδρικών δοκιμών για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος

Δοκίμιο	Πυκνότητα ρ (gr/cm ³)	Mean (gr/cm ³)	St.dev (gr/cm ³)	Cov (%)
LWAC1-ref	1,66			
LWAC2-ref	1,67	1,67	0,006	0,35
LWAC3-ref	1,67			
LWAC1-0,50P	1,58			
LWAC2-0,50P	1,60	1,59	0,010	0,63
LWAC3-0,50P	1,59			
LWAC1-0,25F	1,61			
LWAC2-0,25F	1,62	1,61	0,006	0,36
LWAC3-0,25F	1,61			
LWAC1-0,50F	1,60			
LWAC2-0,50F	1,65	1,63	0,026	1,61
LWAC3-0,50F	1,65			
LWAC4-0,50F	1,61			

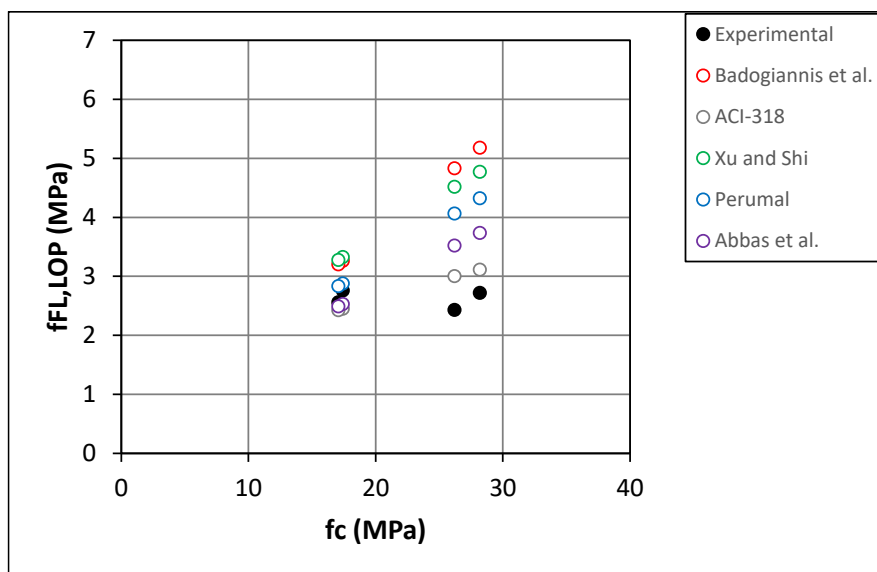
3.3.2.2.4. Σύγκριση καμπτικής αντοχής και θλιπτικής αντοχής

Συνήθως, η καμπτική και η εφελκυστική αντοχή εκφράζεται ως ένα ποσοστό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος, στην παραπάνω συσχέτιση υπεισέρχονται περαιτέρω διορθωτικοί συντελεστές. Ωστόσο, στην διεθνή βιβλιογραφία δεν έχουν παρουσιαστεί συγκεκριμένοι κανόνες για την συσχέτιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις για την πρόβλεψη της καμπτικής αντοχής, λαμβάνοντας υπόψη την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, παρά την μεγάλη ανομοιομορφία των παραμέτρων του τύπου σκυροδέματος (σκυρόδεμα συμβατικής, υψηλής αντοχής, ελαφροσκυρόδεμα κτλ), του υλικού των ινών (χαλύβδινες, πολυπροπυλαίνιου, διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών) αλλά και του σχήματος τους (ίσιες, κεκαμμένες, κυματοειδείς, δακτύλιοι κ.ο.κ.). Μερικοί από αυτούς τους τύπους συγκεντρώνονται στον Πίνακα 13

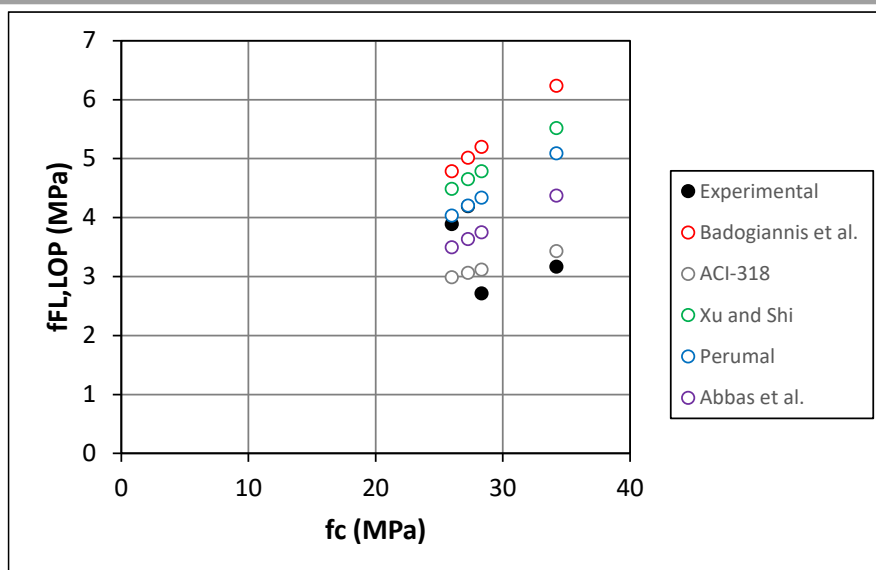
και συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας. Όπως φαίνεται στα συγκεντρωτικά διαγράμματα της Εικόνας 40, δεν είναι σαφής η σχέση της καμπτικής με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, ούτε μπορεί να επιλεχθεί κάποια σχέση που να περιγράφει αυτή την σχέση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός της αστοχίας των συνθέσεων με τα υψηλά ποσοστά αέρα, επομένως, εν προκειμένω απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Πίνακας 13. Πίνακας εμπειρικών σχέσεων της βιβλιογραφίας για την εκτίμηση της καμπτικής αντοχής μέσω της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος

Αναφορές	Σχέσεις εκτίμησης της καμπτικής αντοχής	Τύπος σκυροδέματος
Badogiannis et al. [31]	$f_{fL,LOP}^{FRLWC} = 0,21 * (f_c^{FRLWC})^{0,96}$	Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη, συμβατικής αντοχής
ACI-318 [17]	$f_{fL,LOP}^{FRLWC} = 0,62 * (f_c^{FRLWC})^{0,50} * \lambda,$ $\lambda = 0,85$	Ελαφροσκυρόδεμα χωρίς ίνες
Xu and Shi [95]	$f_{fL,LOP}^{FRLWC} = 0,39 * (f_c^{FRLWC})^{0,75}$	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα συμβατικής και υψηλής αντοχής με διάφορους τύπους ιών
Perumal [96]	$f_{fL,LOP}^{FRLWC} = 0,259 * (f_c^{FRLWC})^{0,843}$	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής
Abbass et al. [97]	$f_{fL,LOP}^{FRLWC} = 0,25 * (f_c^{FRLWC})^{0,81}$	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής



(α) πριν την κανονικοποίηση με βάση την περιεκτικότητα του περιεχόμενου αέρα



(β) μετά την κανονικοποίηση με βάση την περιεκτικότητα του περιεχόμενου αέρα (στις τιμές της καμπτικής και θλιπτικής αντοχής έχουν χρησιμοποιηθεί οι αρχικές πειραματικές τιμές πολλαπλασιασμένες επί τον όρο $\alpha_{SFLRC}/\alpha_{LRC}$)

Εικόνα 40. Συγκεντρωτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής και θλιπτικής αντοχής και εκτίμησης της καμπτικής αντοχής μέσω της θλιπτικής αντοχής από τύπους της βιβλιογραφίας

3.4. Αξιολόγηση ιδιοτήτων στοιχείων Ω/Σ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επιρροή των ιών στην αντοχή σε τέμνουσα στοιχεία Ω/Σ κατασκευάστηκαν δοκοί Ω/Σ για τις τρεις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν 8 δοκοί συμβατικού ελαφροσκυροδέματος, 4 δοκοί με ογκομετρικό ποσοστό ιών $V_f = 0,25\%$ (0,25F), 4 δοκοί με ογκομετρικό ποσοστό ιών $V_f = 0,50\%$ με την τελική σύνθεση σκυροδέματος (0,50F) και 6 δοκοί με ογκομετρικό ποσοστό ιών $V_f = 0,50\%$ με μία προκαταρκτική σύνθεση σκυροδέματος (0,50P). Οι παραπάνω δοκοί θα δοκιμασθούν σε κάμψη τεσσάρων σημείων.

3.4.1. Σχεδιασμός δοκών

Οι διαστάσεις των δοκών είναι οι παρακάτω: μήκος δοκού $L=2300\text{mm}$, πλάτος διατομής $b=150\text{mm}$ κι ύψος διατομής $h=300\text{mm}$, όπως φαίνονται στην Εικόνα 41. Οι διαστάσεις των δοκών επιλέχθηκαν, με διατμητικό μήκος $a=800\text{mm}$ και $d=270\text{mm}$ και λόγο $a/d=2,96$, ούτως ώστε να ανήκουν στην κατηγορία δοκών που συμπεριφέρονται με μορφή αστοχίας Τύπου II ($2,50 < a_v/d < 5$) σύμφωνα με την Θεωρία της Θλιπτικής Τροχιάς [45]. Η μορφή αστοχίας τύπου II αποτελεί μία ψαθυρή μορφή αστοχίας, η οποία σχετίζεται με την μόρφωση μίας βαθιάς κεκλιμένης ρωγμής εντός του διατμητικού μήκους της δοκού. Ψαθυρή αστοχία μπορεί να προκληθεί κι εξαιτίας της οριζόντιας αποκόλλησης της θλιβόμενης ζώνης, η οποία εκτείνεται μέχρι το σημείο άσκησης του φορτίου, και συμβαίνει ανεξάρτητα από την διατμητική ρηγμάτωση στον κορμό της δοκού. Αμέσως μετά τον σχηματισμό της η κεκλιμένη ρωγή (συνήθως εμφανίζεται για δοκούς οι οποίες χαρακτηρίζονται από a_v/d που προσεγγίζει το 2,50), η οποία είναι προέκταση καμπτικής ρωγμής που σχηματίζεται πλησίον της στήριξης, εκτείνεται σχεδόν οριζόντια στην θλιβόμενη ζώνη προς το σημείο που ασκείται το φορτίο, με ασταθή τρόπο, οδηγώντας σε απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας. Αυτή η κεκλιμένη ρωγή είναι δυνατόν να επεκταθεί μέχρι τις στηρίξεις, κατά μήκος της διεπιφάνειας σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού, καταστρέφοντας την συνάφεια των δύο υλικών. Τέτοια μορφή αστοχίας μπορεί να αποφευχθεί μέσω της επαρκούς ακύρωσης των ράβδων οπλισμού.

Η αιτία της παραπάνω μορφής αστοχίας ευθύνεται στις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή εξαιτίας της αλλαγής της διεύθυνσης της θλιπτικής δύναμης (εξαιτίας της κάμψης στην οποία υπόκειται η δοκός). Αυτές οι εφελκυστικές δυνάμεις μπορεί να οδηγήσουν στην αποκόλληση της θλιβόμενης ζώνης, η οποία με την σειρά της οδηγεί σε ολοκληρωτική απώλεια της φέρουσας

ικανότητας. Η αλλαγή της διεύθυνσης της θλιπτικής δύναμης, για τις δοκούς που αστοχούν με την μορφή αστοχίας τύπου II, συμβαίνει σε απόσταση $2,50*d$ (όπου d το στατικό ύψος της δοκού) από την στήριξη. Έχει αποδειχθεί ότι στην θέση αυτή βρίσκεται και η αρχή/άκρη της –χαρακτηριστικής– κεκλιμένης ρωγμής που εκτείνεται μέχρι την στήριξη. Σε περίπτωση αστοχίας λόγω αποκόλλησης της θλιβόμενης ζώνης, η αιτία αυτής της συμπεριφοράς σχετίζεται με τις εφελκυστικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται μέσα στην θλιβόμενη ζώνη και σχετίζονται με την απώλεια της συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού. Αυτή η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη κεκλιμένης ρωγμής η οποία εκτείνεται κυρίως προς το σημείο επιβολής του φορτίου.

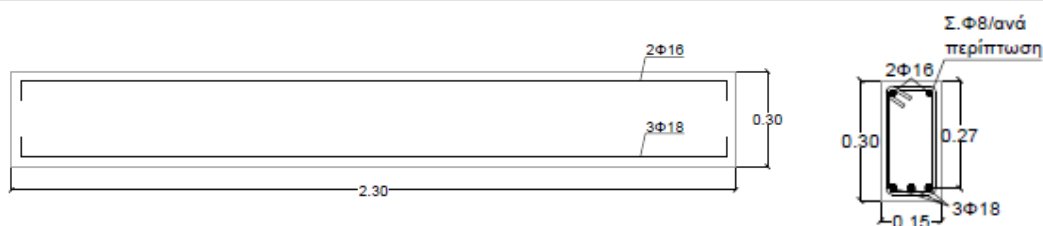
Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέχθηκε η ανάλογη γεωμετρία σε όρους διατομής και στοιχείου για τις δοκούς, προκειμένου να είναι δυνατόν να αναπτύξουν την επιθυμητή μορφή διατμητική μορφή αστοχίας. Όσον αφορά την διάταξη των οπλισμών, προκειμένου να μειωθούν οι εξεταζόμενες παράμετροι, επιλέχθηκε οι δοκοί να είναι επαρκώς οπλισμένες καμπτικά και να διατηρείται η ίδια διάταξη διαμήκους οπλισμού σε όλο τους το πλήθος. Στόχος της παραπάνω επιλογής είναι η αξιολόγηση της συνεισφοράς των ινών στην διατμητική αντοχή των δοκών. Πιο συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν 3 ράβδοι οπλισμού διαμέτρου $\Phi 18$ στην κάτω παρειά των δοκών (εφελκυσόμενες ράβδοι) και 2 ράβδοι διαμέτρου $\Phi 16$ στην άνω παρειά των δοκών (θλιβόμενες ράβδοι), όπως φαίνεται στην Εικόνα 41. Η επικάλυψη των συνδετήρων επιλέχθηκε να είναι 15mm.

Εν αντιθέσει, η διάταξη του διατμητικού οπλισμού επιλέχθηκε να είναι διαφορετική ανά δοκίμιο ξεκινώντας από δοκίμια επαρκώς οπλισμένα κατά EC2-1-1 [98] τα οποία είναι σχεδιασμένα να αστοχούν με πλαστικό τρόπο (ικανοτικά), καμπτικά δηλαδή κι όχι ψαθυρά – διατμητικά. Αυτό λαμβάνοντας υπόψη όλα τα απαραίτητα στοιχεία, που παρατίθενται παρακάτω υπολογισμένα αναλυτικά, επιτυγχάνεται με συνδετήρες $\Phi 8$ τοποθετημένους ανά 100mm στο διατμητικό μήκος της δοκού. Τα συγκεκριμένα δοκίμια αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς, εφόσον αστοχούν με πλαστικό τρόπο, και αποτελούν μέτρο σύγκρισης για όλα τα υπόλοιπα ως την συμπεριφορά που είναι επιθυμητό να επιτευχθεί. Στα παραπάνω δοκίμια επιλέχθηκε να μην κατασκευαστούν αντίστοιχα με ίνες, εφόσον όπως έχει αποδειχθεί από τους Folino et al. [64], Catarrelli et al. [9], Campione et al. [20] και Zhao et al. [41] η επιρροή των ινών στην καμπτική αντοχή δεν είναι καθοριστική. Στην συνέχεια, σχεδιάστηκαν δοκίμια έχοντας τον μισό διατμητικό οπλισμό, δηλαδή με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 200mm. Τα συγκεκριμένα δοκίμια, με την χρήση μη-ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος έχουν περίπου ίδια αντοχή σε κάμψη και σε τέμνουσα, ωστόσο θεωρητικά, αστοχούν οριακά σε τέμνουσα. Επομένως, η εισαγωγή ινών στο μείγμα σκυροδέματος πιθανώς θα μπορέσει να οδηγήσει σε αλλαγή της μορφής αστοχίας από ψαθυρή-διατμητική σε πλαστική-καμπτική. Ακολούθως, επιλέχθηκαν διατάξεις συνδετήρων ανά 250 και 350mm κ.ο.κ., στις οποίες αμβλύνεται η διαφορά ανάμεσα στο φορτίο που προκαλεί διατμητική και καμπτική αστοχία, παρόλα αυτά με την εισαγωγή ινών στο μείγμα σκυροδέματος θα μπορούσε να επιτευχθεί μία περισσότερο πλαστική μορφή διατμητικής αστοχίας, έχοντας περισσότερες, σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, μικρότερου πλάτους διατμητικές ρωγμές, οι οποίες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το μη-ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα. Ειδική αναφορά γίνεται στα δοκίμια που σχεδιάστηκαν έχοντας στο διατμητικό τους μήκος έναν (1) και κανέναν συνδετήρα, τα οποία σχεδιάστηκαν με σκοπό να φανεί η καθαρή επιρροή των ινών στην συμπεριφορά των δοκών έναντι τέμνουσας. Συνολικά παρατίθενται στον Πίνακα 20, όλες οι διατάξεις διατμητικού οπλισμού και κατεπέκταση δοκιμών δοκών που εξετάστηκαν στην παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία.

Εκτός κρίσιμων περιοχών: απόσταση συνδετήρων $s_w \leq 0,75*d = 202,50\text{mm}$

$$\text{Ποσοστό διατμητικού οπλισμού: } \rho_w = \frac{0,08*\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = 0,088\% \Rightarrow \rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w*s} = 0,088\%$$
$$\Rightarrow s = \frac{A_{sw}}{b_w*\rho_w} = \frac{\pi*8^2/4}{150*0,088/100} = 380,80\text{mm}$$

$$\text{Άρα } s_w = \min(202,50; 380,80) = 202,50\text{mm}$$



Εικόνα 41. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκών και διάταξη διαμήκους οπλισμού

3.4.1.1. Μεθοδολογία σχεδιασμού δοκών- Υπολογισμοί

• Υπολογισμός καμπτικής αντοχής δοκών

Έγιναν παραδοχές για την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, εφόσον οι δοκοί σχεδιάζονται να κατασκευαστούν με σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 καθώς και για την τάση διαρροής του χάλυβα οπλισμού, ο οποίος επιλέχθηκε να είναι B500C. Για να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί έγινε μία παραδοχή που επιβεβαιώθηκε: ο εφελκόμενος οπλισμός διέρρευσε ($e_{s1} \geq 2,90\%$) άρα η εφελκυστική του δύναμη μπορεί να ληφθεί $F_{s1} = A_{s1} * f_{y1}$, ο θλιβόμενος οπλισμός δεν διέρρευσε ($e_{s2} \leq 2,90\%$) άρα η θλιπτική του δύναμη θα ληφθεί $F_{s2} = A_{s2} * E_{s2} * e_{s2}$. Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης θα προκύψει μέσα από ένα σύστημα δύο εξισώσεων: (1) ισοδυναμία εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων και (2) επιτεδότητα διατομών. Οι παραδοχές και τα αριθμητικά δεδομένα παρατίθενται στον Πίνακα 14.

Ισοδυναμία εσωτερικών κι εξωτερικών δυνάμεων:

$$\Sigma F = 0 \rightarrow A_{s1} * f_y = b * 0,80 * x * f_c + A_{s2} * E_s * e_{s2} \rightarrow x = 75,74 \text{ mm}$$

Επιτεδότητα διατομών:

$$\frac{e_c}{x} = \frac{e_{s2}}{d - d_2}$$

Άρα από (1) και (2) και με βάση τις παραδοχές του Πίνακα 14 προέκυψε ύψος θλιβόμενης ζώνης $x = 75,74 \text{ mm}$.

Υπολογισμός ροπής αντοχής:

$$M = F_c * \left(d - 0,80 * \frac{x}{2} \right) + F_s * (d - d_2) = b * 0,80 * x * f_c * \left(d - 0,80 * \frac{x}{2} \right) + E_s * e_{s2} * (d - d_2) = 106,13 \text{ kNm}$$

Επομένως το φορτίο που εξαντλεί την καμπτική αντοχή είναι το παρακάτω:

$$\frac{P_f}{2} = \frac{M}{a_v} \rightarrow P_f = 265,33 \text{ kN}$$

Πίνακας 14. Αριθμητικά δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παραδοχές για τις αντοχές σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού

A_{s1} (εφελκόμενος οπλισμός)	3Φ18	763,02	mm ²
f_{y1} (εφελκόμενος οπλισμός)	B500C	580	MPa
b	-	150	mm
f_c	C25/30	30	MPa
A_{s2} (θλιβόμενος οπλισμός)	2Φ16	401,92	mm ²
f_{y2} (θλιβόμενος οπλισμός)	B500C	580	MPa
d_2	-	30	mm
E_s	-	200.000	MPa
$e_y = f_y / E_s$	-	2,90	%

Παραδοχή: Η καμπτική αντοχή άρα και το φορτίο που προκαλεί την καμπτική αστοχία της δοκού θεωρείται ότι παραμένει περίπου το ίδιο για μη ινοπλισμένο και ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα, βασιζόμενοι στα συμπεράσματα των Folino et al. [64], Catarreli et al. [9], Campione et al. [20] και Zhao et al. [41].

• **Υπολογισμός αντοχής σε τέμνουσα δοκών – Ινοπλισμένου και μη-ινοπλισμένου σκυροδέματος**

Η αντοχή σε τέμνουσα μίας δοκού αποτελείται από την συνεισφορά του σκυροδέματος (V_{Rc} , δικτύωμα Moersch) και από την συνεισφορά των συνδετήρων, τους οποίους διαπερνά η διατμητική ρωγμή (V_s). Στην περίπτωση του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος στους παραπάνω μηχανισμούς απόκρισης, προστίθεται κι η συνεισφορά των ινών, που είτε λαμβάνεται ως βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού, άρα στο V_{Rc} , ή ως πρόσθετος διατμητικός οπλισμός.

Συνεισφορά σκυροδέματος:

- EC2-1-1 (6.2) [98]

Ο παρακάτω τύπος του EC2 [98] χρησιμοποιείται για σχεδιασμό έναντι τέμνουσας στοιχείων ωπλισμένου σκυροδέματος. Εν προκειμένω, θα χρησιμοποιηθεί με τιμή συντελεστών ασφαλείας ίση με 1, εφόσον η τιμή της αντοχής αυτής θα χρησιμοποιηθεί για να προσεγγιστούν πειραματικά αποτελέσματα. Οι παραδοχές και τα αριθμητικά δεδομένα παρατίθενται στον Πίνακα 15.

$$V_{Rc,EC2} = \left[C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 * \sigma_{cp} \right] * b_w * d \geq (v_{min} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$$

Άρα, $V_{Rc,EC2} = 46,95 \text{ kN} \geq 16,87 \text{ kN}$

Πίνακας 15. Υπολογισμοί κι αριθμητικά δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παραδοχές για τις αντοχές σκυροδέματος

$C_{Rd,c}$	$0,18/\gamma_c$	0,18	-
k	$1 + \sqrt{\text{sgn}(200/d)} \leq 2$	1,86	-
ρ_l	$A_{s1}/(b_w * d) < 0,02$	0,019	-
f_{ck}	$f_{cm} - 8$	22	MPa
k_1	Μη ύπαρξη	0	-
σ_{cp}	αξονικού φορτίου	-	-
b_w	-	150	mm
d	-	270	mm
v_{min}	$0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$	0,42	MPa

- EC8-3 [99]

Ο παρακάτω τύπος του EC8-3 [99] χρησιμοποιείται για αποτίμηση της διατμητικής αντοχής στοιχείων ωπλισμένου σκυροδέματος. Εν προκειμένω, ο παρακάτω τύπος θα χρησιμοποιηθεί με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1 και μέση τιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος (έστω 28MPa), για να προσεγγιστούν όσο γίνεται καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι παραδοχές και τα αριθμητικά δεδομένα παρατίθενται στον Πίνακα 16.

$$V_{Rc,EC8} = \frac{1}{\gamma_{el}} * [0,16 * \max(0,50; 100 * \rho_{tot}) * (1 - 0,16 * \min(5; \frac{a_v}{h})) * \sqrt{f_c} * A_c$$

Άρα, $V_{Rc,EC8} = 39,49 \text{ kN}$

Πίνακας 16. Υπολογισμοί κι αριθμητικά δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παραδοχές για τις αντοχές σκυροδέματος

γ_{el}	-	1	-
ρ_{tot}	$(A_{s1} + A_{s2}) / (b_w * d)$	0,029	-
a_v	-	800	mm
h	-	300	mm
f_c	-	30	MPa
A_c	$b_w * d$	40500	mm ²

- Συνεισφορά διατμητικού οπλισμού

Ο παρακάτω τύπος του EC2 [98] χρησιμοποιείται τόσο για σχεδιασμό όσο και για αποτίμηση. Εν προκειμένω, ο παρακάτω τύπος θα χρησιμοποιηθεί με τιμή συντελεστών ασφαλείας ίση με 1 και μία τάσης διαρροής οπλισμού που προσεγγίζει περισσότερο την μέση τιμή τάσης διαρροής και όχι την χαρακτηριστική $f_{yw,k}=500\text{MPa}$. Οι παραδοχές και τα αριθμητικά δεδομένα παρατίθενται στον Πίνακα 17. Η συνεισφορά των συνδετήρων στην διατμητική αντοχή των δοκών για κάθε διάταξη διατμητικού οπλισμού παρατίθεται στον Πίνακα 17.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} * z * f_{yw}$$

Πίνακας 17. Υπολογισμοί κι αριθμητικά δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παραδοχές για την τάση διαρροής χάλυβα οπλισμού

A_{sw}	$2 * \pi * d_w^2 / 4$	100,53	mm^2
s_w	-	100, 200, 250, 350, 400	mm
z	$0,90 * d$	243	mm
f_{yw}	-	540	MPa

- Συνδυαστική συνεισφορά σκυροδέματος και ινών σε διάτμηση

Για τον σχεδιασμό των δοκιμών των δοκών που κατασκευάστηκαν με ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα με ποσοστά ινών $V_f=0,25\%$ και $V_f=0,50\%$, εκτιμήθηκε η συνεισφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος έναντι τέμνουσας μέσω του τύπου του Model Code 10 [68]. Οι παραδοχές και τα αριθμητικά δεδομένα παρατίθενται παρακάτω και στον Πίνακα 18.

$$V_{R,f} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} * k * \left[100 * \rho_l * \left(1 + 7,50 \frac{f_{Ftu}}{f_{ct}} \right) * \lambda^2 * f_c \right]^{\frac{1}{3}} \right\} * b_w * d, \text{ όπου}$$

$$\lambda = 0,75$$

Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος: $f_{ct} = f_{t0} * \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{\frac{2}{3}}$, $f_{ck} = f_c - 8$, $f_{ck0} = 10\text{MPa}$, $f_{t0} = 1,40\text{MPa}$, από [45] για σκυροδέμα συμβατικής αντοχής, χωρίς ίνες

Ο όρος f_{Ftu} –απόλυτη παραμένουσα εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος- προσεγγίζεται με δύο εναλλακτικούς τρόπος:

(α) με τους τύπους του Model Code 10 [68] που αφορούν κυρίως τον σχεδιασμό, επομένως αποτελούν μία συντηρητική παραδοχή:

$$f_{Fts} = 0,45 * f_{R,1}, \text{ όπου είναι η παραμένουσα εφελκυστική αντοχή λειτουργικότητας σκυροδέματος}$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} * [f_{Fts} - (0,50 * f_{R,3} - 0,20 * f_{R,1})] \geq 0$$

Η εναπομείνουσα καμπτική αντοχή (residual strength) για $CMOD=500\mu\text{m}$ είναι η $f_{R,1}$

Η εναπομείνουσα καμπτική αντοχή (residual strength) για $CMOD=1500\mu\text{m}$ είναι η $f_{R,2}$

Η εναπομείνουσα καμπτική αντοχή (residual strength) για $CMOD=2500\mu\text{m}$ είναι η $f_{R,3}$

(β) από την καμπύλη της κάμψης τριών σημείων πρισμάτων σκυροδέματος $60 * 15 * 15\text{cm}$ για $CMOD=1500\mu\text{m}$ που αντιστοιχεί στην τιμή εναπομείνουσας καμπτικής αντοχής f_{R2} κατά Model Code 10 [68].

Οι παραπάνω τιμές θα υπολογιστούν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα κάμψης τριών σημείων σε πρίσματα από Badogiannis et al. [31], για ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% και λόγο μήκους προς διάμετρο ινών 36. Προσεγγιστικά, εφόσον δεν υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα για τον επιθυμητό συνδυασμό παραμέτρων για το ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,25% θα ληφθεί το 50% των

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ιών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων

τιμών των $f_{R,i}$ που αντιστοιχούν για ογκομετρικό ποσοστό ιών 0,50%. Οι υπολογισμοί, τόσο για το f_{Ftu} όσο και για την αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε τέννουσα V_{Rf} , παρατίθενται παρακάτω και για τους δύο τρόπους εκτίμησης του f_{Ftu} και για τα δύο ογκομετρικά ποσοστά ιών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα ($V_f=0,25\%$ και $V_f=0,50\%$).

- Ογκομετρικό ποσοστό ιών $V_f=0,25\%$

$$(\alpha) f_{Fts}=0,45*f_{R,1}=0,61\text{MPa}$$

$$f_{Ftu}=f_{Fts}-\frac{W_u}{CMOD_3}*[f_{Fts}-(0,50*f_{R,3}-0,20*f_{R,1})]=0,37\text{MPa}$$

$$\text{Άρα } V_{Rd,f}=56,31\text{kN}$$

$$(\beta) f_{Ftu}=f_{R2}=1,12\text{MPa}$$

$$\text{Άρα } V_{Rm,f}=72,41\text{kN}$$

- Ογκομετρικό ποσοστό ιών $V_f=0,50\%$

$$(\alpha) f_{Fts}=0,45*f_{R,1}=1,22\text{MPa}$$

$$f_{Ftu}=f_{Fts}-\frac{W_u}{CMOD_3}*[f_{Fts}-(0,50*f_{R,3}-0,20*f_{R,1})]=0,74\text{MPa}$$

$$\text{Άρα } V_{Rd,f}=65,24\text{kN}$$

$$(\beta) f_{Ftu}=f_{R2}=2,24\text{MPa}$$

$$\text{Άρα } V_{Rm,f}=87,94\text{kN}$$

Πίνακας 18. Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, παραδοχών για την αντοχή σκυροδέματος και υπολογισμών f_{Ftu} και $V_{Rd,f}$ (σχεδιασμού) και $V_{Rm,f}$ (μέσης τιμής)

Γενικά γεωμετρικά δεδομένα και αντοχής σκυροδέματος			
V_c	-	1	-
k	$1+\text{sqrt}(200/d)$	1,872	-
ρ_l	$[3*\pi*18^2]/4/(b_w*d)$	0,019	-
f_{ct}	[45]	2,22	MPa
f_c	Μέση τιμή	30	MPa
b_w	-	150	Mm
d	-	270	mm
$V_f=0,25\%$			
f_{R1}	$CMOD_1=500\mu\text{m}$	1,36	MPa
f_{R2}	$CMOD_2=1500\mu\text{m}$	1,12	MPa
f_{R3}	$CMOD_3=2500\mu\text{m}$	0,96	MPa
f_{Fts}	με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	0,61	MPa
f_{Ftu}	(α) με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	0,37	MPa
	(β) Για $CMOD=1500\mu\text{m}$	1,12	MPa
$V_{Rd,f}$	με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	56,31	kN
$V_{Rm,f}$	με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	72,41	kN
$V_f=0,50\%$			
f_{R1}	$CMOD_1=500\mu\text{m}$	2,72	MPa
f_{R2}	$CMOD_2=1500\mu\text{m}$	2,24	MPa
f_{R3}	$CMOD_3=2500\mu\text{m}$	1,92	MPa
f_{Fts}	με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	1,22	MPa
f_{Ftu}	(α) με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	0,74	MPa
	(β) Για $CMOD=1500\mu\text{m}$	2,24	MPa
$V_{Rd,f}$	με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	65,24	kN
$V_{Rm,f}$	με τύπο σχεδιασμού Model Code 10 [68]	87,94	kN

Παραδοχή: Για τους παραπάνω υπολογισμούς γίνεται η επί τω δυσμενέστερω θεώρηση ότι η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος παραμένει ίση με του μη ινοπλισμένου σκυροδέματος, σύμφωνα με την ανάλυση των συμπερασμάτων της βιβλιογραφίας που έγινε παραπάνω.

Οι παραπάνω προκαταρκτικοί υπολογισμοί για τον σχεδιασμό των δοκών συγκεντρώνονται στον Πίνακα 19 και απεικονίζονται στα διαγράμματα της Εικόνας 42, στα οποία φαίνεται ακριβώς ποιο δοκίμιο είναι σχεδιασμένο να αστοχήσει σε κάμψη και ποιο σε τέμνουσα. Επιπροσθέτως, με το διάγραμμα της Εικόνας 42 (α), το οποίο έχει διαμορφωθεί με τους τύπους του EC2-1-1 [98] και Model Code [68] για μη ινοπλισμένο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα αντίστοιχα, φαίνεται ακριβώς το γεγονός ότι το δοκίμιο με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 200mm στο διατμητικό μήκος της δοκού αστοχεί διατμητικά. Επομένως, με την εισαγωγή ινών στο μείγμα σκυροδέματος, στοχεύεται η αλλαγή του τρόπου αστοχίας από ψαθυρό/διατμητικό σε πλάστιμο/καμπτικό. Το δοκίμιο με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 250mm αστοχεί οριακά διατμητικά μετά την εισαγωγή ινών στο μείγμα σκυροδέματος, ενώ χωρίς την χρήση ινών αστοχεί ξεκάθαρα ψαθυρά διατμητικά. Τα υπόλοιπα δοκίμια, δεν έχουν σχεδιαστεί να αστοχούν καμπτικά με την εισαγωγή των ινών στο μείγμα, αλλά είναι επιθυμητό να αναπτύξουν περισσότερες ρωγμές, μικρότερου εύρους και σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους κι όχι μία κύρια διατμητική ρωγή. Αυτό θα βοηθήσει στο να επιτευχθεί ένας πιο πλάστιμος μεταλαστικός κλάδος με μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή, άρα και πλαστιμότητα και κατανάλωση ενέργειας.

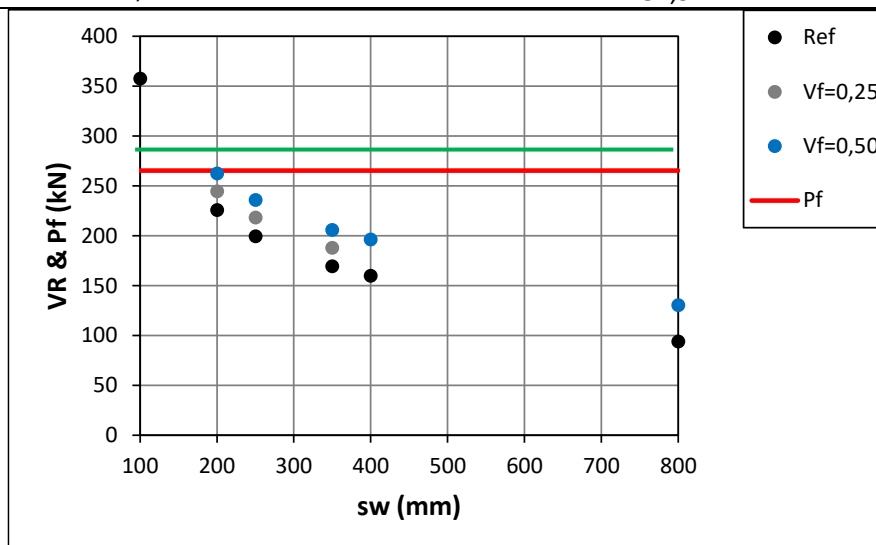
Το διάγραμμα της Εικόνας 42 (β), έχει διαμορφωθεί με τους τύπους του EC8-3 [99] και Model Code [68], αλλά με μέσες τιμές εφελκυστικού φορτίου από κάμψη για τα ζητούμενα CMOD σύμφωνα με Badogiannis et al. [31] και την παραδοχή που έγινε παραπάνω, για μη ινοπλισμένο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση η εισαγωγή ινών στο μείγμα οδηγεί σε φορτίο μεγαλύτερο από το φορτίο που προκαλεί την καμπτική αστοχία, για τις δοκούς με συνδετήρες ανά 200, 250 και 350mm, άρα θεωρητικά αυτά τα δοκίμια θα αστοχήσουν καμπτικά. Οι δοκοί με έναν και κανέναν συνδετήρα στο διατμητικό τους μήκος αστοχούν διατμητικά, αλλά προσεγγίζουν ικανοποιητικά το φορτίο αστοχίας τους και στοχεύεται να παρουσιάσουν μία πιο πλάστιμη εικόνα ρηγμάτωσης.

Στα διαγράμματα της Εικόνας 42 (α) & (β), έχει πραγματοποιηθεί η –επί τω δυσμενέστερω- παραδοχή ότι η καμπτική αντοχή των δοκών θα είναι περίπου η ίδια για το μη ινοπλισμένο και το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ελαφροσκυρόδεμα με κίσηρη η εισαγωγή ινών στο μείγμα σκυροδέματος δεν επηρεάζει την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όσο στην περίπτωση σκυροδέματος με διογκούμενα αργιλικά αδρανή, σύμφωνα με τους Campione et al. [36], Baledran et al. [21], Altun [22], Kim et al. [23], Wang et al. [24] και Grabaset et al. [25]. Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώνεται κι από τα χαμηλά ποσοστά αύξησης της θλιπτικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος -σε σχέση με το αντίστοιχο μη ινοπλισμένο- στις έρευνες των Gao et al. [32], Chen and Liu [33] και Hassanpour et al. [35] που κυμαίνονταν από 10-30% ακόμα και για υψηλά ποσοστά ινών και λόγου μήκους προς διαμέτρου ινών. Τα παραπάνω συμπεράσματα ενισχύονται από την έρευνα των Li et. al [29], Kayali et al. [26], Chen et al. [27] και Choi et al. [28], οι οποίοι παρατήρησαν μέχρι και μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με την προσθήκη ινών. Ωστόσο, τονίζεται ότι εν γένει στην βιβλιογραφία υπάρχουν αντικρουόμενα αποτελέσματα σε σχέση με την επιρροή των ινών στην θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με τους Libre et al. [30] και Badogiannis et al. [31] να σημειώνουν σημαντικά ποσοστά αύξησης (60-80%) της θλιπτικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, το οποίο περιέχει στην σύνθεση του κίσηρη. Άρα για να ληφθεί και το παραπάνω ενδεχόμενο της αύξησης της θλιπτικής αντοχής του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, άρα και του φορτίου που προκαλεί καμπτική αστοχία στην δοκό (υποθετική πράσινη γραμμή στο διάγραμμα της Εικόνας 42 (β), με παραδοχή αύξησης της καμπτικής αντοχής κατά 10% σύμφωνα με Folino et al. [64], Catarreli et al. [9], Campione et al. [20] και Zhao et al. [41]), το συμπέρασμα των δύο διαγραμμάτων (Εικόνα 42 (α) & (β)), εν ολίγοις, ταυτίζεται, με τα δοκίμια δοκών με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 200mm να αστοχούν καμπτικά, τα δοκίμια δοκών με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 250mm να βρίσκονται στο μεταίχμιο διατμητικής και καμπτικής αστοχίας και τα υπόλοιπα να αναπτύσσουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή έναντι τέμνουσας.

Πίνακας 19. Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών για τον σχεδιασμό των δοκών (σε όρους τέμνουσας)

A/A	Όνομα δοκιμίου	$V_{Rd,c,EC2}$ (kN)	$V_{Rd,c,EC8-3}$ (kN)	$V_{Rd,f}$ (kN)	$V_{Rm,f}$ (kN)	$V_{Rd,s}$ (kN)	$V_{R,tot1} = (V_{Rd,c,EC2} + V_{Rd,s}) * 2$ (kN)	$V_{R,tot2} = (V_{Rd,c,EC8-3} + V_{Rd,s}) * 2$ (kN)	$V_{R,tot,f1} = (V_{Rd,f} + V_{Rd,s}) * 2$ (kN)	$V_{R,tot,f2} = (V_{Rm,f} + V_{Rd,s}) * 2$ (kN)	P_f (kN)
1	LWC-100-SG-1/2	46,95	38,16	-	-	131,91	357,72	340,14			265,33
2	LWC-100-2/2			-	-				-	-	
3	LWC-200	46,95	38,16	-	-		225,82	208,24	-	-	
4	LWC-200-0,50P	-	-	65,24	87,94		-	-	262,39	307,80	
5	LWC-200-0,25F-1/2	-	-	56,31	72,42	65,96	-	-	244,53	276,75	
6	LWC-200-0,25F-2/2	-	-	56,31	72,42		-	-	244,53	276,75	
7	LWC-200-0,50F	-	-	65,24	87,94		-	-	262,39	307,80	
8	LWC-250-SG	46,95	38,16	-	-		199,44	181,86	-	-	
9	LWC-250-0,25F	-	-	56,31	72,42	52,77	-	-	218,15	250,37	
10	LWC-250-0,50F-1/2	-	-	65,24	87,94		-	-	236,01	281,42	
11	LWC-250-0,50F-2/2	-	-	65,24	87,94		-	-	236,01	281,42	
12	LWC-350	46,95	38,16	-	-		169,28	151,7	-	-	
13	LWC-350-0,50P	-	-	65,24	87,94		-	-	205,85	251,26	
14	LWC-350-0,50P	-	-	65,24	87,94	37,69	-	-	205,85	251,26	
15	LWC-350-0,25F	-	-	56,31	72,42		-	-	187,99	220,21	

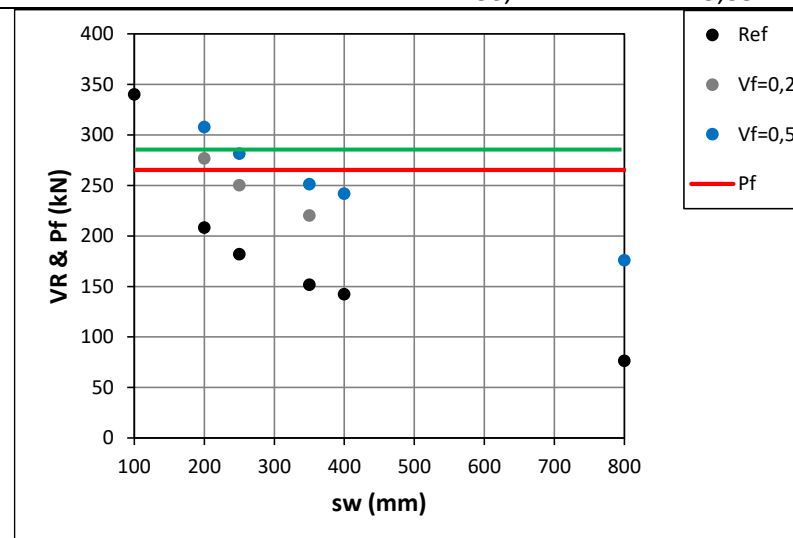
16	LWC-350-0,50F	-	-	65,24	87,94	-	-	205,85	251,26
17	LWC-1	46,95	38,16	-	-	32,98	159,86	142,28	-
18	LWC-1-0,50P	-	-	65,24	87,94	-	-	196,43	241,84
19	LWC-0-1/2	46,95	38,16	-	-	-	93,9	76,32	-
20	LWC-0-2/2	46,95	38,16	-	-	-	93,9	76,32	-
21	LWC-0-0,50-1/2	-	-	65,24	87,94	0	-	-	130,47
22	LWC-0-0,50-2/2	-	-	65,24	87,94	-	-	-	130,47



(σε όρους συνολικής δύναμης-τιμές αντοχών σχεδιασμού)

$$V_{R,tot1} = V_{Rd,c,EC2} + V_{Rd,s} \text{ (μη ινοπλισμένο ελαδροσκυρόδεμα)}$$

$$V_{R,tot,f1} = V_{Rd,f} + V_{Rd,s} \text{ (ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα)}$$



(σε όρους συνολικής δύναμης-μέσες τιμές αντοχών)

$$V_{R,tot2} = V_{Rd,c,EC8-3} + V_{Rd,s} \text{ (μη ινοπλισμένο ελαδροσκυρόδεμα)}$$

$$V_{R,tot,f2} = V_{Rm,f} + V_{Rd,s} \text{ (ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα)}$$

Εικόνα 42. Συγκεντρωτικό διάγραμμα υπολογισμών σχεδιασμού των δοκών

Πίνακας 20. Λίστα δοκιμών ανά σύνθεση και διατάξεις διατμητικού οπλισμού δοκών

A/A	V _f (%)	Κωδικός	Σχηματική απεικόνιση
1	0	LWC-100-SG-1/2	
	0	LWC-100-2/2	
2	0	LWC-200	
	0,25	LWC-200-0,25F-1/2-SG	
	0,25	LWC-200-0,25F-2/2	
	0,50F	LWC-200-0,50F-SG	
	0,50P	LWC-200-0,50P	
3	0	LWC-250-SG	
	0,25	LWC-250-0,25F-SG	
	0,50F	LWC-250-0,50F-1/2	
	0,50F	LWC-250-0,50F-2/2	
	0,50P	LWC-250-0,50P	
4	0	LWC-350	
	0,25	LWC-350-0,25F	
	0,50F	LWC-350-0,50F	
	0,50P	LWC-350-0,50P	
	0,50P	LWC-350-0,50P	
5	0	LWC-1	
	0,50P	LWC-1-0,50P	
6	0	LWC-0-1/2	
	0	LWC-0-2/2	
	0,50P	LWC-0-0,50P-1/2	
	0,50P	LWC-0-0,50P-2/2	

*Επεξήγηση συντομεύσεων: 0,50P= προκαταρκτική σύνθεση, 0,50F=τελική σύνθεση

Σημείωση: Υπόμνημα κωδικής ονομασίας δοκιμών δοκών

LWC (Lightweight concrete)- απόσταση συνδετήρων -ποσοστό ιών/σύνθεση σκυροδέματος – αριθμός δοκιμίου/συνολικός αριθμός δοκιμών για την ίδια διάταξη συνδετήρων-0/SG (μη ύπαρξη strain gauge σε επιλεγμένους συνδετήρες ή ύπαρξη)

Παράδειγμα: LWC-200-0,25F-1/2-SG

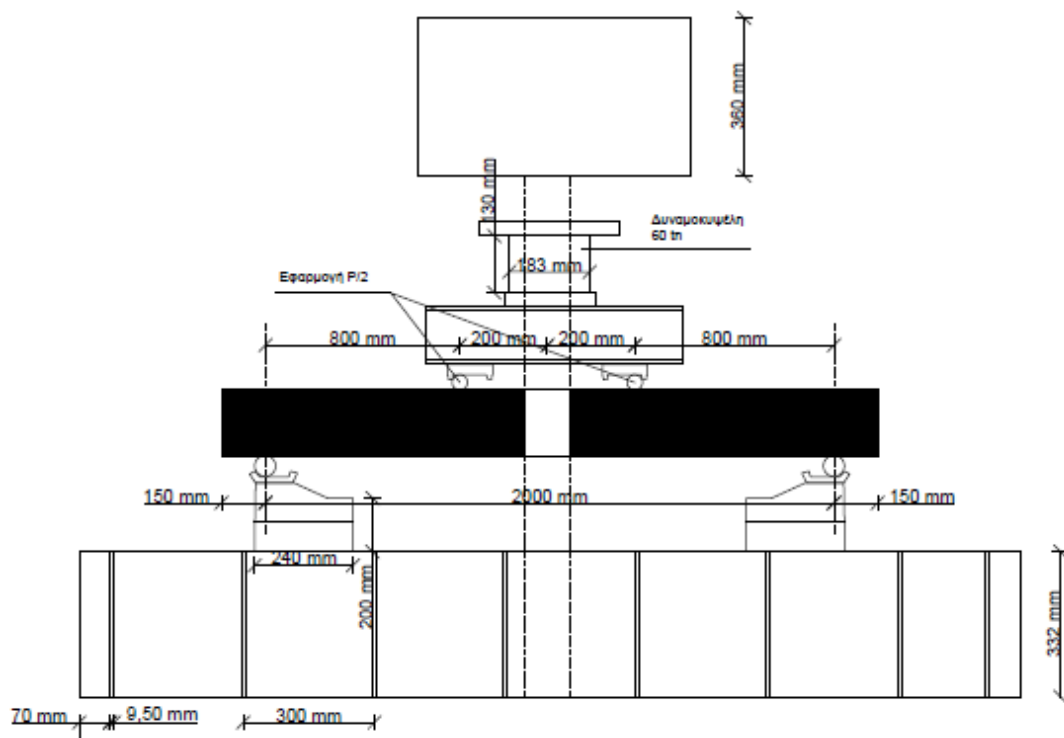
Δοκός με συνδετήρες ανά 200mm στο διατμητικό της μήκος, με ποσοστό ιών 0,25%, το πρώτο δοκίμιο εκ των δύο με την ίδια διάταξη διατμητικού οπλισμού και ποσοστού ιών, με strain gauge σε επιλεγμένους συνδετήρες

3.4.2. Περιγραφή δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων δοκών

Οι παραπάνω δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων σε ειδική πειραματική διάταξη (AMSLER) στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

Διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ελαφροσκυροδέματος με χρήση ινών προς μερική αντικατάσταση συνδετήρων

Το μέγιστο φορτίο το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση της παρούσας πειραματικής διάταξης είναι 500kN κι οι δοκιμές που διενεργούνται σε αυτή την μηχανή είναι displacement-control, προκειμένου να είναι δυνατή η λήψη δεδομένων και στον φθίνοντα/μετελαστικό κλάδο του δοκιμίου. Η μετακίνηση μεταφέρεται στην άνω μεριά του δοκιμίου μέσω ενός μικρότερου πλαισίου που αποτελείται από δύο κυλίνδρους (στηρίξεις) και μία δοκού HEA100. Μία σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης απεικονίζεται στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που διενεργήθηκαν οι δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων

Εκτός από την μέτρηση του φορτίου, κατά την διάρκεια της δοκιμής λαμβάνονται μετρήσεις για την κατακόρυφη μετακίνηση/ βέλος της δοκού σε διάφορα σημεία κατά μήκος της και στις δύο όψεις της: ένας μετρητής στο μεσαίο σημείο της δοκού, δύο μετρητές στα σημεία επιβολής του φορτίου και δύο μετρητές στις στηρίξεις της δοκού, σύνολο 10 μετρητές (Εικόνα 44). Οι μετρητές που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των τιμών των μετακινήσεων είναι βελόμετρα (LVTD's) και συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται βελόμετρα μέγιστης διαδρομής 25mm στην θέση των στηρίξεων (εφόσον δεν αναμένονται μεγάλες τιμές μετακινήσεων εκεί) και βελόμετρα μέγιστης διαδρομής 50mm στις πιο κεντρικές θέσεις της δοκού, όπου και αυξάνονται τα βέλη της με την αύξηση της τιμής του φορτίου. Ο τύπος βελόμετρο και η τιμή της μέγιστης διαδρομής κρίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά της δοκού και το μέγιστο φορτίο που κρίνεται ότι θα επιτευχθεί για κάθε δοκίμιο που εξετάζεται. Έτσι, όπως αποδεικνύεται παρακάτω, απλοποιητικά υπολογίστηκε το βέλος για την περίπτωση δοκού που υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων, και αποδείχθηκε ότι οι μετρητές με μέγιστη διαδρομή τα 50mm επαρκούν. Οι τιμές των μετακινήσεων οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δοκών είναι ο μέσος όρος των μετακινήσεων που προκύπτουν από τους μετρητές των δύο όψεων στο ίδιο σημείο κατά μήκος της δοκού αφού έχει αφαιρεθεί η όποια βύθιση έχει υποστεί η εκάστοτε στήριξη της δοκού. Οι μετρήσεις του φορτίου και των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι ταυτόχρονες και λαμβάνονται μέσω καταγραφικών συσκευών.

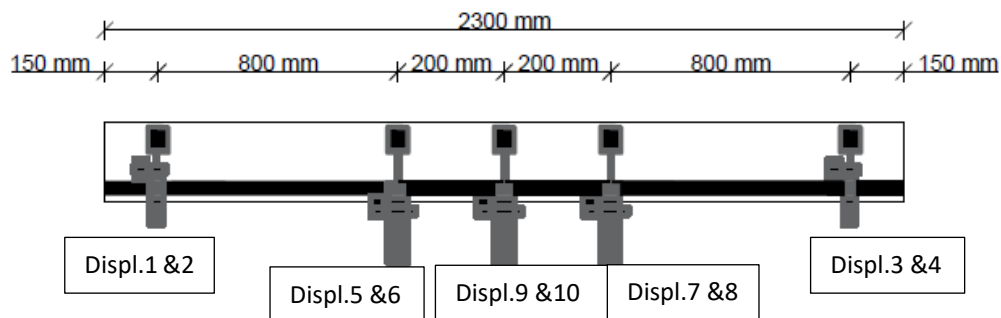
$$w = \frac{\max(M) \cdot \alpha^2}{3 \cdot 0,50 \cdot E \cdot J} = 8,32 \text{ mm}$$

Μετά την επίλυση της διατομής, όπως παρουσιάζεται και παραπάνω, η μέγιστη ροπή που μπορεί να φέρει η διατομή είναι η $M=106,13 \text{ kNm}$

$\alpha=1000\text{mm}$

$E=25000\text{MPa}$ (στον παραπάνω τύπο χρησιμοποιήθηκε επί τω δυσμενέστερω η μισή τιμή του μέτρου ελαστικότητας, θεωρώντας ότι θα απομειωθεί λόγω της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος)

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{150 \cdot 300^3}{12} = 3,40 \cdot 10^8 \text{mm}^4$$

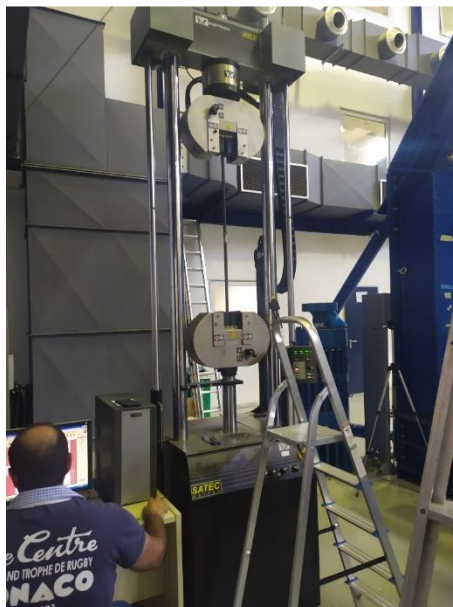


Εικόνα 44. Διάταξη και αρίθμηση των βελομέτρων κατά μήκος της δοκού

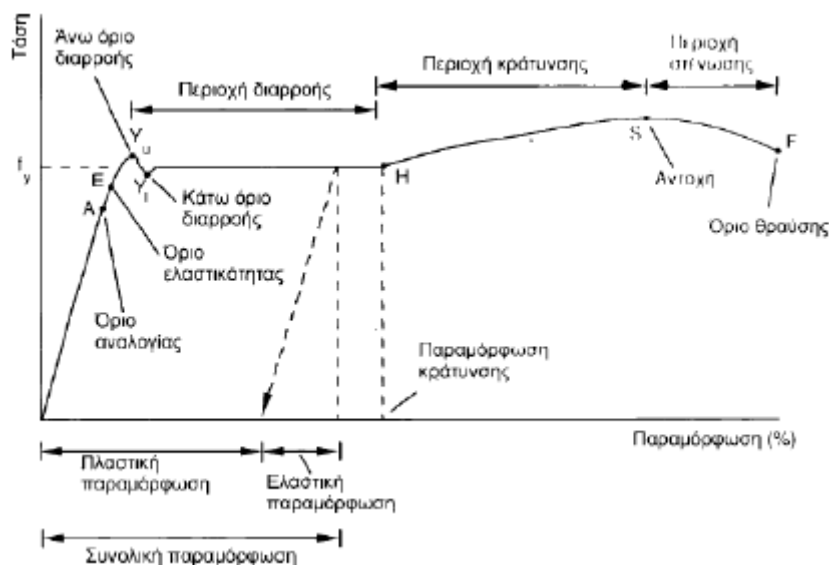
3.4.3. Δοκιμή εφελκυσμού χαλύβδινων ράβδων οπλισμού δοκών

3.4.3.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Προκειμένου να είναι ολοκληρωμένη η εικόνα γύρω από την συμπεριφορά των δοκών σε κάμψη, είναι απαραίτητη κι η γνώση της συμπεριφοράς των ράβδων οπλισμού τους (διαμήκων και εγκάρσιων). Επομένως, δοκιμάσθηκαν σε εφελκυσμό 3 δοκίμια ράβδων οπλισμού από κάθε τύπο ράβδου οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την διαμόρφωση των δοκών: 3 ράβδοι διαμέτρου $\Phi 18$, 3 ράβδοι διαμέτρου $\Phi 16$ και 3 ράβδοι διαμέτρου $\Phi 8$. Ενδεικτικά, παρατίθεται στην Εικόνα 46, ένα τυπικό διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού B500C και παρακάτω περιγράφεται η συμπεριφορά του.



Εικόνα 45. Δοκιμή εφελκυσμού χαλύβδινων ράβδων οπλισμού

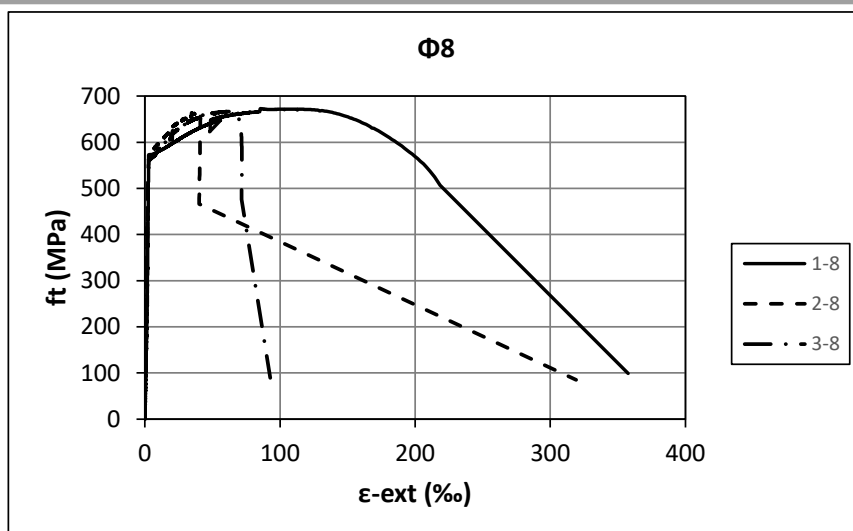


Εικόνα 46. Τυπικό διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού

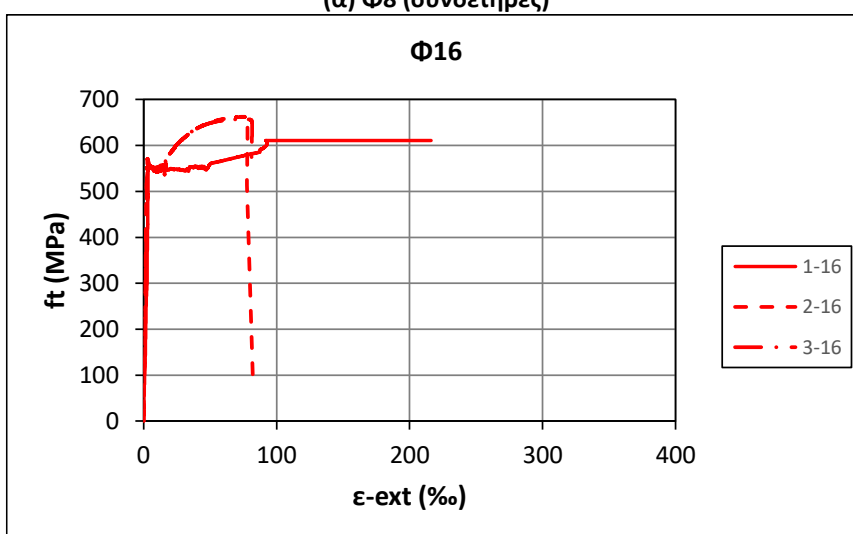
Η καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης (F-Δl) ή τάσης παραμόρφωσης (σ - ϵ) του χάλυβα οπλισμού κατά τον εφελκυσμό του παρουσιάζει διακριτό γραμμικό-ελαστικό κλάδο, όπου διακρίνονται χαρακτηριστικά σημεία και περιοχές. Ενδεικτικά αναφέρεται η τάση στο όριο διαρροής (f_y), δηλαδή η μέγιστη τάση πέρα από την οποία υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Το αρχικό τμήμα του διαγράμματος σ - ϵ είναι ευθύγραμμο και ακολουθείται από την περιοχή ή πλατώ διαρροής, όπου αυξάνονται οι παραμορφώσεις υπό σταθερή τάση. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση ή όριο διαρροής, f_y . Ακολουθεί η περιοχή κράτνωσης, όπου παρατηρείται μικρή αύξηση των τάσεων μέχρι τη μέγιστη τιμή (εφελκυστική αντοχή), πέρα από την οποία αρχίζει η στένωση της διατομής του μετάλλου (δημιουργία τοπικού "λαιμού") μέχρι τη θραύση. Η εφαπτομένη του διαγράμματος στην αρχή της κράτνωσης ονομάζεται μέτρο κράτνωσης και η αντίστοιχη παραμόρφωση είναι η παραμόρφωση κράτνωσης. Η συνολική παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο της καμπύλης σ - ϵ δίνεται προσθέτοντας στην ελαστική παραμόρφωση (αυτή που ανακτάται κατά την αποφόρτιση) την πλαστική παραμόρφωση (παραμένουσα ή μόνιμη).

3.4.3.2. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού χαλύβδινων ράβδων

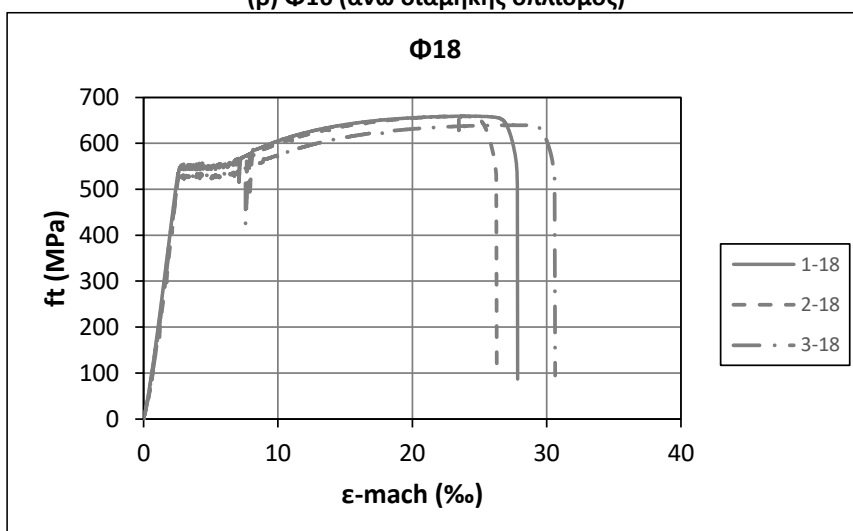
Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές του ορίου διαρροής (f_y) και της αντίστοιχης παραμόρφωσης (ϵ_y) των ράβδων οπλισμού την στιγμή της επίτευξης του ορίου διαρροής. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών ράβδων οπλισμού που εξετάστηκαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 47. Συνολικά εξετάστηκαν 3 δοκίμια ράβδων οπλισμού για τις διαμέτρους 18, 16 και 8mm. Οι τιμές του ορίου διαρροής (f_y) και της εφελκυστικής αντοχής (f_u) και των αντίστοιχων παραμορφώσεων, παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 21, μαζί με τις μέσες τους τιμές και τα αντίστοιχα στατιστικά τους στοιχεία (τυπική απόκλιση $st.dev$ και συντελεστής μεταβλητότητας con).



(α) Φ8 (συνδετήρες)



(β) Φ16 (άνω διαμήκης σπλισμός)



*Σημείωση: παρατίθενται μετρήσεις από την μηχανή στην περίπτωση των ράβδων Φ18, εφόσον δεν υπήρχαν αντίστοιχες μετρήσεις από extensiometre

(γ) Φ18 (κάτω διαμήκης σπλισμός)

Εικόνα 47. Συγκεντρικά διαγράμματα δοκιμών ράβδων σπλισμού τάσεων-παραμορφώσεων: (α) Φ8 συνδετήρες, (β) Φ16 θλιβόμενος διαμήκης σπλισμός και (γ) Φ18 εφελκυσμένος διαμήκης σπλισμός

Πίνακας 21. Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών μηχανικών χαρακτηριστικών των ράβδων οπλισμού

Δοκίμιο	f_y (MPa)	e_y (%)	f_u (MPa)	e_u (%)
Μετρήσεις από extensionmeter				
1-8	562,72	2,81	672,90	85,18
2-8	555,74	2,78	663,29	39,49
3-8	542,06	2,71	666,21	62,13
8-mean	553,51	2,77	667,47	59,27
8-st.dev	10,51	0,05	4,93	22,84
8-cov (%)	1,90	1,90	0,74	38,54
1-16	552,06	2,76	653,43	105,39
2-16	569,87	2,85	662,34	75,28
3-16	535,07	2,68	657,69	72,30
16-mean	552,33	2,76	657,82	81,52
16-st.dev	17,40	0,09	4,46	18,30
16-cov (%)	3,15	3,15	0,68	22,45
1-18	545,70	2,73	659,13	23,52
2-18	550,24	2,75	659,17	23,72
3-18	526,61	2,63	639,74	27,58
18-mean	540,85	2,70	652,68	24,85
18-st.dev	12,54	0,06	11,21	2,29
18-cov (%)	2,32	2,32	1,72	9,20

3.4.4. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων δοκών

3.4.4.1. Καμπύλες φορτίου-μετακίνησης

Το αποτέλεσμα της διενέργειας των δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων των δοκών είναι η καμπύλες φορτίου μετατόπισης. Στην προκειμένη περίπτωση, έχουν τοποθετηθεί βελόμετρα στα σημεία επιβολής του φορτίου, στο μεσαίο σημείο της δοκού και στις στηρίξεις της δοκού, προκειμένου να ληφθούν δεδομένα μετακίνησης για τυχούσες βυθίσεις της στήριξης. Το πιο αντιπροσωπευτικό σημείο είναι το κεντρικό σημείο της δοκού, εφόσον σε αυτό εμφανίζεται η τιμή της μέγιστης ροπής, άρα και η τιμή της μέγιστης μετακίνησης. Οι τιμές της μετακίνησης στα σημεία επιβολής των φορτίων αλλά και στο κεντρικό σημείο της δοκού, αφού έχουν υπολογιστεί οι μέσοι όροι των μετακινήσεων των μετρητών που βρίσκονται στην ίδια θέση των δύο όψεων της δοκού, διορθώνονται, αφαιρώντας από αυτές τις βυθίσεις των στηρίξεων, ως εξής:

$$\text{displacement_loads} = \text{average}(\text{displ}_i, \text{displ}_{i+1}) - \text{average}(\text{displ}_y, \text{displ}_{y+1})$$

Όπου ο δείκτης i αναφέρεται σε μετρητή που βρίσκεται στα σημεία επιβολής του φορτίου και ο δείκτης y αναφέρεται στους μετρητές που βρίσκονται στις στηρίξεις. Αφαιρείται ο μέσος όρος των τιμών των μετακινήσεων των μετρητών που βρίσκονται στις στηρίξεις που είναι πλησίον του εκάστοτε σημείου επιβολής του φορτίου. Στην περίπτωση των τιμών των μετακινήσεων που προκύπτουν από τους μετρητές του κεντρικού σημείου της δοκού αφαιρείται το άθροισμα των μέσων όρων των μετακινήσεων που προκύπτουν από τους μετρητές των στηρίξεων, ανά ζευγάρια. Ο τρόπος υπολογισμού περιγράφεται παρακάτω:

$$\text{displacement_mid} = \text{average}(\text{displ}_i, \text{displ}_{i+1}) - (\text{average}(\text{displ}_{y1}, \text{displ}_{y1+1}) + \text{average}(\text{displ}_{y2}, \text{displ}_{y2+1}))$$

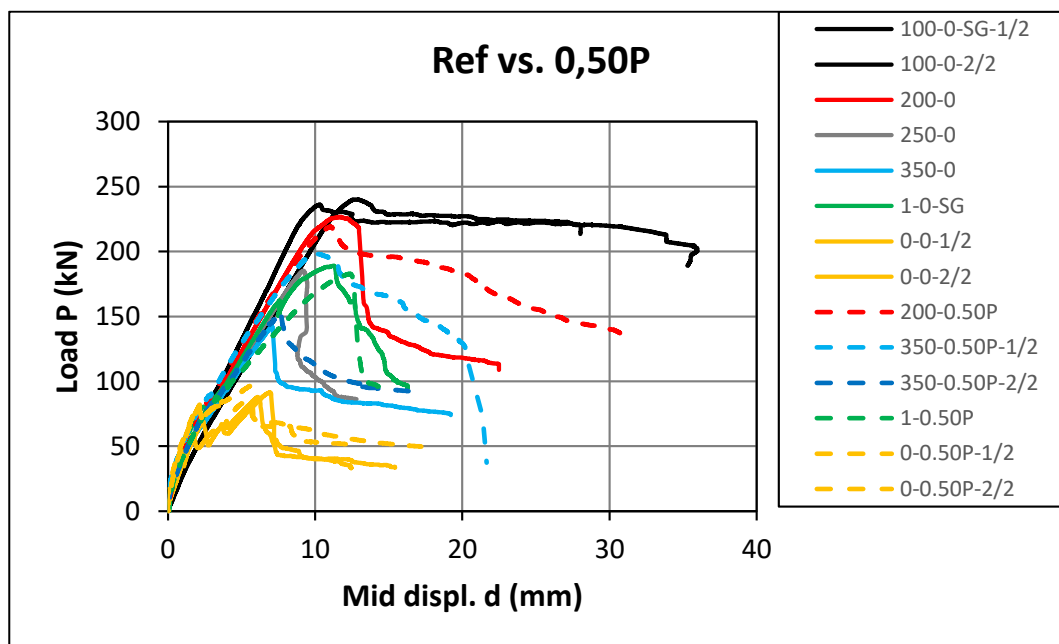
Εκτός από τις καμπύλες φορτίου-μετακίνησης που παρατίθενται παραπάνω, απομονώθηκαν οι βασικές τιμές φορτίου μετατόπισης στον Πίνακα 22. Αρχικά, απομονώνονται οι τιμές του απόλυτου

μέγιστου φορτίου P_{max} καθώς και της μετακίνησης στην οποία συναντάται το απόλυτο μέγιστο φορτίο $d_{P_{max}}$. Οι τιμές του (ισοδύναμο-υπολογιστικού) φορτίου διαρροής P_y και της αντίστοιχης μετατόπισης d_{P_y} που συναντάται αυτό το φορτίο προκύπτουν από επαναληπτική διαδικασία διγραμμικοποίησης της πειραματικής καμπύλης φορτίου-μετατόπισης ως εξής: το ισοδύναμο φορτίο διαρροής προκύπτει από την επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι καμπύλες, έχοντας ως δεδομένο ότι η αρχική κλίση προκύπτει από το γεγονός ότι η διγραμμική καμπύλη πρέπει να τέμνει την πραγματική καμπύλη στο σημείο που αντιστοιχεί στο 75% του ισοδύναμου φορτίου διαρροής P_y , όπως προτείνεται από τους Paulay & Priestley [100]. Η μετακίνηση d_u , αντιστοιχεί στο 80% του απόλυτου μέγιστου φορτίου P_{max} , επίπεδο φορτίου που θεωρείται ότι επέρχεται η αστοχία σύμφωνα με τον EC8-3 (CEN 2005-[99]) για στάδιο επιτελεστικότητας Near Collapse. Με τις τιμές των μετακινήσεων d_u και d_y υπολογίζεται η τιμή της πλαστιμότητας ως ο λόγος d_u/d_y . Επιλέγεται, το φορτίο στις καμπύλες φορτίο-μετατόπισης να κανονικοποιηθεί με το γινόμενο του πλάτους επί του στατικού ύψους της δοκού προκειμένου να απομονωθεί ο παράγοντας των διαστάσεων της διατομής της δοκού.

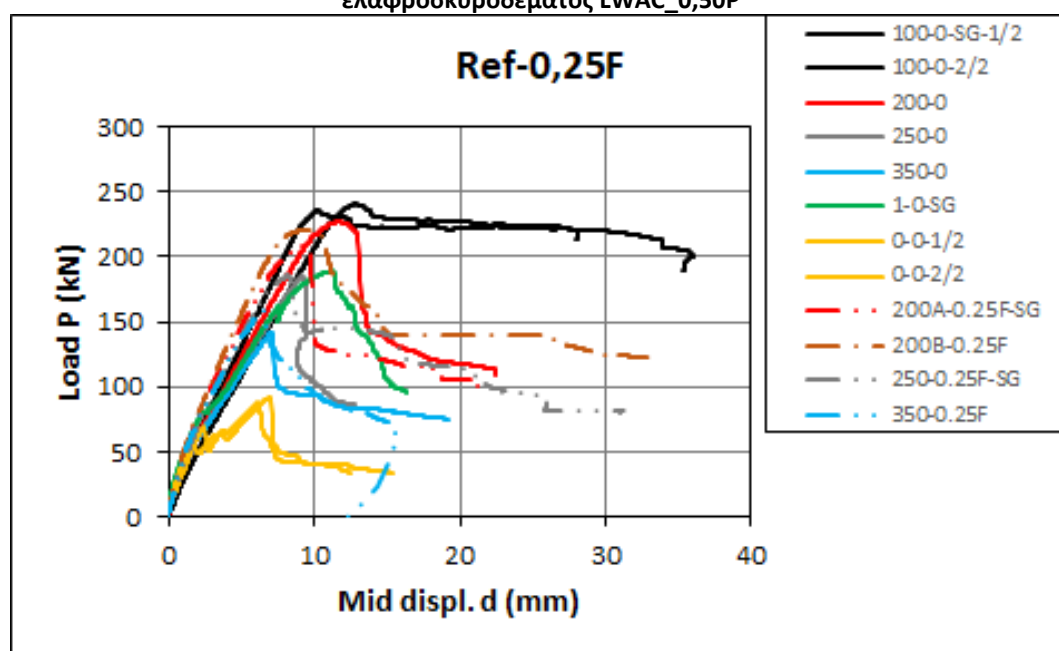
Πίνακας 22. Βασικά πειραματικά αποτελέσματα

Όνομα δοκιμίου	P_{max} (kN)	$d_{P_{max}}$ (mm)	$0,80P_{max}$ (kN)	$d_{0,80d_{P_{max}}}$ (mm)	$P_y=P_u$ (kN)	d_y (mm)	d_u (mm)	K (kN/mm)	$\mu=d_u/d_y$
Δοκοί μη-ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος									
100-0-SG-1/2	236,14	10,31	188,91	28,00	226,31	8,91	28,00	25,39	3,14
100-0-2/2	240,16	12,72	192,13	35,00	228,06	10,87	35,00	20,99	3,22
200-0	226,58	11,69	181,26	13,19	248,67	10,94	13,19	22,40	1,21
250-0	185,20	9,19	148,16	9,42	-	-	-	-	1
350-0	142,20	7,06	113,76	7,28	-	-	-	-	1
1-0-SG	189,06	11,26	151,25	13,79	-	-	-	-	1
0-0-1/2	91,38	6,92	73,10	7,09	72,02	2,23	7,09	32,25	1
0-0-2/2	87,85	6,08	70,28	6,38	72,91	1,96	6,38	37,11	1
Δοκοί ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος – 0,50P									
200-0,50P	219,00	11,02	175,20	21,15	201,12	8,29	21,15	24,26	2,55
350-0,50P-1/2	198,28	10,08	158,62	16,00	189,59	7,68	16,00	24,69	2,08
350-0,50P-2/2	152,48	7,63	121,98	8,83	162,40	7,27	8,83	22,32	1,21
1-0,50P	182,89	12,35	146,31	12,77	-	-	-	-	1
0-0,50P-1/2	96,69	5,63	77,35	5,78	87,52	1,97	5,78	44,31	1
0-0,50P-2/2	84,58	5,35	67,66	7,65	75,42	1,45	7,65	52,05	1
Δοκοί ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος – 0,25F									
200A-0,25F-SG	207,58	9,31	166,06	9,87	-	-	-	-	1
200B-0,25F	220,73	9,56	176,58	12,06	216,16	7,01	12,33	30,83	1,76
250-0,25F-SG	186,02	8,19	148,82	9,00	-	-	-	-	1
350-0,25F	158,61	6,46	126,89	7,30	-	-	-	28,63	1
Δοκοί ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος – 0,50F									
200-0,50F-SG	167,23	7,99	133,78	12,26	156,40	5,35	12,26	117,30	2,29
250A-0,50F-SG	172,49	7,71	137,99	9,71	170,58	5,32	9,71	32,05	1,82
250B-0,50F	154,45	6,21	123,56	9,69	147,86	4,95	9,69	29,90	1,96
350-0,50F	131,02	4,82	104,82	9,03	127,18	3,49	9,03	36,48	2,59

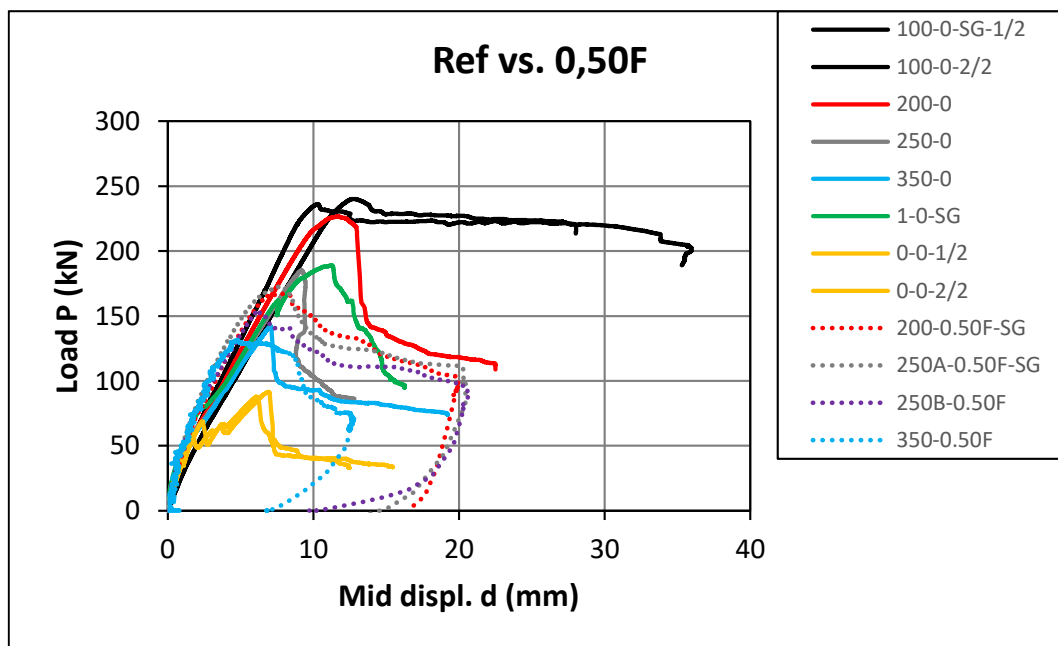
Στα διαγράμματα της Εικόνας 48 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι καμπύλες φορτίου- μετατόπισης των εξεταζόμενων δοκών, τόσο συγκριτικά (Εικόνα 48 (α), (β), (γ)) ανάμεσα σε ινοπλισμένο και μη ελαφροσκυροδέμα όσο και συνολικά (Εικόνα 48 (δ)).



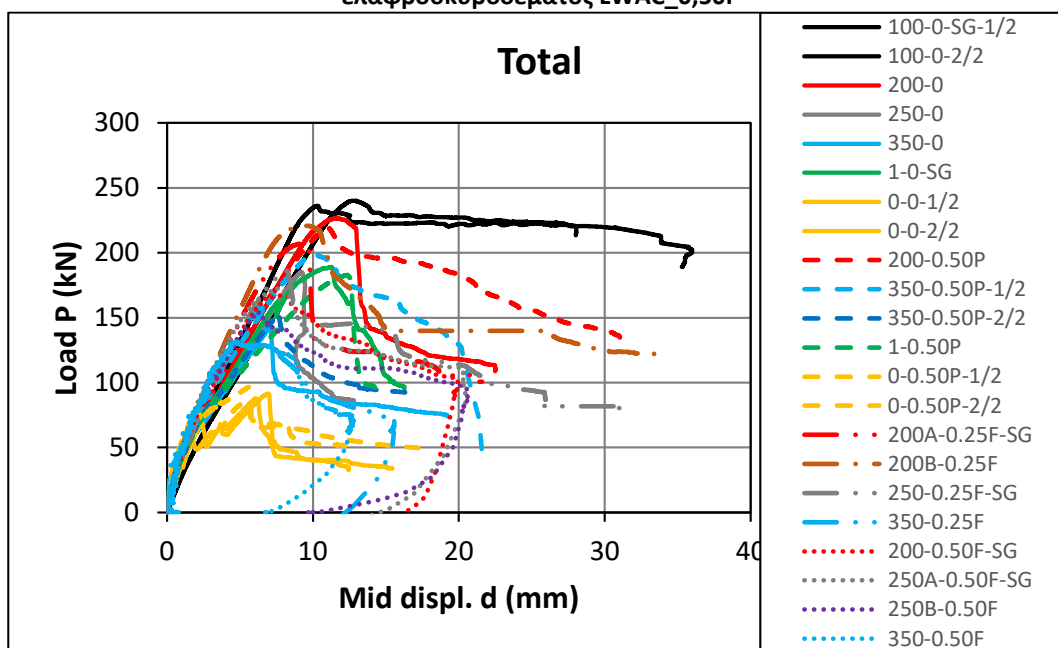
(α) Συγκριτικό διάγραμμα δοκών μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος vs. ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος LWAC_0,50P



(β) Συγκριτικό διάγραμμα δοκών μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος vs. ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος LWAC_0,25F



(γ) Συγκριτικό διάγραμμα δοκών μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος vs. ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος LWAC_0,50F



(δ) Συγκριτικό διάγραμμα δοκών μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος LWAC_0,25F, LWAC_0,50P & LWAC_0,50F

Εικόνα 48. Συγκεντρωτικά διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης στο κεντρικό σημείο της δοκού για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ινοπλισμένου (LWAC_0,25F, LWAC_0,50P & LWAC_0,50F) και μη ελαφροσκυροδέματος

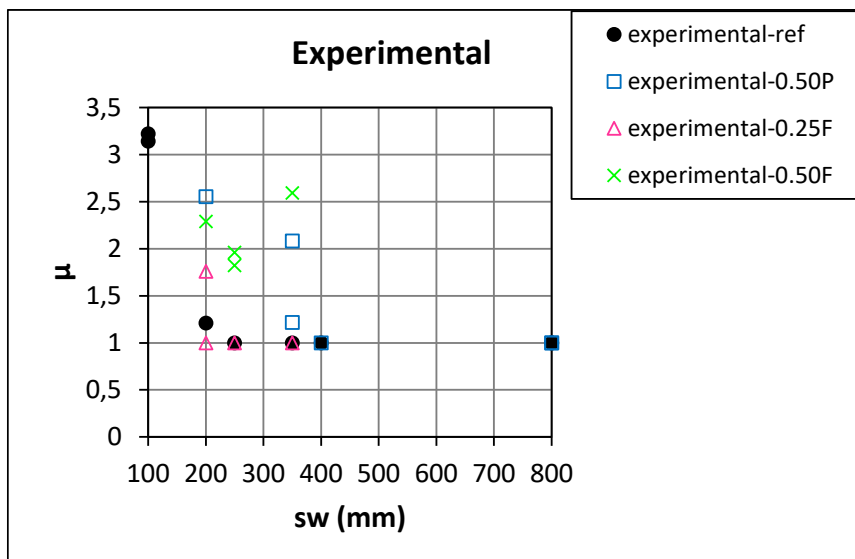
Όπως φαίνεται από το συγκριτικό διάγραμμα των καμπύλων φορτίου-μετατόπισης ανάμεσα στις δοκούς με ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα σε ποσοστό 0,25% και στις αντίστοιχες δοκούς αναφοράς με μη ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα (Εικόνα 48 (β)), η εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος δεν οδήγησε σε αύξηση του φορτίου αστοχίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το φορτίο παρέμεινε σταθερό με την εισαγωγή ινών στο μίγμα (π.χ. στις δοκούς με συνδετήρες ανά 350mm), ενώ σε κάποιες είχε μία μικρή πτωτική τάση (π.χ. στις δοκούς με συνδετήρες ανά 200mm). Στην περίπτωση των δοκών με συνδετήρες ανά 200mm ($\mu=1,76$) (για το

δοκίμιο 200B-0,25F) στο διατμητικό τους μήκος, παρατηρείται αύξηση της πλαστιμότητας τους με την προσθήκη ινών σε ποσοστό $V_f=0,25\%$ (Εικόνα 50), μιας και το μη ινοπλισμένο δοκίμιο με την ίδια διάταξη συνδετήρων είχε αναπτύξει δείκτη πλαστιμότητας περί το 1,21. Η παραπάνω εικόνα μπορεί να οφείλεται στα μη αναμενόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά που σημειώθηκαν σε επίπεδο υλικού, ενσωμώντας την αυξημένη αεροπεριεκτικότητα και κάθιση, που οδήγησαν σε μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς, όσο και στο γεγονός πως το συγκεκριμένο ποσοστό ινών για τις ίνες με λόγο μήκους προς διάμετρο 43,75 θεωρείται αρκετά μικρό ώστε να βελτιώσει την διατμητική αντοχή των δοκών, αλλά και την πλαστιμότητα τους.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η σύνθεση ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50% επαναλήφθηκε δύο φορές, προκειμένου να βελτιωθούν κάποια ζητήματα που είχαν προκύψει σε επίπεδο υλικού, αλλά και να γίνουν παραπάνω δοκιμιά δοκών ούτως ώστε να προκύψει μία πιο ξεκάθαρη εικόνα για τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην πρώτη σειρά δοκιμών με ποσοστό ινών 0,50% (0,50P) (Εικόνα 48 (α)) στην περίπτωση δοκών με συνδετήρες ανά 200mm στο διατμητικό τους μήκος, με την εισαγωγή ινών σε ποσοστό 0,50% επιτεύχθηκε το ίδιο φορτίο αλλά μεγαλύτερη πλαστιμότητα (Εικόνα 50). Συγκεκριμένα, με την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος σε αυτό το ποσοστό αυξήθηκε ο λόγος πλαστιμότητας από 1,21 που ήταν στο αντίστοιχο μη ινοπλισμένο δοκίμιο δοκού, σε 2,55, οδηγώντας σε μία ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 108%. Επίσης, στην περίπτωση δοκών οι οποίες έχουν συνδετήρες ανά 350mm στο διατμητικό τους μήκος, κατασκευάστηκαν δύο δοκοί με ποσοστό ινών 0,50%. Η μία δοκός έδειξε αύξηση της διατμητικής αντοχής κατά 38%, ενώ η άλλη ανά 10%, χωρίς κάποια εμφανή διαφορά ανάμεσα στα δύο δοκίμια που να επεξηγεί αυτή την διαφοροποίηση στην φέρουσα ικανότητα τους. Επίσης, η δοκός που έδειξε την μεγαλύτερη αύξηση στην διατμητική αντοχή εμφάνισε και λόγο πλαστιμότητας ίσο με 2, σε αντίθεση με το αντίστοιχης όπλισης μη ινοπλισμένο δοκίμιο το οποίο εμφάνισε λόγο πλαστιμότητας ίσο με 1. Ως εκ τούτου για τις διατάξεις διατμητικής όπλισης ανά 200mm και 350mm, σημειώθηκε αύξηση της πλαστιμότητας μεγαλύτερη από 100%. Ωστόσο, εξαιτίας της μη αναμενόμενης διασποράς των αποτελεσμάτων του μέγιστου διατμητικού φορτίου και πλαστιμότητας στα ινοπλισμένα δοκίμια με ποσοστό ινών 0,50% για διάταξη διατμητικής όπλισης ανά 350mm στο διατμητικό τους μήκος, θεωρείται ότι απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Σε όλες τις άλλες διατάξεις διατμητικού οπλισμού επιτεύχθηκε η ίδια ή ελαφρώς αυξημένη διατμητική αντοχή, χωρίς αξιόλογη βελτίωση στην πλαστιμότητα. Εν προκειμένω, αν δεν είχαν σημειωθεί οι προαναφερθείσες μη αναμενόμενες συμπεριφορές σε επίπεδο υλικού, σε σχέση με την αυξημένη ποσότητα ρευστοποιητή σε σύγκριση με την σύνθεση αναφοράς, οι οποίες οδήγησαν σε αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα και αυξημένη κάθιση, άρα και ανομοιόμορφη κατανομή των ινών στο μίγμα σκυροδέματος, θα αναμενόταν μεγαλύτερη αύξηση τόσο σε επίπεδο διατμητικής αντοχής, όσο και σε επίπεδο πλαστιμότητας. Στην επαναληπτική σύνθεση, με ποσοστό ινών 0,50%, δεν κατέστη δυνατή η βελτίωση των χαρακτηριστικών σε επίπεδο υλικού, επομένως τα αποτελέσματα, δεν θεωρούνται συγκρίσιμα σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς, αφού αναφέρονται σε άλλη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος. Ωστόσο, οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης παρατίθενται στην Εικόνα 48 (γ) για λόγους πληρότητας.

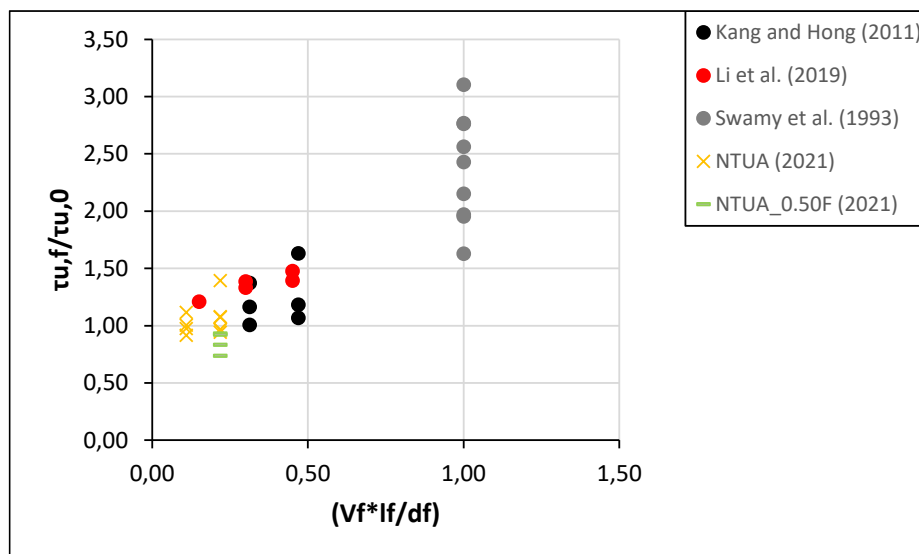
Συνολικά, για όσες δοκούς ήταν δυνατόν να διγραμμοκοποποιηθούν, σύμφωνα με την μεθοδολογία και κριτήρια κατά Paulay & Priestley [100] παρατηρήθηκε, μία τάση αύξησης της πλαστιμότητας με την εισαγωγή ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Ωστόσο όλες οι δοκοί αστόχησαν διατμητικά και δεν εμφάνισαν λόγο πλαστιμότητας μεγαλύτερο του 3,50. Η τιμή 3,50 αποτελεί μία τιμή- κάτω όριο πάνω από την οποία θεωρείται ότι οι δοκοί αστοχούν καμπτικά. Όπως φαίνεται για δοκούς με απόσταση συνδετήρων ανά 200, 250 και 350mm και για ποσοστό ινών 0,50% ο λόγος πλαστιμότητας είναι μεγαλύτερος του 2, που αποτελεί κάτω όριο της συνδυαστικής καμπτικής-διατμητικής αστοχίας. Επίσης, τα παραπάνω δοκίμια με ποσοστό ινών 0,50% εμφανίζουν λόγο πλαστιμότητας μεγαλύτερο από τον λόγο πλαστιμότητας των μη ινοπλισμένων δοκιμών με αντίστοιχη διατμητική όπλιση. Σε γενικές γραμμές, όλα τα δοκίμια αναφοράς (οι δοκοί μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος), εκτός από τα δοκίμια με συνδετήρες ανά 100mm τα οποία ήταν επαρκώς οπλισμένα έναντι τέμνουσας και κάμψης, εμφάνισαν δείκτη πλαστιμότητας γύρω στο 1, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι αστόχησαν ψαθυρά. Επομένως, μπορεί τα δοκίμια με απόσταση συνδετήρων ανά 200, 250 και 350mm και για ποσοστό 0,50% να εμφάνισαν λόγο

πλαστιμότητας μεγαλύτερο ή ίσο του 2, ωστόσο πάλι η αστοχία τους λογίζεται ως διατμητική, εξαιτίας της μορφής της η οποία αφορά την διαμόρφωση διατμητικών ρωγμών στο διατμητικό μήκος τους. Παρόλα αυτά, η εν λόγω αύξηση του λόγου πλαστιμότητας, ακόμα και με τις παρούσες μειωμένες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σε επίπεδο υλικού, οι ίνες φαίνεται να βελτιώνουν την πλαστιμότητα των δοκών.



Εικόνα 49. Συγκεντρωτικό διάγραμμα πλαστιμότητας σε σύγκριση με την απόσταση των συνδετήρων για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

Προσθέτοντας τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας στα αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας από δοκιμές ινοπλισμένων δοκών από ελαφροσκυροδέμα, οι οποίες αστοχούν διατμητικά, στο διάγραμμα της Εικόνας 50, φαίνεται πως θα μπορούσε να πει κανείς πως τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα και εμφανίζουν ικανοποιητική συσχέτιση με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Ως συμπέρασμα θα μπορούσε να προκύψει πως οι ίνες με λόγο μήκους προς διάμετρο 43,75 σε ποσοστό 0,25% θεωρούνται ανεπαρκείς για να αυξήσουν την διατμητική αντοχή και την πλαστιμότητα δοκών ελαφροσκυροδέματος. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, θα είχαν προκύψει βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με τα παρόντα αν είχε επιτευχθεί η αναμενόμενη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος σε σχέση με το μη ινοπλισμένο. Όσον αφορά το ποσοστό 0,50% συμπεραίνεται ότι η εισαγωγή ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος σε αυτό το ποσοστό θα μπορούσε να μειώσει τους συνδετήρες που απαιτούνται λόγω τέμνουσας στο μίσο απαιτούμενο - από τον κανονισμό- ποσοστό. Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός πως τα δοκίμια με απόσταση συνδετήρων ανά 200mm έφτασαν το φορτίο αστοχίας των δοκών αναφοράς με συνδετήρες ανα 100mm, τα οποία είναι επαρκώς οπλισμένα σε κάμψη και τέμνουσα με βάση τον κανονισμό. Επίσης, το δοκίμιο 200_0,50P ($\mu=2,50$), με συνδετήρες ανά 200mm και ποσοστό ινών 0,50%, εμφάνισε και βελτίωση της πλαστιμότητας του σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς 200-0 ($\mu=1,20$), το οποίο είναι κατασκευασμένο χωρίς ίνες με το ίδιο ποσοστό συνδετήρων. Ωστόσο, παρόλη την προαναφερθείσα αύξηση δεν ήταν σε θέση να προσεγγίσει την πλαστιμότητα του δοκίμιου αναφοράς 100-0 ($\mu=3,20$), το οποίο ήταν επαρκώς οπλισμένο έναντι κάμψης και τέμνουσας. Πρέπει να σημειωθεί πως η συνεισφορά των ινών εξαρτάται κι από άλλους παράγοντες όπως είναι ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος a/d , το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού ρ_s , εξ ου κι η μεγάλη διακύμανση του λόγου της διατμητικής αντοχής των δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος με τις αντίστοιχες δοκούς αναφοράς μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος στην περίπτωση της έρευνας των Swamy et al. [56], στην οποία υπάρχει διακύμανση των παραπάνω παραμέτρων ενώ το ποσοστό και οι διαστάσεις των ινών παραμένουν σταθερά.



Εικόνα 50. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας για ινοπλισμένες δοκούς από ελαφροσκυροδέμα

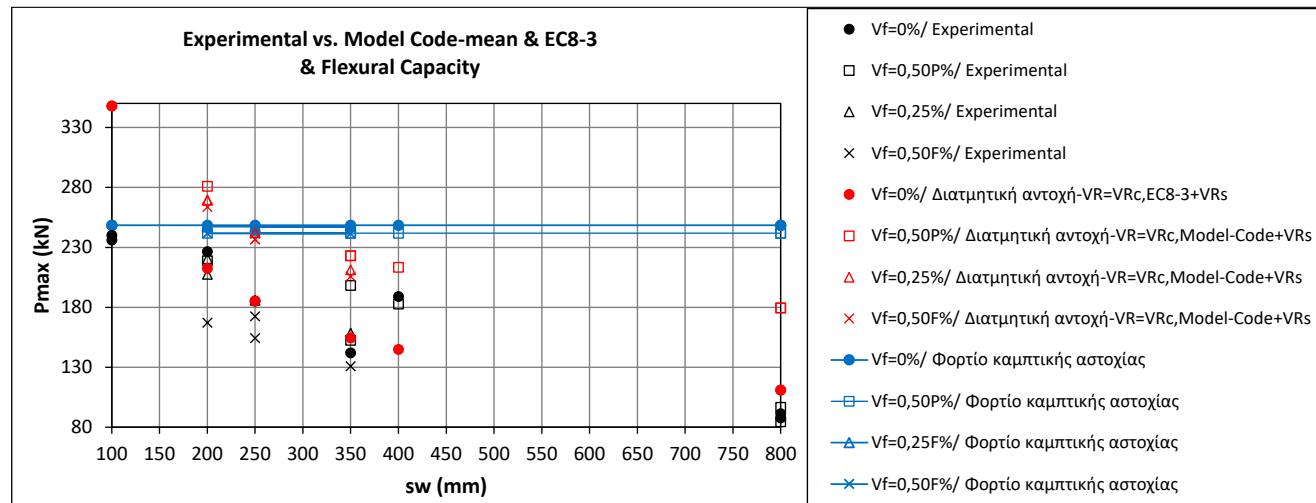
3.4.4.2. Εκτίμηση διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματοςΦ

Στο διάγραμμα της Εικόνας 51 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα του μέγιστου φορτίου για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ινοπλισμένου και μη ελαφροσκυροδέματος (σύμβολα με μαύρο χρώμα: κύκλος μη ινοπλισμένες δοκοί αναφοράς, τετράγωνο και Χ ινοπλισμένες δοκοί με $V_f=0,50\%$ και με τρίγωνο ινοπλισμένες δοκοί με $V_f=0,25\%$) σε σύγκριση με την απόσταση των συνδετήρων στο διατμητικό μήκος των δοκών. Στο ίδιο διάγραμμα παρατίθενται κι οι προβλέψεις της διατμητικής αντοχής κατά Model Code [68] με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα έρευνα για την θλιπτική και καμπτική αντοχή σε επίπεδο υλικού καθώς και για τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα σπλισμού (σύμβολα με κόκκινο χρώμα: κύκλος μη ινοπλισμένες δοκοί αναφοράς, τετράγωνο και Χ ινοπλισμένες δοκοί με $V_f=0,50\%$ και με τρίγωνο ινοπλισμένες δοκοί με $V_f=0,25\%$). Επιπροσθέτως με μπλέ χρώμα υπολογίστηκε το φορτίο που οδηγεί σε καμπτική αστοχία λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση. Εν προκειμένω, επιβεβαιώνεται η παραδοχή που έγινε κατά τον σχεδιασμό των δοκών, ότι η καμπτική αντοχή παραμένει σταθερή με την εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος, εφόσον σε πολλές περιπτώσεις η θλιπτική αντοχή μειώθηκε περίπου στο μισό σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, για την ανάγνωση του παρακάτω διαγράμματος, ανακεφαλαιώνοντας, οι τιμές με κόκκινο και μπλε χρώμα αποτελούν τιμές πρόβλεψης του φορτίου αστοχίας, λαμβάνοντας υπόψη τις υφιστάμενες μηχανικές ιδιότητες (θλιπτική αντοχή f_c , και εναπομείνουσα καμπτική αντοχή -residual strength- f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{LOP} και μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα σπλισμού) των συνθέσεων σκυροδέματος. Σε κάθε περίπτωση θα έπρεπε οι πειραματικές τιμές του φορτίου αστοχίας (μαύρα σημεία) που προέκυψαν να είναι ίσες ή μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές πρόβλεψης του διατμητικού φορτίου (κόκκινα σημεία) κατά Model Code (2010) [68], χωρίς όμως να υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τιμές του καμπτικού φορτίου που προκαλεί την αστοχία (μπλε χρώμα). Στην πράξη η παραπάνω περιγραφή μεταφράζεται στην κατάσταση πως αν το φορτίο που προκαλεί διατμητική αστοχία ξεπεράσει το φορτίο που προκαλεί καμπτική αστοχία, τότε σημαίνει πως το δοκίμιο θα έχει αστοχήσει καμπτικά.

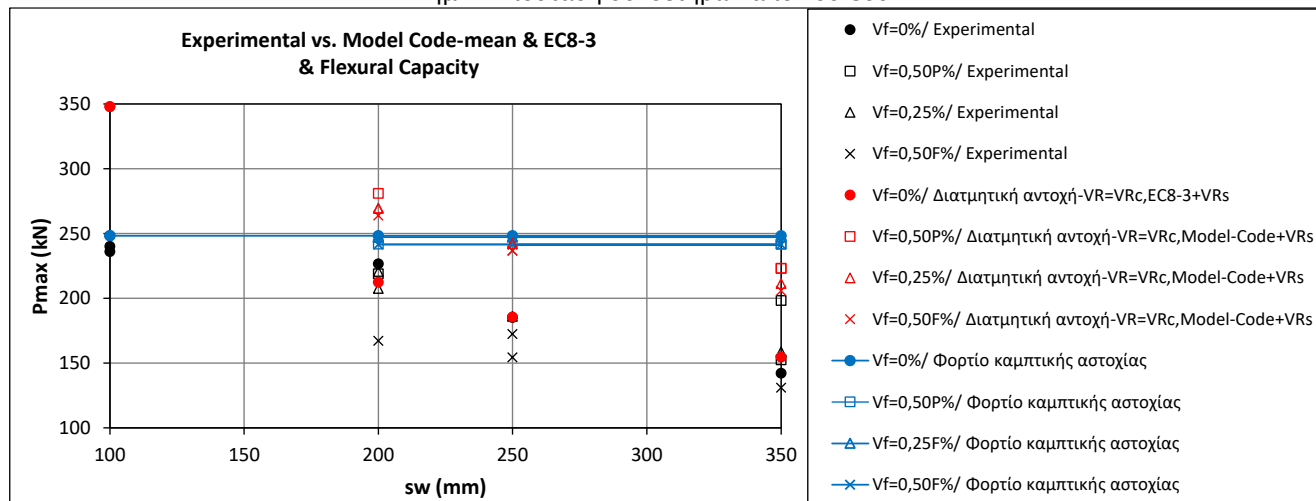
Σύμφωνα με την προαναφερθείσα μη αναμενόμενη συμπεριφορά σε επίπεδο υλικού, στις συνθέσεις με ογκομετρικό ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$ μετρήθηκε περίπου η μισή θλιπτική αντοχή σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση αναφοράς και σε σχέση με την σύνθεση με ποσοστό ινών $V_f=0,25\%$. Ωστόσο, για ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$ σημειώθηκαν σημαντικά αυξημένες τιμές εναπομένουσας καμπτικής αντοχής (residual strength) f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{LOP} σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση αναφοράς και σε σχέση με την σύνθεση με ποσοστό ινών $V_f=0,25\%$, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 8, κι όπως ήταν αναμενόμενο σε σχέση με τα συμπεράσματα

της βιβλιογραφίας. Επομένως, τα παραπάνω στοιχεία, τα οποία εισάγονται στον τύπο υπολογισμού της διατμητικής αντοχής κατά Model Code [68] μέσω των όρων της απόλυτης παραμένουσας εφελκυστικής αντοχής f_{ftw} , της εφελκυστικής αντοχής f_{ct} και της θλιπτικής αντοχής f_c του σκυροδέματος, οδηγούν στις τιμές που αποτυπώνονται στα διαγράμματα της Εικόνας 51. Όπως είναι εμφανές, η διατμητική αντοχή για ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$ προκύπτει περίπου ίδια και για κάποιες περιπτώσεις μικρότερη από την διατμητική αντοχή για ποσοστό ινών $V_f=0,25\%$, κάτι το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο. Παρόλα αυτά, εφόσον στην παρούσα έρευνα στην περίπτωση των δοκών με ποσοστό $V_f=0,50\%$ εμφανίστηκε περίπου η μισή θλιπτική αντοχή σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση αναφοράς και σε σχέση με την σύνθεση με ποσοστό ινών $V_f=0,25\%$, δικαιολογούνται οι μειωμένες τιμές πρόβλεψης, παρόλες τις αυξημένες τιμές καμπτικής αντοχής. Επίσης, η τιμή της εφελκυστικής αντοχής που εισάγεται στον εν λόγω τύπο, σύμφωνα με τις οδηγίες του Model Code [68], λαμβάνεται ως η τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς, χωρίς την προσθήκη ινών, η οποία εμφανίστηκε εν προκειμένω, μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του σκυροδέματος με ποσοστό ινών $V_f=0,50\%$, γεγονός που μειώνει ακόμα περισσότερο την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής για αυτό το ποσοστό ινών.

Για συμβατικό σκυρόδεμα χωρίς διατμητικό οπλισμό οι Folino et al. (2020) [64] συμπέραναν πως ο Model Code [68] οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα και χρήζει αναθεώρησης. Εδώ ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις οδηγεί σε μη συντηρητικά αποτελέσματα. Εν προκειμένω, όλες οι δοκοί, εκτός από τα δοκίμια που ήταν επαρκώς οπλισμένα έναντι διάτμησης με συνδετήρες ανά 100mm, αστόχησαν διατμητικά. Επομένως, οι τιμές της διατμητικής αντοχής κατά Model Code [68] (κόκκινα σημεία), θα έπρεπε σε όλες τις περιπτώσεις να είναι μικρότερες από τις πειραματικές τιμές (μαύρα σημεία), κάτι το οποίο δεν έγινε για καμία από τις διατάξεις όπλισης, ειδικά στην περίπτωση που συγκρίνονται οι προβλέψεις της διατμητικής αντοχής με την χρήση μέσων τιμών μηχανικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τιμές σχεδιασμού, για τις περιπτώσεις δοκών με συνδετήρες ανά 350mm και με έναν συνδετήρα στο διατμητικό μήκος, τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής κατά Model Code. Ωστόσο για όλες τις υπόλοιπες διατάξεις συνδετήρων (ανά 200, 250mm και με κανέναν συνδετήρα στο διατμητικό μήκος) είναι πάλι μη ασφαλής. Πρέπει να σημειωθεί πως ο τύπος του Model Code [68] είναι διαμορφωμένος κυρίως για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής σε μέλη από συμβατικό σκυρόδεμα, κι όχι ελαφροσκυρόδεμα. Ως εκ τούτου, δεν έχει ληφθεί υπόψη η μειωμένη απόκριση που έχει από την φύση του το ελαφροσκυρόδεμα στους μηχανισμούς που συνεισφέρουν σε τέμνουσα. Στον Model Code [68] λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω μηχανισμοί: (α) η δράση βλήτρου μέσα από τον όρο του εφελκυστικού οπλισμού κι ενός συντελεστής, (β) ο μηχανισμός τόξου μέσα από την θλιπτική αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα, καθώς και από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος η οποία συνεισφέρει στον αναπτυσσόμενο διαγώνιο-εγκάρσιο εφελκυσμό, (γ) η συνεισφορά του αρηγμάτωσης του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης και (δ) η μεταφορά εφελκυστικών δυνάμεων κάθετα στην διεύθυνση της διαγώνιας ρωγμής, λόγω της ύπαρξης των ινών, μέσα από τον όρο της απόλυτης παραμένουσας εφελκυστικής αντοχής επί έναν συντελεστή. Όλοι αυτοί οι παραπάνω μηχανισμοί, στην περίπτωση του Model Code [68] για συμβατικό σκυρόδεμα, λαμβάνονται υπόψη υψωμένοι εις το 1/3. Επομένως, σύμφωνα με την παραπάνω παρατήρηση με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει ανάγκη ανασχηματισμού του εν λόγω τύπου πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής, λαμβάνοντας υπόψη μέσω των εκάστοτε συντελεστών μειωμένα τον κάθε μηχανισμό, για την περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος. Οι λόγοι για τους οποίους το ελαφροσκυρόδεμα αποκρίνεται μειωμένα έναντι τέμνουσας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα παρατίθενται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.3.

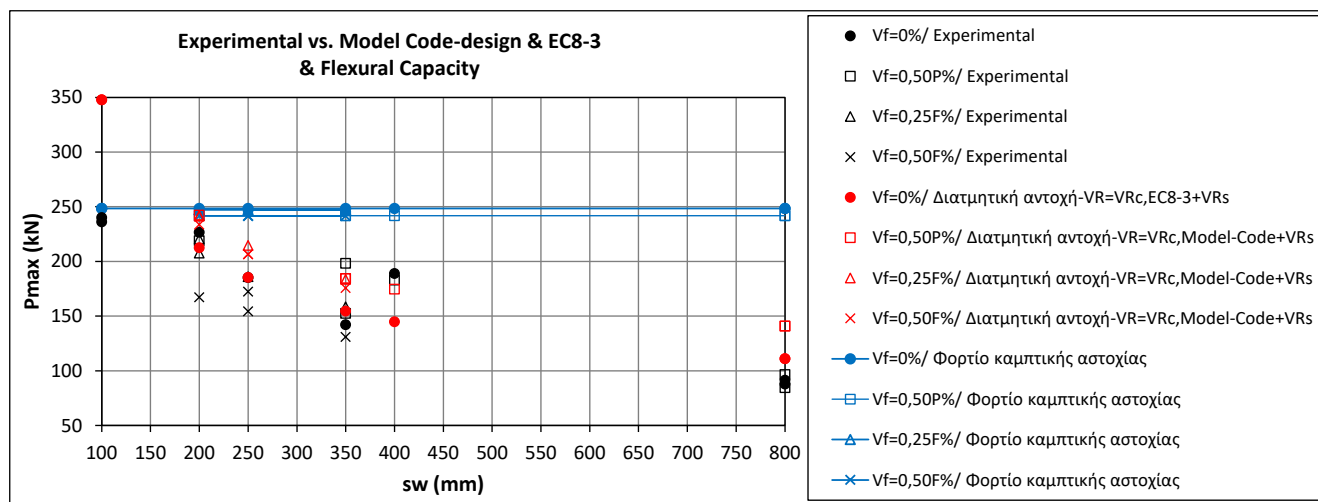


Σημ.1: Απόσταση συνδετήρων από 100-800mm

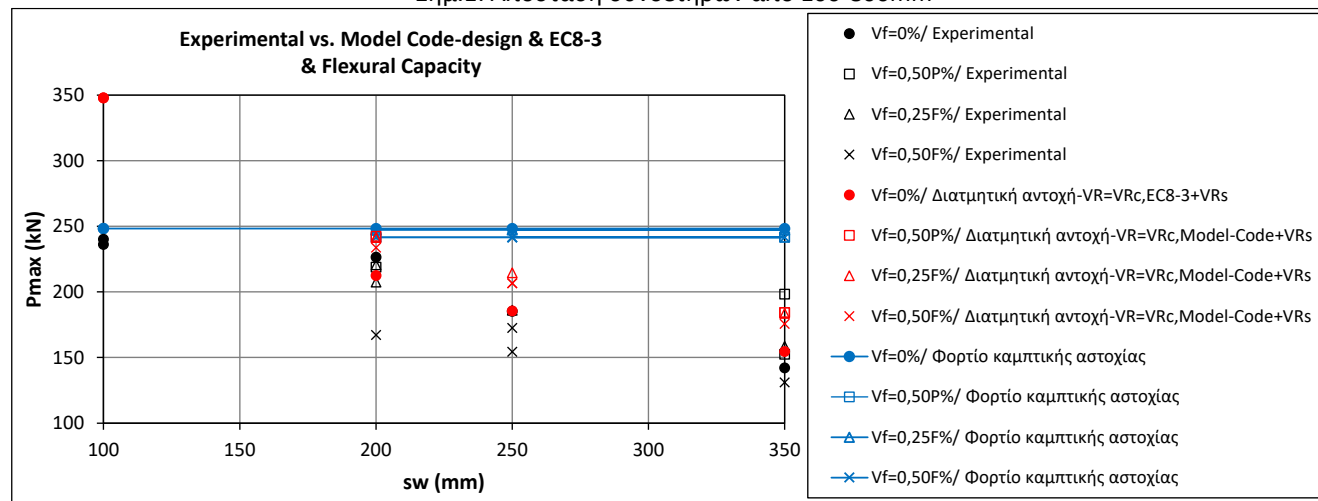


Σημ.2: Απόσταση συνδετήρων από 100-350mm

(α) τιμές πρόβλεψης της αντοχής με βάση μέσες πειραματικές τιμές



Σημ.1: Απόσταση συνδετήρων από 100-800mm

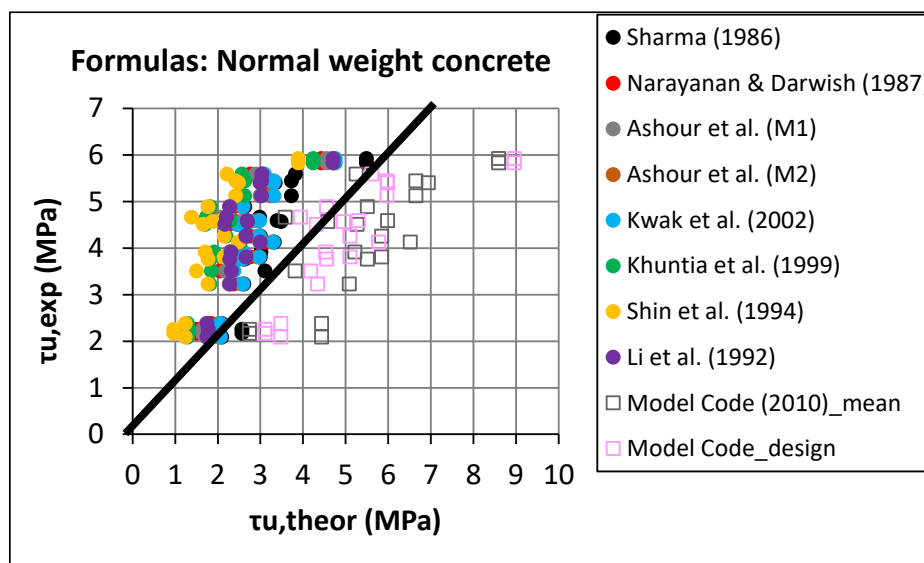


Σημ.2: Απόσταση συνδετήρων από 100-350mm

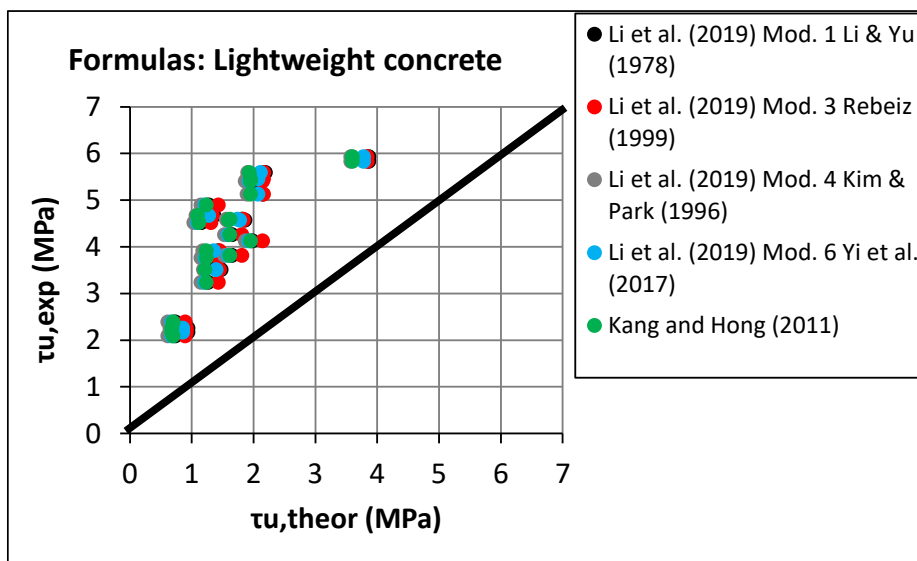
(β) τιμές πρόβλεψης της αντοχής με βάση πειραματικές τιμές σχεδιασμού

Εικόνα 51. Συνολικό συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών αποτελεσμάτων μέγιστου φορτίου σε σύγκριση με την απόσταση συνδετήρων και πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής κατά EC8-3 [99] και Model Code (2010) [68] για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, αντίστοιχα

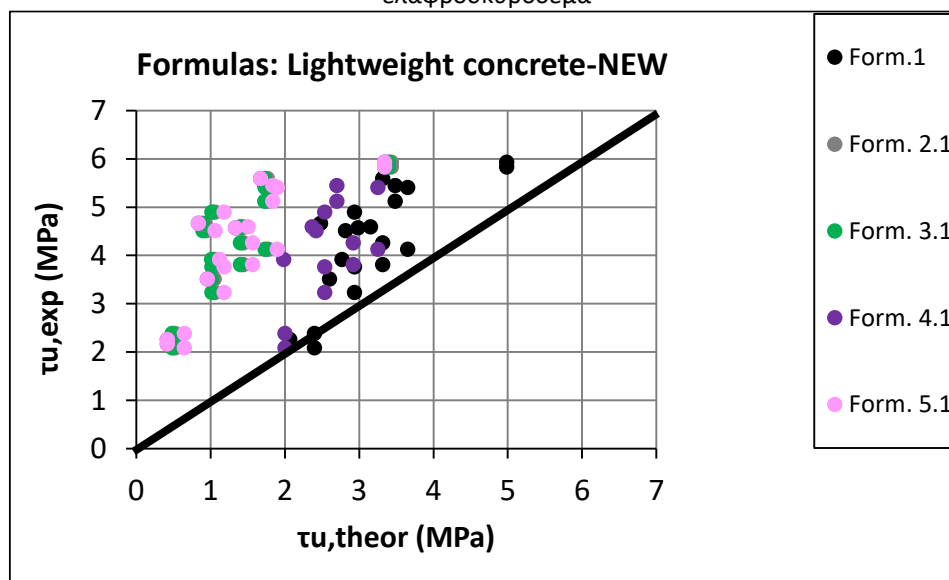
Παρακάτω, γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής για τις πειραματικές τιμές της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής που σημειώθηκαν για τύπους της βιβλιογραφίας που σχηματίστηκαν: (α) για συμβατικό σκυρόδεμα, λαμβάνοντας μειωμένη την συνεισφορά των μηχανισμών που αντιτίθενται σε τέμνουσα μέσα από τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος (Εικόνα 52 (α)), (β) για ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα (Εικόνα 52 (β)), (γ) σε αυτήν την έρευνα μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας για δοκούς ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος (Εικόνα 52 (γ)). Όπως αποδείχθηκε και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας όλοι οι τύποι που είχαν σχηματιστεί για συμβατικό σκυρόδεμα, λαμβάνοντας μειωμένη την συνεισφορά των μηχανισμών που αντιτίθενται σε τέμνουσα μέσα από τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος είναι κατάλληλοι για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής δοκών ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με πιο ακριβείς τους τύπους από Sharma (1986) [74], Narayanan & Darwish (1987) [71], Ashour et al. (1992) (M2) [70] και Kwak et al. (2002) [42]. Οι τύποι από Ashour et al. (M1) [42], Khuntia et al. (1999) [73], Shin et al. (1994) [72] και Li et al. (1992) [48] κρίνονται κατάλληλοι για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής δοκών ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, αλλά είναι πιο συντηρητικοί από τους προαναφερθέντες. Ο τύπος του Model Code (2010) [68] κρίνεται κατά της ασφαλείας, κι ακατάλληλος για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Οι τύποι που προτάθηκαν από τους Li et al. (2019) [19] και Kang & Hong (2011) [18] για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος κρίνονται κι αυτοί κατάλληλοι αλλά είναι αρκετά πιο συντηρητικοί από αυτούς που έχουν προταθεί για ινοπλισμένο συμβατικό σκυρόδεμα. Τέλος, κι οι τύποι που προτάθηκαν στην παρούσα έρευνα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας κρίνονται κατάλληλοι για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής, με πιο κατάλληλο τον 1 και 4.1, και αρκετά πιο συντηρητικούς τους τύπους 2.1, 3.1 και 5.1.



(α) τύποι που είχαν δημιουργηθεί για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής σε συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα



(β) τύποι που είχαν δημιουργηθεί για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής σε ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα



(γ) τύποι που δημιουργήθηκαν στην παρούσα έρευνα για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής σε ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα

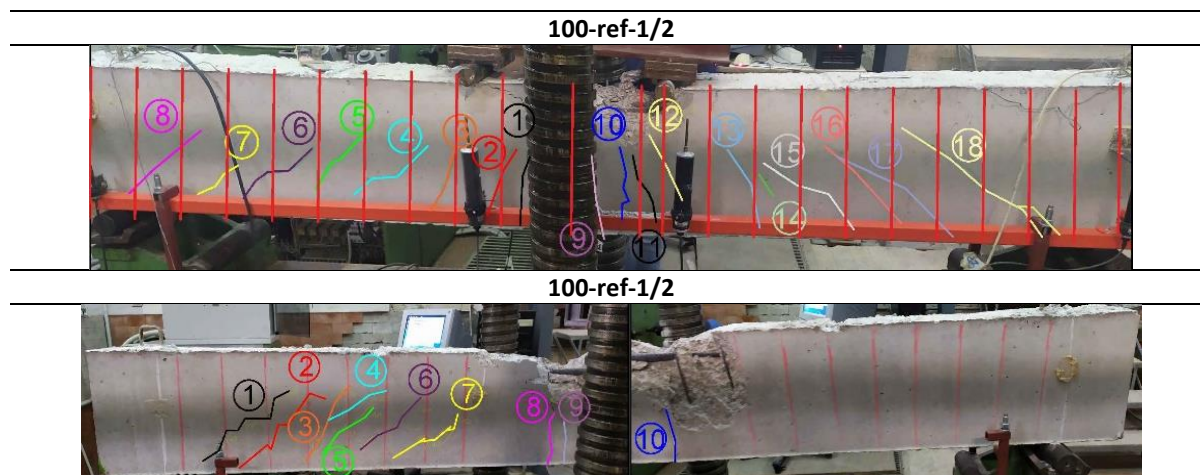
Εικόνα 52. Συγκεντρωτικά συγκριτικά διαγράμματα πειραματικών τιμών διατμητικής αντοχής σε σχέση με τις τιμές πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής με βάση τους τύπους της βιβλιογραφίας που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 2.5

3.4.4.3. Εξέλιξη ρηγμάτωσης

Πέρα από την λήψη των στοιχείων του φορτίου και της μετατόπισης κατά την διάρκεια της δοκιμής τεσσάρων σημείων των δοκών ελαφροσκυροδέματος, έγινε και μία προσπάθεια καταγραφής των ανοιγμάτων της ρωγμής. Οι μετρήσεις δεν είναι συνεχείς, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έναν ποιοτικό μακροσκοπικό σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Γενικότερα η καταγραφή των ρωγμών κατά την διάρκεια των δοκιμών είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την διεθνή βιβλιογραφία, γι αυτό και έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένες μέθοδοι οι οποίες είναι σε θέση να καταγράφουν συνεχώς το άνοιγμα της ρωγμής, μέσα από την λήψη φωτογραφιών σε σταθερό βήμα χρόνου (μέθοδος φωτογραμμομετρίας). Η λήψη των φωτογραφιών συγχρονίζεται με την λήψη δεδομένων φορτίου και μετακίνησης, έτσι ώστε να μπορέσει να υπάρξει μία συσχέτιση μεταξύ τους.

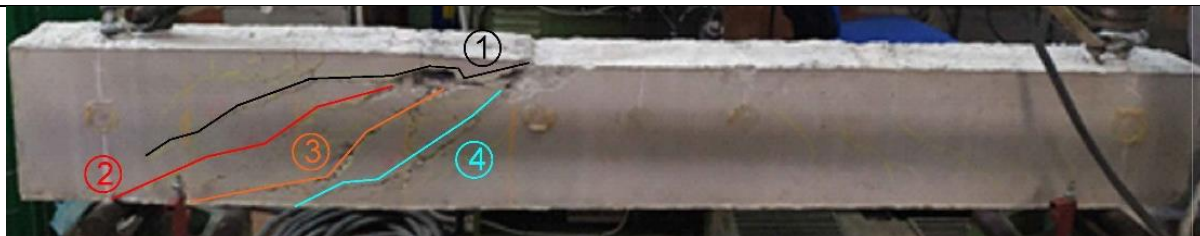
Εν προκειμένω, στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας, επιλέχθηκε να μετρηθούν οι ρωγμές με ρωγμόμετρο. Ακολούθησαν δύο μεθοδολογίες καταγραφής των ρωγμών: (α) στην μη ινοπλισμένη σύνθεση και στην σύνθεση με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50P% μετρήθηκε το άνοιγμα της ρωγμής μετά το τέλος της δοκιμής, στην αποφόρτιση των δοκιμίων και (β) στις συνθέσεις με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,25F% και 0,50F% μετρήθηκε η εξέλιξη του ανοίγματος της ρωγμής για συγκεκριμένες στάθμες επιβαλλόμενης μετακίνησης. Οι μετρήσεις αυτές μαζί με σκαριφήματα του μοτίβου των ρωγμών παρατίθενται στις Εικόνες 53-58. Στις δοκούς για τις οποίες υπάρχουν και συνεχείς μετρήσεις των ανοιγμάτων των ρωγμών, η αρίθμηση και το χρώμα επισήμανσης των ρωγμών πάνω στις φωτογραφίες των δοκιμίων των δοκών συμπίπτουν με την αντίστοιχη αρίθμηση και χρώμα στα αντίστοιχα διαγράμματα εξέλιξης των ρωγμών.

Παρακάτω θα γίνει ένας μακροσκοπικός σχολιασμός και σύγκριση στις εξής ιδιότητες: (α) στην ποσότητα των ρωγμών στις περιπτώσεις μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, (β) στην γωνία των ρωγμών στις περιπτώσεις μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος και (γ) στα αναπτυσσόμενα ανοίγματα των ρωγμών κατά την διάρκεια και μετά το πέρας των δοκιμών στις περιπτώσεις μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος.

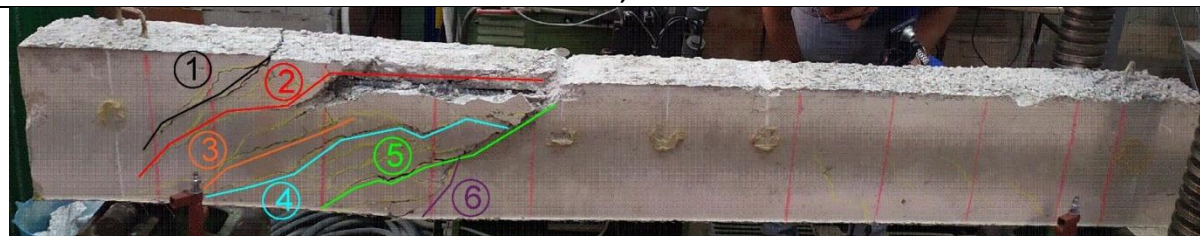


Εικόνα 53. Pattern ρηγμάτωσης για τα δοκίμια δοκών με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 100mm- δοκίμια αναφοράς

200-ref



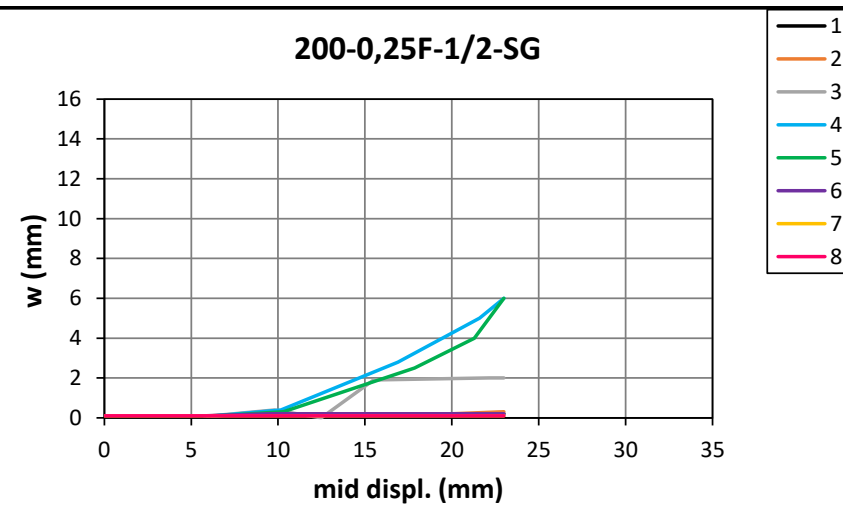
200-0,50P



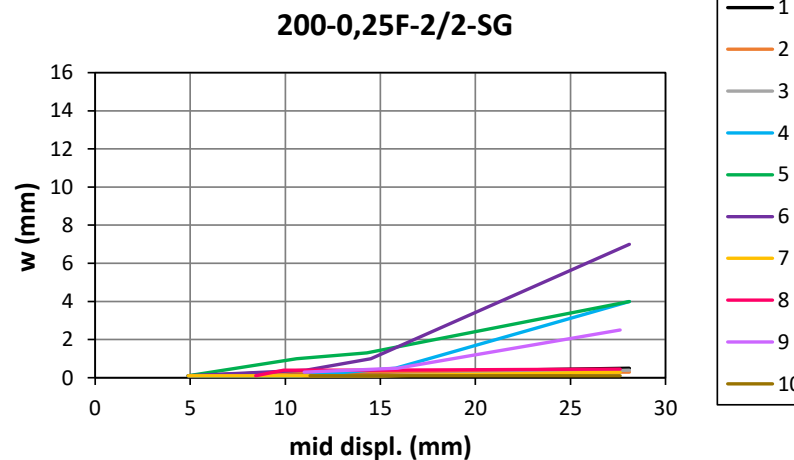
200-0,25F-1/2



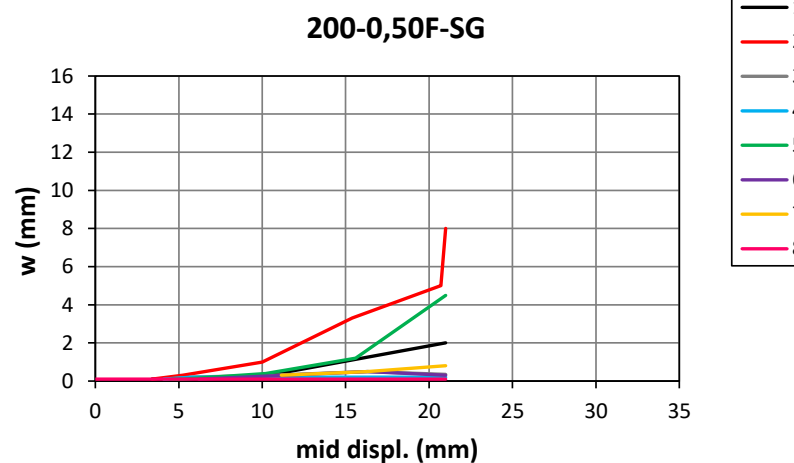
200-0,25F-1/2-SG



200-0,25F-2/2

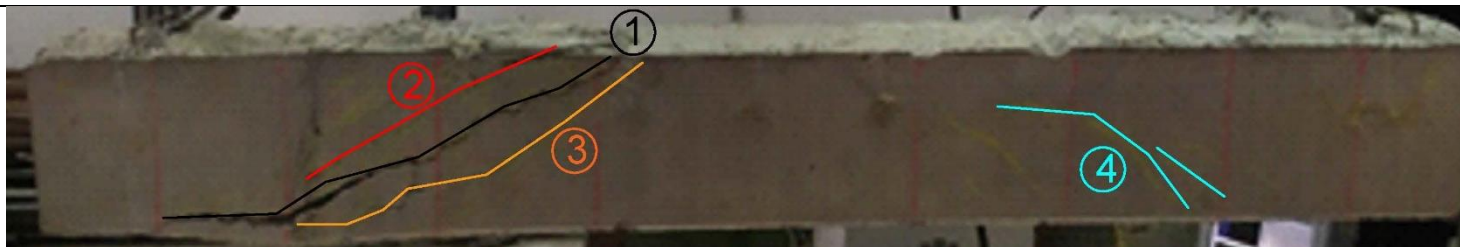


200-0,50F

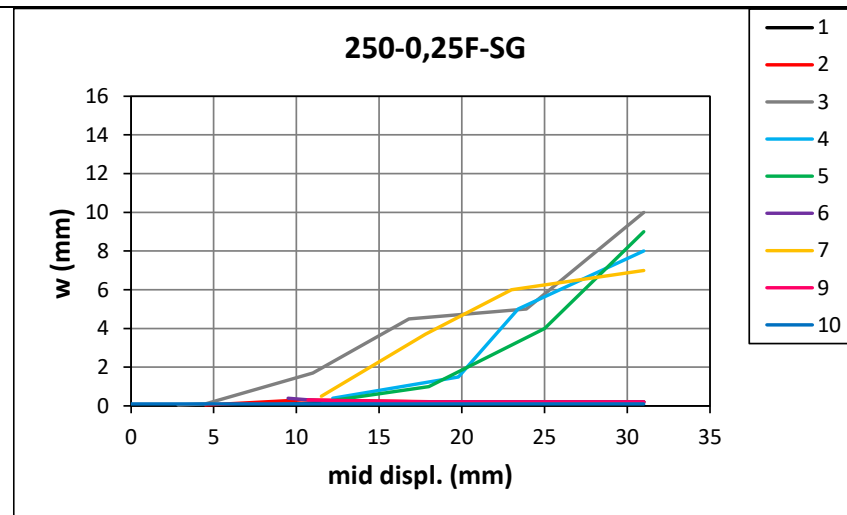
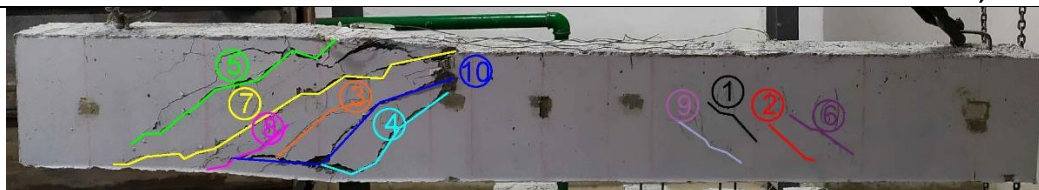


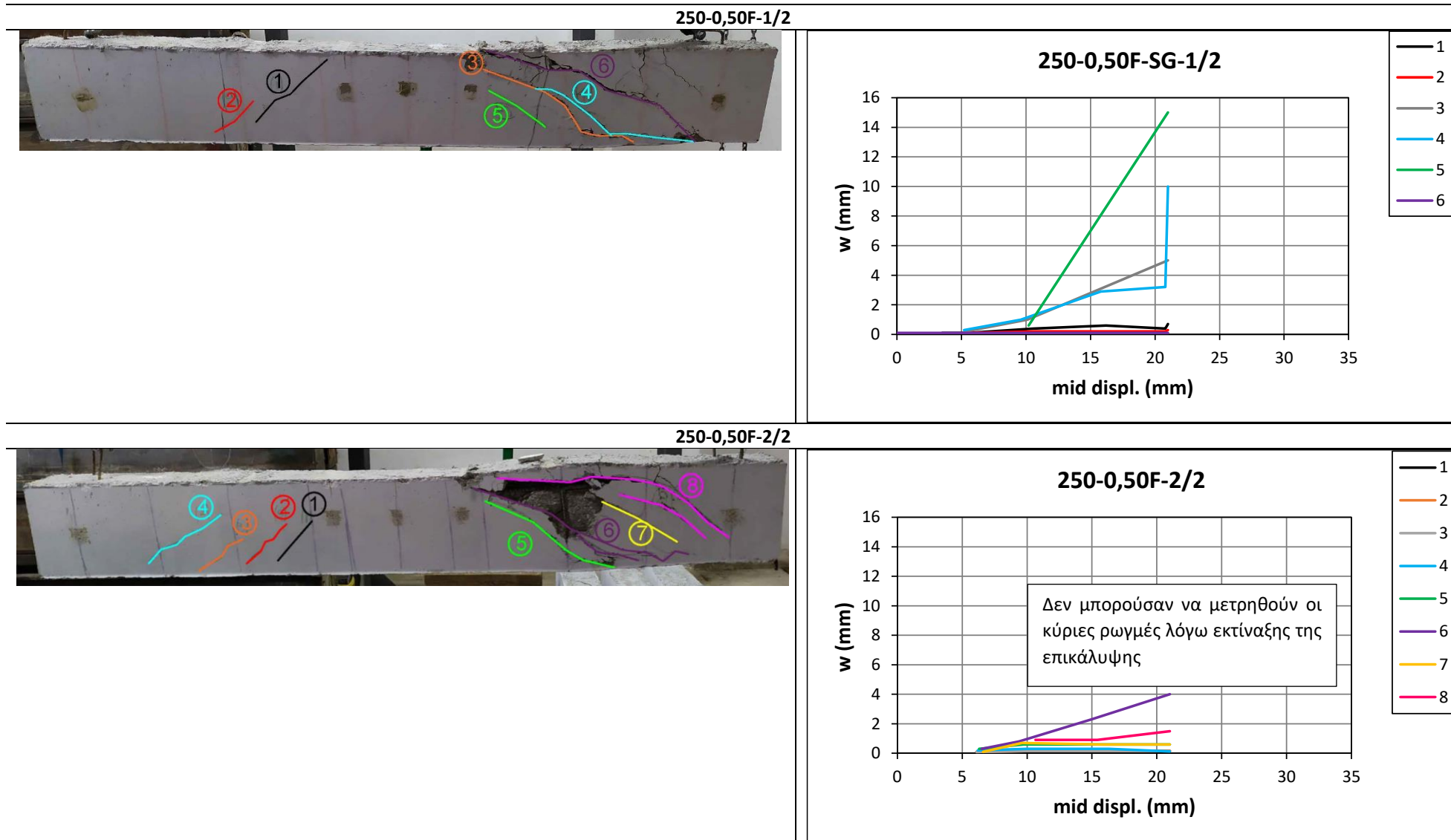
Εικόνα 54. Pattern ρηγμάτων για τα δοκίμια δοκών με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 200mm για ογκομετρικά ποσοστά συνδετήρων 0,25% και 0,50%

250-ref



250-0,25F

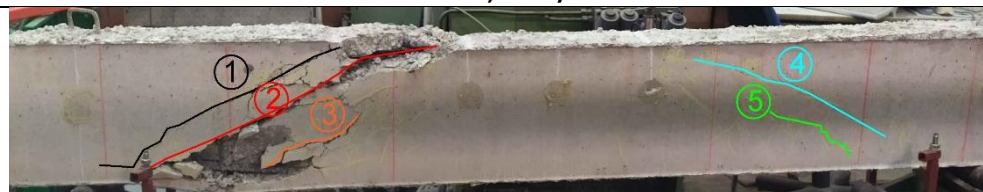




350-ref



350-0,50P-1/2



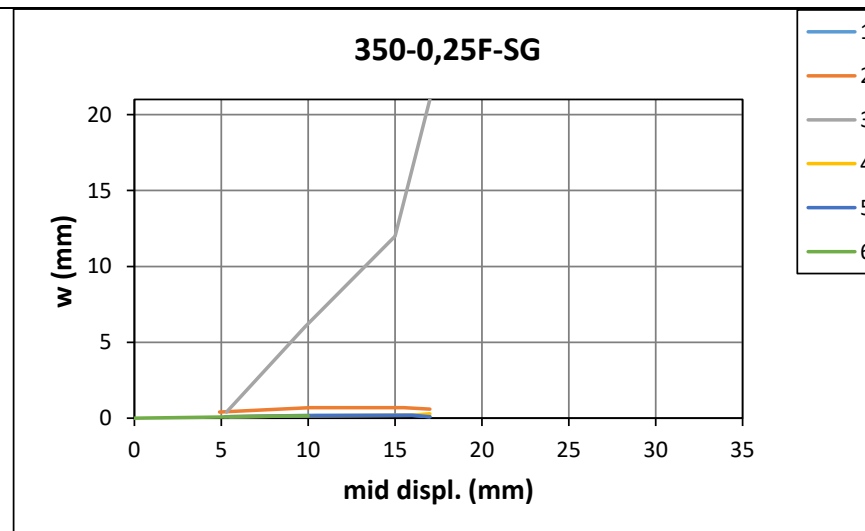
350-0,50P-2/2

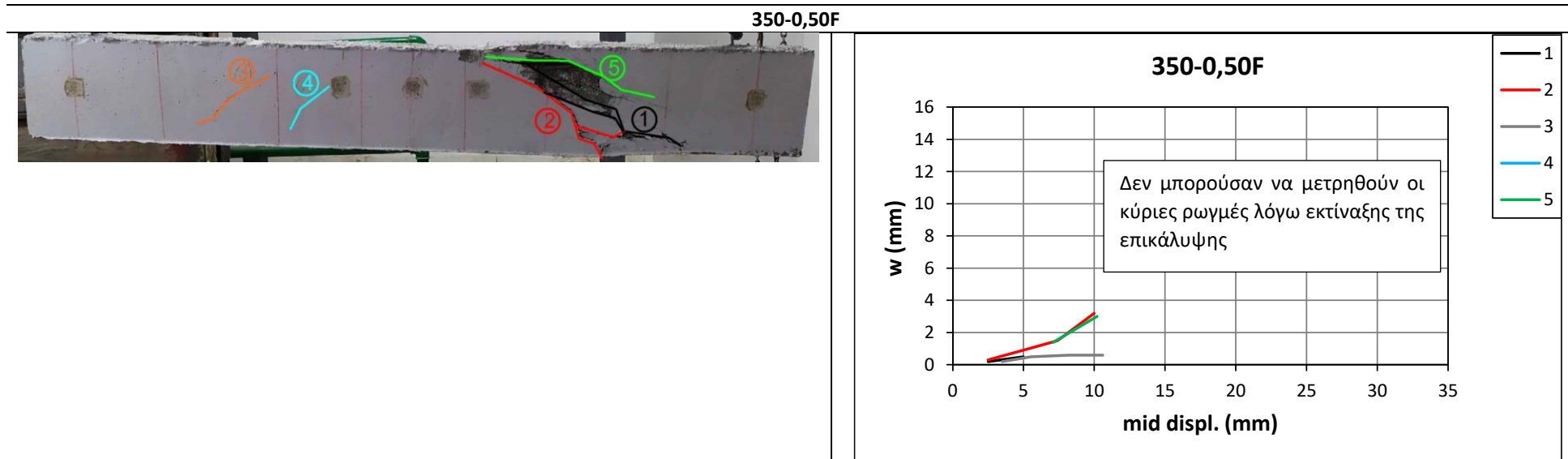


350-0,25F

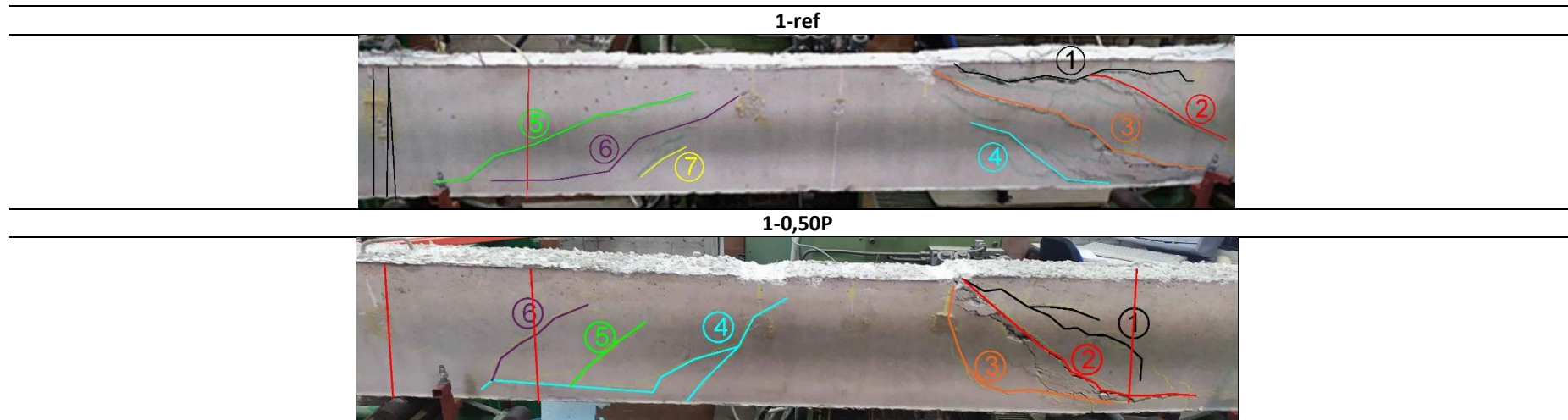


350-0,25F-SG



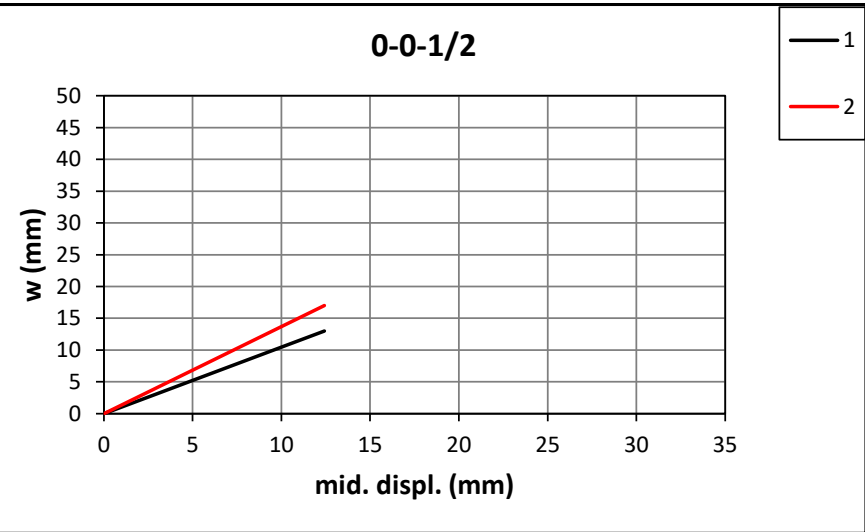


Εικόνα 56. Pattern ρηγμάτωσης για τα δοκίμια δοκών με συνδετήρες τοποθετημένους ανά 350mm για ογκομετρικά ποσοστά συνδετήρων 0,25% και 0,50%

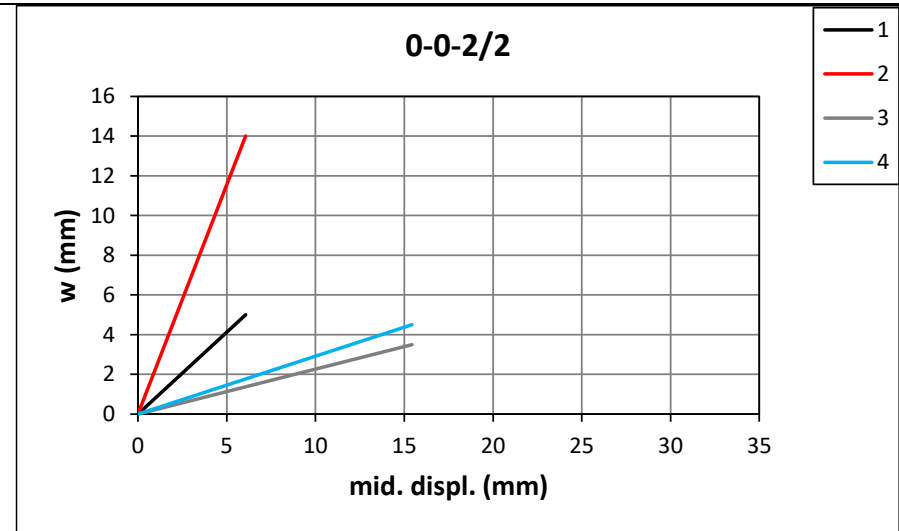


Εικόνα 57. Pattern ρηγμάτωσης για τα δοκίμια δοκών με έναν συνδετήρα στο διατμητικό μήκος της δοκού για ογκομετρικά ποσοστά συνδετήρων 0,25% και 0,50%

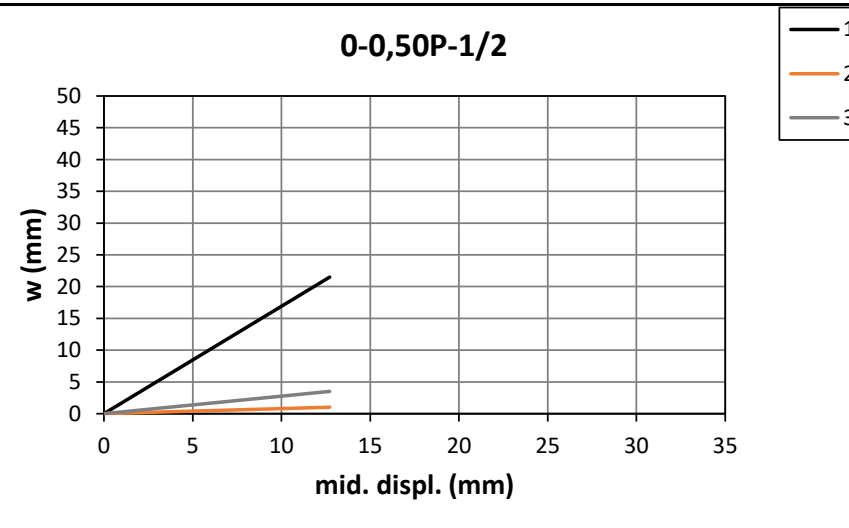
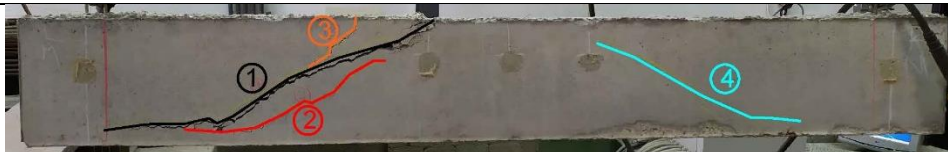
0-ref-1/2



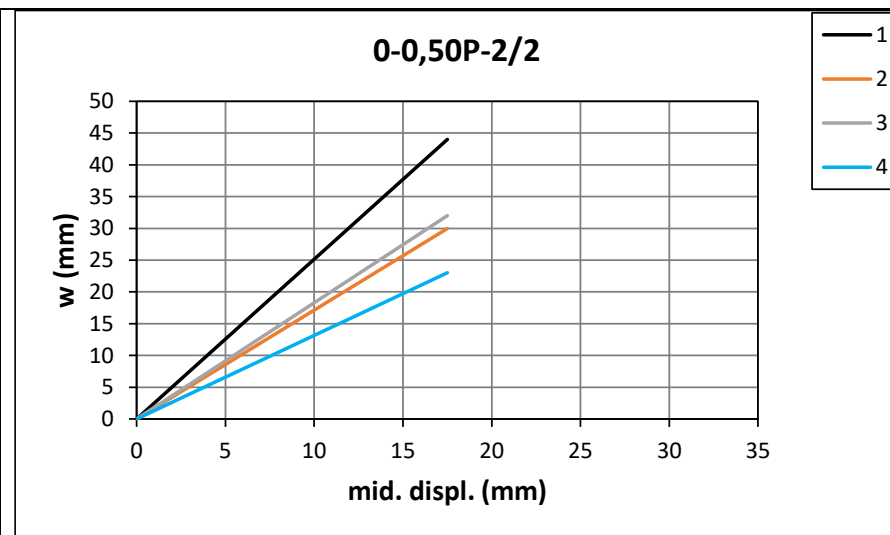
0-ref-2/2



0-0,50P-1/2

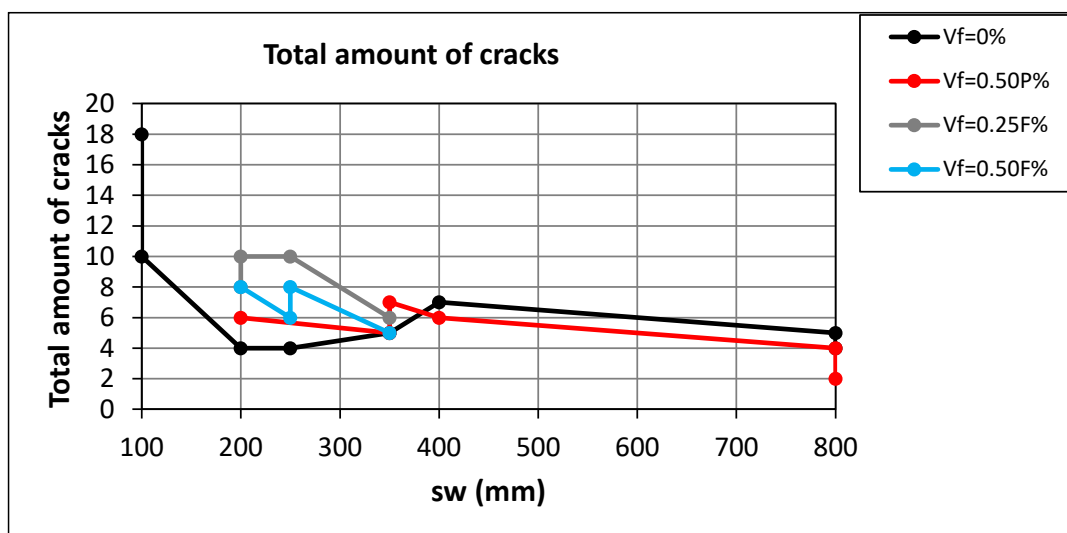


0-0,50P-2/2

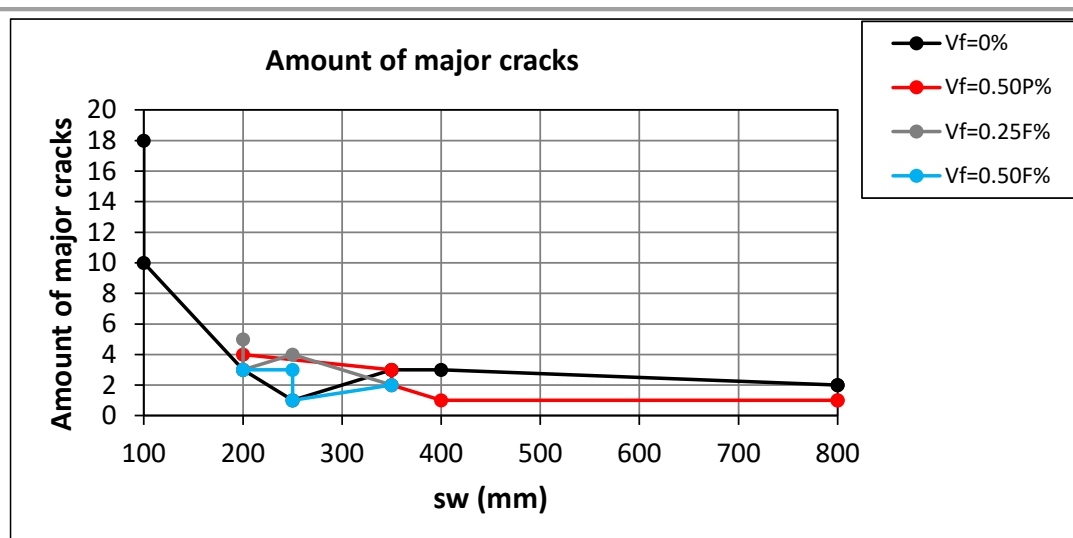


Εικόνα 58. Pattern ρηγμάτωσης για τα δοκίμια δοκών με κανέναν συνδετήρα για ογκομετρικά ποσοστά συνδετήρων 0,25% και 0,50%

Όπως σημειώνεται στην βιβλιογραφία, η προσθήκη ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος, εκτός από την βελτίωση στα μηχανικά του χαρακτηριστικά και στην πλαστιμότητα του προσφέρει και σημαντική βελτίωση στην εικόνα του μοτίβου της ρηγμάτωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ύπαρξη ινών στο σκυρόδεμα, βελτιώνει σημαντικά την πλαστιμότητα του, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της ποσότητας των ρωγμών -οι οποίες αναπτύσσουν μικρότερο άνοιγμα- για την εκτόνωση της ενέργειας, κι όχι στην ύπαρξη μίας κύριας ρωγμής που οδηγεί μετά την δημιουργία της σε σημαντική μείωση – έως και απώλεια- της φέρουσας των δοκών. Το παραπάνω συμπέρασμα αποτυπώνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 59 στο οποίο είναι εμφανές πως η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα συνεισφέρει στην ανάπτυξη πιο πλαστικής εικόνας ρηγμάτωσης, με περισσότερες, μικρότερου εύρους ρωγμές, έναντι λιγότερων κύριων ρωγμών. Αυτό ισχύει για τις δοκούς με διατμητικό οπλισμό ανά 200, 250 και 350mm κυρίως, στις οποίες αυξήθηκε το πλήθος των συνολικών αλλά και κύριων ρωγμών με την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος σε σχέση με τις μη ινοπλισμένες δοκούς αντίστοιχης διατμητικής όπλισης (Εικόνα 59 (α) & (β)). Δεν μπορεί να προκύψει κάποια συσχέτιση της αύξησης του πλήθους των ρωγμών ανάμεσα στα διαφορετικά ποσοστά ινών τόσο εξαιτίας της μικρής διαφοράς των εν λόγω ποσοστών μεταξύ τους όσο και εξαιτίας της μη αναμενόμενης συμπεριφοράς των εν λόγω συνθέσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, αυτό που μπορεί να προκύψει ως συμπέρασμα είναι πως για τις δοκούς με διατμητικό οπλισμό ανά 200, 250 και 350mm υπήρξε αύξηση της πλαστιμότητας όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 3.4.4.2.1., κάτι το οποίο αποτυπώθηκε και στην εικόνα της ρηγμάτωσης. Επίσης, επιβεβαιώθηκε πως οι ίνες στις δοκούς με έναν και κανέναν συνδετήρα στο διατμητικό τους μήκος, δεν προσέφεραν κάτι σε όρους πλαστιμότητας, εφόσον η μορφή αστοχίας τους αφορούσε κυρίως στην μόρφωση μίας κύριας διατμητικής ρωγμής στο διατμητικό μήκος των δοκών, τόσο στην περίπτωση μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος όσο και στην περίπτωση ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος.



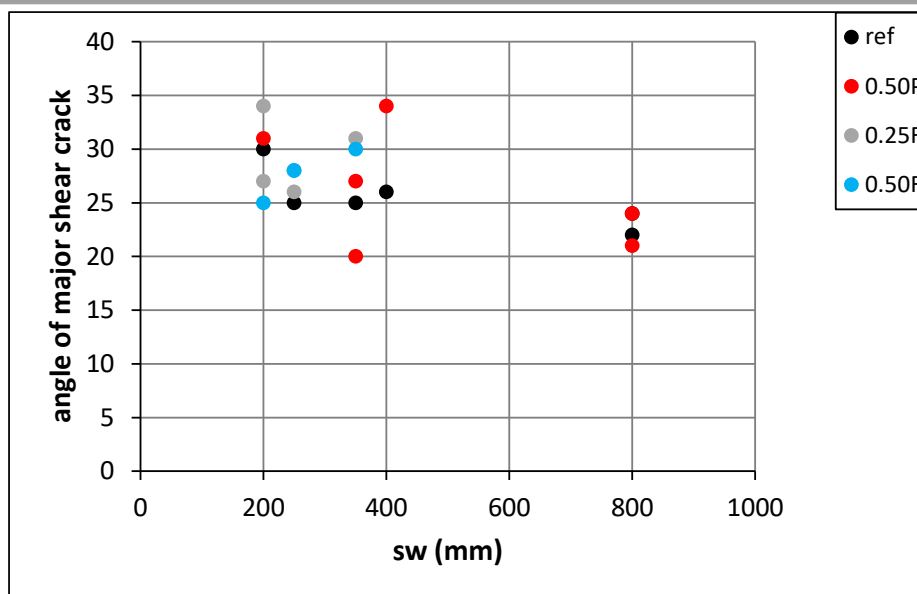
(α) Διάγραμμα συνολικού αριθμού ρωγμών σε σύγκριση με την απόσταση των συνδετήρων των δοκών ανά ογκομετρικό ποσοστό ινών



(β) Διάγραμμα αριθμού κύριων ρωγμών σε σύγκριση με την απόσταση των συνδετήρων των δοκών ανά ογκομετρικό ποσοστό ινών

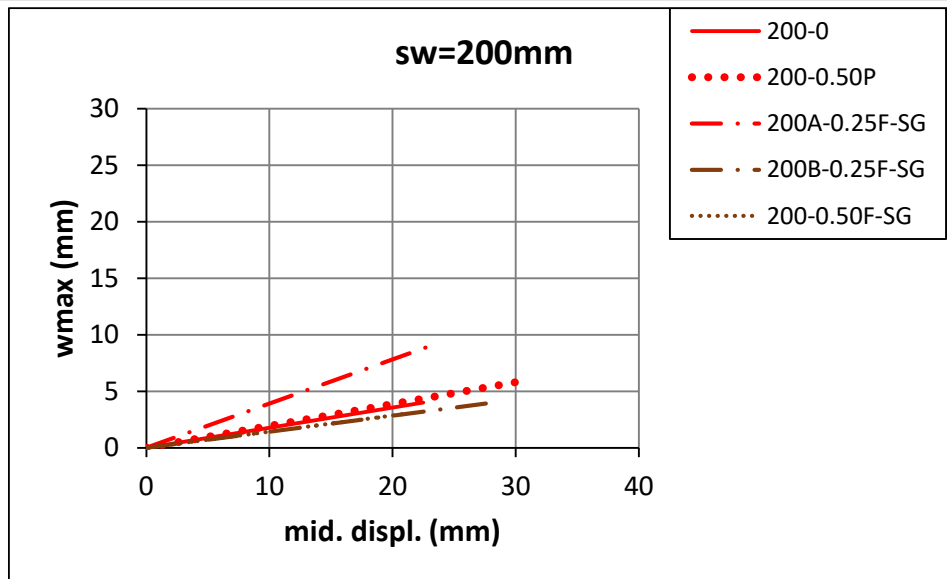
Εικόνα 59. Διαγράμματα αριθμού ρωγμών σε σύγκριση με την απόσταση των συνδετήρων των δοκών ανά ογκομετρικό ποσοστό ινών

Όπως είναι γνωστό, η συνεισφορά του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας περιγράφεται από τον EC2-1-1 [98], μέσα από το μοντέλο του δικτυώματος Moersch. Συνοπτικά, η συνολική αντίσταση ενός μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα αφορά στην συνεισφορά του διαγώνιου θλιπτήρα και στην ενεργοποίηση των συνδετήρων που τέμνει η κεκλιμένη διατμητική ρωγμή σε ένα μήκος $z=0,90d$. Εν προκειμένω, αυτό το μήκος είναι $z=0,90 \cdot 270 \sim 250\text{mm}$. Ως εκ τούτου, για την παρούσα έρευνα, θεωρείται πως η θεωρία του δικτυώματος Moersch μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως για τις δοκούς με συνδετήρες ανά 100, 200 και 250mm. Στο εν λόγω μοντέλο, αναφέρεται πως η γωνία του θλιπτήρα σκυροδέματος που αναπτύσσεται, συμπίπτει με την γωνία της διαγώνιας διατμητικής ρωγμής, εφόσον η ρωγμή αναπτύσσεται κάθετα στις κύριες εφελκυστικές τάσεις, διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση των θλιπτικών τάσεων. Επίσης, σημειώνεται πως σύμφωνα με τον EC2-1-1 [98], η γωνία του θλιπτήρα, άρα και της ρωγμής, για τον σχεδιασμό μπορεί να ληφθεί από 22 έως 45 μοίρες. Στην περίπτωση που η γωνία ληφθεί 22 μοίρες, μειώνεται η συνεισφορά του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος, αλλά μειώνεται και η ποσότητα των συνδετήρων, ενώ για γωνία θλιπτήρα 45 μοιρών συναντάται βελτιωμένη απόκριση του θλιπτήρα, αλλά και συνδετήρες σε πιο πυκνές αποστάσεις. Ως εκ τούτου, από τα παραπάνω, συμπεραίνεται πως για πιο πυκνές διατάξεις συνδετήρων η γωνία του θλιπτήρα άρα και της ρωγμής, θα είναι μεγαλύτερη, ενώ για πιο αραιές διατάξεις συνδετήρων η αντίστοιχη γωνία θα είναι μικρότερη, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται για τα δοκίμια αναφοράς, μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος (μαύρα σημεία), από το διάγραμμα της Εικόνας 60. Η προσθήκη ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος σε όλες τις περιπτώσεις οδηγεί σε αύξηση της γωνίας της ρωγμής. Η παραπάνω παρατήρηση είναι πιο εμφανής στις δοκούς με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50%, χωρίς να θεωρείται και αμελητέα η αύξηση της γωνίας που προκαλεί το ποσοστό ινών 0,25%. Η αύξηση της γωνίας της ρωγμής είναι εμφανής μέχρι την περίπτωση διάταξης συνδετήρων ανά 400mm. Αυτή η αύξηση θα μπορούσε να αποδοθεί στην πρόσθετη συνισταμένη συνεισφορά των ινών στο εξεταζόμενο μήκος z της δοκού, ως οπλισμός διάτμησης, αυξάνοντας την γωνία της ρωγμής, άρα και του θλιπτήρα. Υπάρχουν εξαιρέσεις στις οποίες παρουσιάστηκε μείωση της γωνίας της ρωγμής με την εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος, ωστόσο αυτά τα αποτελέσματα συμπίπτουν με μη αναμενόμενα αποτελέσματα δοκών και σε επίπεδο μηχανικών χαρακτηριστικών, επομένως δεν θα σχολιαστούν περαιτέρω στην παρούσα παράγραφο.

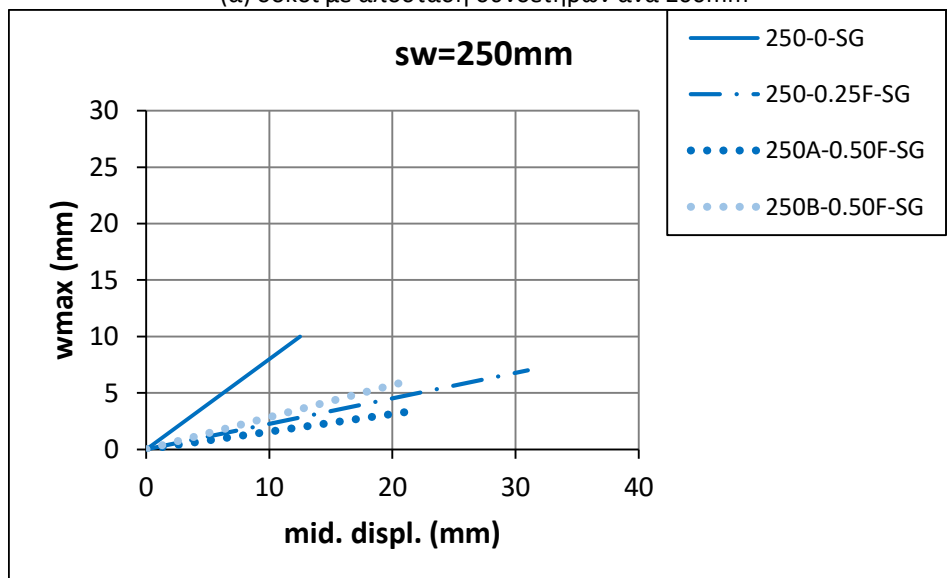


Εικόνα 60. Συγκριτικό διάγραμμα γωνίας κύριας διατμητικής ρωγμής σε σχέση με την απόσταση των συνδετήρων στο διατμητικό μήκος των δοκών για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

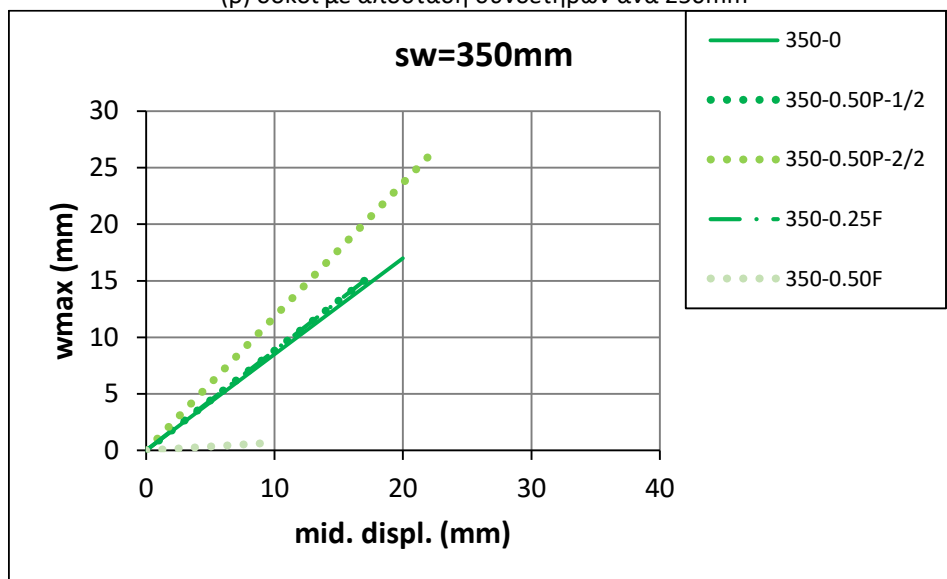
Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της Εικόνας 61 παρατίθενται οι μετρήσεις του ανοίγματος της κύριας διατμητικής ρωγμής μετά την αποφόρτιση του δοκιμίου στο πέρας της δοκιμής. Ως γενική παρατήρηση θα μπορούσε να καταγραφεί το γεγονός πως αυξανόμενης της απόστασης των συνδετήρων προκύπτουν μεγαλύτερα ανοίγματα ρωγμών, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ινών στο μίγμα σκυροδέματος ή όχι. Επίσης θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί το συμπέρασμα της βιβλιογραφίας πως με την εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος μειώνεται το άνοιγμα των ρωγμών. Εξαιρέσεις αποτελούν τα δοκίμια 200-0,25F-1/2 και 350-0,50P-2/2, τα οποία –όπως αναφέρθηκε και παραπάνω– παρουσίασαν μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα όμοια τους. Επομένως, τα αυξημένα ανοίγματα ρωγμών, ακόμα και σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς μη ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, θα μπορούσαν να τεκμηριωθούν με βάση την παραπάνω εξήγηση. Συνεπώς, οι ίνες μέσω της εξόλκευσης τους μετά την δημιουργία της ρωγμής, αναλαμβάνουν την μεταφορά εφελκυστικών δυνάμεων από το ένα τεμάχιο σκυροδέματος στο άλλο, εμποδίζοντας έτσι την περαιτέρω ασταθή ανάπτυξη των ρωγμών. Η παραπάνω εικόνα ήταν εμφανής, κυρίως, στα δοκίμια με συνδετήρες ανά 200 και 250mm, επιβεβαιώνοντας για άλλη μία φορά, πως για τόσο χαμηλά ποσοστά ινών, είναι απαραίτητη η ύπαρξη του ελάχιστου διατμητικού σπλισμού. Η δράση αυτή των ινών εξαρτάται τόσο από το ποσοστό τους στην σύνθεση ελαφροσκυροδέματος, όσο και από τις διαστάσεις τους, εφόσον ενεργοποιούνται μέσω της εξόλκευσης τους, η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από το μήκος αγκύρωσης των ινών, άρα και το συνολικό τους μήκος. Επομένως, θα μπορούσε να προταθούν μεγαλύτερα μήκη ινών σε περίπτωση που ήταν επιθυμητό να διατηρηθούν χαμηλά ογκομετρικά ποσοστά ινών, προκειμένου να διατηρηθούν χαμηλές τιμές ανοίγματος ρωγμών. Σημειώνεται πως για αποστάσεις συνδετήρων ανά 350mm και άνω, οι ίνες δεν φάνηκε να μπορούν να μειώσουν το άνοιγμα της ρωγμής, κάτι το οποίο για τόσο χαμηλά ποσοστά ινών είναι αναμενόμενο.



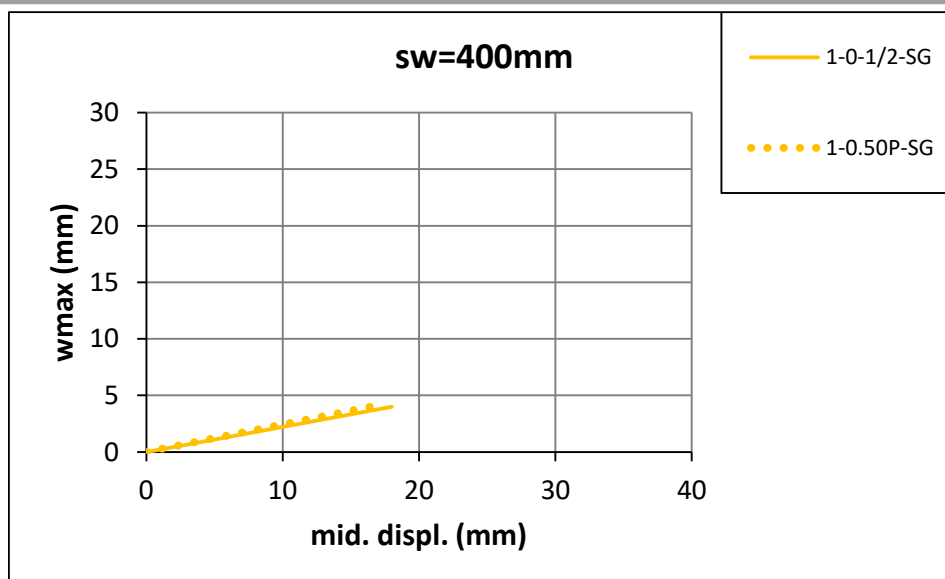
(α) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 200mm



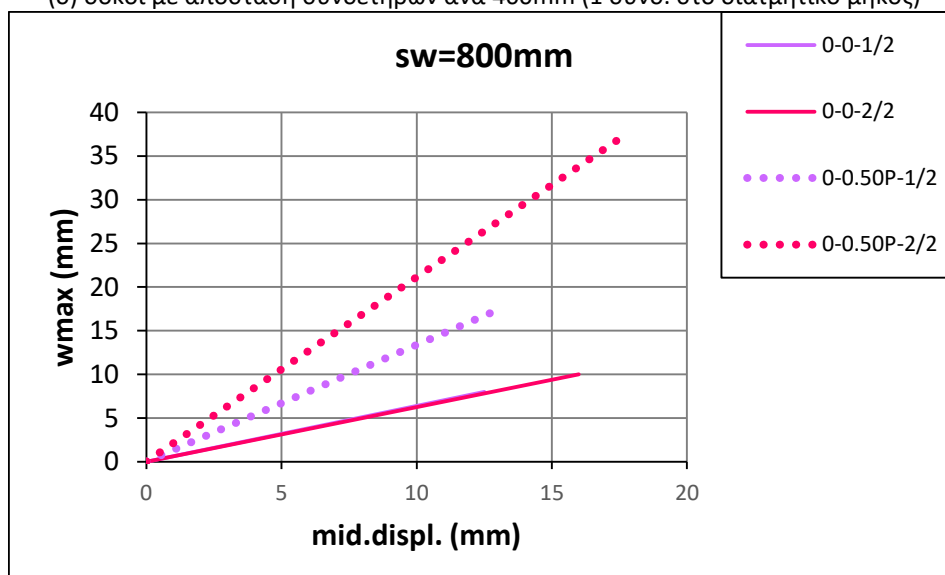
(β) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 250mm



(γ) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 350mm



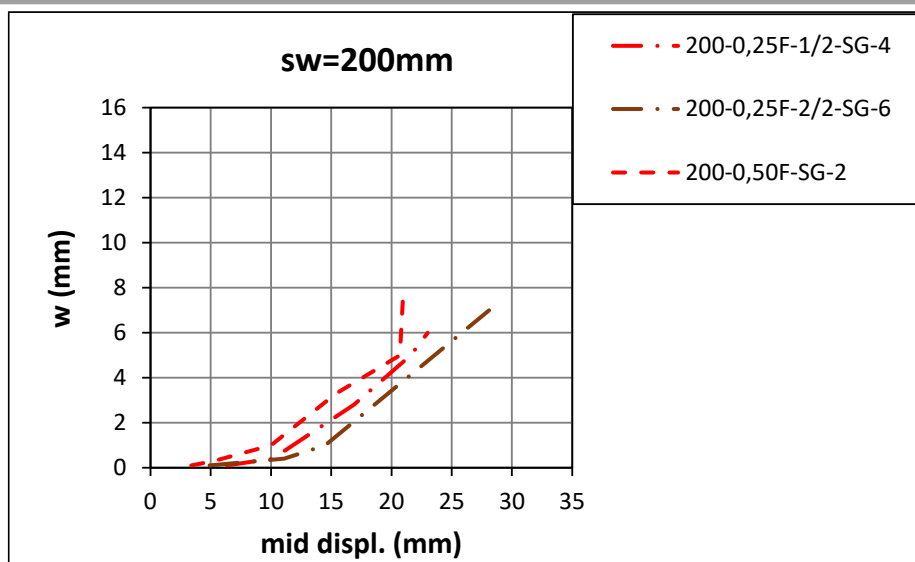
(δ) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 400mm (1 συνδ. στο διατμητικό μήκος)



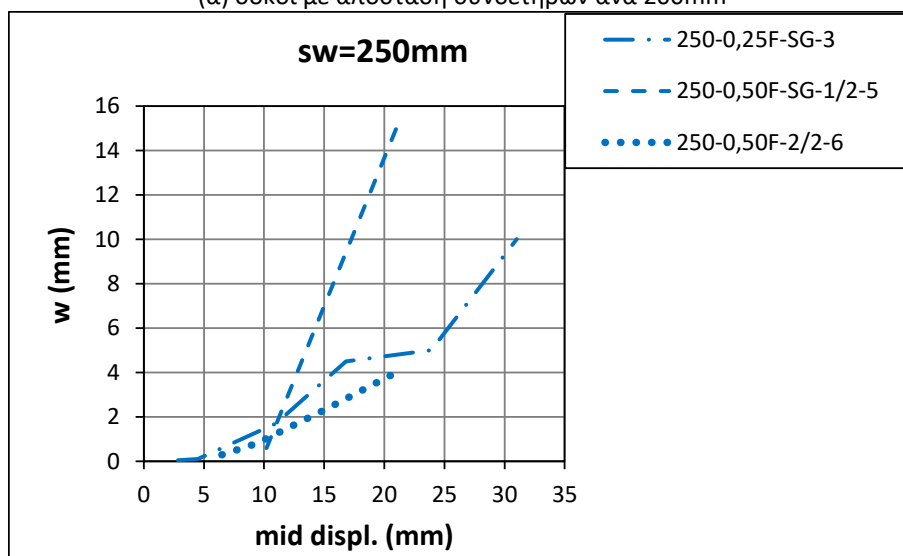
(ε) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 800mm (κανένας συνδετήρας στο διατμ. μήκος)

Εικόνα 61. Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστου ανοίγματος ρωγμής w_{max} σε σύγκριση με την μετατόπιση του κεντρικού σημείου της δοκού, μετά την αποφόρτιση της δοκού στο τέλος της δοκιμής για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

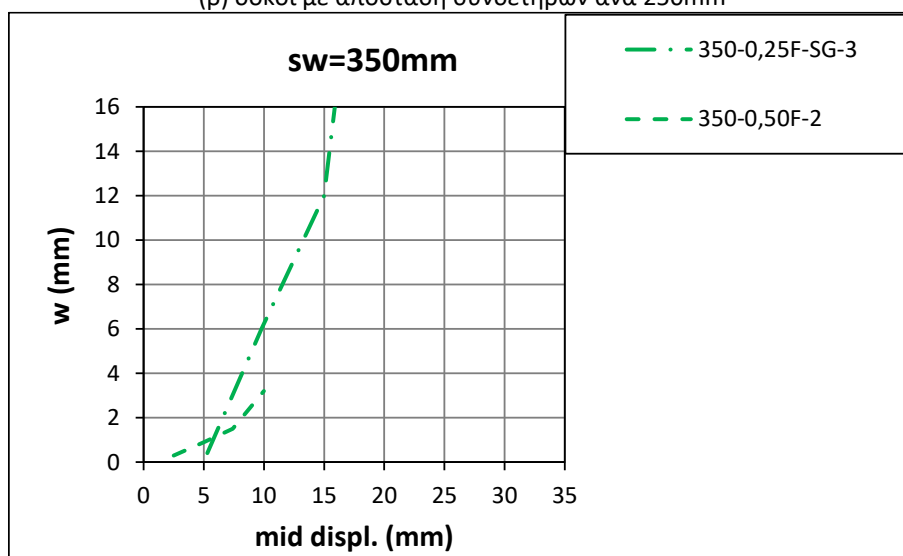
Στα διαγράμματα της Εικόνας 62 αποτυπώνεται η εξέλιξη της ρηγμάτωσης για τις δοκούς με ογκομετρικά ποσοστά ινών 0,25% και 0,50F%. Δεν μπορεί να προκύψει κάποιο σαφές συμπέρασμα για την επίδραση του ποσοστού των ινών στο άνοιγμα των ρωγμών, εφόσον τα δύο εξεταζόμενα ποσοστά είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.



(α) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 200mm



(β) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 250mm



(γ) δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 350mm

Εικόνα 62. Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης του ανοίγματος της ρωγμής σε σύγκριση με την επιβαλλόμενη μετατόπιση για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως αντικείμενο την μελέτη της συμπεριφοράς δοκών οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με σκοπό την μερική αντικατάσταση του συμβατικού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρες) με μεταλλικές ίνες, μια πρακτική η οποία πλέον περιλαμβάνεται και στις διατάξεις πολλών σύγχρονων κανονισμών (π.χ. ACI 544 [62], Model Code 2010 [68]) ενώ συναντάται ευρέως και στην διεθνή βιβλιογραφία. Σκοπός της αντικατάστασης των συνδετήρων με ίνες, είναι η αποσυμφόρηση των μελών Ο/Σ από τα μεγάλα ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού που απαιτούνται από τους σύγχρονους κανονισμούς, κι οδηγούν σε μέλη με πυκνή διατμητική όπλιση. Τα μεγάλα ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού, σε πυκνές αποστάσεις μεταξύ τους, προκαλούν δυσμενείς συνθήκες σκυροδέτησης, μειώνοντας έτσι σημαντικά την τελική ποιότητα της κατασκευής. Ωστόσο από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, προέκυψε ότι το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας αφορά στην εξέταση δοκών που περιελάμβαναν μεγάλα ποσοστά ινών (πολλές φορές ποσοστά μεγαλύτερα από 1% κατ. όγκο). Τα ποσοστά αυτά, αν και φαίνεται από άποψη μηχανικής να αποδίδουν σε ικανοποιητικό βαθμό για δομοστατικές εφαρμογές, δημιουργούν ταυτόχρονα και αρκετές δυσκολίες. Η σημαντικότερη εξ' αυτών είναι η δυσκολία που συναντάται κατά την διάρκεια της σκυροδέτησης σε επίπεδο εργασιμότητας και καθιστά την χρήση τέτοιων ποσοστών ινών πολλές φορές απαγορευτική, οδηγώντας εν τέλει πάλι σε δυσμενείς συνθήκες σκυροδέτησης, όπως και στην περίπτωση του πυκνού εγκάρσιου οπλισμού. Επομένως, η διαστασιολόγηση των δοκιμών που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα έγινε με κατεύθυνση την χρήση μικρών ογκομετρικών ποσοστών προσθήκης ινών (<0,50%) με σκοπό να καλυφθεί το κενό που συναντάται στην βιβλιογραφία.

Συγκεντρωτικά, από τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν στην νωπή και σκληρυμένη κατάσταση του ελαφροσκυροδέματος προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Σε αντίθεση με την βιβλιογραφία όπου η χρήση ινών οδηγεί σε μικρή έως, κάποιες φορές, και σε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής, στην συγκεκριμένη έρευνα παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το μη ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Πιο συγκεκριμένα, στην σύνθεση 0,25% παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής της τάξης περίπου του 10% ενώ ακόμα μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στην σύνθεση 0,50% (40%). Σημειώνεται πως ο λόγος Poisson και το μέτρο ελαστικότητας παρέμειναν σχεδόν σταθερά με την εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος, συμπέρασμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφία για τα εξεταζόμενα ποσοστά και διαστάσεις ινών.
- Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και όσον αφορά την καμπτική αντοχή στην οποία η συνεισφορά των ινών αναμενόταν σημαντική. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη έρευνα η καμπτική αντοχή παρέμεινε ουσιαστικά η ίδια (και οριακά μειωμένη 5-10%) και για τα δύο ποσοστά ινών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την σχέση που προτείνεται από τους Badogiannis et al. (2019) [31] αναμενόταν αύξηση της καμπτικής αντοχής περίπου 17% και 35% για τις συνθέσεις με 0,25% και 0,50% κατ' όγκο ινών, αντίστοιχα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι μετά την πρώτη πτώση του φορτίου (όριο αναλογικότητας f_{LOP}), με την εισαγωγή ινών στο μίγμα δεν επιτεύχθηκε αύξηση της απόλυτης καμπτικής αντοχής των δοκιμών (f_R), γεγονός που αποδεικνύει πως οι ίνες δεν ήταν σε θέση λόγω του μικρού τους ποσοστού να αυξήσουν την καμπτική αντοχή μετά την πρώτη ρηγμάτωση του δοκιμίου. Ωστόσο, αξιοσημείωτη είναι η αύξηση της εναπομείνουσας τάσης και για τα δύο ποσοστά ινών σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση ελαφροσκυροδέματος, με πιο σημαντική αύξηση να σημειώνεται στην σύνθεση με ποσοστό ινών 0,50%. Η πλαστιμότητα των πρισμάτων σκυροδέματος ποσοτικοποιείται μέσα από την ιδιότητα της δυθραυστότητας (toughness). Για ποσοστό ινών 0,50% υπολογίστηκε αύξηση της δυθραυστότητας κατά 15-22% ενώ για ποσοστό ινών 0,25% 10% σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση αναφοράς.
- Ο συνδυασμός μεγαλύτερης κάθισης, εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας ρευστοποιητή σε κάποιες συνθέσεις ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, και του μεγαλύτερου ποσοστού αέρα, οδηγούν σε μειωμένα χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Οι παραπάνω παράγοντες, όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 3.3.2. επηρέασαν σχεδόν αναλογικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συνθέσεων. Αν τα εν λόγω μηχανικά χαρακτηριστικά κανονικοποιηθούν με βάση το ποσοστό του αέρα, το οποίο επηρεάζει και την κάθιση των

συνθέσεων, βελτιώνονται σημαντικά, επιβεβαιώνουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας. Επίσης, προσεγγίζουν και τις προβλέψεις των εμπειρικών τύπων της βιβλιογραφίας αρκετά ικανοποιητικά.

Για την αποτίμηση της συνεισφοράς των ινών στην διατμητική αντοχή των δοκών, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή τεσσάρων σημείων σε δοκίμια δοκών χωρίς ίνες και σε δοκίμια με ποσοστά ινών 0,25% και 0,50% (ίνες με λόγο $l/d=43$). Στα εν λόγω δοκίμια περιλαμβάνονται:

- Μία σειρά οκτώ δοκιμών χωρίς την χρήση ινών με διαμόρφωση συνδετήρων οι οποίοι κυμαίνονταν στις εξής αποστάσεις: (α) 100mm, τα οποία αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς που είναι επαρκώς οπλισμένα έναντι κάμψης και τέμνουσας, (β) 200mm, το οποίο έχει το μισό απαιτούμενο διατμητικό οπλισμό, (γ) 250mm, (δ) 350mm, (ε) 400mm έως και (στ) 800mm μεταξύ τους, που πρακτικά αντιστοιχούν σε δοκούς με κανέναν συνδετήρα στο διατμητικό τους μήκος. Οι δοκοί αυτοί εξυπηρέτησαν τον σκοπό των δοκιμών αναφοράς.
- Μία σειρά τεσσάρων δοκιμών με την επιλογή μεταξύ των παραπάνω δοκιμών ίδιας διαμόρφωσης συνδετήρων και με χρήση ινών σε ποσοστό 0,25%. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν δύο δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 200mm, μία ανά 250mm και μία ανά 350mm.
- Δύο σειρές, έξι και τεσσάρων δοκιμών, αντίστοιχα, με την ίδια διαμόρφωση συνδετήρων συνολικά, όπως και στα δοκίμια αναφοράς, και με χρήση ινών σε ποσοστό 0,50%.

Τονίζεται ότι σε όλα τα δοκίμια ο καμπτικός οπλισμός παρέμεινε ο ίδιος ενώ όλα τα δοκίμια είχαν λόγο διάτμησης $av/d=2,96$.

Με βάση τα αποτελέσματα φαίνεται ότι:

- Η δοκός αναφοράς με το συμβατικό ελαφροσκυροδέμα σχεδιασμένη κατά EC2 παρουσίασε, όπως αναμενόταν, καμπτική συμπεριφορά με την παράλληλη ανάπτυξη αξιόλογων τιμών πλαστιμότητας. Όλες οι υπόλοιπες δοκοί με συμβατικό ελαφροσκυροδέμα αστοχήσαν εν γένει διατμητικά. Μερική εξαίρεση αποτέλεσε το δοκίμιο με απόσταση συνδετήρων ανά 200 mm (δηλαδή με το μισό απαιτούμενο διατμητικό οπλισμό) του οποίου η φέρουσα ικανότητα έφτασε τα επίπεδα της καμπτικής του αντοχής. Ωστόσο και αυτό επέδειξε ένα σχετικά φθιτό μεταλαστικό κλάδο και μικρή τιμή πλαστιμότητας.
- Όσον αφορά τα δοκίμια με το ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα, συνολικά, το μέγιστο διατμητικό φορτίο, για την σύνθεση με ποσοστό ινών 0,25%, παράμεινε σταθερό σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, με κάποιες φορές να εμφανίζει μία ελαφρώς πτωτική τάση. Στην περίπτωση της σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με ποσοστό ινών 0,50%, οι δοκοί με συνδετήρες ανά 350mm εμφάνισαν αύξηση της διατμητικής αντοχής από 10-38% σε σχέση με την μη ινοπλισμένη σύνθεση. Για όλες τις υπόλοιπες διατάξεις οπλισμού για το εν λόγω ποσοστό ινών, το μέγιστο διατμητικό φορτίο παρέμεινε περίπου το ίδιο με την αντίστοιχη μη ινοπλισμένη σύνθεση.
- Η προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οδηγεί σε αύξηση της πλαστιμότητας σε ποσοστά πολλές φορές μεγαλύτερα του 200% για ποσοστά ινών από 0,40-1,20%. Εν προκειμένω, για ογκομετρικά ποσοστά ινών 0,25% και 0,50% και απόσταση συνδετήρων ανά 200mm σημειώθηκε αύξηση της πλαστιμότητας κατά 46% και 108%, αντίστοιχα. Επίσης, για ποσοστό ινών 0,50% για την παραπάνω απόσταση συνδετήρων, προσεγγίστηκε ικανοποιητικά το φορτίο καμπτικής αστοχίας. Επομένως σε συνδυασμό με την αυξημένη τιμή της πλαστιμότητας, συμπεραίνεται πως αν το ινοπλισμένο σκυροδέμα ανέπτυξε τις αναμενόμενες μηχανικές ιδιότητες, σε συνδυασμό με κάποιες βελτιώσεις στο ποσοστό και τις διαστάσεις των ινών θα μπορούσε να μειωθεί το ποσοστό των απαιτούμενων συνδετήρων στο μισό με την προσθήκη ινών στο μίγμα, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του κανονισμού σε επίπεδο φορτίου και πλαστιμότητας. Επιπροσθέτως, για ποσοστό ινών 0,50% και απόσταση συνδετήρων ανά 350mm σημειώθηκε τόσο αύξηση της διατμητικής αντοχής όσο και αύξηση της πλαστιμότητας, σε σύγκριση με το αντίστοιχο μη ινοπλισμένο δοκίμιο δοκού, κατά 100% (σε όρους πλαστιμότητας). Πιο συγκεκριμένα οι δοκοί με απόσταση συνδετήρων ανά 200, 250 και 350mm και για ποσοστό ινών 0,50%, εμφάνισαν λόγο πλαστιμότητας μεγαλύτερο του 2, που αποτελεί κάτω όριο της συνδυαστικής καμπτικής-διατμητικής αστοχίας. Επίσης, τα παραπάνω δοκίμια με ποσοστό ινών 0,50% εμφανίζουν λόγο

- πλαστιμότητας μεγαλύτερο από τον λόγο πλαστιμότητας των μη ινοπλισμένων δοκιμών με αντίστοιχη διατμητική όπλιση. Παρόλα αυτά, αστόχησαν και πάλι διατμητικά. Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια, με πιο αραιούς συνδετήρες, δεν ανέπτυξαν σημαντική βελτίωση της πλαστιμότητας σε σχέση με τα αντίστοιχα μη ινοπλισμένα δοκίμια, και για τα δύο εξεταζόμενα ποσοστά ινών.
- Ο τύπος υπολογισμού της διατμητικής αντοχής κατά Model Code [68] εμφανίστηκε αρκετά μη ασφαλής σε σχέση με τα παρόντα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό εξηγείται με βάση το γεγονός πως ο τύπος του Model Code [68] είναι διαμορφωμένος κυρίως για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής σε μέλη από συμβατικό σκυροδέμα, κι όχι ελαφροσκυροδέμα. Ως εκ τούτου, δεν έχει ληφθεί υπόψη η μειωμένη απόκριση που έχει από την φύση του το ελαφροσκυροδέμα στους μηχανισμούς που συνεισφέρουν σε τέμνουσα. Επομένως, σύμφωνα με την παραπάνω παρατήρηση με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει ανάγκη ανασχηματισμού του εν λόγω τύπου πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής, για την περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος.
 - Οι εμπειρικοί και ημιεμπειρικοί τύποι που είχαν σχηματιστεί για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής συμβατικού σκυροδέματος, λαμβάνοντας μειωμένη την συνεισφορά των μηχανισμών που αντιτίθενται σε τέμνουσα μέσα από τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος είναι κατάλληλοι για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής δοκών ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με πιο ακριβείς τους τύπους από Sharma (1986) [74], Narayanan & Darwish (1987) [71], Ashour et al. (1992) (M2) [70] και Kwak et al. (2002) [42]. Οι τύποι που προτάθηκαν από τους Li et al. (2019) [19] και Kang & Hong (2011) [18] για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος κρίνονται κατάλληλοι αλλά είναι πιο συντηρητικοί από τους αντίστοιχους για ινοπλισμένο συμβατικό σκυροδέμα. Τέλος, από τους τύπους που προτάθηκαν στην παρούσα έρευνα μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας κρίνεται κατάλληλος ο (1) για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής.
 - Όσον αφορά την εικόνα της ρηγμάτωσης των δοκών, η προσθήκη ινών στο σκυροδέμα συνεισφέρει στην ανάπτυξη πιο πλαστικής εικόνας ρηγμάτωσης, με περισσότερες, μικρότερου εύρους ρωγμές, έναντι λιγότερων κύριων ρωγμών. Αυτό ισχύει για τις δοκούς με διατμητικό σπλισμό ανά 200, 250 και 350mm κυρίως, στις οποίες αυξήθηκε το πλήθος των συνολικών αλλά και κύριων ρωγμών με την προσθήκη ινών στο μίγμα σκυροδέματος σε σχέση με τις μη ινοπλισμένες δοκούς αντίστοιχης διατμητικής όπλισης, επιβεβαιώνοντας έτσι και την αύξηση της πλαστιμότητας που είχε σημειωθεί στις εν λόγω δοκούς. Δεν μπορεί να προκύψει κάποια συσχέτιση της αύξησης του πλήθους των ρωγμών ανάμεσα στα διαφορετικά ποσοστά ινών τόσο εξαιτίας της μικρής διαφοράς των εν λόγω ποσοστών μεταξύ τους όσο και εξαιτίας της μη αναμενόμενης συμπεριφοράς των εν λόγω συνθέσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού.
 - Η προσθήκη ινών στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος σε όλες τις περιπτώσεις οδηγεί σε αύξηση της γωνίας της ρωγμής. Η παραπάνω παρατήρηση είναι πιο εμφανής στις δοκούς με ογκομετρικό ποσοστό ινών 0,50%, χωρίς να θεωρείται και αμελητέα η αύξηση της γωνίας που προκαλεί το ποσοστό ινών 0,25%. Η αύξηση της γωνίας της ρωγμής είναι εμφανής μέχρι την περίπτωση διάταξης συνδετήρων ανά 400mm. Αυτή η αύξηση θα μπορούσε να αποδοθεί στην πρόσθετη συνισταμένη συνεισφορά των ινών στο εξεταζόμενο μήκος z της δοκού, ως σπλισμός διάτμησης, αυξάνοντας την γωνία της ρωγμής, άρα και του θλιπτήρα.
 - Επίσης θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί το συμπέρασμα της βιβλιογραφίας πως με την εισαγωγή ινών στο μίγμα σκυροδέματος μειώνεται το άνοιγμα των ρωγμών. Η παραπάνω εικόνα ήταν εμφανής, κυρίως, στα δοκίμια με συνδετήρες ανά 200 και 250mm, επιβεβαιώνοντας για άλλη μία φορά, πως για τόσο χαμηλά ποσοστά ινών, είναι απαραίτητη η ύπαρξη του ελάχιστου διατμητικού σπλισμού. Η δράση αυτή των ινών εξαρτάται τόσο από το ποσοστό τους στην σύνθεση ελαφροσκυροδέματος, όσο και από τις διαστάσεις τους, εφόσον ενεργοποιούνται εξαιτίας της εξόλκευσης τους, η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από το μήκος αγκύρωσης των ινών, άρα και το συνολικό τους μήκος. Επομένως, θα μπορούσε να προταθούν μεγαλύτερα μήκη ινών σε περίπτωση που ήταν επιθυμητό να διατηρηθούν χαμηλά ογκομετρικά ποσοστά ινών, προκειμένου να διατηρηθούν χαμηλές τιμές ανοίγματος ρωγμών.

5. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας προέκυψαν διάφορα ζητήματα προς περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να διευρυνθεί η βάση δεδομένων των πειραματικών αποτελεσμάτων των μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων σκυροδέματος τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο στοιχείου (π.χ. δοκών). Παρακάτω παρατίθενται κάποιες προτάσεις οι οποίες θα ήταν χρήσιμο να ληφθούν υπόψη κατά την διάρκεια εκπόνησης αντίστοιχης έρευνας.

1. Μελέτη ινών μεγαλύτερων διαστάσεων, ικανοποιώντας τα κριτήρια για να επιτευχθεί σωστή ανάμιξη των υλικών, για τα ίδια ποσοστά ινών, προκειμένου να γίνει πιο ξεκάθαρη η επιρροή των διαστάσεων των ινών στην φέρουσα ικανότητα των δοκών, στην πλαστιμότητα και την εξέλιξη της ρηγμάτωσης τους.
2. Μελέτη της επιρροής του ποσοστού του αέρα και της τιμής της κάθισης του σκυροδέματος στα μηχανικά χαρακτηριστικά του για συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος με διάφορα ποσοστά ινών. Όπως έγινε εμφανές παραπάνω, στις περιπτώσεις που ήταν αυξημένες αυτές οι τιμές, πάνω από τα αναμενόμενα όρια, μειώθηκαν σημαντικά οι μηχανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών, ως εκ τούτου θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να μελετηθεί -μεταβάλλοντας τα ποσοστά των ινών ή και τις διαστάσεις τους ακόμα- πως μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του περιεχόμενου αέρα, της κάθισης και της απώλειας κάθισης, κι αν υπάρχει κάποια συσχέτιση με το ποσοστό των ινών.
3. Εφαρμογή της μεθόδου της φωτογραμμετρίας για την συνεχή καταγραφή των ρωγμών κατά την διάρκεια δοκιμών τεσσάρων σημείων σε δοκούς ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Έτσι θα είναι εφικτό να υπάρξει συσχέτιση ανάμεσα στο άνοιγμα και την γωνία των ρωγμών με το ποσοστό των ινών που περιέχονται στην σύνθεση σκυροδέματος. Επίσης θα μπορεί να συσχετιστεί και το φορτίο με το άνοιγμα των ρωγμών, εφόσον θα λαμβάνονται ταυτόχρονες μετρήσεις.
4. Διερεύνηση της προσαρμογής του τύπου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής κατά Model Code (2010) [68], προκειμένου να δίνει ασφαλείς προβλέψεις της διατμητικής αντοχής στις περιπτώσεις ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Αυτό θα επιτευχθεί μέσα από δοκιμές δοκών με διάφορα ποσοστά ινών, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και επίπεδο στοιχείου.

Βιβλιογραφία

- [1]. Badogiannis E.G., Kotsovos M.D. (2014). Monotonic and cyclic flexural tests on Lightweight aggregate concrete beams, *Earthq. Struct.* 6 317-334.
- [2]. Al-Khaiat H., Haque M.N. (1998). Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete, *Cem. Concr. Res.* 28 859–866.
- [3]. Uysal H., Demirboga R., Remzi S., Gul R. (2004). The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 845–848.
- [4]. Al-Jabri K.S., Hago A.W., Al-Nuaimi A.S., Al-Saidy A.H. (2005). Concrete blocks for thermal insulation in hot climate, *Cem. Concr. Res.* 35 1472–1479.
- [5]. Hwang C.L., Hung M.F. (2005). Durability design and performance of selfconsolidating lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.* 19 619–626.
- [6]. Altun F. and Aktas B. (2013). Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.* 38 575–581
- [7]. Fantilli A.P., Cavallo A.D., Pistone G. (2015). Fiber-reinforced lightweight concrete slabs for the maintenance of the Soleri Viaduct, *Eng. Struct.* 99 184–191.
- [8]. Caratelli A., Imperatore S., Meda A., Rinaldi Z. (2016). Punching shear behavior of lightweight fiber reinforced concrete slabs, *Compos. Part B* 99 257–265.
- [9]. Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z. (2016). Monotonic and cyclic behaviour of lightweight concrete beams with and without steel fiber reinforcement, *Constr. Build. Mater.* 122 23–35.
- [10]. Alhassan M., Al-Rousan R., Ababneh A. (2017). Flexural behavior of lightweight concrete beams encompassing various dosages of macro synthetic fibers and steel ratios, *C Stud. Constr. Mater.* 7 280–293.
- [11]. CEN (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings-Chapter 11. EN 1992-1-1. Brussels (Belgium): European Committee for Standardisation; 2004
- [12]. ACI PRC-213-14 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete
- [13]. Neville AM. (1981). Properties of concrete. 3rd ed. Essex, Longman Scientific and Technical, pp. 702-704.
- [14]. Philleo R. (1991). Concrete Science and Reality. In *Materials Science of Concrete II*, American Ceramic Society, Westerville, OH, USA, pp.1-8.
- [15]. Zeyad A.M., Tayeh B.A., Yusuf M.O. (2019). Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 216 314-324.
- [16]. Σημειώσεις ΔΠΜΣ για το μάθημα Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος
- [17]. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (318R-02). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2002, 443 pp.
- [18]. Kang T., Kim W, Kwak Y-K., Hong S-G. (2011). Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement, *ACI Structural Journal*, V. 108, No. 5.
- [19]. Li X., Li Ch., Zhao M. and Zhou S. (2019). Testing and Prediction of Shear Performance for Steel Fiber Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcements, *Materials* 2019, 12, 1594.
- [20]. Campione G. (2014). Flexural and shear resistance of steel fiber-reinforced lightweight concrete beams, *J. Struct. Eng.*, 4, 04013103.
- [21]. Balendran R. V., Zhou F.P., Nadeem A., Leung A.Y.T. (2002). Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete, *Build. Environ.* 37 1361–1367.
- [22]. Altun F. (2006). Experimental investigation of lightweight concrete with steel–fibre, *J Eng. Sci.* 12 333–339.

- [23]. Kim Y.J., Hu J., Lee S.J., You B.H. (2010). Mechanical properties of fiber reinforced lightweight concrete containing surfactant, *Adv. Civ. Eng.* 2010 1–8.
- [24]. Wang H.T., Wang L.C. (2013). Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 38 1146–1151.
- [25]. Grabois T.M., Cordeiro G.C., Toledo Filho R.D. (2016). Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 104 284–292.
- [26]. Kayali O., Haque M.N., Zhu B. (2003). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.* 25 207–213.
- [27]. Chen B., Liu J. (2004). Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber, *Cem. Concr. Res.* 34 1259–1263.
- [28]. Choi J., Zi G., Hino S., Yamaguchi K., Kim S. (2014). Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.* 69 381–389.
- [29]. Li J.J., Wan C.J., Niu J.G., Wu L.F., Wu Y.C. (2017). Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 131 449–458.
- [30]. Libre N.A., Shekarchi M., Mahoutian M., Soroushian P. (2011). Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice, *Constr. Build. Mater.* 25 2458–2464.
- [31]. Badogiannis E.G., Christidis K.I., Tzanetatos G.E. (2019). Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers, *Constr. Build. Mater.* 196 443–456.
- [32]. Gao J., Sun W., Morino K. (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cem. Concr. Compos.* 19 307–313.
- [33]. Chen B., Liu J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability, *Cem. Concr. Res.* 35 913–917.
- [34]. Zhao M., Li C., Su J., Shang P., Zhao Sh. (2019). Experimental study and theoretical prediction of flexural behaviors of reinforced SFRELC beams, *Constr. Build. Mater.* 208 454–463.
- [35]. Hassanpour M., Shafigh P., Bin Mahmud H. (2014). Mechanical Properties of Structural Lightweight Aggregate Concrete Containing Low Volume Steel Fiber, *Arab. J. Sci. Eng.* 39 3579–3590.
- [36]. Campione G., Miraglia N., Papia M. (2001). Mechanical properties of steel fibre reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates, *Mater. Struct. Constr.* 34 201–210.
- [37]. Düzgün O.A., Gül R., Aydın A.C. (2005). Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete, *Mater. Lett.* 59 3357–3363.
- [38]. Suraneni P., Anleu P.C.B., Flatt R.J. (2016). Factors affecting the strength of structural lightweight aggregate concrete with and without fibers in the 1200–1600 kg/m³ density range, *Mater. Struct.* 49 677–688.
- [39]. Guler S. (2018). The effect of polyamide fibers on the strength and toughness properties of structural lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 173 394–402.
- [40]. Domogala L. (2011). Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres, *J. Civil Eng. Manag.* 17 36–44.
- [41]. Zhao S.B., Zhao G.F., Huang C.K. (1997). Experimental research on shear cracking strength of steel fiber reinforced concrete beams, *J. Hydroelectr. Eng.*, 4, 18–29.
- [42]. Kwak Y.-K., Eberhard M.O., Kim W.-S. & Kim J. (2002). Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 99 (4): 530-538.

- [43]. Lantsoght E.O.L. (2019). How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?, *Compos. Part B*, 175: 1-16.
- [44]. Deluce J.R., Lee S.-C. and Vecchio F. J. (2014). Crack model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 111 (1): 93-102.
- [45]. Michael D. Kotsovos (2014). *Compressive Force-Path Method: Unified Ultimate Limit-State Design of Concrete Structures*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London
- [46]. Kotsovos, M.D. (1988). Compressive force path concept: Basis for reinforced concrete ultimate limit state design, *ACI Struct. J*, 1, 68–75.
- [47]. Arslan G. (2014). Shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC) slender beams, *KSCSE J. Civ. Eng.* 2, 587–594.
- [48]. Li S.K.; Yu Y.Y. (1978). Shear strength calculation of simple-supported reinforced concrete beams considering shear-span to depth ratio, *J. Tongji Univ.* 1, 81–93.
- [49]. Li F.L.; Zhao S.B.; Huang C.K. (2003). Design method of shear-resistance of steel fiber reinforced concrete beams, *Ind. Constr.*, 10, 66–68.
- [50]. Rebeiz K.S. (1999). Shear strength prediction for concrete members, *J. Struct. Eng.*, 3, 301–308.
- [51]. Kim J.K.; Park Y.D. (1996). Prediction of shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement, *ACI Mater. J.*, 3, 213–222.
- [52]. Tang C.-W., Yen T., Chen H.-J. (2009). Shear behavior of reinforced concrete beams made with sedimentary lightweight aggregate without shear reinforcement, *J. Mater. Civ. Eng.*, 12, 730–739.
- [53]. Fenwick RC, Paulay T (1968). Mechanisms of shear resistance of concrete beams, *J Struct Div – ASCE*, 94:2325–50.
- [54]. Kani MW, Huggins MW, Wittkopp RR (1979). *Kani on shear in reinforced concrete*. Toronto: Univ of Toronto, Dept of Civil Engineering.
- [55]. Dinh HH (2009). *Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement*, The University of Michigan.
- [56]. Swamy R. N.; Jones R.; and Chiam A. T. P. (1993). Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-Beams, *ACI Structural Journal*, V. 90, No. 1, pp. 103-114.
- [57]. Zarrinpour MR., Chao S-H. (2017). Shear strength enhancement mechanisms of steel fiber reinforced concrete slender beams, *ACI Struct J* 114.
- [58]. Walraven J.; Belletti B.; Esposito R. (2013). Shear capacity of normal, lightweight, and high-strength concrete beams according to Model Code 2010. I: Experimental results versus analytical model results, *J. Struct. Eng.*, 9, 1593–1599.
- [59]. Lu Y., Ye L.P., Sun H.L., Ding J.T. (2008). Experimental study on shear strength of lightweight high strength concrete beams, *Build. Struct.*, 5, 16–21.
- [60]. Yi W.J., Ding Y.B., Chen H. (2017). Experimental study on shear behavior of lightweight aggregate concrete beams without stirrups, *J. Build. Struct.*, 6, 123–132.
- [61]. Yang K.-H., Ashour A.F. (2015). Modification factor for shear capacity of lightweight concrete beams. *ACI Struct. J.*, 4, 485–492.
- [62]. ACI Committee 544. *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*; ACI 544.4R-2009; American Concrete Institute: Farmington Hill, MI, USA, 2009.
- [63]. Cardoso D.C.T., Pereira G.B.S., Flávio A. Silva F.A., Silva Filho J.J.H, Pereira E.V. (2019). Influence of steel fibers on the flexural behavior of RC beams with low reinforcing ratios: Analytical and experimental investigation, *Compos. Struct.*, 222: 1-13.
- [64]. Folino P., Ripania M., Xargay H., Rocca N. (2020). Comprehensive analysis of Fiber Reinforced Concrete beams with conventional reinforcement, *Eng. Struct.*, 202: 1-11.

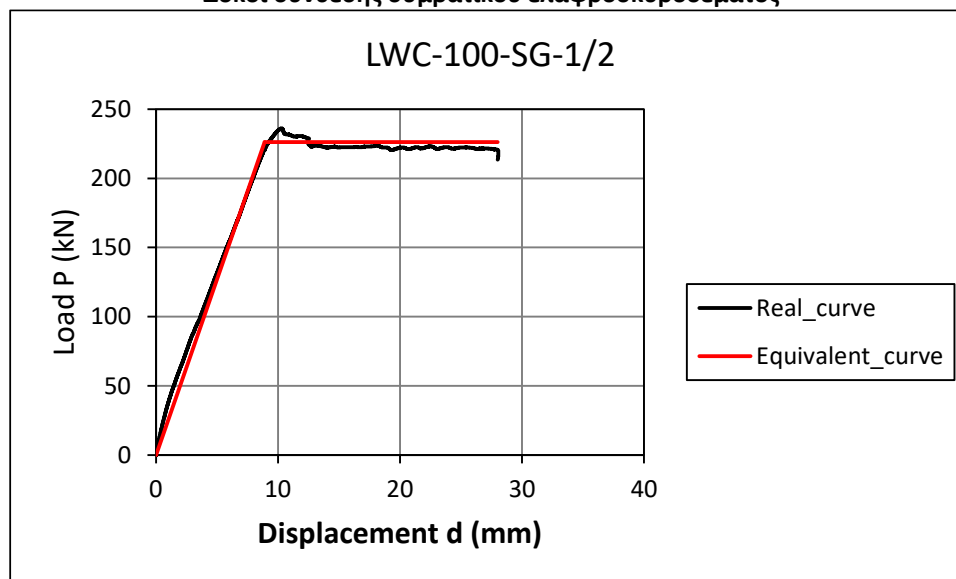
- [65]. Sahoo D.-R., Sharma A. (2014). Effect of Steel Fiber Content on Behavior of Concrete Beams with and without Stirrups, *ACI Structural Journal*, 111(98): 1157-1166.
- [66]. Dinh H.H., Parra Montesinos G.J. and Wight J.K. (2010). Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 107(59): 597-606.
- [67]. Vougioukas E., Papadatou M. (2017). A Model for the Prediction of the Tensile Strength of Fiber-Reinforced Concrete Members, Before and After Cracking, *Fibers*, 5(27): 1-14.
- [68]. Model Code - Final Draft; vol. 1–2. *FIB Bulletin*; 2010.
- [69]. Kang T. and Kim W. (2010). Shear strength of steel fiber-reinforced lightweight concrete beams, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications-* B. H. Oh, et al. (eds) 2010 Korea Concrete Institute, ISBN 978-89-5708-182-2. *ACI Structural Journal* V. 108, No. 1
- [70]. Ashour S. A.; Hassanain G. S. and Wafa, F. F. (1992) Model A. Shear Behavior of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 2, pp. 176-184.
- [71]. Narayanan R. & Darwish I.Y.S. (1987). Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 84(3): 216-227.
- [72]. Shin S.-W., Oh J.-K. & Ghosh S.K. (1994). Shear Behavior of Laboratory-Sized High-Strength Concrete Beams Reinforced with Bars and Steel Fibers. *Fiber Reinforced Concrete Developments and Innovations*, SP-142, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA: 181-200.
- [73]. Khuntia M., Stojadinovic B. & Goel S. C. (1999). Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *ACI Structural Journal*, 96 (2): 282-289.
- [74]. Sharma A.K. (1986). Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI JOURNAL*, Proceedings, 83 (4): 624-628.
- [75]. Choi K.-K., Park H.-G. & Wight J.K. (2007). Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with Web Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 104 (1): 12-22.
- [76]. Huda M. N., Jumat M.Z.B., Islam A.B.M.S. (2016). Flexural performance of reinforced oil palm shell & palm oil clinker concrete (PSCC) beam, *Constr. Build. Mater.* 127, 18-25.
- [77]. Yap S.P., Alengaram U.J., Mo K.H. (2017). Ductility behaviours of oil palm shell steel fibre-reinforced concrete beams under flexural loading, *Eur. J. Environ. Civ. En.* 1-13.
- [78]. Sin L.H., Huan W.T., Islam M.R., and Mansur M.A. (2011) Reinforced Lightweight Concrete Beams in Flexure
- [79]. Zsutty T. (1971). Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests, *ACI JOURNAL*, Proceedings V. 68, No. 2, pp. 138-143.
- [80]. Imam M.; Vandewalle L.; and Mortelmans F. (1994). Shear Capacity of Steel Fiber High-Strength Concrete Beams. *High-Performance Concrete*, SP-149, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 227-241.
- [81]. Carmo R.N.F., Costa T., Simoes T., Lourenco C., Andrade D. (2013). Influence of both concrete strength and transverse confinement on bending behaviour of reinforced LWAC beams, *Eng. Struct.* 48 329-341.
- [82]. Μ. Στρατούρα, «Ανάπτυξη, παραγωγή και εφαρμογές ελαφροσκυροδέματος υψηλής ανθεκτικότητας και βιωσιμότητας», εν εξελίξει Διδακτορική διατριβή
- [83]. ASTM C173 / C173M-16, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [84]. EN12350-7 (2019). Testing fresh concrete. Air content. Pressure methods. British Standards Institution
- [85]. ΕΛΟΤ EN 206: 2013 Σκυρόδεμα - Προδιαγραφή, επιδόσεις, παραγωγή και συμμόρφωση
- [86]. EN 12350-2 (2019). Testing fresh concrete. Slump test. British Standards Institution
- [87]. ASTM C143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete Volume: 04.02

- [88]. EN 14651. Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Eurocodes; 2005.
- [89]. ASTM C 469 -17, standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, USA, 5 pp 2017.
- [90]. Altabani D., Linsel St., Dillshad K.H., Bzeni (2020). Rheological Properties and Strength of Polypropylene Fiber-Reinforced Self-compacting Lightweight Concrete Produced with Ground Limestone, *Arabian Journal for Science and Engineering* 45, 4171–4185(2020).
- [91]. Gencil O., Ozel C., Brostow W. and Martinez-Barrera G. (2011). Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres, *Materials Research Innovations*, Vol. 15 No. 3 216-225.
- [92]. Stratoura M, Badogiannis E., Papadakis E. (2018). Study on the durability parameters of lightweight concrete (in Greek), 18th Greek Concrete Conference.
- [93]. Swamy R. N. and Jojagha A. H. (1982). Workability of Steel Fibre Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, V. 4, No. 2, pp. 103-109.
- [94]. Swamy R. N., Mangat P. S., and Rao C. V. S. K. (1974). The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices, *Fiber Reinforced Concrete*, SP-44, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 1-28.
- [95]. Xu B.W., Shi H.S. (2009). Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 3468–3474.
- [96]. Perumal R. (2015). Correlation of compressive strength and other engineering properties of high-performance steel fiber-reinforced concrete, *J. Mater Civil Eng.* 04014114, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001050).
- [97]. Abbass W., Khan M.I., Mourad S. (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Constr. Build. Mater.* 168 556–569.
- [98]. CEN (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1. Brussels (Belgium): European Committee for Standardisation; 2004.
- [99]. CEN (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. EN 1998-3:2004. Brussels (Belgium): European Committee for Standardisation; 2004.
- [100]. Paulay T. P.M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, New York: John Wiley & Sons.

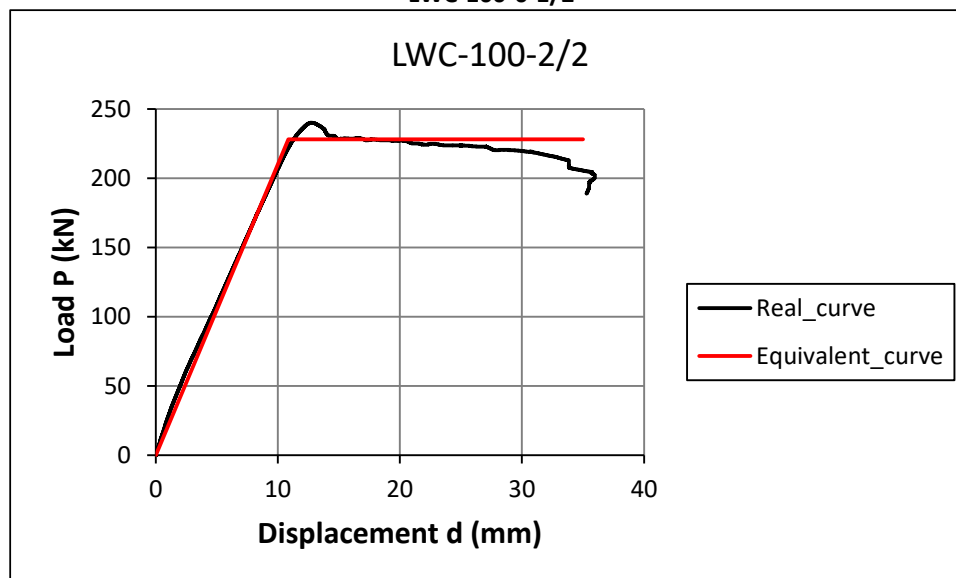
Παράρτημα Α

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου- μετατόπισης του κεντρικού σημείου της δοκού για κάθε δοκίμιο δοκού μεμονωμένα για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος. Στο ίδιο διάγραμμα παρατίθενται κι οι ισοδύναμες διγραμμικοποιημένες καμπύλες σύμφωνα με την μεθοδολογία διγραμμικοποίησης των Paulay & Priestley [100], όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.4.4.2.1.. Στις περιπτώσεις τις οποίες η πτώση του φορτίου ήταν απότομη, άρα και η συμπεριφορά του δοκιμίου ήταν ψαθυρή, δεν έχει νόημα η έννοια της πλαστιμότητας επομένως ο δείκτης πλαστιμότητας τίθεται ως μονάδα (1) και δεν παρατίθεται διγραμμικοποιημένη καμπύλη, αλλά μόνο η πραγματική.

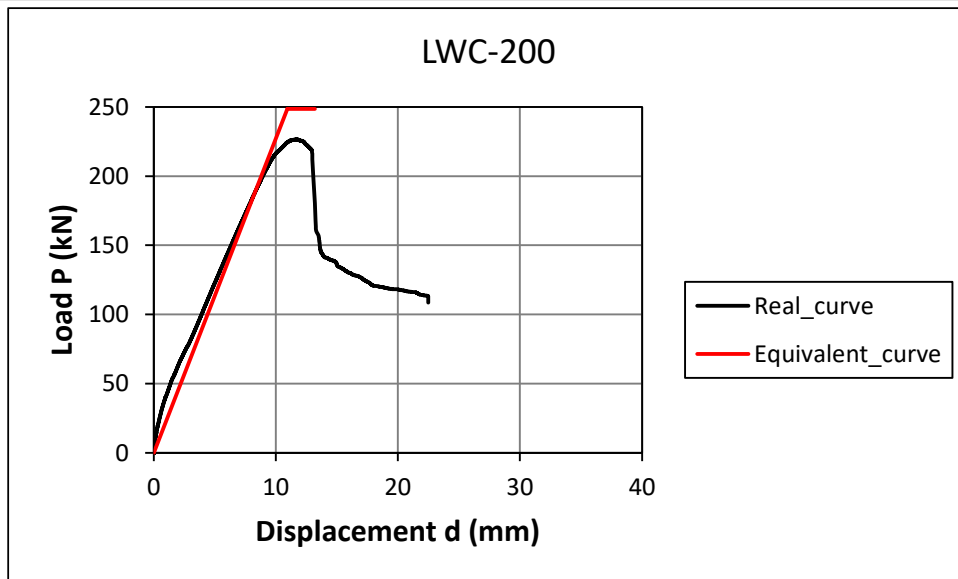
Δοκοί σύνθεσης συμβατικού ελαφροσκυροδέματος



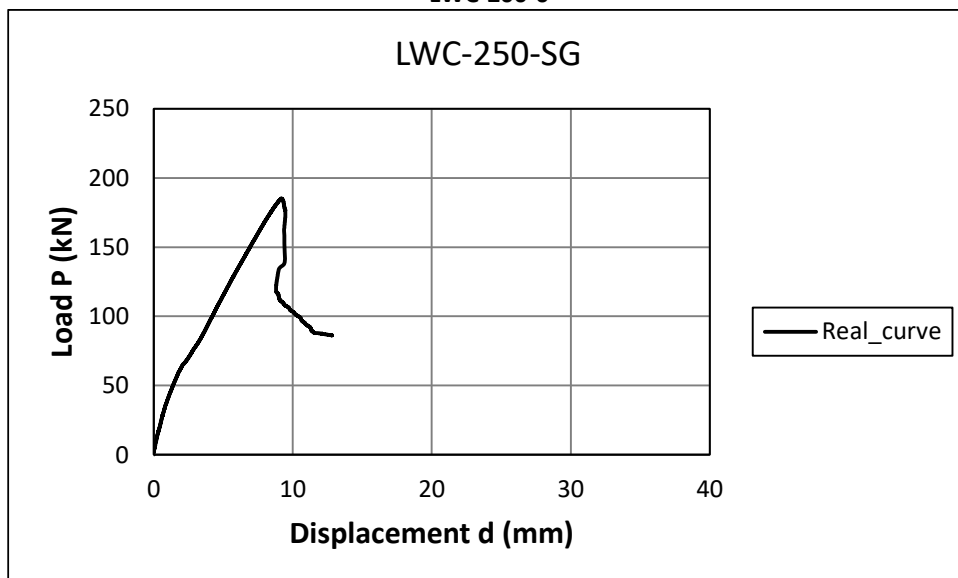
LWC-100-0-1/2



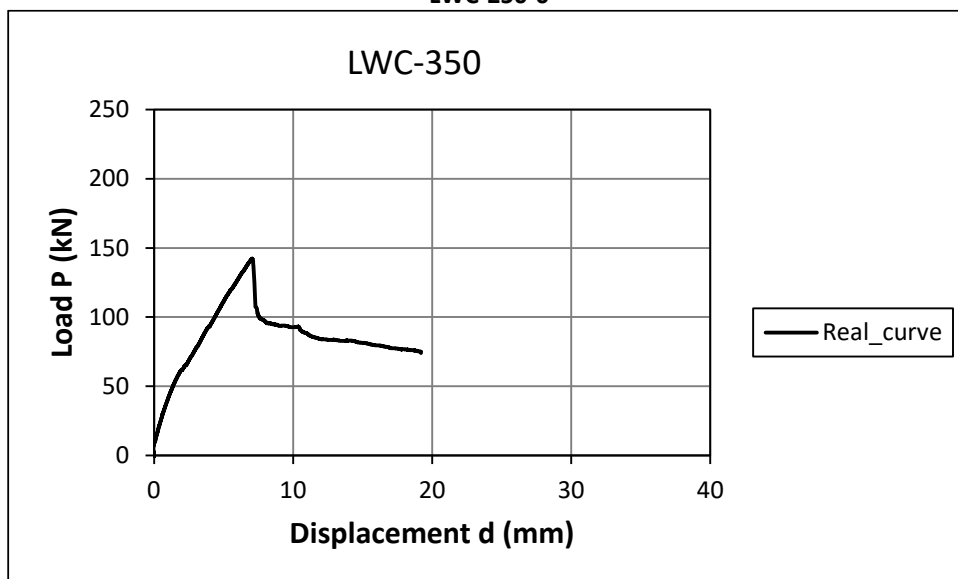
LWC-100-0 -2/2



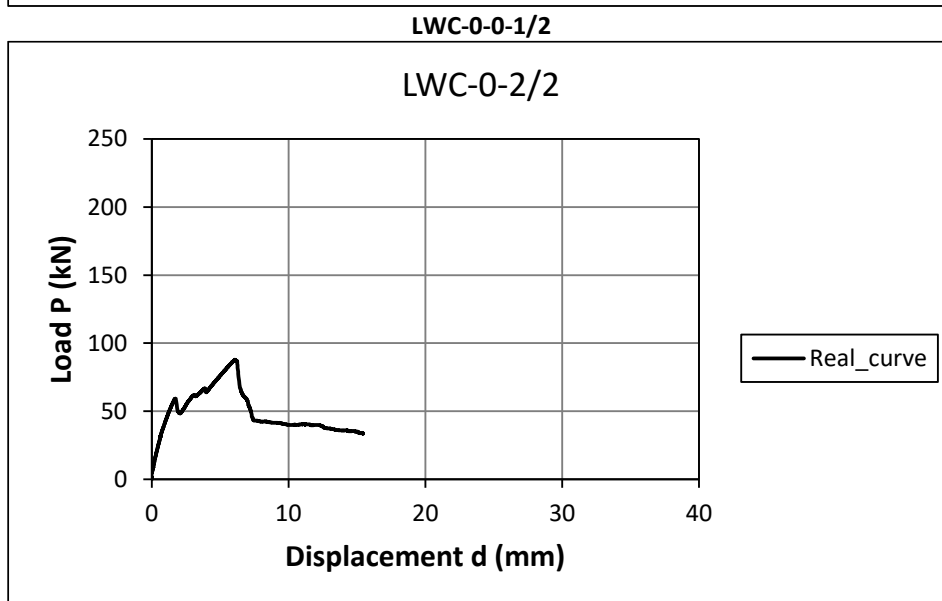
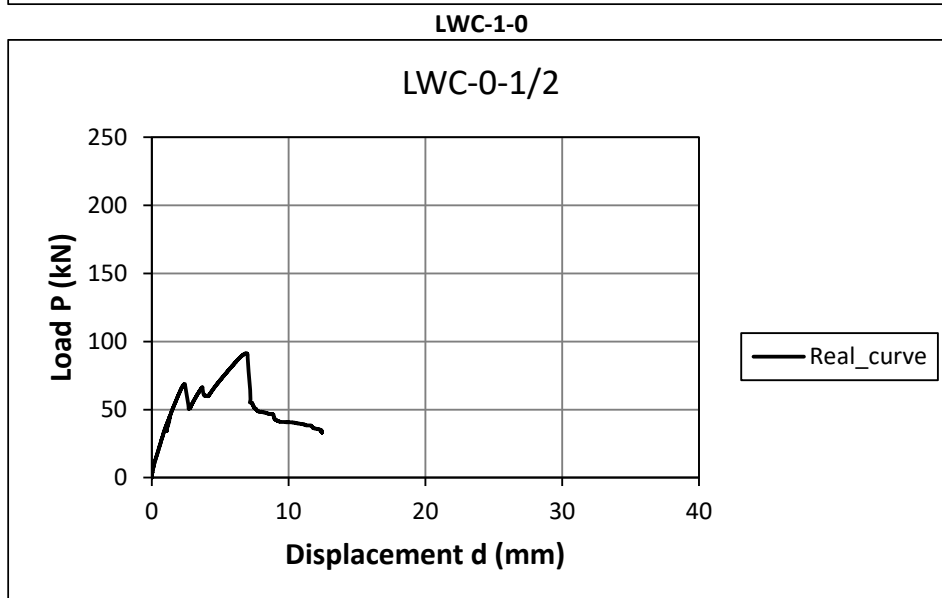
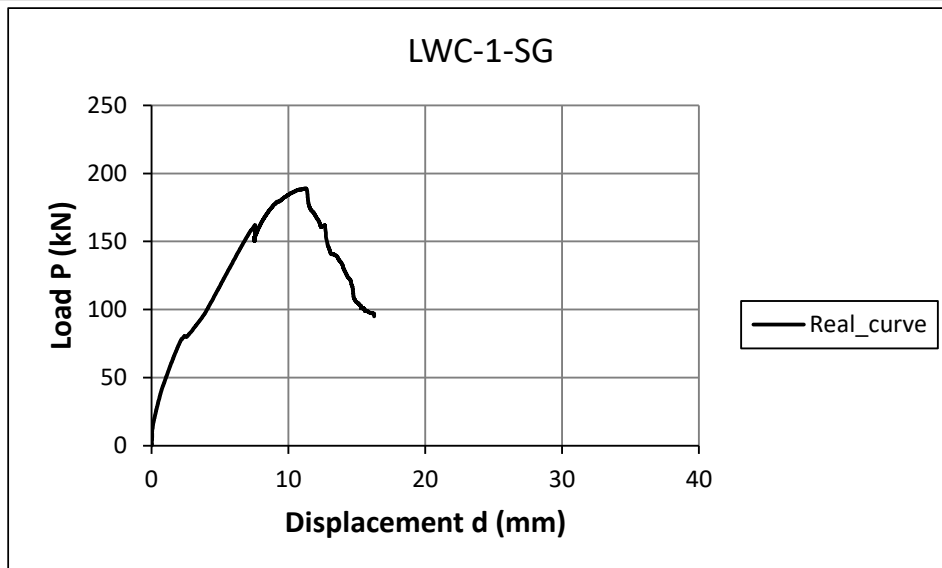
LWC-200-0



LWC-250-0

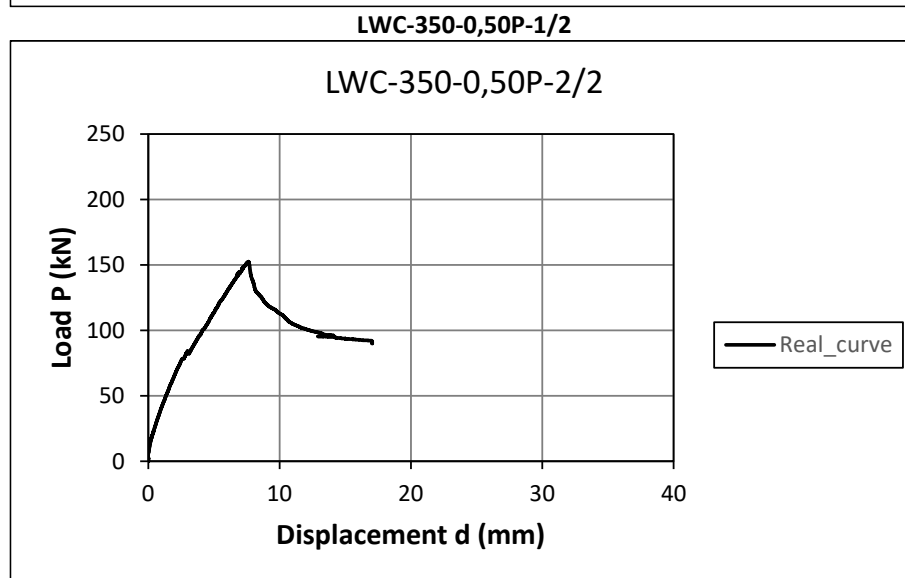
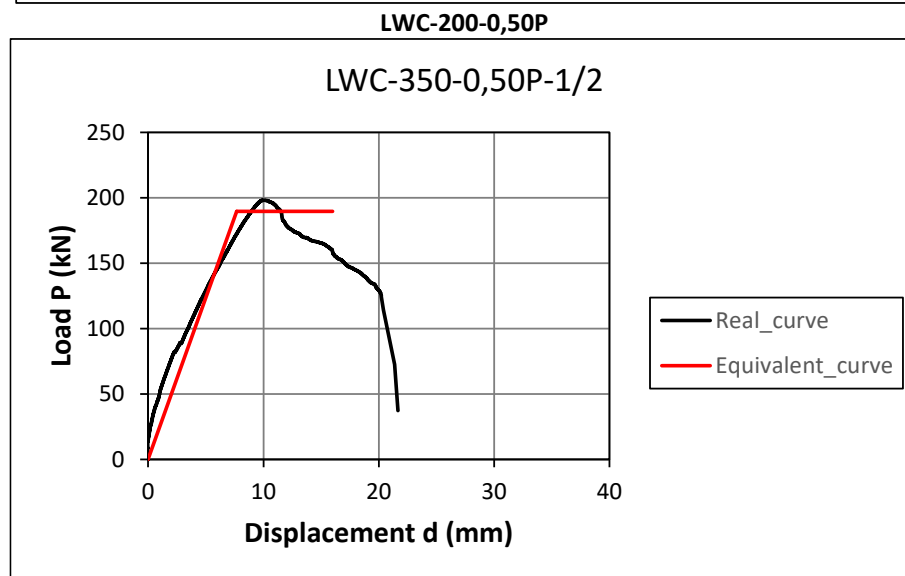
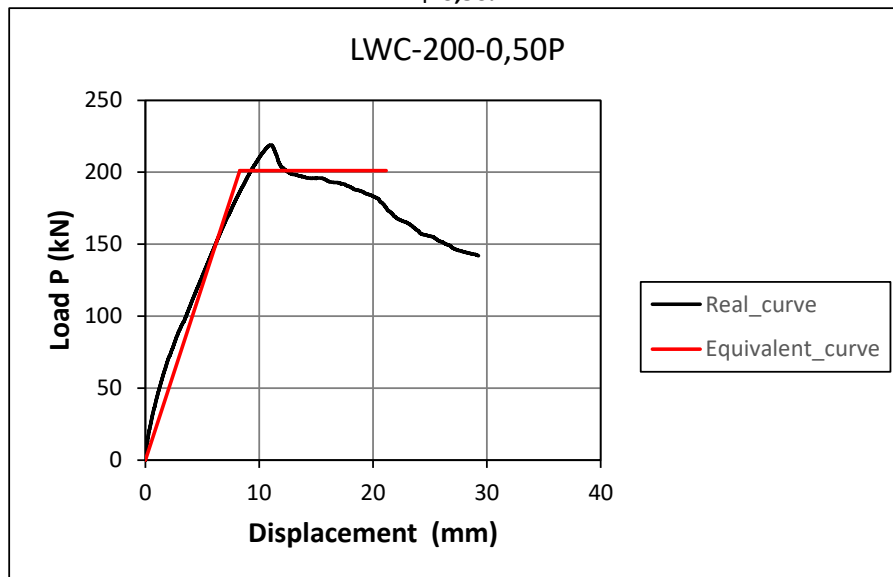


LWC-350-0

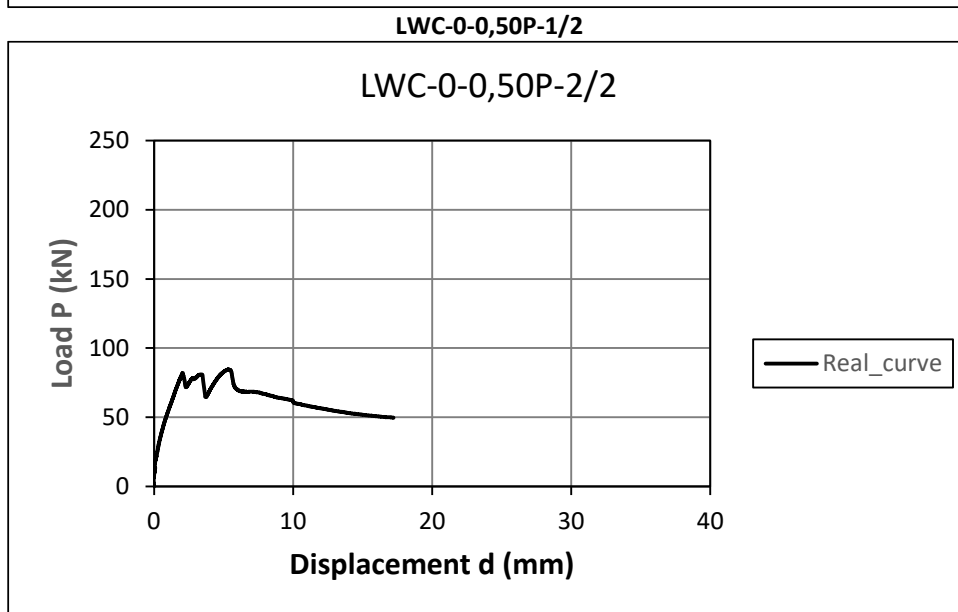
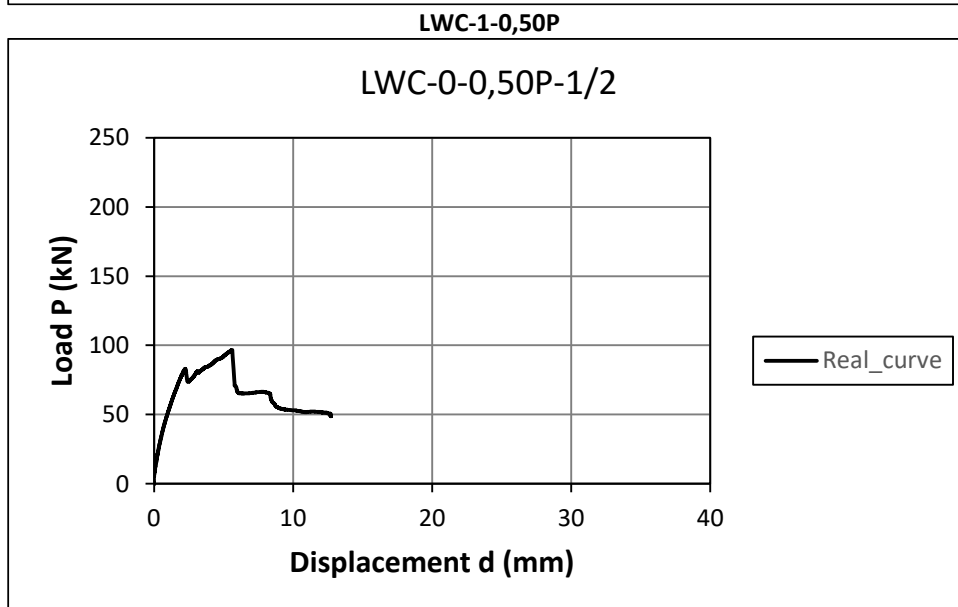
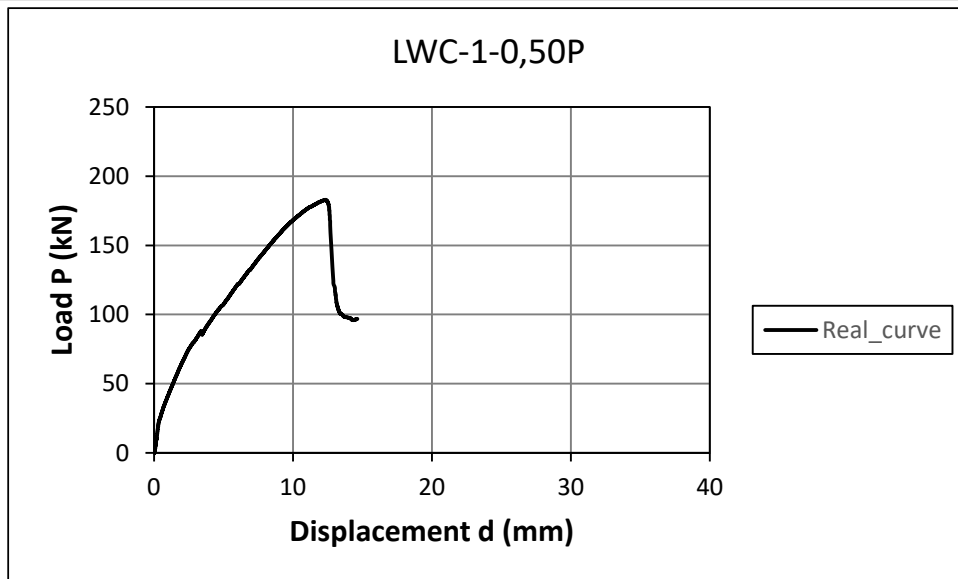


LWC-0-0-2/2

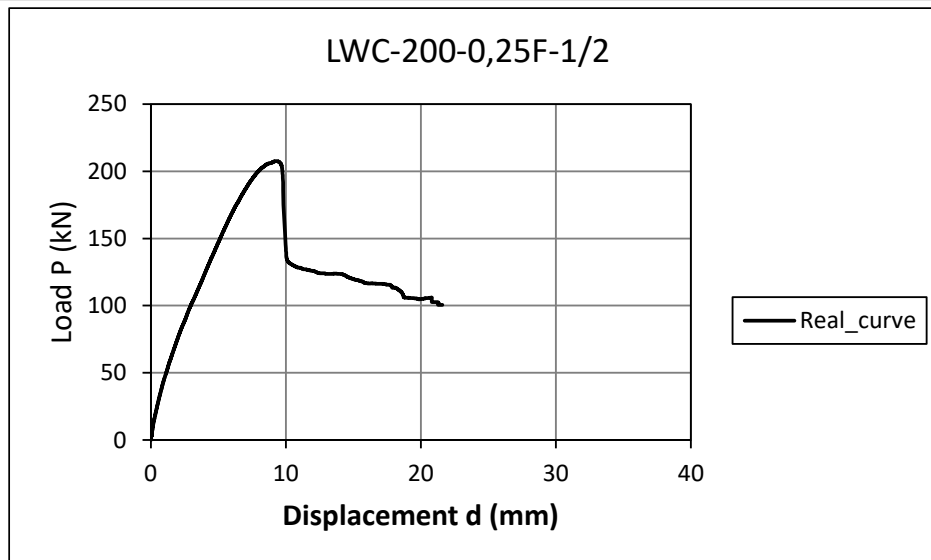
Δοκοί σύνθεσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος – Προκαταρκτική σύνθεση LWAC_0,50P–
 $V_f=0,50\%$



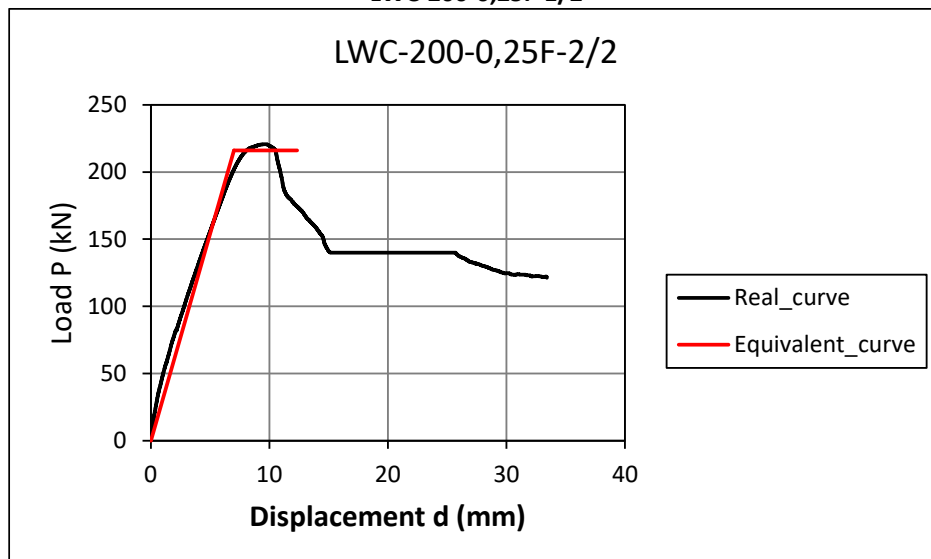
LWC-350-0,50P-2/2



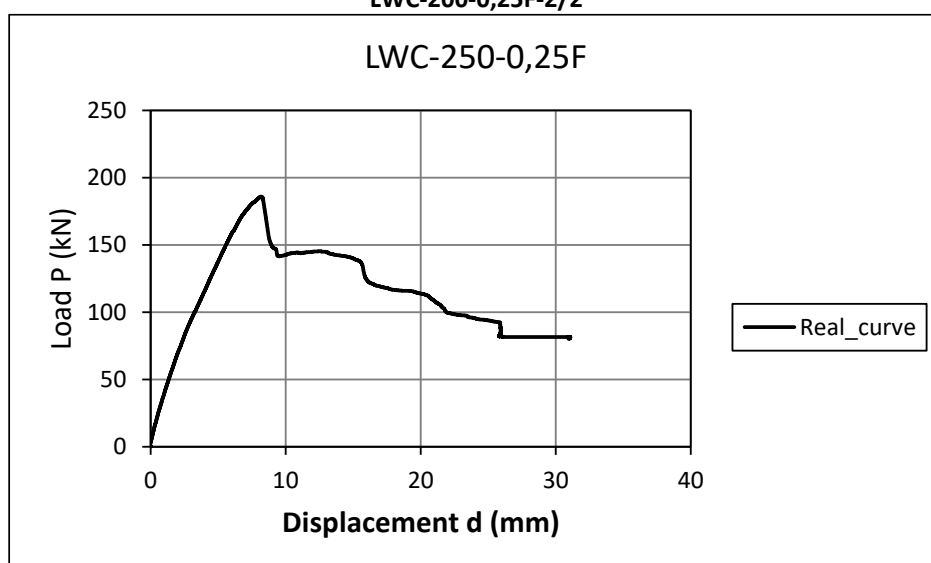
LWC-0-0,50P-2/2
Δοκοί σύνθεσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος – Τελική σύνθεση LWAC_0,25F- $V_f=0,25\%$



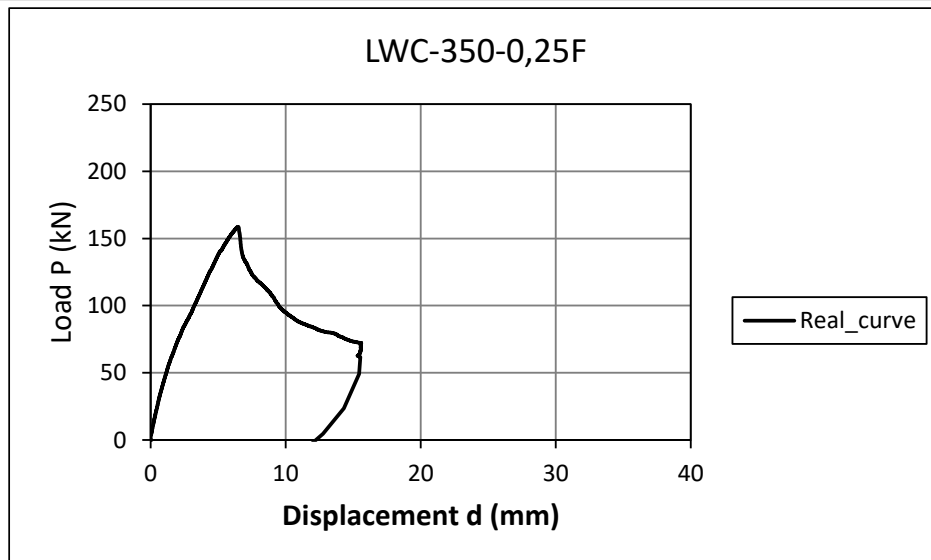
LWC-200-0,25F-1/2



LWC-200-0,25F-2/2

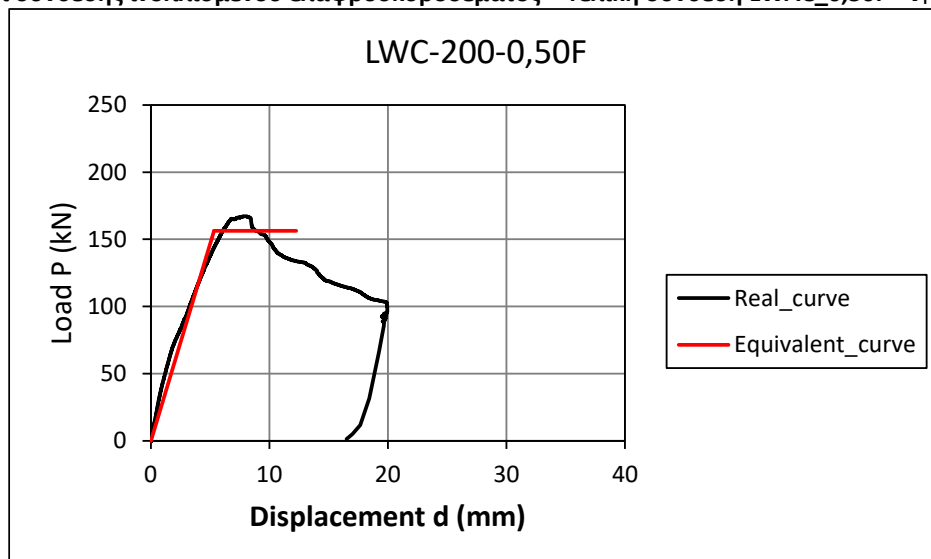


LWC-250-0,25F

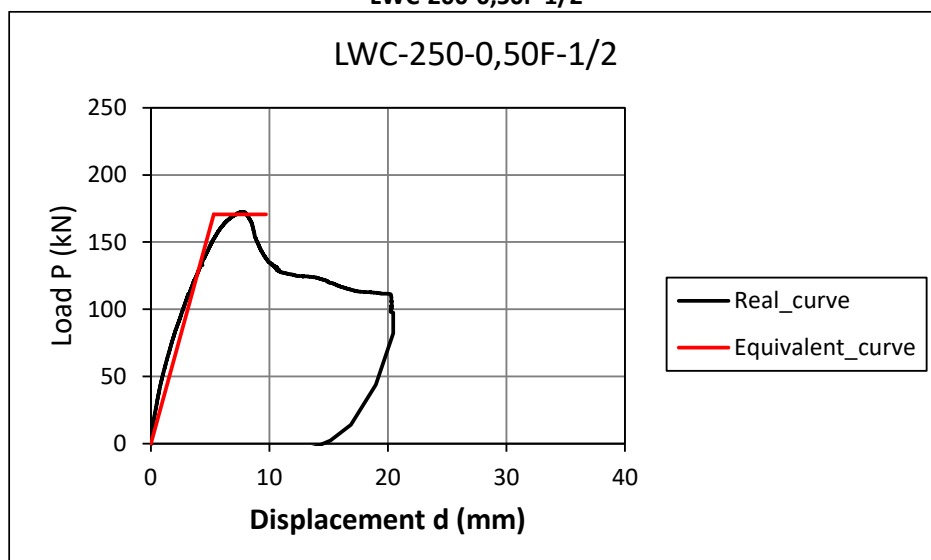


LWC-350-0,25F

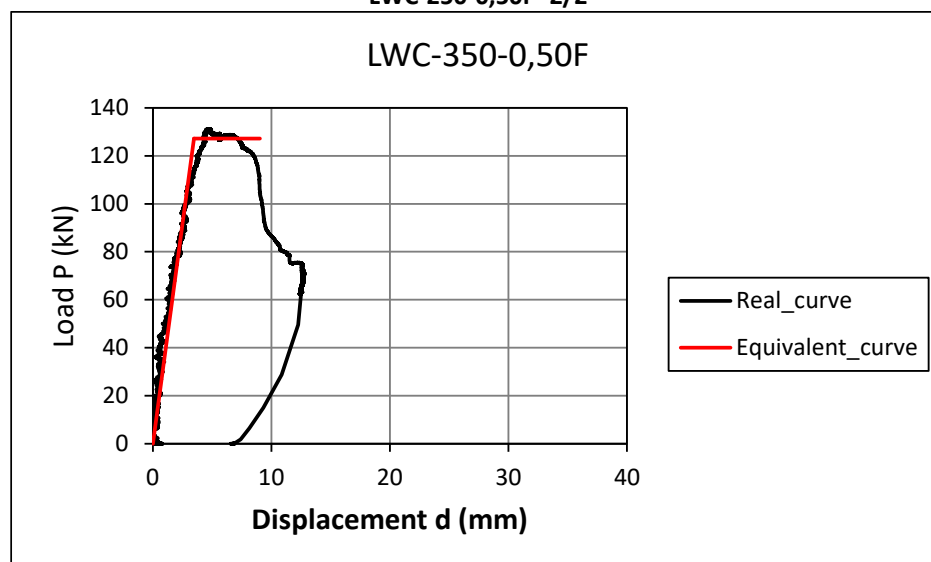
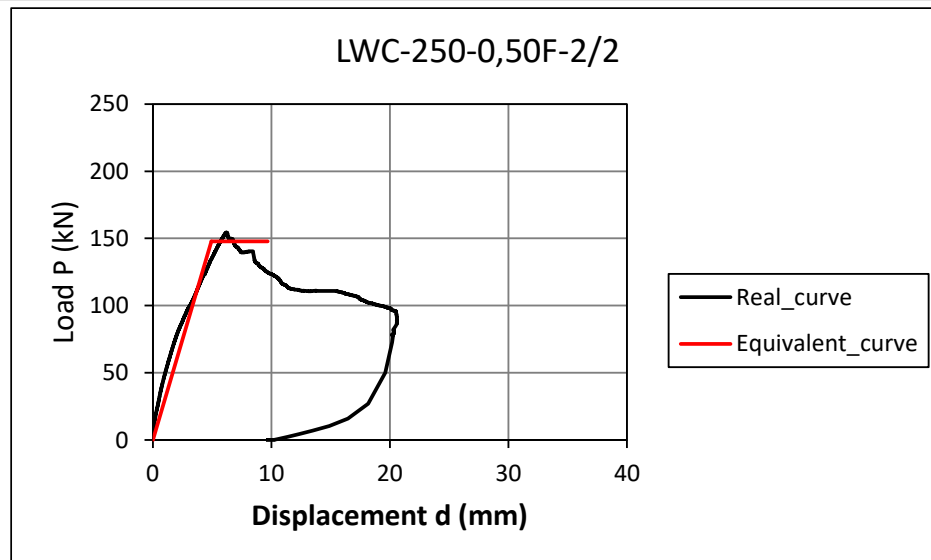
Δοκοί σύνθεσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος – Τελική σύνθεση LWAC_0,50F- $V_f=0,50\%$



LWC-200-0,50F-1/2



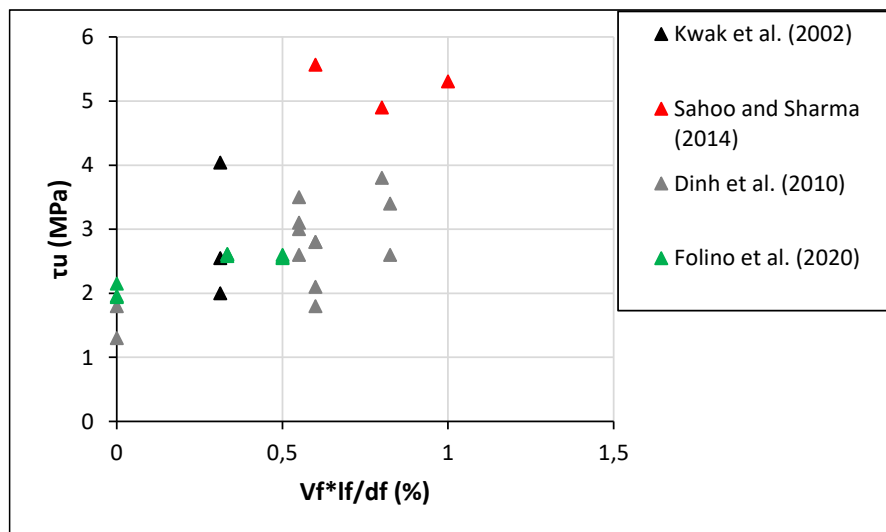
LWC-250-0,50F -1/2



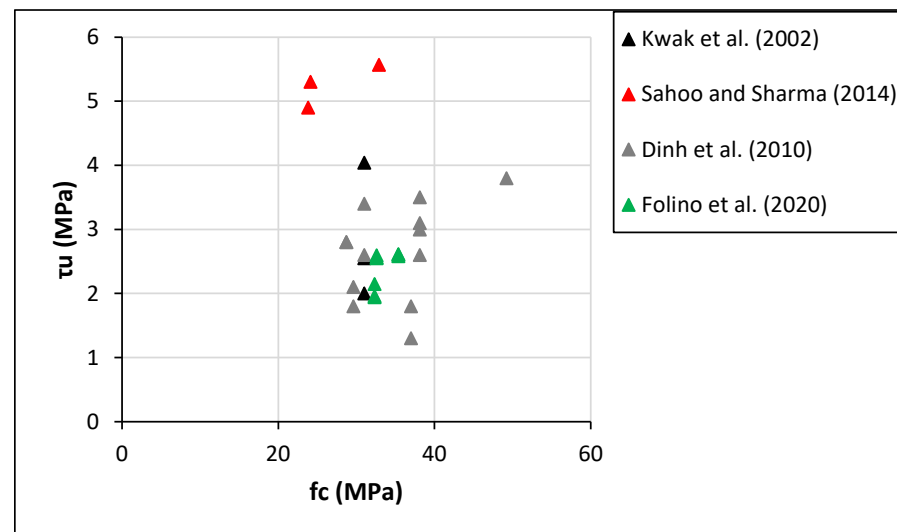
Εικόνα 63. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο δοκού πριν και μετά την διαγραμμικοποίηση τους

Παράρτημα Β

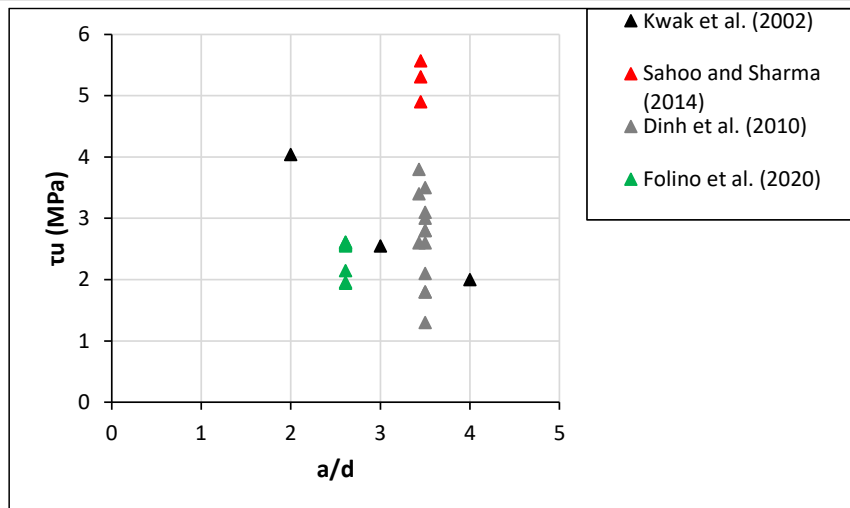
Στο παρόν Παράρτημα παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των ερευνών των οποίων τα συμπεράσματα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.4.1.1, καθώς και όσα πληρούσαν τα κριτήρια που τέθηκαν στην αρχή της ίδιας ενότητας. Αποτελούν 28 δοκούς ινοπλισμένου και μη συμβατικού σκυροδέματος, χωρίς εγκάρσιο διατμητικό οπλισμό. Παρακάτω παρατίθενται μόνο δεδομένα για την διατμητική τάση των δοκών στο μέγιστο φορτίο της δοκού τ_u , κι όχι για την διατμητική τάση στην οποία εμφανίστηκαν οι πρώτες ρωγμές και η πλαστιμότητα των δοκών διότι δεν υπήρχε επαρκές πλήθος δεδομένων στις εν λόγω έρευνες.



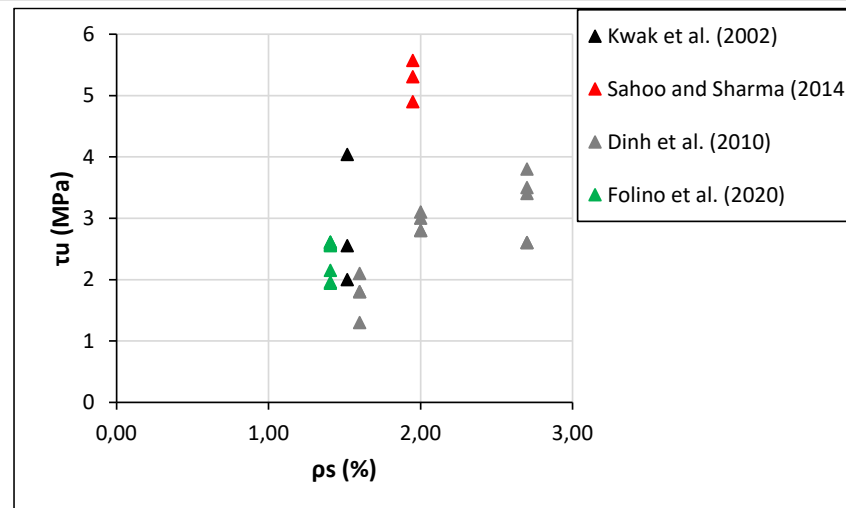
(α) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $V_f * I_f / d_f$



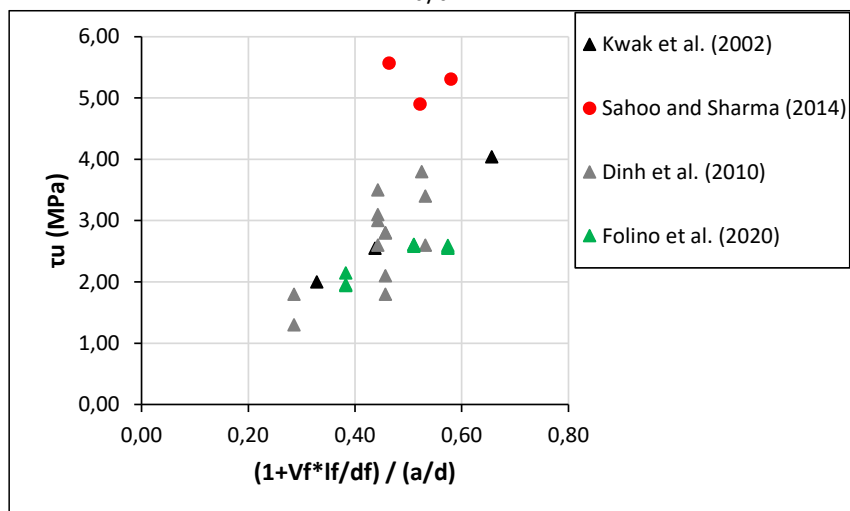
(β) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c



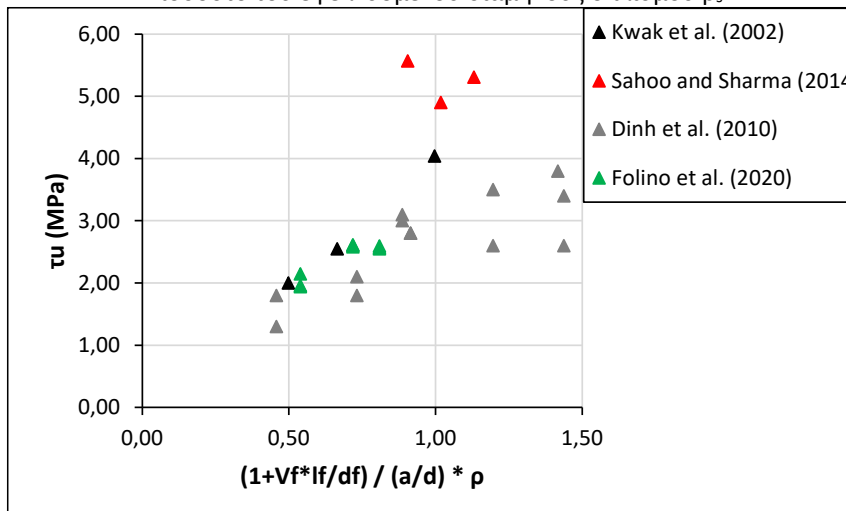
(γ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο a/d



(δ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού ρ_s

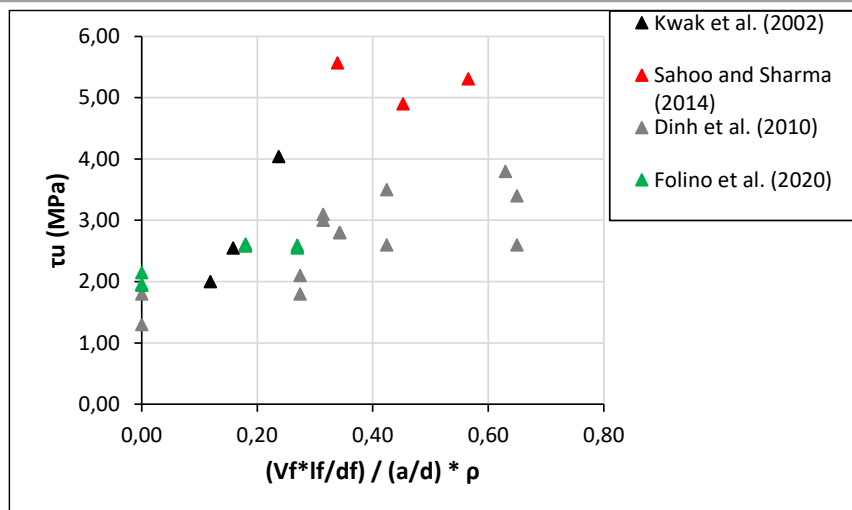


(ε) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(1+V_f \cdot I_f/d_f)/(a/d)$

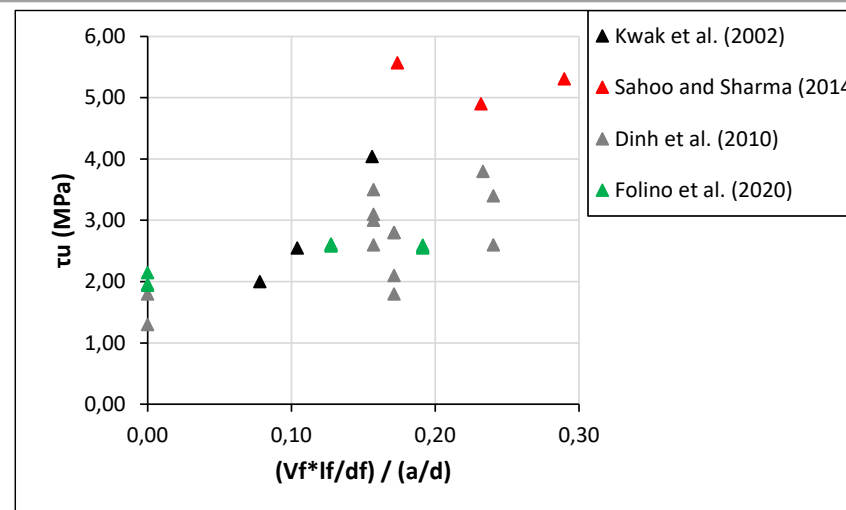


(στ) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(1+V_f \cdot I_f/d_f)/(a/d) \cdot \rho_s$

Εικόνα 64. Διαγράμματα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με διάφορες παραμέτρους και διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων (συμπεριλαμβάνονται και μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου σκυροδέματος)

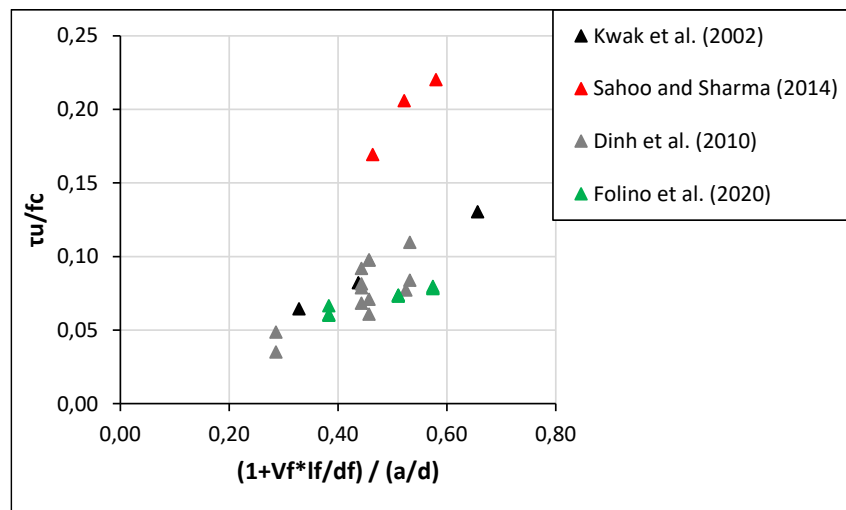


(α) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(V_f * I_f / d_f) / (a/d) * \rho_s$

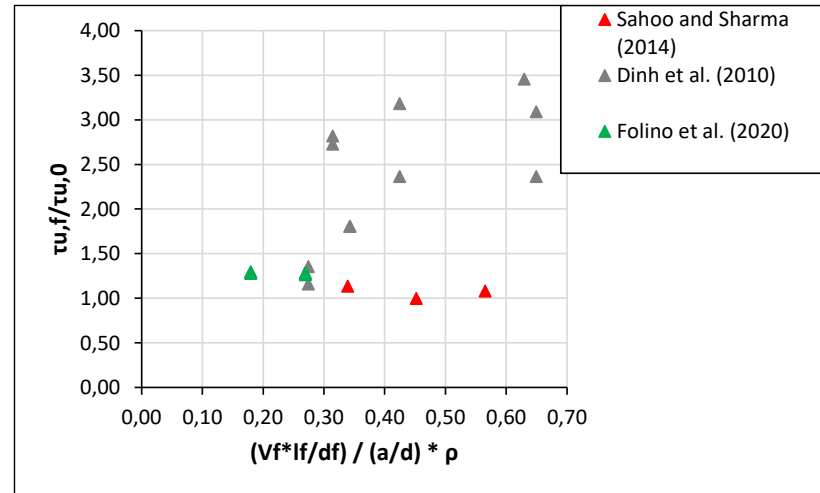


(β) Διάγραμμα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u σε σύγκριση με τον λόγο $(V_f * I_f / d_f) / (a/d)$

Εικόνα 65. Διαγράμματα αναπτυσσόμενης διατμητικής αντοχής τ_u πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με διάφορες παραμέτρους και διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων (δεν συμπεριλαμβάνονται μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου σκυροδέματος)



Εικόνα 66. Διαγράμματα λόγου διατμητικής αντοχής προς θλιπτική αντοχή σκυροδέματος τ_u / f_c πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με τον όρο $(1 + V_f * I_f / d_f) / (a/d)$ (συμπεριλαμβάνονται και μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου σκυροδέματος)



Εικόνα 67. Διαγράμματα λόγου διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων και μη ινοπλισμένων δοκιμών δοκών $\tau_{u,f}/\tau_{u,0}$ πειραματικών ερευνών σε σύγκριση με τον όρο $(V_f \cdot l_f / d_f)$ (δεν συμπεριλαμβάνονται μελέτες με δοκίμια μη ινοπλισμένου σκυροδέματος)

Παράρτημα Γ

Παρακάτω παρατίθενται οι φωτογραφίες που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων σε πρίσματα (Εικόνα 68) και μονοαξονικής θλίψης σε κυλίνδρους (Εικόνα 69), των εξεταζόμενων συνθέσεων.



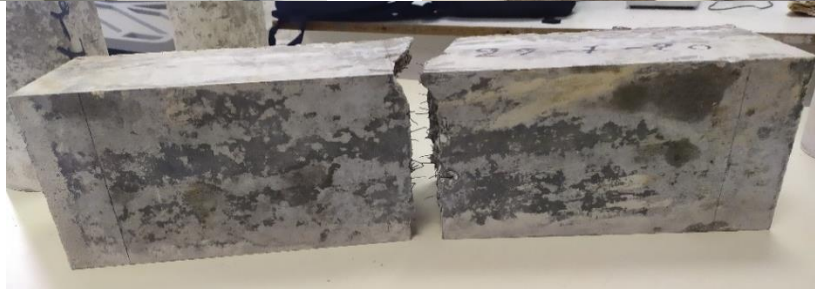
LWAC1



LWAC2



LWAC3



LWAC1_0,50P



LWAC2_0,50P

Εικόνα 68. Αστοχία δοκιμών σε κάμψη τριών σημείων μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος



LWAC1



LWAC2

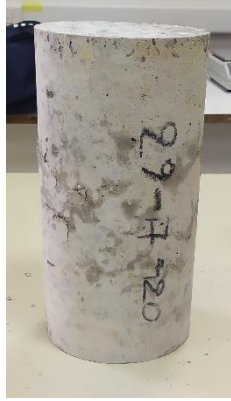


LWAC3



LWAC1_0,50P





LWAC2_0,50P



LWAC3_0,50P

Εικόνα 69. Αστοχία δοκιμίων σε θλίψη μη ινοπλισμένου και ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος