



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου
σκυροδέματος με πιθανές εφαρμογές στην υποστήριξη υπογείων
τεχνικών έργων**

Διπλωματική Εργασία

Λεωνίδας Κ. Παγάνης

Εξεταστική Επιτροπή

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής

Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Καθηγητής

Χανιά

Μάιος 2009

Περίληψη

Τα σύγχρονα υπόγεια τεχνικά έργα είναι μεγάλης έκτασης και ευρύτατα διαδεδομένα στα μεγάλα αστικά κέντρα αλλά και στις οδικές και σιδηροδρομικές ζεύξεις μεταξύ αστικών κέντρων.

Το κόστος υποστήριξης τέτοιων υπόγειων έργων και ιδιαίτερα των σήραγγων είναι συνήθως πολύ μεγάλο, σε σχέση με τον προϋπολογισμό του έργου. Μία αλλαγή στον τρόπο υποστήριξης, είτε μέσω μίας τεχνολογικής καινοτομίας, είτε μέσω μιας διαφορετικής προσέγγισης στη φάση της τελικής επένδυσης, ενδεχομένως θα μείωνε πολύ το κόστος, με αποτέλεσμα η κατασκευή τέτοιων έργων να γίνει ακόμα πιο ελκυστική.

Η υποστήριξη που συχνά απαιτείται σε υπόγειες σήραγγες περιλαμβάνει μια σειρά μέτρων, όπως μεταλλικά πλαίσια, με/ή χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με/ή χωρίς κοχλίες κατανεμημένης ή σημειακής αγκύρωσης, μονολιθική υποστήριξη με οπλισμό ή/και συνδυασμό των παραπάνω.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προκαταρκτική μελέτη των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος, του οποίου οι αντοχές και οι ελαστικές ιδιότητες συγκρίνονται με αυτές του άοπλου σκυροδέματος με στόχο τη διερεύνηση της πιθανής χρήσης του ως μέσο υποστήριξης υπογείων έργων. Εάν η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος θεωρηθεί εφικτή από τους μελετητές ή/και κατασκευαστές των υπογείων έργων σε αντικατάσταση ή μερική αντικατάσταση των συμβατικών μέτρων υποστήριξης τότε είναι πολύ πιθανό να υπάρξει μεγάλη εξοικονόμηση πόρων κατά την κατασκευή υπόγειων τεχνικών έργων.

Abstract

Modern underground engineering is widely used in major urban centers but also in road and rail links between urban centers.

The cost of supporting such works, especially underground tunnels, is typically very large in relation to the budget of the project. A change in the way of support, either through a technological innovation, or through a different approach in the final support system, might well reduce costs, resulting in an advantage towards the construction of such projects to become more attractive.

This thesis is a preliminary study of the properties of fiber reinforced concrete, whose strength and elastic properties are compared with those of normal concrete to explore its possible use in reinforcement of underground works. If the use of fiber reinforced concrete is considered feasible by designers and / or constructors of underground projects in place or in partial replacement of conventional support measures then large savings in the construction of underground structures.

Πρόλογος

Ο Benjamin Franklin είχε πει «*Ή γράψε κάτι που αξίζει, ή κάνε κάτι που αξίζει να γραφτεί*». Προσωπικά, πιστεύω πως όλοι οι άνθρωποι που βοήθησαν για να ολοκληρωθεί αυτή η διπλωματική, είχαμε στόχο το δεύτερο. Το μέγεθος της προσπάθειας που κατέβαλε ο καθένας από εμάς, της γνώσης που αναζητήθηκε και προφανώς του ζήλου, που επιδείξαμε για την επίτευξη του στόχου μας δε μπορεί να αποτυπωθεί εξ ολοκλήρου σε ένα κείμενο, το βέβαιο όμως είναι ότι αξίζει την προσπάθεια.

Οι άνθρωποι, που εργάστηκαν για την ολοκλήρωση των πειραματικών διαδικασιών, αλλά και την επίβλεψη του κειμένου και που θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς, είναι ο κ. **Αγιουτάντης Ζαχαρίας**, καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συνεχή του καθοδήγηση και βοήθεια, ο κ. **Μαυριγιαννάκης Στέλιος**, εργαστηριακός βοηθός και μέλος του εργαστηρίου της Μηχανικής Πετρωμάτων για την καθοριστική βοήθειά του στην εκτέλεση των πειραματικών διαδικασιών, ο κ. **Στειακάκης Χρύσανθος** για την έγκυρη ενημέρωσή του στα σύγχρονα γεωτεχνικά θέματα και η κ. **Παπαδάκη Ζωγραφιά**, επιστημονικός συνεργάτης του εργαστηρίου της Μηχανικής Πετρωμάτων για τις απαραίτητες διορθώσεις της επί του κειμένου της διπλωματικής, αλλά κυρίως για την ψυχολογική βοήθειά της σε δύσκολες στιγμές.

Ευχαριστίες, οφείλω να δώσω στον κ. Περδικάτση για τη βοήθειά του στη μικροσκοπική εξέταση δοκιμίων και στις εταιρείες **Sika-Fibers** και **Inomix/Sidenor S.A.**, οι οποίες μας προμήθευσαν δωρεάν τις απαραίτητες ποσότητες ινών για την ολοκλήρωση των δοκιμών, στον **Συνεταιρισμό Εργολάβων Οικοδομών - ΠΡΟΜΕΚΑΤ** για την προμήθεια των μητρών χύτευσης των δοκιμίων και στην εταιρεία **Φινομπετόν Α.Ε.** για την δωρεάν προμήθεια του σκυροδέματος.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου Αγγελάκη Βασίλη και Γκουβέρη Νίκο για την πολύτιμη βοήθειά τους στο εργαστηριακό μέρος της διπλωματικής.

αφιερώνεται
στην οικογένειά μου
και στους αγαπημένους φίλους μου

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract.....	iii
Πρόλογος.....	iv
 Κεφάλαιο 1	 1
Εισαγωγή.....	1
 Κεφάλαιο 2	 3
Υποστήριξη σηράγγων	3
2.1 Κατανομή τάσεων στο πέτρωμα	4
2.2 Καταπόνηση υποστήριξης	7
2.3 Τύποι υποστήριξης	10
2.3.1 Μεταλλότυπος	13
2.3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	14
 Κεφάλαιο 3	 17
Σκυρόδεμα σε τεχνικά έργα	17
3.1. Σύνθεση σκυροδέματος.....	17
3.1.1 Ιδιότητες σκυροδέματος.....	18
3.1.2 Κατηγοριοποίηση σκυροδέματος	20
3.2 Οπλισμένο σκυρόδεμα	20
3.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα	22
 Κεφάλαιο 4	 27
Σχεδίαση και υλοποίηση πειραματικής διαδικασίας.....	27
4.1 Είδη ινών και χαρακτηριστικά τους.....	28
4.1.1. Ίνες πολυπροπυλενίου (PP)	28
4.1.2. Χαλύβδινες ίνες	29
4.2 Επιλογές για τη σκυροδέτηση δοκιμίων.....	30

4.3	Σχεδίαση πειραματικής διαδικασίας με τις διατιθέμενες ίνες	32
4.4	Σκυροδέτηση δοκιμών	34
4.5	Εκτέλεση δοκιμών	37
4.5.1	Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	37
4.5.2	Δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό	39
4.5.3	Μικροσκοπική εξέταση δοκιμών	41
Κεφάλαιο 5		43
Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....		43
5.1	Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.....	44
5.1.1	Τρόπος αστοχίας των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη.....	53
5.2	Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού	55
5.2.1	Τρόπος αστοχίας των δοκιμών σε έμμεσο εφελκυσμό	69
Κεφάλαιο 6		71
6.1	Συμπεράσματα.....	71
6.2	Προτάσεις	73
Βιβλιογραφία και αναφορές		75
Διεθνής Βιβλιογραφία		75
Ελληνική Βιβλιογραφία		75
Παράρτημα		77

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η συγκέντρωση πληθυσμού στα μεγάλα αστικά κέντρα έχει πυροδοτήσει την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων, τα οποία διευκολύνουν τη λειτουργία των αστικών κέντρων και κυρίως τη μετακίνηση των πολιτών, όπως ανισόπεδοι οδικοί και σιδηροδρομικοί κόμβοι, υπόγειοι σιδηρόδρομοι και σήραγγες.

Οι σήραγγες αποτελούν υπόγεια τεχνικά έργα, μεγάλου μεν προϋπολογισμού, με φιλικό δε χαρακτήρα προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Για το λόγο αυτό, προτιμούνται από μεταλλευτικές εταιρίες και από συγκοινωνιακές υπηρεσίες. Εντούτοις, το μεγάλο κόστος τους αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για πολλές μελετητικές και κατασκευαστικές εταιρίες. Ένα μεγάλο μέρος του προϋπολογισμού μεγάλων υπόγειων τεχνικών έργων καταναλώνεται στη εγκατάσταση των μέτρων υποστήριξης του υπόγειου ανοίγματος.

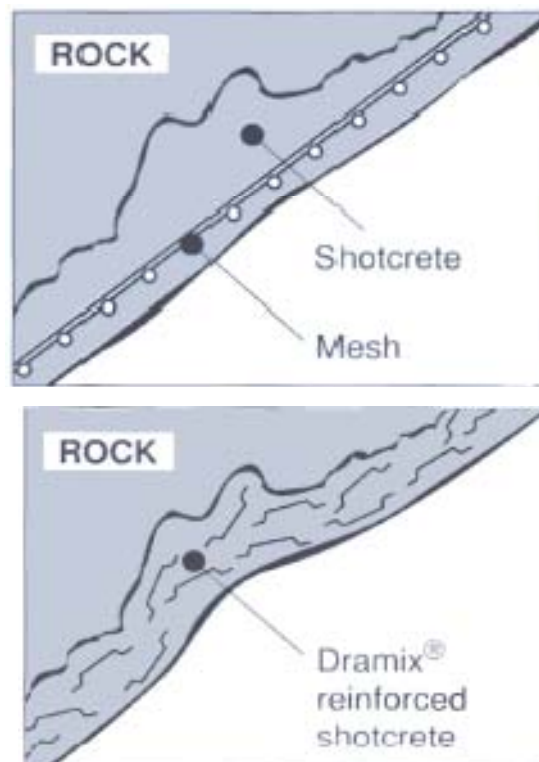
Ειδικά για τα υπόγεια συγκοινωνιακά έργα, το κοινό σημείο μεταξύ των διαφόρων μέτρων υποστήριξης είναι η χρήση σκυροδέματος, είτε μέσω μεταλλότυπων, είτε ως προκατασκευασμένα τεμάχια οπλισμένου σκυροδέματος (όπως για παράδειγμα με τη χρήση TBM), στην τελική επένδυση της σήραγγας, είτε ως εκτοξευόμενο ινοπλισμένο ή μη σκυροκονίαμα ή σκυρόδεμα στα πρώτα στάδια υποστήριξης.

Η τοποθέτηση του σκυροδέματος συνήθως συνδυάζεται με την χρήση είτε βαρέως μεταλλικού οπλισμού, είτε μεταλλικών πλεγμάτων, είτε συνδυασμού και των δύο. Δεδομένης της μεγάλης έκτασης των υπογείων έργων, η προμήθεια του όποιου μεταλλικού οπλισμού καθίσταται αρκετά δαπανηρή.

Επομένως, η ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας, η οποία θα μπορεί να μειώσει το κόστος του μεταλλικού οπλισμού και θα μπορεί να λειτουργεί εξίσου αποτελεσματικά με προγενέστερες μεθοδολογίες υποστήριξης, είναι προφανώς εξαιρετικά ευπρόσδεκτη από τις κατασκευαστικές εταιρίες. Η χρήση πλαστικών ή μεταλλικών ή οργανικών ινών, ως πρόσθετο στοιχείο στα δομικά υλικά δεν αποτελεί μία νέα

τεχνολογία. Από την αρχαιότητα ακόμα χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή πλίνθων, με την μορφή ινών άχυρου ή ινών μαλλιού, για την ενίσχυσή τους σε οικοδομικές εργασίες.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται περισσότερο στις κατασκευές βιομηχανικών δαπέδων και λιγότερο σε οικοδομικές εργασίες. Στις σήραγγες, χρησιμοποιούνται ίνες μαζί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή σκυροκονίαμα, το οποίο καλύπτει συνήθως κατά την πρώτη φάση υποστήριξης, την οροφή και τα τοιχώματα των σηράγγων.



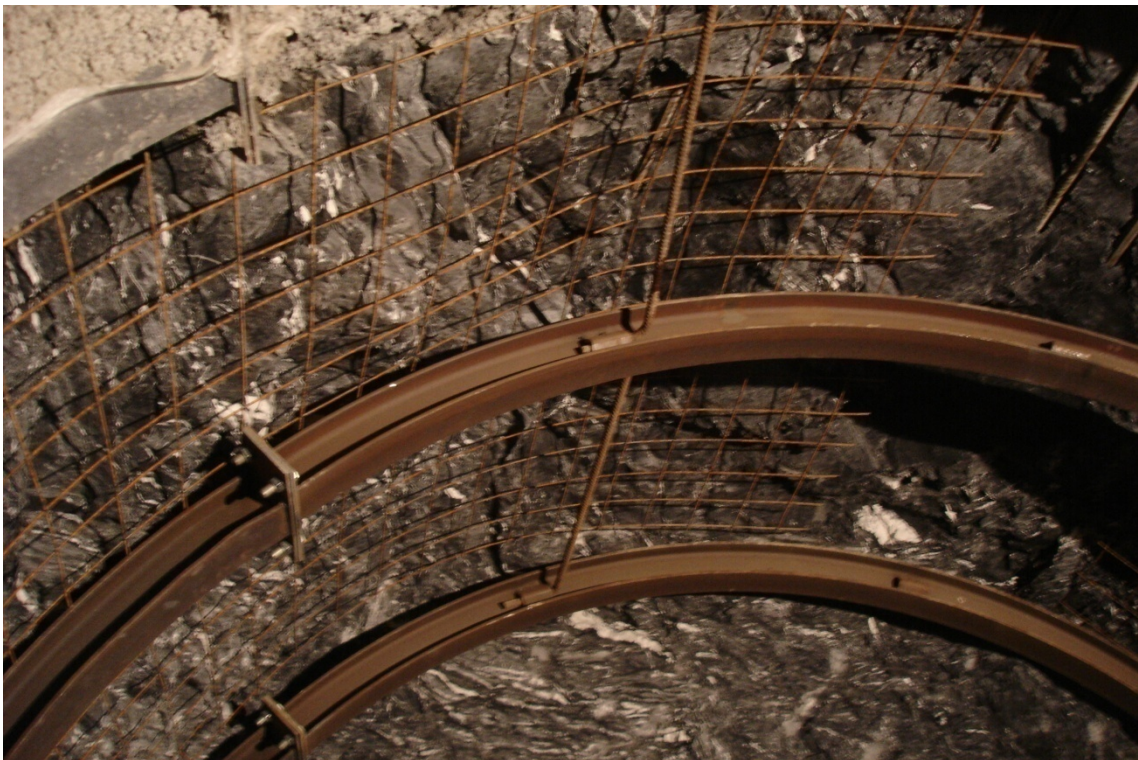
Εικόνα 1.1: Τρόπος εφαρμογής των ινών με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τελική επένδυση των σηράγγων (Bekaert, Dramix 2008)

Πρόσφατα, πολλοί μελετητές τεχνικών έργων εξέτασαν την εισαγωγή της τεχνολογίας αυτής, στον τομέα της υποστήριξης σηράγγων με μόνιμο πια χαρακτήρα και συγκεκριμένα στην κατασκευή της τελικής υποστήριξης των σηράγγων (Εικόνα 1.1). Η αρχή λειτουργίας και ενεργοποίησης των ινών είναι σχεδόν ίδια με αυτή του μεταλλικού πλέγματος και αποσκοπεί στην απορρόφηση εφελκυστικών φορτίων, τα οποία δεν μπορεί να λάβει το σκυρόδεμα. Η απορρόφηση των εφελκυστικών τάσεων από τις ίνες και όχι από το σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μικρότερων ρωγμών στο σκυρόδεμα και την διασφάλιση των συνθηκών ασφαλείας στο εργοτάξιο.

Κεφάλαιο 2

Υποστήριξη σηράγγων

Ως **υποστήριξη**, ορίζονται οι διαδικασίες και τα μέσα εκείνα που χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες του υποστηριζόμενου πετρώματος και την ικανοποιητική παραλαβή των φορτίων που δέχεται η εξωτερική στοιβάδα της σήραγγας (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Υποστήριξη οροφής σήραγγας με χρήση χαλύβδινων πλαισίων και δομικών πλεγμάτων

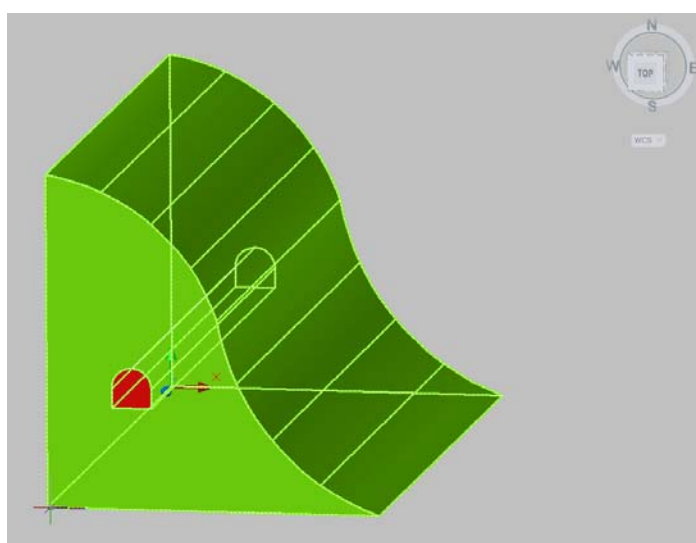
Η υποστήριξη έχει δύο στόχους (Brady and Brown 1985):

- να **ενισχύσει** (*reinforce*) το πέτρωμα με την ενεργοποίηση και τη διατήρηση της προϋπάρχουσας αντοχής της βραχομάζας (*mobilized strength*)

- να **υποστηρίξει** (*support*) το φορτίο μεμονωμένων τμημάτων της οροφής και των τοιχωμάτων που έχουν αποκολληθεί από τη βραχομάζα.

2.1 Κατανομή τάσεων στο πέτρωμα

Μια σήραγγα καταπονείται υπό μία σύνθετη εντατική κατάσταση. Μετά την όρυξη ενός υπόγειου ανοίγματος προκαλείται ανακατανομή των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, γεγονός που επιφέρει μεταβολή στο προϋπάρχον εντατικό πεδίο με σκοπό την αποκατάσταση της στατικής ισορροπίας του συστήματος (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Μοντέλο υπόγειου τεχνικού έργου

Οι τάσεις που ασκούνται γύρω από το σύστημα, λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου διακρίνονται σε **αρχικές** (*virgin stresses*) και **επιφερόμενες** (*induced stresses*).

Οι αρχικές τάσεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες, (Αγιουτάντης 2002):

- **Βαρυτικές τάσεις** (*gravitational stresses*), που οφείλονται στη δράση του πεδίου βαρύτητας
- **Τεκτονικές τάσεις** (*tectonic stresses*), που οφείλονται σε τεκτονικές δυνάμεις
- **Παραμένουσες τάσεις** (*residual stresses*) που μπορεί να δημιουργηθούν λόγω φυσικών ή/και χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε περιορισμένους όγκους πετρωμάτων

Οι **κατακόρυφες τάσεις** που εμφανίζονται στο σύστημα υπολογίζονται ως ίσες με το βάρος των υπερκειμένων στρωμάτων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_u = \sum_{i=1}^n \gamma_i * h_i \quad (\text{Σχέση 2.1})$$

όπου σ_u είναι η κατακόρυφη θλιπτική τάση, n είναι ο αριθμός των διαφορετικών στρωμάτων γ_i είναι το μοναδιαίο βάρος κάθε στρώματος των υπερκειμένων και h_i είναι το πάχος του κάθε στρώματος.

Οι **οριζόντιες τάσεις** που εμφανίζονται λόγω του νέου εντατικού πεδίου θεωρούνται ανάλογες των κατακόρυφων τάσεων και υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_h = k * \sigma_u \quad (\text{Σχέση 2.2})$$

όπου σ_h είναι η οριζόντια θλιπτική τάση και k είναι ο συντελεστής πλευρικών τάσεων ή συντελεστής πλευρικής ώθησης ή συντελεστής ουδέτερης ώθησης (*earth pressure coefficient*) που είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του εντατικού πεδίου.

Το κυρίως πρόβλημα στην όρυξη υπόγειων ανοιγμάτων είναι ο προσδιορισμός των μέγιστων τάσεων που ασκούνται στο άνοιγμα. Οι τάσεις αυτές θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος που περιβάλλει τη σήραγγα, ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθεια και η ασφάλεια του έργου.

$$S_f * \sigma_{max} \leq \sigma_a \leq S_f \leq \frac{\sigma_a}{\sigma_{max}} \quad (\text{Σχέση 2.3})$$

όπου σ_{max} η μέγιστη τάση που δέχεται το υλικό, είναι S_f ο συντελεστής ασφαλείας για τον οποίο θεωρείται ότι $S_f \geq 1$ και σ_a είναι η αντοχή του υλικού στον αντίστοιχο τύπο καταπόνησης. Η καταπόνηση μιας κυκλικής σήραγγας σε δύο διαστάσεις, για την περίπτωση ενός ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου υλικού, εκφρασμένη σε πολικές συντεταγμένες, σ_θ , σ_r και $\tau_{r\theta}$, υπολογίζεται από τις εξισώσεις του **Kirsch**.

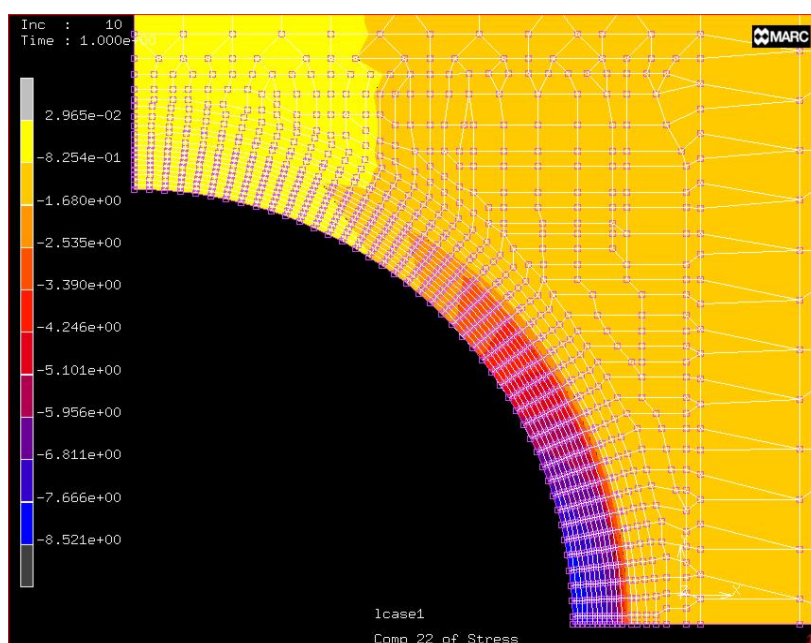
$$\sigma_r = \left[\frac{\sigma_h + \sigma_u}{2} \right] \left[1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + \left[\frac{\sigma_h - \sigma_u}{2} \right] \left[1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \quad (\text{Σχέση 2.4})$$

$$\sigma_\theta = \left[\frac{\sigma_h + \sigma_u}{2} \right] \left[1 + \frac{a^2}{r^2} \right] - \left[\frac{\sigma_h - \sigma_u}{2} \right] \left[1 + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \quad (\text{Σχέση 2.5})$$

$$\tau_{r\theta} = \left[\frac{\sigma_u - \sigma_h}{2} \right] \left[1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right] \sin 2\theta \quad (\text{Σχέση 2.6})$$

Επί προσθέτως, υπάρχουν αριθμητικοί και αναλυτικοί τρόποι υπολογισμού της ανακατανομής του εντατικού πεδίου, όπως πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένες διαφορές, κλπ, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις σύνθετης γεωμετρίας καθώς και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υφίστανται ελαστικά, ομογενή και ισότροπα σώματα. Η ανάλυση, κατά Kirsch, αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα της ανακατανομής τάσεων γύρω από τα υπόγεια ανοίγματα.

Στην Εικόνα 2.3, φαίνεται μία επίλυση ενός κυκλικού ανοίγματος με οριζόντια και κατακόρυφη συμμετρία, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία είναι δυνατό κάποιος να δει γραφικά τις συγκεντρώσεις τάσεων στα τοιχώματα του ανοίγματος, λόγω της ανακατανομής του εντατικού πεδίου.



Εικόνα 2.3: Καταπόνηση υπόγειου ανοίγματος

Θεωρητικά, σε ένα εντατικό πεδίο, που το περιβάλλον πέτρωμα θεωρείται ελαστικό, ομογενές και ισότροπο υλικό και ο συντελεστής πλευρικών τάσεων k είναι μηδενικός, στο σύνορο του ανοίγματος και πάνω στον οριζόντιο άξονα του δαπέδου της σήραγγας εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις ($\theta=0^\circ$), ενώ στη στέψη της σήραγγας εμφανίζονται εφελκυστικές τάσεις. Αναλυτικότερα, οι θλιπτικές τάσεις για $\theta=0^\circ$ από την οριζόντιο (παράλληλη προς το δάπεδο της σήραγγας) υπολογίζονται ίσες με $\sigma_\theta=3\sigma_v$, όπου σ_v η κατακόρυφη τάση στο αδιατάραχτο πέτρωμα. Αντίθετα, οι εφελκυστικές τάσεις για $\theta=90^\circ$ υπολογίζονται ίσες με $\sigma_\theta=-\sigma_v$ (Kirsch 1898).

2.2 Καταπόνηση υποστήριξης

Τα στοιχεία της υποστήριξης που τοποθετούνται στις σήραγγες καλούνται να παραλάβουν τα φορτία που εμφανίζονται στο διαταραγμένο πέτρωμα λόγω της όρυξης του ανοίγματος. Η τελική επένδυση σχεδιάζεται να αναλάβει τα εξής φορτία (Καββαδάς 2007):

1. Το φορτίο των προσωρινών αγκυρίων (σε βραχώμαζα με έντονα ερπυστική συμπεριφορά, ή πιθανότητα διάβρωσης των αγκυρίων)
2. Το φορτίο των χαλύβδινων πλαισίων σε περίπτωση που έχουν ανεπαρκή επικάλυψη και μπορούν να διαβρωθούν
3. Το φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε περίπτωση που έχει έντονο ερπυσμό (π.χ. λόγω των προσμίκτων)
4. Μέρος του φορτίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μονίμου έργου (κατά την άμεση υποστήριξη της σήραγγας το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας)
5. Τυχόν αυξημένα μακροχρόνια φορτία της βραχώμαζας λόγω ερπυσμού
6. Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμελούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης
7. Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα
8. Τυχόν σεισμική επιφόρτιση της σήραγγας

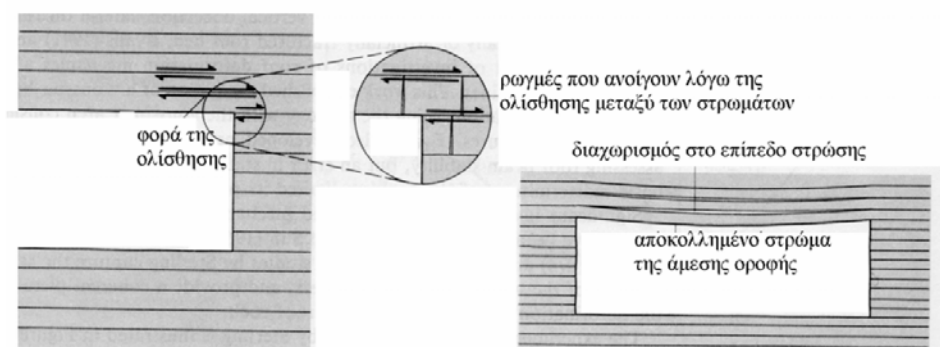
Το είδος της υποστήριξης που εφαρμόζεται σε ένα άνοιγμα, μπορεί να χαρακτηριστεί ως **ενεργητική** (active) ή ως **παθητική** (passive) υποστήριξη. Ο μηχανισμός λειτουργίας της ενεργητικής υποστήριξης, βασίζεται στην εφαρμογή φορτίου πάνω στην επιφάνεια του πετρώματος που υποστηρίζει από την στιγμή της εγκατάστασής της και μετά. Τέτοιου είδους υποστήριξη είναι απαραίτητη να εφαρμοστεί σε εντατικά πεδία τα οποία διευκολύνουν την κατάπτωση χαλαρών όγκων βραχομάζας. Η ενεργητική υποστήριξη χρησιμοποιεί κυρίως προεντεταμένους κοχλίες και συρματόσκοινα, μηχανικούς ή υδραυλικούς ορθοστάτες, διογκούμενη υποστήριξη από σκυρόδεμα, κλπ.

Αντίθετα, η παθητική υποστήριξη βασίζεται στην απορρόφηση των τάσεων που ασκεί η υπερκείμενη βραχομάζα, χωρίς την επιβολή κάποιου πρόσθετου φορτίου. Η

παθητική υποστήριξη χρησιμοποιεί κυρίως χαλύβδινες αψίδες, ξύλινες υποστηρίξεις, μη προεντεταμένους κοχλίες κλπ. Επομένως, τα φορτία τα οποία αναπτύσσονται περιμετρικά του ανοίγματος μπορούν να παραληφθούν από τα στοιχεία της υποστήριξης με ενεργητικό ή παθητικό τρόπο. Ο κατάλληλος συνδυασμός αυτών των στοιχείων μπορεί να αποφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα υποστήριξης της σήραγγας με το ανάλογο οικονομικό κόστος.

Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού των στοιχείων υποστήριξης σε ένα έργο εξαρτάται από την θεωρητική προσέγγιση του εκάστοτε προβλήματος υποστήριξης. Παραδείγματος χάριν, όταν ένα ρωγματωμένο πέτρωμα μπορεί να προσομοιαστεί εύκολα με μία δοκό, εγκάρσια ρωγματωμένη, τότε ο υπολογισμός της υποστήριξης βασίζεται στην **θεωρία της αψίδας** (arch or dome theory) και την **ανάλυση χαμηλού θόλου** (Σοφιανός και Καπένης 1999). Η συγκεκριμένη θεωρία, στηρίζεται στο γεγονός της διατάραξης και της χαλάρωσης, των υπερκείμενων ενός ανοίγματος, πετρωμάτων λόγω της ανακατανομής των τάσεων και την απορρόφηση των ασκούμενων τάσεων από παρακείμενα τμήματα του πετρώματος. Τα υλικά αυτά χαλαρώνουν και όταν υπερβαίνουν την τιμή της φέρουσας ικανότητάς τους, αστοχούν αποτελώντας μεγάλο κίνδυνο για την ευστάθεια του έργου και την ασφάλεια του προσωπικού και του μηχανοκίνητου εξοπλισμού. Η αψίδα των θλιπτικών τάσεων δημιουργείται από την τομή των στρώσεων των πετρωμάτων της οροφής και ενός δευτερεύοντος συστήματος ασυνεχειών που τέμνουν κάθετα τις στρώσεις της οροφής.

Τα στρώματα των οροφών σε υπόγεια ανοίγματα, κατά τον Fayol, συχνά εμφανίζονται με στρωσιγενή δομή και διαχωρίζονται κατά την κάμψη τους με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το καθένα από αυτά να μεταφέρει στα στηρίγματα μόνο το ίδιο βάρος του ως δοκός, χωρίς να φορτίζει ή να φορτίζεται από τα όμορα στρώματα (Σοφιανός και Καπένης 1999) (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Αστοχία στρωσιγενούς οροφής (Σοφιανός 2002)

Ως αποτέλεσμα, η ευστάθεια της οροφής καθορίζεται από την εκάστοτε φέρουσα ικανότητα του φορτιζόμενου στρώματος, κυρίως από το ίδιο το βάρος του. Η φέρουσα ικανότητα του ρωγματωμένου στρώματος της οροφής δύναται να επανέλθει και να φέρει φορτία, ύστερα από μία πρόσθετη μετακίνηση κατά την οποία σταθεροποιείται και αλληλοεμπλέκεται με τα περιβάλλοντα πετρώματα (Σοφιανός και Καπένης 1999).

Επομένως, γίνεται κατανοητό πως η υποστήριξη των υπόγειων οροφών εξαρτάται από την θεωρητική προσέγγιση του μηχανικού του έργου, όπως συμβαίνει με τον υπολογισμό του ελάχιστου πάχους της εγκάρσιας ρωγματωμένης δοκού που είναι σταθερή, προκειμένου να υπολογιστεί το αναγκαίο μήκος των αγκυρίων (ήλων) που θα εφαρμοστούν στη διαταραγμένη οροφή (**ανάλυση χαμηλού θόλου**) στη θεωρία της αψίδας (Εικόνα 2.5) (Σοφιανός και Καπένης 1999).



Εικόνα 2.5: Λειτουργία χαμηλού θόλου (Σοφιανός 2002)

Συνεπώς, αντικειμενικός σκοπός της υποστήριξης είναι να παραλάβει το φορτίο αυτών των χαλαρωμένων πετρωμάτων, τα οποία θεωρητικά περιβάλλονται από μία αψίδα στο εσωτερικό της οποίας δεν δύναται να ασκηθούν τάσεις. Όλοι οι σχεδιασμοί υποστηρικτικών συστημάτων, υπολογίζουν το φορτίο μόνο των πετρωμάτων που τοποθετούνται μέσα σε αυτή την αψίδα και όχι ολόκληρης της κατακόρυφης στήλης των υπερκείμενων πετρωμάτων.

Το φορτίο αυτών των πετρωμάτων σε συνδυασμό με την υποστήριξη προκαλεί ένα πολύπλοκο εντατικό πεδίο, το οποίο περιγράφηκε προηγουμένως. Εφόσον το εντατικό πεδίο γύρω από το άνοιγμα συνδυάζει θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις, είναι προφανές πως η υποστήριξη θα πρέπει να λειτουργεί ανάλογα για κάθε σημείο στην περιφέρεια του ανοίγματος και να λαμβάνει υπόψη της τον προσανατολισμό των μέγιστων τάσεων που ασκούνται στην επιφάνειά της.

2.3 Τύποι υποστήριξης

Η υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων επιτυγχάνεται με χρήση ποικίλων στοιχείων υποστήριξης, από τα οποία τα συνηθέστερα είναι (Αγιουτάντης 2002):

- τα ξύλινα πλαίσια
- οι υδραυλικοί ή μηχανικοί ορθοστάτες
- τα μεταλλικά πλαίσια (πλαίσια μορφοχάλυβα, πλαίσια lattice girdes)
- οι κοχλίες (αγκύρια, καρφιά, κλπ) (Εικόνα 2.6)
- το σκυρόδεμα
- ειδικά συστήματα (όπως υδραυλικές ασπίδες)



Εικόνα 2.6: Υποστήριξη τοιχωμάτων σήραγγας με χρήση κοχλίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος

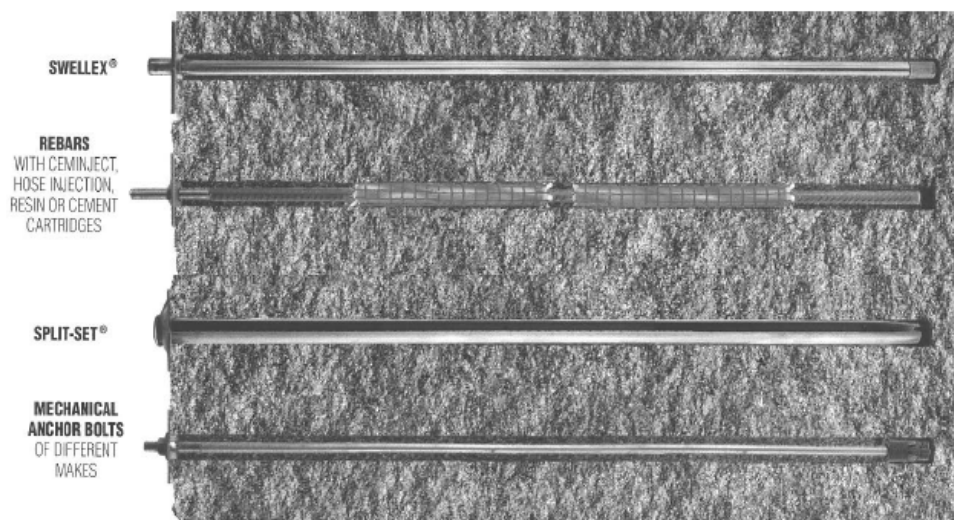
Για την επίτευξη αποδοτικότερου ή οικονομικότερου σχεδιασμού υποστήριξης είναι δυνατός ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων συστημάτων υποστήριξης.

Ένας συνηθισμένος σχεδιασμός υποστήριξης υπογείων ανοιγμάτων περιλαμβάνει χρήση σκυροδέματος (οπλισμένου και μη) και μεταλλικών (χαλύβδινων) πλαισίων, τα οποία τοποθετούνται επιδερμικά στα τοιχώματα της σήραγγας.

Η υποστήριξη μίας σήραγγας αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία και γι' αυτό το λόγο διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, με κύριο γνώμονα το χρονοδιάγραμμα του

έργου αλλά και την ασφάλεια τόσο του έργου όσο και του προσωπικού που εργάζεται στα μέτωπα εκσκαφής. Την **προσωρινή** (temporary) υποστήριξη, η οποία προηγείται και την **τελική** (μόνιμη, permanent) υποστήριξη, η οποία τοποθετείται στο τελικό στάδιο της κατασκευής του έργου.

Η προσωρινή υποστήριξη αποτελεί ένα συνδυασμό μέτρων υποστήριξης, με κύριο σκοπό την άμεση υποστήριξη ασταθών όγκων πετρωμάτων στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας και την προστασία του ανθρώπινου δυναμικού που εργάζεται στο εσωτερικό της σήραγγας και του μηχανικού εξοπλισμού. Ένας τυπικός συνδυασμός μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο συνδυασμός δομικών πλεγμάτων, εκτοξευόμενου σκυροδέματος (gunite), κοχλιών, αγκυρίων, ράβδων προπορείας (spiles, forepoles) και μεταλλικών πλεγμάτων (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Μορφές αγκυρίων (Καβαδάς 2005)

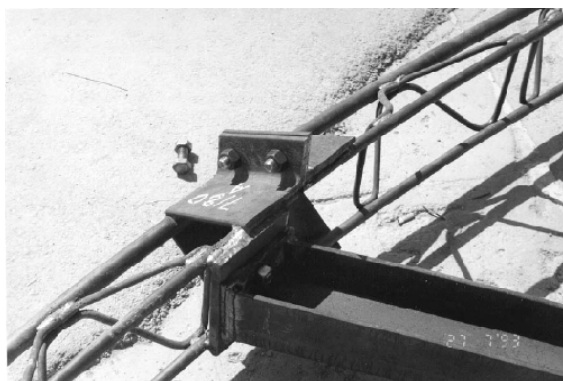
Τα μεταλλικά πλαίσια χρησιμοποιούνται τόσο στην προσωρινή υποστήριξη, όσο και στην μόνιμη επένδυση της σήραγγας. Ανάλογα με το είδος του τεχνικού έργου και τη χρήση της σήραγγας, η προσωρινή υποστήριξη μπορεί να χαρακτηριστεί είτε ως τελική είτε ως προσωρινή μορφή υποστήριξης (πρωτογενής υποστήριξη). Μετά το πέρας των εργασιών, η προσωρινή υποστήριξη ενδέχεται να ενισχυθεί και να διαμορφωθεί με έναν δεύτερο συνδυασμό μέτρων υποστήριξης (δευτερογενής υποστήριξη). Η διαδικασία αυτή έχει σκοπό την υποστήριξη της σήραγγας σε μεγάλο βάθος χρόνου και την διαμόρφωση μιας πιο φιλικής εξωτερικής στοιβάδας της υποστήριξης στα τοιχώματα της σήραγγας. Ειδικότερα, η μόνιμη επένδυση κατασκευάζεται μετά την συμπλήρωση της σύγκλισης της προσωρινής

υποστήριξης, την οποία και διαδέχεται. Οι συγκλίσεις της σήραγγας προκύπτουν είτε από την ερπυστική παραμόρφωση του εδάφους, είτε από την χαλάρωση των αγκυρώσεων, λόγω εμφάνισης τοπικού ερπυσμού στις θέσεις αγκύρωσης, είτε λόγω της εμφάνισης ερπυσμού στο στρώμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην προσωρινή υποστήριξη. Η τελική επένδυση μιας σήραγγας μπορεί να διαμορφωθεί με ποικίλους τρόπους. Μερικοί από αυτούς είναι οι παρακάτω:

- υποστήριξη με οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο τοποθετείτε *in situ*, είτε με τη χρήση μεταλλότυπων, είτε με τη χρήση εκτοξευτήρα
- εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο χρησιμοποιεί ως οπλισμό του, είτε πλαίσια (Εικόνα 2.8), είτε δομικό πλέγμα, είτε δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) (Εικόνα 2.9)
- προκατασκευασμένα πλαίσια σκυροδέματος



Εικόνα 2.8: Μεταλλικά πλαίσια



Εικόνα 2.9: Δικτυωτά πλαίσια – Lattice girders

2.3.1 Μεταλλότυπος

Οι μεταλλότυποι (Εικόνα 2.10) χρησιμοποιούνται συνήθως στη διάνοιξη σηράγγων με τη **μέθοδο NATM** (New Austrian Tunneling Method). Η μέθοδος διάνοιξης σηράγγων αποτελείται από τρία επιμέρους στάδια (Κωμοδρόμος 2008):

- Εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της διατομής της σήραγγας σε πολλαπλές φάσεις
- Προσωρινή υποστήριξη με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (με ίνες), χαλύβδινο πλέγμα και πλαίσια διατομής I, αγκύρια, δοκούς προτοπείας, κλπ.
- Κατασκευή μόνιμης επένδυσης μετά την ολοκλήρωση διάνοιξης

Οι μεταλλότυποι αποτελούνται από χαλύβδινα πλαίσια ποικίλης μορφής και διαστάσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη χύτευση της τελικής επένδυσης από σκυρόδεμα. Η λειτουργία των μεταλλοτύπων βασίζεται στην απορρόφηση του φορτίου του σκυροδέματος μέχρι την πήξη του.



Εικόνα 2.10: Σκυροδέτηση Μόνιμης επένδυσης (Κωμοδρόμος 2008)



Εικόνα 2.11: Συναρμολόγηση μεταλλότυπου (Κωμοδρόμος 2008)

2.3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, gunite) συνίσταται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή, με διαστάσεις μικρότερες των 10mm. Εφαρμόζεται στο μέτωπο και στα τοιχώματα της σήραγγας με εκτόξευση από κατάλληλο μηχανοκίνητο εξοπλισμό με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Ενδέχεται, να παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη του νερού τη στιγμή της εξόδου του από το στόμιο εκτόξευσης, είτε ως υγρό μίγμα (wet mix), όπου η ανάμιξη του μίγματος με το νερό γίνεται σε αναδευτήρα. Όταν υπάρχει μεγάλη κατανάλωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, συνήθως προτείνεται η χρήση υγρού μίγματος. Τα συστατικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, η παιπάλη πυριτίου που προστίθεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη διαπερατότητά του. Επίσης μειώνει το φαινόμενο της αναπήδησης (rebound) του σκυροδέματος κατά την φάση της εκτόξευσής του στα τοιχώματα του ανοίγματος και βελτιώνει την πρόσφυσή του σε επαφή με την εκάστοτε βραχομάζα (Κωμοδρόμος 2008).



Εικόνα 2.12: Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο της σήραγγας

Ενίοτε, χρησιμοποιείται ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με σκοπό την αντικατάσταση των μεταλλικών πλεγμάτων, κυρίως λόγω της μείωσης της αναπήδησης του σκυροδέματος και της ιδιότητας των ινών να μην υπόκεινται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση, αφού δεν είναι συνεχείς. Κύριο όμως πλεονέκτημα της χρήσης ινών είναι η ταχύτερη εφαρμογή τους στο μέτωπο διάνοιξης.



Εικόνα 2.13: Τοιχώματα σήραγγας επικαλυμμένα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Κεφάλαιο 3

Σκυρόδεμα σε τεχνικά έργα

3.1. Σύνθεση σκυροδέματος

Το **σκυρόδεμα** είναι μίγμα κονιάς (τσιμέντο), νερού και αδρανών υλικών, οι κόκκοι των οποίων καλύπτουν όλες τις διαβαθμίσεις (από παιπάλη και ψιλή άμμο μέχρι τα χαλίκια). Το μίγμα στερεοποιείται με την χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση).

Η **κονία** που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο, όπως αυτό προδιαγράφεται στο DIN 1164. Τα **αδρανή** κατά το DIN 4226 είναι ένα συνονθύλευμα θραυστών ή/και συλλεκτών χαλίκων (σκύρων) φυσικής ή/και τεχνητής προέλευσης. Αποτελείται από κόκκους συμπαγείς του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους (Wendehorst 1975).

Τα αδρανή διακρίνονται ανάλογα με την προέλευση και το μέγεθός τους (Πίνακας 3.1).

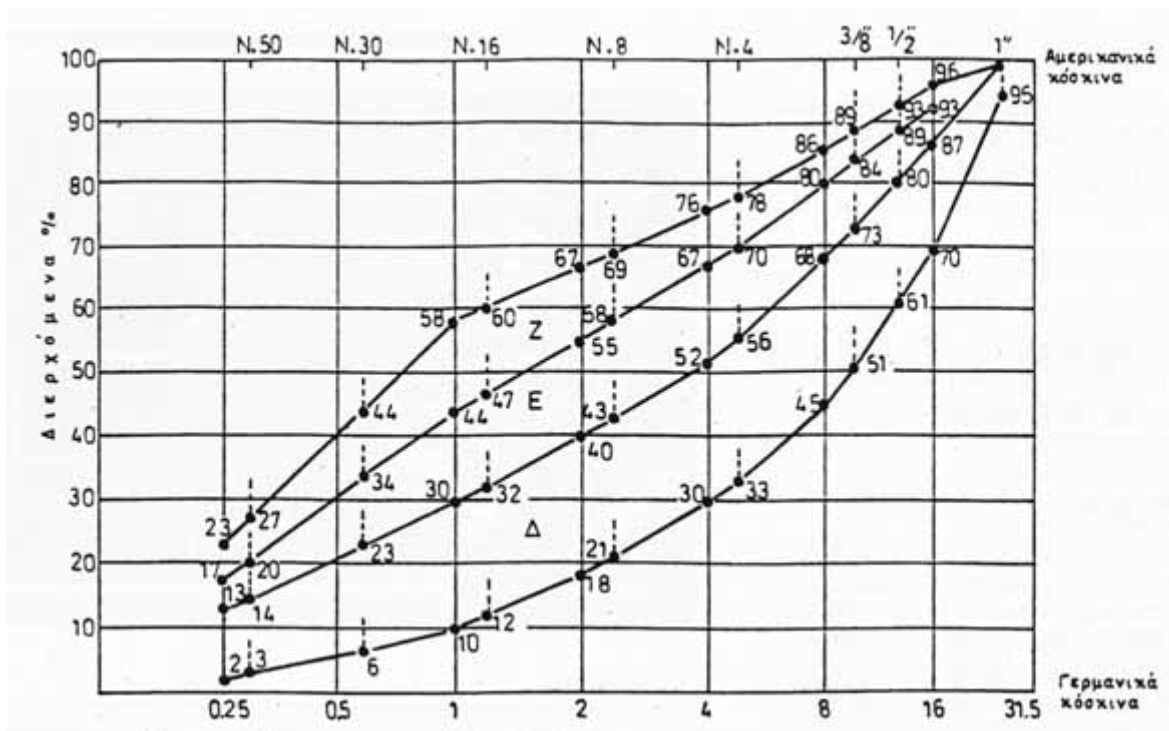
Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμοί αδρανών (Wendehorst 1975)

Αδρανή με		Πρόσθετος χαρακτηρισμός για	
Ελάχιστο μέγεθος κόκκου σε mm	Μέγιστο μέγεθος κόκκου σε mm	Συλλεκτά αδρανή	Θραυστά αδρανή
-	0,25	Παιπάλη	Παιπάλη θραυστή
-	1	Λεπτόκοκκη άμμος	Λεπτόκοκκη θραυστή άμμος
1	4	Χονδρόκοκκη άμμος	Χονδρόκοκκη θραυστή άμμος
4	32	Χάλικες	Σκύρα
32	63	Χονδροί χάλικες	Χονδρά σκύρα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι το **χαμηλό κόστος** (το φθηνότερο υλικό για παραλαβή θλιπτικών δυνάμεων), η **πλαστικότητα**, η **αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες** και η **μονολιθικότητα**.

Τα μειονεκτήματά του είναι το σημαντικό ίδιο **βάρος**, η μικρή **θερμομόνωση** και **ηχομόνωση** (Κεφαλιάκος 1999). Στα μίγματα σκυροδέματος τα αδρανή απαιτείται να έχουν συγκεκριμένη κοκκομετρική διαβάθμιση. Ένα παράδειγμα της

συνιστώμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης (τόσο για γερμανικά, όσο και αμερικανικά κόσκινα), φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών (Ν.Κ.Τ.Σ 1997)

3.1.1 Ιδιότητες σκυροδέματος

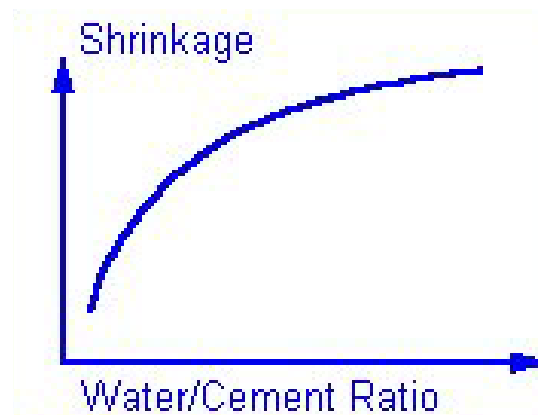
Το **φαινόμενο βάρος** του σκυροδέματος προσδιορίζεται μέσω δοκιμών ή εκτιμάται με βάση τις γνωστές τιμές φαινόμενων βαρών των συστατικών του σκυροδέματος (Ν.Κ.Τ.Σ, 1997).

Η **θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος** υπολογίζεται σε δοκίμια, τα οποία έχουν «ωριμάσει» για περίοδο 28 ημερών. Τα δοκίμια αυτά είναι, είτε κυλινδρικά διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm, είτε κυβικά ακμής 150mm, σύμφωνα με τις διατάξεις του Νέος Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος, (Ν.Κ.Τ.Σ, 1997).

Επειδή οι τιμές της αντοχής των δοκιμών αυτών συχνά ποικίλουν, εισήχθη η έννοια της χαρακτηριστικής αντοχής. Χαρακτηριστική αντοχή είναι η τιμή της αντοχής εκείνης την οποία υπερβαίνουν το 95% των δοκιμών ενός έργου. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται με το χρόνο, αλλά μειώνεται με διαχρονική φόρτιση.

Είναι πειραματικά αποδεδειγμένο ότι όταν αυξάνεται η ποσότητα του τσιμέντου σε 1m^3 σκυροδέματος, τόσο αυξάνεται και η αντοχή του σκυροδέματος. Αντίθετα, η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση του περιεχομένου σε νερό

(Εικόνα 3.2), το οποίο καθορίζεται έμμεσα από το λόγο Νερό/Τσιμέντο μέσα σε 1m^3 συμπυκνωμένου σκυροδέματος και δεν πρέπει να υπερβαίνει ποτέ το 0,7 (Κεφαλιάκος, 1999).



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα λόγου περιεχομένου νερού και τσιμέντου (Παναγιωτάκος 2003)

Οι μετρούμενες αντοχές του σκυροδέματος και η τυπική τους απόκλιση μπορούν να επηρεαστούν από αρκετούς παράγοντες.

Ορισμένοι από αυτούς μπορούν να χαρακτηριστούν ως κύριοι, οι παρακάτω:

- Το περιεχόμενο τσιμέντο
- Η αντοχή του τσιμέντου
- Η σχέση νερού προς τσιμέντο
- Η ποιότητα και σύνθεση των αδρανών
- Η ποιότητα και δοσομετρία των προσμίκτων
- Ο περιεχόμενος αέρας
- Η ακρίβεια των πλαστίγγων τροφοδοσίας
- Η ορθότητα και αναπαραγωγιμότητα της διαδικασίας δειγματοληψίας, κατασκευής, συντήρησης και θραύσης των δοκιμίων

Το σκυρόδεμα έχει μικρή **εφελκυστική αντοχή** και μπορεί να εξαντληθεί κατά τη διάρκεια επιβολής φορτίων, λόγω τάσεων από τη συστολή ξήρανσης, τις θερμοκρασιακές συστολές, κλπ. Γι' αυτό το λόγο θεωρείται πως τα εφελκυστικά φορτία παραλαμβάνονται εξ ολοκλήρου από τον σπλισμό του σκυροδέματος όπου αυτό χρησιμοποιείται (κτήρια, ειδικά έργα, υποστηρίξεις σηράγγων, κα.).

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της χαρακτηριστικής αντοχής του σκυροδέματος από τον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Εφελκυστική αντοχή σε MPa (Ε.Κ.Ο.Σ 2000)

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	12	16	20	25	30	35	40	45	50
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ 5%	1.1	1.3	1.5	1.8	2	2.2	2.5	2.7	2.9
ΜΕΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ 95%	2	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3

Σημαντική ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η **εργασιμότητα**. Για την ταξινόμηση των σκυροδεμάτων, με βάση αυτή την ιδιότητα, έχει υπολογιστεί μία κλίμακα, η οποία μετρά το πόσο «μαλακό» είναι το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με την κλίμακα αυτή, S1 είναι το πολύ σφιχτό σκυρόδεμα, ενώ S5 το πολύ μαλακό. Για τις συνηθισμένες χρήσεις, καλή εργασιμότητα θεωρείται η S3 ή S2.

3.1.2 Κατηγοριοποίηση σκυροδέματος

Με την καθοδήγηση της χαρακτηριστικής αντοχής, τα δοκίμια σκυροδέματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής δέκα ομάδες, σύμφωνα με τον Ν.Κ.Τ.Σ, 1997:

- C 8/10
- C12/15
- C16/20
- C20/25
- C25/30
- C30/37
- C35/45
- C40/50
- C45/55
- C50/60

Η πρώτη τιμή ορίζει τη χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου με γενέτειρα διάμετρο 15cm και ύψος 30cm σε MPa. Η δεύτερη τιμή ορίζει τη χαρακτηριστική αντοχή σε MPa κυβικού δοκιμίου ακμής 15cm.

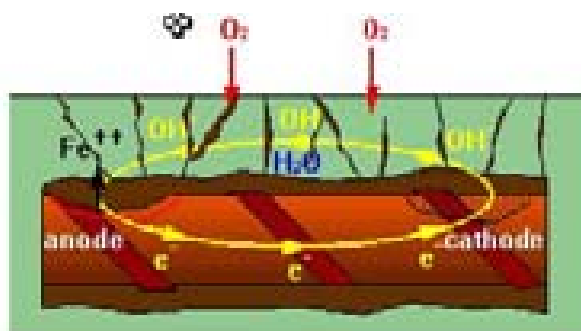
3.2 Οπλισμένο σκυρόδεμα

Συχνά σε τεχνικές εφαρμογές απαιτούνται υψηλές τιμές εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Οι αντοχές του σκυροδέματος, είτε θλιπτική, είτε εφελκυστική μπορούν να αυξηθούν με την εισαγωγή στη μάζα του στοιχείων, όπως χαλύβδινος

οπλισμός π.χ. με τη μορφή χαλύβδινου πλέγματος κα. Το σκυρόδεμα αυτό καλείται **οπλισμένο σκυρόδεμα**. Το κάθε ένα από τα παραπάνω πρόσθετα επηρεάζουν διαφορετικά τη λειτουργία του σκυροδέματος και αναπόφευκτα και την εφαρμογή του στα διάφορα έργα. Η τελική ποιότητα μίας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Ποιότητα υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα)
- Σωστή κατασκευή (καλούπωμα, σκυροδέτηση)
- Σωστή συντήρηση

Αν ένας από αυτούς τους παραπάνω παράγοντες δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της κατασκευής, τότε μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά όλη η τελική ποιότητά της. Για παράδειγμα, η κακή κατασκευή και συντήρηση μιας κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο περιεχόμενο σε νερό, το οποίο μπορεί να διαβρώσει το χάλυβα του οπλισμού του σκυροδέματος (Εικόνα 3.3). Η σωστή κατασκευή πρέπει να διασφαλίζει το αλκαλικό περιβάλλον που δημιουργεί το τσιμέντο, το οποίο περιβάλλει τον οπλισμό και το οποίο τον προστατεύει από την οξείδωσή του.



Εικόνα 3.3: Επίδραση οξείδωσης σε χαλύβδινο οπλισμό (Παναγιωτάκος, 2003)

Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με (Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμένου Σκυροδέματος, ΝΚΤΧΟΣ, 2008):

- την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας
- τη μείωση του pH
- την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον)
- την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κλπ.
- την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα

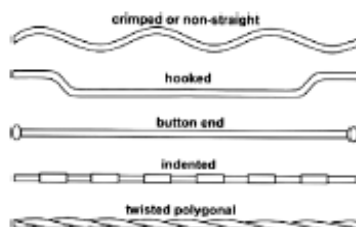
- την ύπαρξη ενεργών «κέντρων» στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως οξείες αιχμές ή πληγές)
- την ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης
- την επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού
- την ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση κλπ.)
- το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σημαντική η **ανθεκτικότητά** του (durability), δηλαδή η αντοχή του στο χρόνο. Αυτή επιτυγχάνεται μεταξύ άλλων και με την ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, η οποία υπολογίζεται σε 270kg τσιμέντο σε 1m³ σκυροδέματος. Έτσι προστατεύεται ο μεταλλικός οπλισμός και περιορίζεται ο βαθμός ενανθράκωσης (N.K.T.Σ, 1997).

3.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, ως οπλισμός στο σκυρόδεμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ίνες διαφόρων υλικών, αλλά κατάλληλων αντοχών. Στο εμπόριο διανέμονται πολλά είδη ινών και σε ποικίλες μορφές (Εικόνα 3.4), όπως:

- χαλύβδινες ίνες
- συνθετικές ίνες (πολυπροπυλενίου, πολυαιθυλένιο, PVA, αμίαντο (AFRP) κλπ)
- ίνες υάλου (GFRP)
- ίνες άνθρακα (CFRP), PA



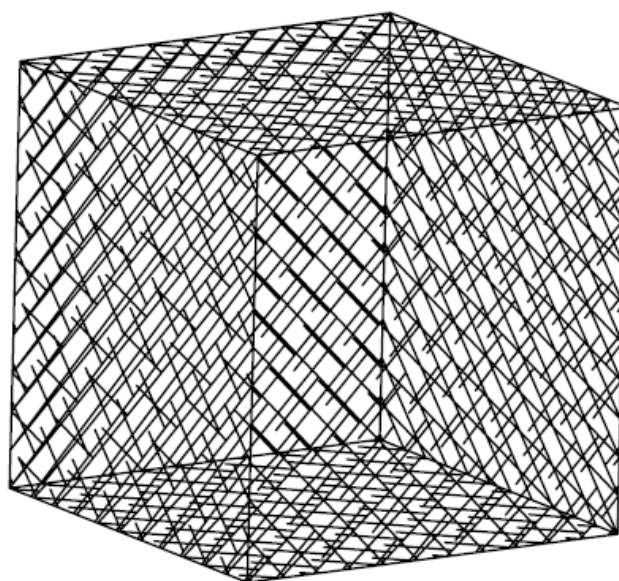
Εικόνα 3.4: Διάφορες μορφές ινών (Brandt 2008)

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ίνες σε τεχνικές εφαρμογές είναι οι ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου, λόγω της εύκολης διαμόρφωσής τους σε διάφορα μήκη και σχήματα. Έτσι συναντώνται χαλύβδινες ίνες με μορφή αγκυρίων, με τομές, σε ελικοειδή μορφή, κα. Η διαφορετική μορφή των ινών αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος εφαρμογής και διαφορετικής έντασης καταπόνηση.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, από την εξέταση της βιβλιογραφίας, η χρήση των ινών συνδυάζεται, κατά πλειοψηφία σε μεγάλα τεχνικά έργα, με σκυροδέματα υψηλών και υπερ-υψηλών αντοχών (high strength, ultra-high strength) (Padmarajaiah and Ramaswamy 2004, Gao, et al 1997).

Αρχικά, στο πλαίσιο διερεύνησης της επίδρασης του ινοπλισμού σε δοκίμια σκυροδέματος, εξετάζονται οι αντοχές και οι ελαστικές ιδιότητες κυβικών δοκιμίων και στη συνέχεια κυλινδρικών δοκιμίων (Brazil). Οι ίνες μέσα στο δοκίμιο, είτε κυβικό, είτε κυλινδρικό, είναι τυχαία προσανατολισμένες, αλλά ομοιόμορφα κατανεμημένες στο χώρο (Εικόνα 3.5).

Η προσθήκη ινών, διαφόρων τύπων και μεγεθών, στη μάζα του σκυροδέματος, ενισχύει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, υλικού το οποίο παραδοσιακά εμφανίζει χαμηλές τιμές εφελκυστικής αντοχής. Όταν, ένα τέτοιο υλικό τοποθετείται σε ένα εντατικό πεδίο το οποίο απαιτεί την παραλαβή εφελκυστικών τάσεων, τότε είναι δυνατόν το υλικό αυτό να ανταπεξέλθει, χωρίς τη χρήση του αντίστοιχου χαλύβδινου οπλισμού με τη μορφή πλέγματος.



Εικόνα 3.5: Δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος

Ανάλογα με το είδος της καταπόνησης, σε ένα στοιχειώδη όγκο ινοπλισμένου σκυροδέματος προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα (Γεωργακοπούλου 2006):

- Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνει χώρα η σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.
- Επίσης οι ίνες εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών λόγω της πρόσφυσης μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος και της πυκνότητας των ινών. Λειτουργούν σα «γέφυρες» που μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής.
- Οι ίνες λειτουργούν επίσης ως κινηματικός περιορισμός έναντι της διόγκωσης του υπό φόρτιση σκυροδέματος.
- Επί προσθέτως, βελτιώνουν την στρεπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος
- Η τυχαία διάταξη των ινών στον όγκο του εκάστοτε δοκιμίου, του προσδίδει ομοιογένεια και ισοτροπία.

Ο κύριος ρόλος των διασκορπισμένων ινών είναι να ελέγξουν το άνοιγμα και τη διάδοση των ρωγμών. Χάρη στις ίνες, οι μεγάλες ενιαίες ρωγμές αντικαθίστανται με πυκνά συστήματα «μικρορωγμών», τα οποία μπορούν να είναι αποδεκτά από την άποψη ασφάλειας και διάρκειας (Γεωργακοπούλου 2006).

Από την υπάρχουσα βιβλιογραφία έγινε γνωστό πως η πρόσθεση ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα αυξάνει τη θλιπτική αντοχή κατά 3.15% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί σε ινοπλισμένα δοκίμια με μέση θλιπτική αντοχή της τάξης των 28 MPa. Επίσης, αυξάνεται η εφελκυστική αντοχή κατά 4.3% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα για ινοπλισμένα δοκίμια με μέση εφελκυστική αντοχή 2.5 MPa (Hsie, et al, 2008). Όσον αφορά τις χαλύβδινες ίνες, δεν είναι διαθέσιμα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, στις οποίες να υπολογίζονται η θλιπτική ή η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Η χρήση ινών επηρεάζει την ολκιμότητα καθώς και τη δυναμική ενέργεια που δέχεται το υλικό κατά τη φόρτισή του. Αναλυτικότερα, από προηγούμενες δοκιμές που διεξήχθησαν έχει υπολογιστεί ότι μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της ολκιμότητας μέχρι και 68% και της δυναμικής ενέργειας κατά τη φόρτισή μέχρι και 88% (Padmarajaiah and Ramaswamy 2004).

Κεφάλαιο 4

Σχεδίαση και υλοποίηση πειραματικής διαδικασίας

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν δοκιμές αντοχής του σκυροδέματος με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των ινών (χαλύβδινων και πολυπροπυλενίου) στη σύνθεσή του. Όπως εξηγείται αναλυτικά και στη συνέχεια, επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι τύποι ινών καθώς και συγκεκριμένη διαδικασία χύτευσης δοκιμίων με σκοπό τη διεξαγωγή σειράς πειραμάτων από τα οποία προκύπτουν αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό των αντίστοιχων δοκιμίων.

Η πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να προκύψουν αποτελέσματα για την μηχανική αντοχή των ινών και του σκυροδέματος και πιο συγκεκριμένα την **αντοχή σε μονοαξονική θλίψη** και την **αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό**. Ιδανικά, θα ήταν χρήσιμα πειραματικά αποτελέσματα της αντοχής των δοκιμίων σε κάμψη τριών σημείων, στην οποία και αναμένονται και οι μεγαλύτερες ποσοστιαίες αυξήσεις των αντοχών (Ashour 1999).

Για τον προσδιορισμό αυτών των εντατικών μεγεθών κατασκευάστηκαν δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 15*15*15 cm, μέσω χύτευσης και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου **ASTM C 1116-03**, σε καλούπια μαζί με συγκεκριμένη μάζα ινών.

Δημιουργήθηκε μία κλίμακα περιεχόμενου ποσοστού ινών για κάθε είδος ινών, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εύρεση του βέλτιστου περιεχόμενου ποσοστού ινών στην υποστήριξη. Ως **βέλτιστο περιεχόμενο σε ίνες** εννοείται το περιεχόμενο των ινών, το οποίο επιφέρει τη μέγιστη αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό. Η κλίμακα αυτή αποτελούσε μία δυναμική παράμετρο της μελέτης, καθώς εξελισσόταν διαρκώς ανάλογα με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυπταν μετά από τη συμπλήρωση και την εξέταση κάθε μίας σειράς δοκιμίων.

Ο αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας περιλάμβανε συγκεκριμένα ποσοστά περιεχομένου ινών στα δοκίμια (20, 40 και 60 kg/m³), τα οποία είτε εν μέρει αντικαταστάθηκαν είτε εμπλουτίστηκαν λόγω της συνεχόμενης τροφοδοσίας αποτελεσμάτων από τις εργαστηριακές δοκιμές. Έτσι, όσον αφορά τις ίνες πολυπροπυλενίου συγκρίθηκαν αποτελέσματα για περιεχόμενο ινών ίσο με **0.5, 1, 5, 10, 15, 20 και 30 kg/m³**. Αντίστοιχα, για τις χαλύβδινες ίνες χρησιμοποιήθηκαν περιεχόμενα ίσα με **10, 20, 40 και 60 kg/m³**. Η κλίμακα αυτή βασίστηκε κυρίως σε προϋπάρχουσα τεχνογνωσία μελετητικών γραφείων και στις προδιαγραφές που τηρούν οι προμηθευτές/κατασκευαστές των υλικών των δοκιμών καθώς και σε βιβλιογραφικές πηγές από προηγούμενες προσπάθειες μελέτης των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

4.1 Είδη ινών και χαρακτηριστικά τους

Σήμερα, διατίθενται πολλές μορφές ινών ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέχθηκαν οι ίνες πολυπροπυλενίου και οι χαλύβδινες ίνες, ως οι πιο ευρέως διαδεδομένες σε τεχνικά έργα.

4.1.1. Ίνες πολυπροπυλενίου (PP)

Η προμήθεια των ινών πολυπροπυλενίου έγινε από την εταιρεία **Sika® Hellas** (Εικόνα 4.1). Οι ίνες πολυπροπυλενίου είναι λευκές με στρογγυλεμένες άκρες, ειδικής επεξεργασίας και προσφέρονται σε υδροδιαλυόμενα σακουλάκια των 600 gr. Το μήκος των ινών ποικίλει. Προτιμήθηκαν τα μήκη των 12 και 18 mm για τις εργαστηριακές δοκιμές. Όπως φαίνεται στο φυλλάδιο προϊόντος του κατασκευαστή Sika® - Fibers, η κύρια χρήση των ινών πολυπροπυλενίου είναι η μείωση των ρηγματώσεων κατά την ξήρανση, η βελτίωση της αντοχής σε κρούση και της στεγανότητας του σκληρυμένου κονιάματος. Όμως, υπάρχουν και άλλα οφέλη από τη χρήση των ινών όπως είναι η αύξηση στην θλιπτική και εφελκυστική αντοχή και η ενίσχυση των ελαστικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος (μέτρο ελαστικότητας, πλαστικότητα).



Εικόνα 4.1: Ίνες της εταιρείας Sika® - Fibers

Ο κατασκευαστής προειδοποιεί πως οι ίνες δεν αντικαθιστούν τον στατικό οπλισμό, αλλά είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν τον οπλισμό έναντι ρηγματώσεων.

Χρησιμοποιούνται για:

- Πλάκες, πίστες, μεγάλες επιφάνειες σκυροδέματος
- Σκυρόδεμα και κονιάματα υποκείμενα σε κρούσεις
- Κονιάματα ή σκυρόδεμα που απαιτούν μεγάλη συνεκτικότητα κατά τη
- διάστρωση όπως σε κεκλιμένες επιφάνειες ή παραγωγή προκατασκευών
- Εκτοξευόμενα κονιάματα μικρού πάχους
- Προκατασκευασμένα στοιχεία για τη βελτίωση των αντοχών σε γωνίες
- Επιχρίσματα, σοβάδες

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών πολυπροπυλενίου

Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών πολυπροπυλενίου	
Μήκος (mm)	12 και 18
Διάμετρος (μm)	25
Επιμήκυνση θραύσης	29% (±10%) (EN ISO 2062)
Εφελκυστική αντοχή	400 (±10%) N/mm ² (EN ISO 2062)
Χημική αντοχή	Εξαιρετική

4.1.2. Χαλύβδινες ίνες

Η προμήθεια των χαλύβδινων ινών έγινε από την εταιρεία **Inomix/Sidenor S.A** (Εικόνα 4.2). Οι ίνες INOMIX λειτουργώντας στο μέγεθος του κόκκου του σκυροδέματος προσδίδουν πλασιμότητα και οπλισμό τριών διαστάσεων. Παράγονται σε πλήθος διαστάσεων και καλύπτουν όλο το εύρος αναγκών της αγοράς από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έως την κατασκευή δαπέδων (βιομηχανικών, λιμενικών, στρατιωτικών, κλπ).



Εικόνα 4.2: Ίνες εταιρείας Inomix/Sidenor S.A.

Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά χαλύβδινων ινών

Τεχνικά χαρακτηριστικά χαλύβδινων ινών	
Μήκος (mm)	45 και 55
Διάμετρος (mm)	0,75

4.2 Επιλογές για τη σκυροδέτηση δοκιμών

Για την έγκαιρη ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής ήταν απαραίτητη η χύτευση μεγάλου αριθμού δοκιμών κάθε μέρα (24 έως 32) και δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατή η διάθεση μεταλλικών μητρών χύτευσης για έναν τέτοιο αριθμό δοκιμών, χρησιμοποιήθηκαν μήτρες πολυουρεθάνης (Εικόνα 4.4), διαστάσεων 15*15*15cm, μίας χρήσεως. Η προμήθεια των καλουπιών που χρησιμοποιήθηκαν στη σκυροδέτηση των δοκιμών έγινε από τον **Συνεταιρισμό Εργολάβων Οικοδομών - ΠΡΟΜΕΚΑΤ**, στα Χανιά. Πολλοί ερευνητές συνιστούν τη χρήση μόνο μεταλλικών μητρών χύτευσης, προκειμένου να αποφευχθεί η οποιαδήποτε παραμόρφωση των δοκιμών κατά τη χύτευσή τους.

Όσον αφορά, το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια υπήρχαν δύο επιλογές:

1. Κατασκευή σκυροδέματος με βάση συγκεκριμένη σύνθεση, το οποίο θεωρήθηκε ιδιαίτερα χρονοβόρο και για το λόγο αυτό απορρίφθηκε
2. Η χρήση σκυροδέματος, το οποίο παράγεται από μονάδα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος.

Η δεύτερη λύση που θεωρήθηκε προσφορότερη και επιλέχτηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής, είχε ένα μειονέκτημα. Καθώς οι σταθμοί έτοιμου σκυροδέματος παράγουν σκυρόδεμα σε μεγάλες ποσότητες (6, 8, 10m³ κάθε μία φορά), δεν ήταν δυνατή η λήψη σκυροδέματος της τάξεως των μερικών λίτρων. Επομένως, έπρεπε να γίνει πρώτα από το σταθμό σκυροδέματος φόρτωση του αυτοκινήτου μεταφοράς σκυροδέματος (βαρέλα) και στη συνέχεια από τη βαρέλα να γίνει έκχυση μικρής ποσότητας σκυροδέματος για την χρήση του στην παρακάτω περιγραφόμενη πειραματική διαδικασία (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Φόρτωση σκυροδέματος από τη βαρέλα, στο καρότσι μεταφοράς



Εικόνα 4.4: Μήτρες πολυουρεθάνης κατά το στάδιο της χύτευσης

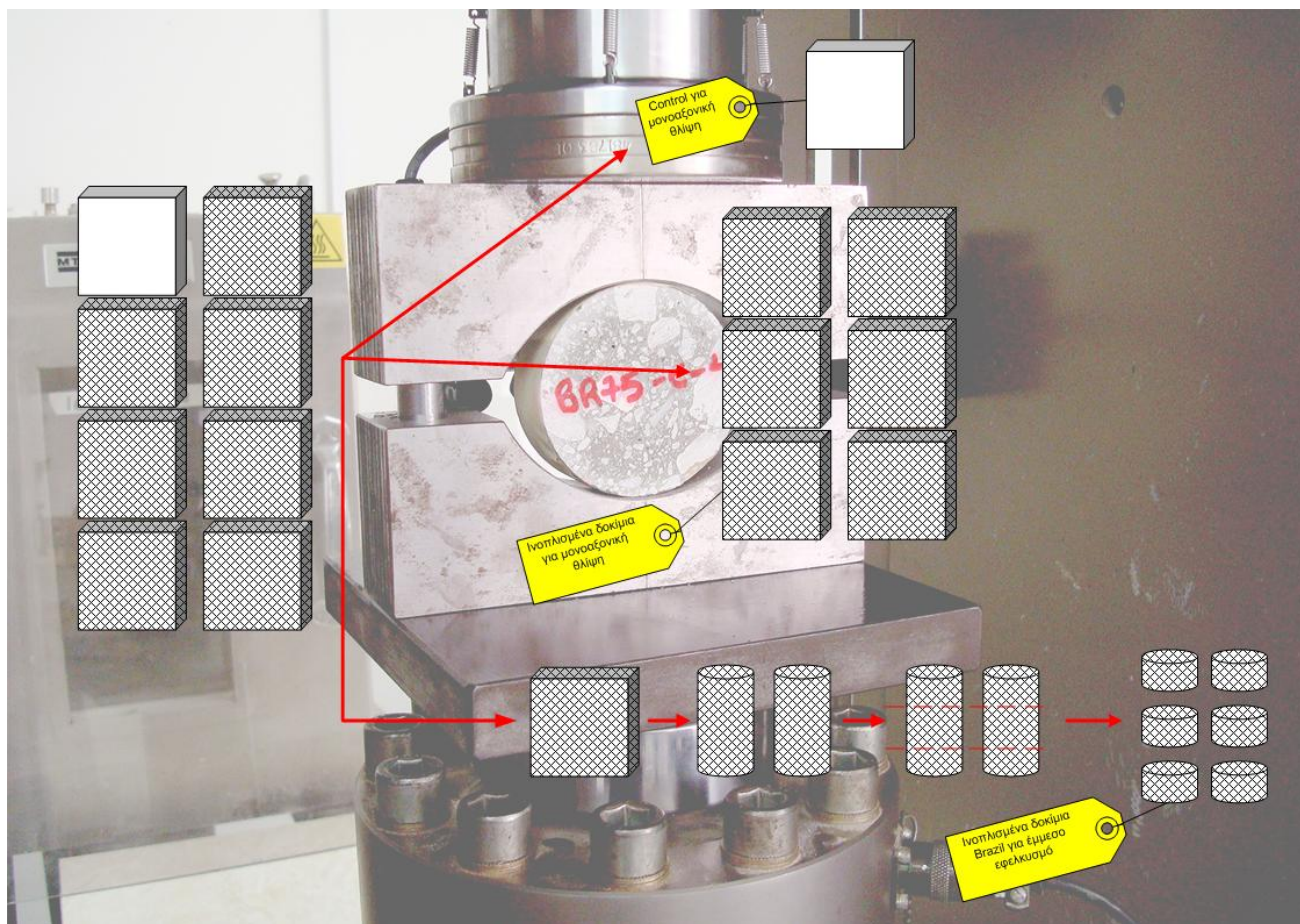
Οι προδιαγραφές λήψης δοκιμών κατά τη σκυροδέτηση τεχνικών έργων προβλέπουν συγκεκριμένη διαδικασία και αριθμό για μεγάλα ή μικρά τεχνικά έργα (Ν.Κ.Τ.Σ, 1997). Στον Ν.Κ.Τ.Σ 1997 αναφέρεται ότι για ποσότητες σκυροδέματος μεγαλύτερες των 20m^3 είναι απαραίτητη η λήψη 1 δοκιμίου control ανά βαρέλα στη μέση της διαδικασίας της σκυροδέτησης και στη συνέχεια λήψη 6 δοκιμών, από τα οποία θα υπολογιστεί ο μέσος όρος τους. Όμως, ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει τη χύτευση ενός δοκιμίου control ανά παρτίδα σκυροδέματος, κυρίως λόγω εξοικονόμησης καλουπιών και χρόνου, με πλεονέκτημα όμως η σύσταση του σκυροδέματος του δοκιμίου control να είναι η ίδια με αυτή των υπόλοιπων δοκιμών της παρτίδας.

Τέλος, για την μορφοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με ονομαστική αντοχή, η οποία ποικίλει από 20 έως 25 MPa. Η προμήθεια του απαιτούμενου σκυροδέματος έγινε από την εταιρεία **ΦΙΝΟΜΠΕΤΟΝ Α.Ε.**

4.3 Σχεδίαση πειραματικής διαδικασίας με τις διατιθέμενες ίνες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αρχικός σχεδιασμός αφορούσε τρία περιεχόμενα ινών 20, 40 και 60 kg/m^3 για κάθε ένα είδος ίνας. Με βάση αυτόν τον προγραμματισμό, προέκυπταν τρεις σειρές δοκιμών, με κάθε σειρά να αποτελείται από οκτώ δοκίμια. Αυτός ο σχεδιασμός στην πορεία άλλαξε διότι, η σκυροδέτηση των δοκιμών εξαρτιόταν από την ημερήσια ζήτηση σε σκυρόδεμα που είχε η εταιρεία και από την ποιότητα του σκυροδέματος, που παρήγαγε κάθε φορά. Οπότε, σχεδιάστηκε ένας πιο ευέλικτος προγραμματισμός των χυτεύσεων των δοκιμών, ο οποίος σχετιζόταν άμεσα με το χρονοδιάγραμμα της εταιρείας και την παραγωγή της σε σκυρόδεμα καθώς και με τα αποτελέσματα των εργαστηρίων. Τελικά, η κάθε σειρά δοκιμών που σκυροδετήθηκαν αποτελούνταν από **έξι δοκίμια** ινοπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη, **ένα δοκίμιο** ινοπλισμένου σκυροδέματος, από το οποίο προέρχονταν τα κυλινδρικά δοκίμια, που δοκιμάστηκαν σε έμμεσο εφελκυσμό και **ένα δοκίμιο** από άοπλο σκυρόδεμα (control) που εξετάστηκε σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Εικόνα 4.5).

Στη παρούσα διπλωματική επιλέχτηκε να ληφθεί μόνο ένα δοκίμιο Control από το αρχικό σκυρόδεμα καθώς η σκυροδέτηση όλων των μητρών χύτευσης σε κάθε σειρά γινόταν από την ίδια παρτίδα υλικού.



Εικόνα 4.5: Αναπαράσταση εργαστηριακών δοκιμών

Ο όγκος, που καταλάμβανε το κάθε δοκίμιο, ήταν ίσος με $0,003375 \text{ m}^3$ ή 3375 cm^3 . Επομένως, για κάθε σειρά δοκιμών, χρειάστηκαν:

$$7 * 0,003375 = 0,024 \text{ m}^3 = 24 \text{ L}$$

Το δοκίμιο, που δεν περιείχε ίνες, δεν υπολογίστηκε στο συνολικό όγκο του σκυροδέματος, που χρησιμοποιήθηκε για την ανάμειξη με τις ίνες, καθώς η σκυροδέτησή του ξεκίνησε πριν την σκυροδέτηση των υπολοίπων δοκιμών.

Για την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών σκυροδέτησης των δοκιμών, ο παραπάνω όγκος αυξήθηκε στα 32L σκυροδέματος, συνυπολογίζοντας τις τυχαίες απώλειες σκυροδέματος, σε όλη τη διαδικασία μεταφοράς και χύτευσής του.

Αντίστοιχα με το σκυρόδεμα έτσι και η μάζα των ινών, υπολογίστηκε αναλογικά με τον όγκο του σκυροδέματος, ώστε να διασφαλιστεί το σωστό ποσοστό περιεχόμενων ινών.

4.4 Σκυροδέτηση δοκιμών

Ξεκινώντας την διαδικασία της σκυροδέτησης των δοκιμών, ογκομετρήθηκε ο όγκος των 32L σκυροδέματος με τη βοήθεια ενός βαθμονομημένου κουβά και τοποθετήθηκε μέσα σε μπετονιέρα, μικρής χωρητικότητας (Εικόνα 4.6). Από το περισσευούμενο σκυρόδεμα λήφθηκε κατάλληλη ποσότητα για την χύτευση του δοκιμίου control. Το δοκίμιο control αποτελούσε το συγκρίσιμο μέγεθος στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τα υπόλοιπα δοκίμια.



Εικόνα 4.6: Φόρτωση και ανάμειξη σκυροδέματος και ινών σε μικρή μπετονιέρα

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε στην μπετονιέρα η απαιτούμενη ποσότητα ινών και ξεκίνησε η ανάμειξη των δύο υλικών. Αφού παρήλθε ικανό χρονικό διάστημα (περίπου 10 λεπτά) μέσα στο οποίο το μίγμα στη μπετονιέρα θεωρήθηκε επαρκώς ομογενοποιημένο, σταμάτησε η ανάμιξη και ξεκίνησε η χύτευση του μίγματος.

Όταν ολοκληρώθηκε αυτό το στάδιο, οι μήτρες κωδικοποιούνται και σφραγίζονται για διάστημα έως 48 ώρες. Οι προδιαγραφές του σκυροδέματος που αναφέρονται στον Ν.Κ.Τ.Σ 1997, αναφέρουν πως οι μήτρες ανοίγονται σε χρονικό διάστημα μεταξύ 20 και 36 ωρών μετά τη σκυροδέτησή τους. Με την παρέλευση του απαραίτητου χρονικού διαστήματος τα κυβικά δοκίμια είχαν μορφοποιηθεί και είχαν αποκτήσει συμπαγή χαρακτήρα.

Τότε εξέρχονταν της μήτρας και φυλάσσονταν για 26 μέρες σε κατάλληλο θάλαμο συντήρησης. Συγκεντρωτικά, η σκυροδέτηση των δοκιμών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.7.). Μετά την μορφοποίηση των δοκιμών έλαβε χώρα η εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών. Στο πρώτο στάδιο, ένα δοκίμιο κάθε σειράς δοκιμών μεταφέρθηκε στο εργαστήριο για περαιτέρω επεξεργασία.

4.4 ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε έναν εργαστηριακό πυρηνολήπτη, από τον οποίο προέκυψαν κυλινδρικά δοκίμια μήκους 15cm με γενέτειρα διάμετρο 5,2cm (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.7: Αναπαράσταση σκυροδέτησης δοκιμών

Υπολογίζοντας τη μάζα των ινών για κάθε κατηγορία περιεχόμενου ποσοστού και για κάθε κατηγορία ίνας, προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες για τις απαιτήσεις σε ίνες για κάθε σειρά δοκιμών (Πίνακες 4.3 και 4.4). Η διαφορά της τιμής της συνολικής θεωρητικής και πραγματικής μάζας των ινών ήταν αποτέλεσμα της αναγωγής της απαιτούμενης μάζας ινών από τον όγκο του δοκιμίου στον συνολικό όγκο του σκυροδέματος που αναμειγνύεται με τις ίνες στη μπετονιέρα. Ο αρχικός υπολογισμός έγινε για την περιεχόμενη μάζα ινών σε ένα δοκίμιο σκυροδέματος όγκου $0,003375\text{m}^3$, ενώ στην ανάμειξη του σκυροδέματος με τις ίνες υπολογίστηκε ο όγκος των 32L, ο οποίος αποτελούσε τον όγκο του σκυροδέματος μίας σειράς δοκιμών.

Πίνακας 4.3: Υπολογισμός μάζας ινών ανά κατηγορία

ΠΕΙΧΟΜΕΝΟ	ΕΙΔΟΣ ΙΝΩΝ			
ΣΕ ΙΝΕΣ	ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ		ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ	
ΣΕ kg/m ³	ΜΗΚΟΥΣ 55mm	ΜΗΚΟΥΣ 45mm	ΜΗΚΟΥΣ 18mm	ΜΗΚΟΥΣ 12mm
0.5				0.013kg
1				0.0252kg
5				
10			0.04kg	
15			0.08kg	0.16kg
20			0.12kg	
30	0.501kg	0.64kg		0.32kg
40				0.472kg
60	1.29kg	1.28kg		
	1.92kg	1.92kg		

Πίνακας 4.4: Σύγκριση συνολικής πραγματικής και θεωρητικής μάζας ινών

ΕΙΔΟΣ ΙΝΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΑΖΑ ΙΝΩΝ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΣΕ kg	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΑΖΑ ΙΝΩΝ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΣΕ kg
ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΜΗΚΟΥΣ 55mm	3.711	2.430
ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΜΗΚΟΥΣ 45mm	4.093	2.599
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 12mm	0.990	0.620
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 18mm	0.240	0.152
ΣΥΝΟΛΟ	9.034	5.801

Στη συνέχεια το δείγμα του δοκιμίου διαιρέθηκε από ένα δισκοπρίονο σε 3 ή 4 κυλινδρικά δοκίμια πάχους περίπου 3cm και ίδιας διαμέτρου (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμίων

Από τις δοκιμές που ακολούθησαν σε αυτά τα δοκίμια έγινε ο έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής τους σε εφελκυσμό με τη **μέθοδο Brazil** (ή δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης).

4.5 Εκτέλεση δοκιμών

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν, εξετάστηκαν σε δύο είδη δοκιμών, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

4.5.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Αντικειμενικός σκοπός της δοκιμής αυτής ήταν ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των κυβικών δοκιμίων. Το θλιπτικό φορτίο ασκήθηκε από συσκευή φόρτισης, υπό σταθερό ρυθμό (περίπου 0,5-1 MPa/sec) με δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής του επιβαλλόμενου φορτίου.

Ο ρυθμός φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή είναι ανάλογος με αυτόν που συνιστούν τα διεθνή πρότυπα, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 0,2-1 MPa/sec (Βουδικλάρης 2009). Το φορτίο εφαρμόστηκε πάνω στο δοκίμιο μέσω της σφαιρικής κεφαλής έδρασης.

Η σφαιρική κεφαλή τοποθετήθηκε στην ανώτερη επιφάνεια του δοκιμίου και ο άξονάς της ήταν ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης. Για την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου πάνω στο δοκίμιο, χρησιμοποιήθηκαν πλάκες φόρτισης.

Η συσκευή φόρτισης περιλάμβανε **χαλύβδινους δίσκους** (platens), οι οποίοι τοποθετούνταν ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης, με σκοπό την μείωση της πλευρικής παραμόρφωσης των δοκιμίων λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής και **άκαμπτο πλαίσιο φόρτισης** (1600kN θλίψη) του οίκου MTS (Εικόνα 4.6).

Για την κατάλληλη εκτέλεση των δοκιμών ήταν απαραίτητη η άσκηση του επιβαλλόμενου φορτίου σε ομαλή και λεία επιφάνεια. Παρατηρήθηκε πως αρκετά δοκίμια έχουν ανώμαλες επιφάνειες ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της σκυροδέτησης.



Εικόνα 4.6: Συσκευή φόρτισης MTS

Μάζες αδρανών υλικών, τσιμέντου και ινών εμποδίζουν την σωστή μορφοποίηση των επιφανειών. Για το λόγο αυτό πριν την εκκίνηση των δοκιμών προσδιορίστηκαν σε κάθε δοκίμιο οι επιφάνειες που θεωρούνταν κατάλληλες για την επιβολή του φορτίου.



Εικόνα 4.7: Δοκίμιο μονοαξονικής θλίψης

Τα δοκίμια τοποθετούνταν στη μηχανή φόρτισης και φορτίζονταν έως ότου αστοχήσουν. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη C_0 προσδιορίστηκε σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$C_0 = \frac{F_{max}}{A} \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

όπου F_{max} είναι το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του και A είναι η επιφάνεια που ασκήθηκε το φορτίο.

4.5.2 Δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό

Αντικειμενικός σκοπός της δοκιμής αυτής ήταν ο έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό των κυλινδρικών δοκιμών (Εικόνα 4.9).

Εφαρμόζεται η μέθοδος Brazil, σύμφωνα με την οποία τα δοκίμια που φορτίζονται αντιδιαμετρικά, αστοχούν σε εφελκυσμό με διεύθυνση του επιπέδου αστοχίας παράλληλη με τον άξονα φόρτισης.

Το θλιπτικό φορτίο ασκήθηκε από συσκευή φόρτισης, υπό σταθερό ρυθμό (περίπου 200 N/sec) με δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής του επιβαλλόμενου φορτίου.

Τα δοκίμια φορτίζονταν μέσω δύο χαλύβδινων σιαγόνων (Εικόνα 4.10) με ημιελλειπτικό άνοιγμα τέτοιο ώστε η ακτίνα καμπυλότητάς του να είναι 1,5 φορές η ακτίνα του δοκιμίου.



Εικόνα 4.9: Δοκίμιο δίσκου Brazil

Το άνοιγμα αυτό επέτρεπε την έδραση των δοκιμίων, που είχαν μορφή δίσκου, έτσι ώστε οι σιαγόνες και το δοκίμιο να βρίσκονταν σε επαφή κατά τόξο 10° τη στιγμή της αστοχίας. Αυτό επετεύχθη όταν η ακτίνα του ημικυλίνδρου ήταν 1,5 φορές η ακτίνα του δοκιμίου (Αγιουτάντης, 2002).

Οι πύρροι ευθυγράμμισης που συγκρατούσαν τις δύο σιαγόνες επέτρεπαν την κίνηση μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και ήταν έτσι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να επέτρεπαν παρέκκλιση από το επίπεδο των σιαγόνων της τάξης των $4 \cdot 10^{-3}$ ακτινίων (Αγιουτάντης, 2002).

Αρχικά, μετρούνταν η διάμετρος και το πλάτος των δοκιμίων με ακρίβεια 0,1 mm. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν μέσα στις σιαγόνες έτσι ώστε ο άξονας συμμετρίας του δοκιμίου να ταυτιζόταν με τον άξονα συμμετρίας του συστήματος σιαγόνων.



Εικόνα 4.10: Σιαγόνες φόρτισης και πύρροι ευθυγράμμισης δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού.
(Διακρίνεται μονάδα καταγραφής μετατόπισης πίσω από τις σιαγόνες φόρτισης)

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή επαφή του δίσκου με τις σιαγόνες φόρτισης, τα δοκίμια τυλίγονταν με χαρτοταινία, πάχους 0,2-0,4mm και πλάτος ίσο με το πλάτος των δοκιμίων.

Παρόλο που μετά την αστοχία του δοκιμίου ο δίσκος δεν έχανε τη φέρουσα ικανότητά του και συνέχιζε να παραλαμβάνει θλιπτικά φορτία μέχρι την οριστική του αστοχία, η αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται με βάση την πρώτη αστοχία του δοκιμίου.

Η αντοχή σε εφελκυσμό (T_0) υπολογίσθηκε, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$T_0 = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot D \cdot T} = \frac{0.637 \cdot F_{max}}{D \cdot T} \quad (\text{Σχέση 4.2})$$

όπου F_{max} είναι το φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του σε εφελκυσμό, D είναι η διάμετρος και t είναι το πλάτος του δοκιμίου.

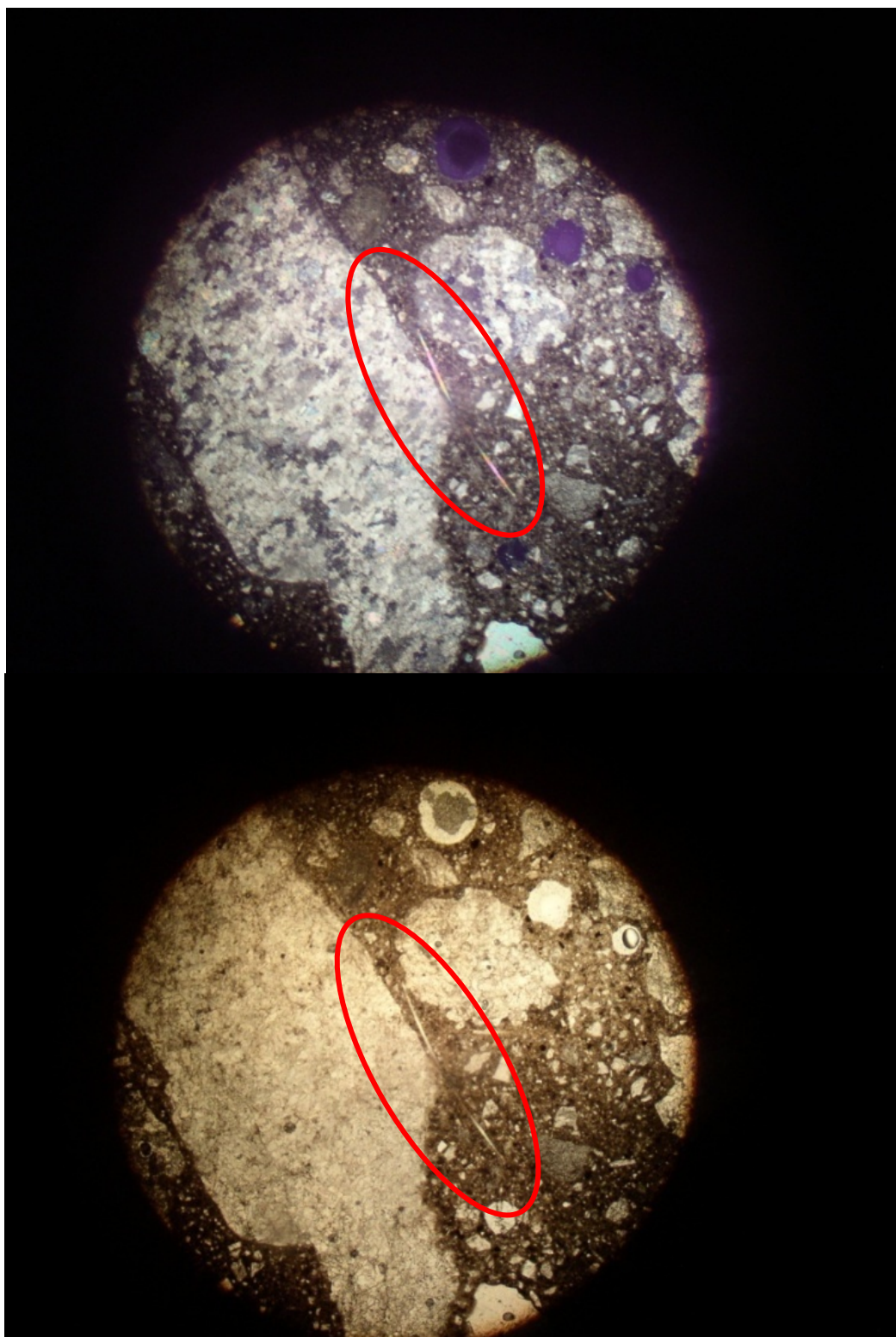
4.5.3 Μικροσκοπική εξέταση δοκιμίων

Προκειμένου να διαπιστωθεί η κατανομή των ινών στο εσωτερικό του σκυροδέματος έγινε εξέταση στο στερεοσκοπικό μικροσκόπιο των κυλινδρικών δοκιμίων που προετοιμάστηκαν για τη δοκιμή Brazil.

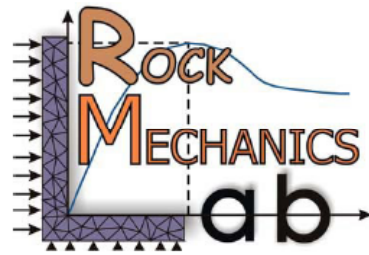
Στην Εικόνα 4.10, φαίνονται δύο διαφορετικές φωτογραφίες από το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο για ένα δοκίμιο Brazil διαμέτρου 50mm, στις οποίες διακρίνεται στην επιφάνεια του δοκιμίου μία ίνα πολυπροπυλενίου 12mm.

Από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψε ότι η κατανομή των ινών μέσα στο δοκίμιο ήταν πολύ καλή και συγκεκριμένα υπήρχαν, στη μάζα του τσιμέντου, ίνες σχεδόν μεταξύ όλων των κόκκων των αδρανών υλικών.

Επίσης, από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψε ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου δεν φαίνεται να αντέδρασαν χημικά με τα υπόλοιπα συστατικά του σκυροδέματος καθώς δεν φαίνονται να έχουν διαβρωθεί ή να έχουν υποστεί αλλαγή στη γεωμετρία τους.



Εικόνα 4.10: Δοκίμια Brazil οπλισμένα με ίνες πολυπροπυλενίου



Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Τα αποτελέσματα των δοκιμών **μονοαξονικής θλίψης** παρουσιάζονται σε διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης. Η τάση παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα ως ποσοστιαίο μέγεθος, ώστε να διευκολυνθεί η παρουσίαση των διαφορετικών τιμών τάσης.

Η τιμή της τάσης μετατρέπεται σε ποσοστό σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma(\%) = \frac{\sigma(\text{MPa})}{\sigma_{\text{control}}(\text{MPa})} * 100\% \quad \text{Σχέση 5.1}$$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών **έμμεσου εφελκυσμού** παρουσιάζονται σε διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης. Το φορτίο παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα ως ποσοστιαίο μέγεθος, ώστε να διευκολυνθεί η παρουσίαση των διαφορετικών τιμών φορτίου.

Η τιμή της τάσης μετατρέπεται σε ποσοστό σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$T(\%) = \frac{\tau(\text{MPa})}{\tau_{\text{control}}(\text{MPa})} * 100\% \quad \text{Σχέση 5.2}$$

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και φορτίου-μετατόπισης που αντιστοιχούν στα ινοπλισμένα δοκίμια, αναπαριστούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών εκείνων που προσέγγιζαν όσο το δυνατό καλύτερα το μέσο όρο των τιμών τάσης και μέτρου ελαστικότητας ή φορτίου που προέκυπταν από την εκάστοτε σειρά δοκιμών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά ανά είδος και περιεκτικότητα ινών, για κάθε σειρά δοκιμών.

Σημειώνεται ότι, στο **Παράρτημα** της διπλωματικής, παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών που εξετάστηκαν είτε σε μονοαξονική θλίψη, είτε σε έμμεσο εφελκυσμό, ενώ στη συγκεκριμένη παράγραφο

παρουσιάζονται οι πιο χαρακτηριστικές καμπύλες, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών.

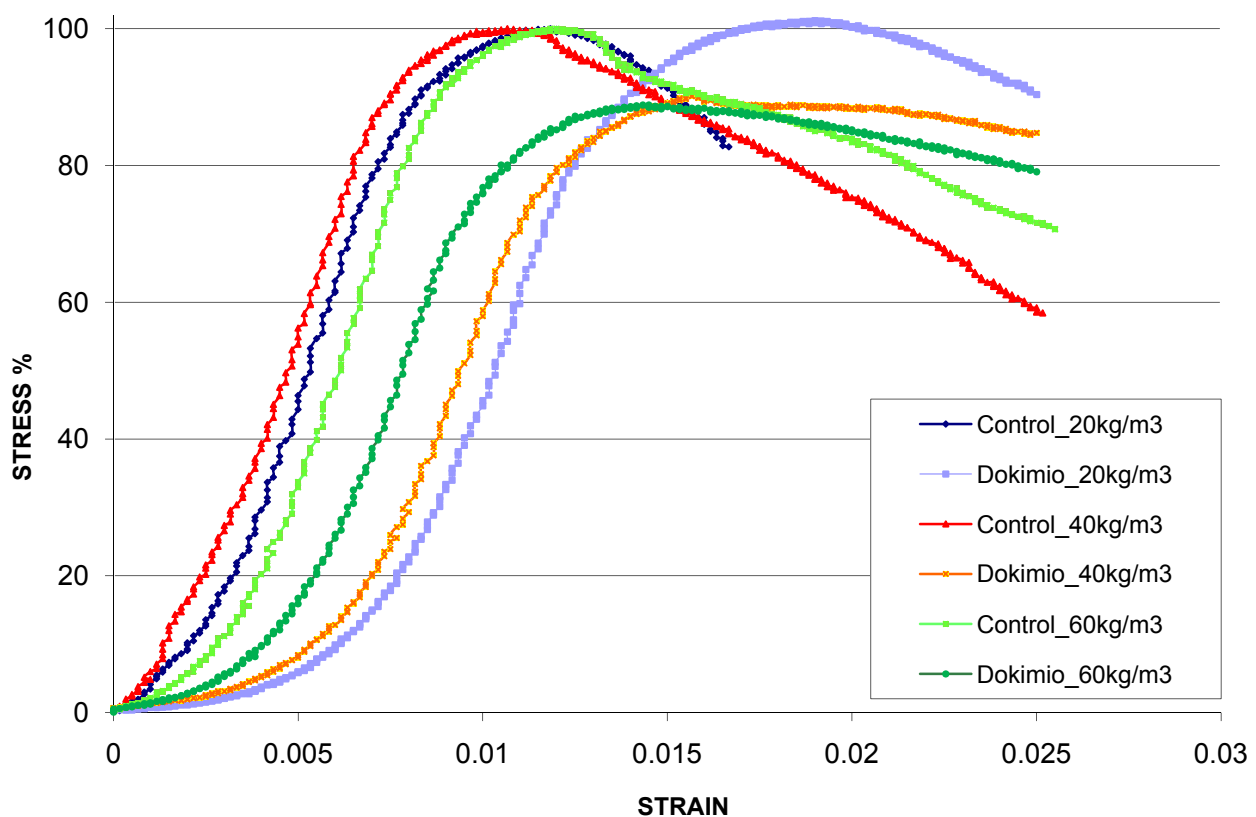
5.1 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που φαίνονται στο διάγραμμα 5.1, αποτελούν τις πιο αντιπροσωπευτικές καμπύλες της συγκεκριμένης παρτίδας δοκιμών. Ως αντιπροσωπευτικές καμπύλες, θεωρήθηκαν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών εκείνων, τα οποία εμφάνισαν τιμές αντοχής σε θλίψη πολύ κοντά στο μέσο όρο ολόκληρης της σειράς δοκιμών.

Για παράδειγμα, στην πρώτη σειρά δοκιμών υπήρχαν πέντε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος με περιεχόμενο ινών 20kg/m^3 . Ο μέσος όρος της αντοχής σε θλίψη που εμφάνισαν τα δοκίμια αυτά είναι πολύ κοντά στην πραγματική τιμή της αντοχής που εμφάνισε το πρώτο δοκίμιο (**Δ20_MA60_1**). Ομοίως ισχύει και για τις υπόλοιπες σειρές δοκιμών και στα δύο είδη δοκιμών.

Επομένως, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του πρώτου δοκιμίου θεωρήθηκε πιο αντιπροσωπευτική και για αυτό το λόγο παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Για τις πρώτες σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες μήκους 55 mm για περιεκτικότητες ινών 20, 40 και 60 kg/m^3 . Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών με χαλύβδινες ίνες (55mm)

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 20kg/m^3 παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 0,42% με τυπική απόκλιση 1,81% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 8,76% με τυπική απόκλιση 8,88%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 40kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 9,23% με τυπική απόκλιση 8,34% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 5,82% με τυπική απόκλιση 8,22%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 60kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 11,02% με τυπική απόκλιση 3,03% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 14,03% με τυπική απόκλιση 5,6%.

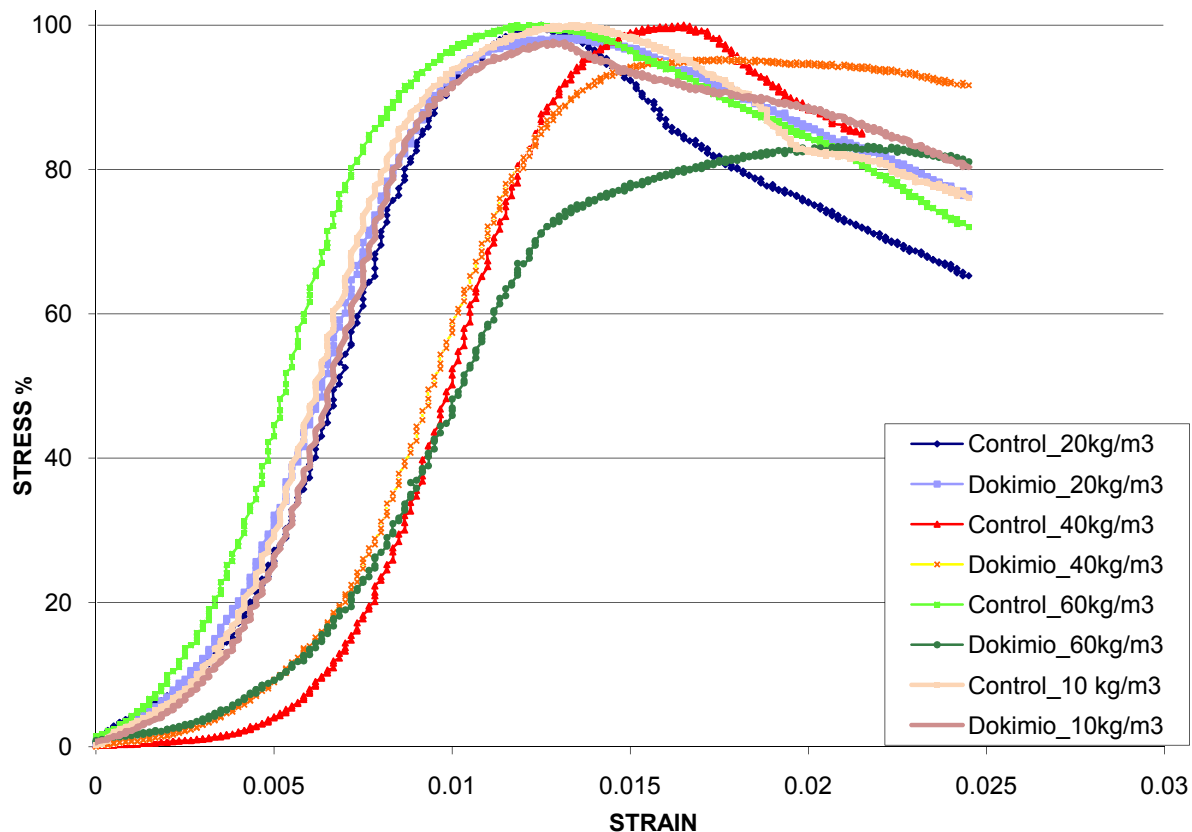
Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα 1^{ης} σειράς δοκιμών

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ Μ.Θ. (MPa)	E (MPa)
✓ CONTROL_1	23,70	3902,30
✓ Δ20_MA60_1	23,98	3214,89
Δ20_MA60_2	23,40	3649,34
Δ20_MA60_3	23,47	3340,06
Δ20_MA60_4	23,40	3664,11
Δ20_MA60_5	24,28	3933,74
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	23,80	3560,43
✓ CONTROL_2	23,40	3585,11
Δ40_MA60_1	24,37	3550,03
✓ Δ40_MA60_2	21,12	3182,33
Δ40_MA60_3	21,78	3715,29
Δ40_MA60_4	20,85	2981,17
Δ40_MA60_5	19,34	3412,69
Δ40_MA60_6	19,96	3417,87
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	21,24	3376,56
✓ CONTROL_3	22,77	3816,01
Δ60_MA60_1	20,62	3496,25
Δ60_MA60_2	21,32	3348,31
Δ60_MA60_3	19,79	3407,38
Δ60_MA60_4	19,73	3275,04
✓ Δ60_MA60_5	20,23	3118,61
Δ60_MA60_6	19,89	3038,41
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	20,26	3280,67

- ✓ Οι κωδικοί των δοκιμών με ένδειξη, αφορούν τα δοκίμια με αντιπροσωπευτικές καμπύλες τάσης –παραμόρφωσης.

Για τις επόμενες σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες μήκους 45 mm για περιεκτικότητες ινών 10, 20, 40 και 60 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.2.



Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών με χαλύβδινες ίνες (45mm)

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 10kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 2,24% με τυπική απόκλιση 1% και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 1,16% με τυπική απόκλιση 8,1%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 20kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 3,25% με τυπική απόκλιση 6,15% και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 1,21% με τυπική απόκλιση 11,46%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 40kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 4,63% με τυπική απόκλιση 7,76% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 17,22% με τυπική απόκλιση 17,57%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 60kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 14,08% με τυπική απόκλιση 9% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 37,19% με τυπική απόκλιση 27,19%.

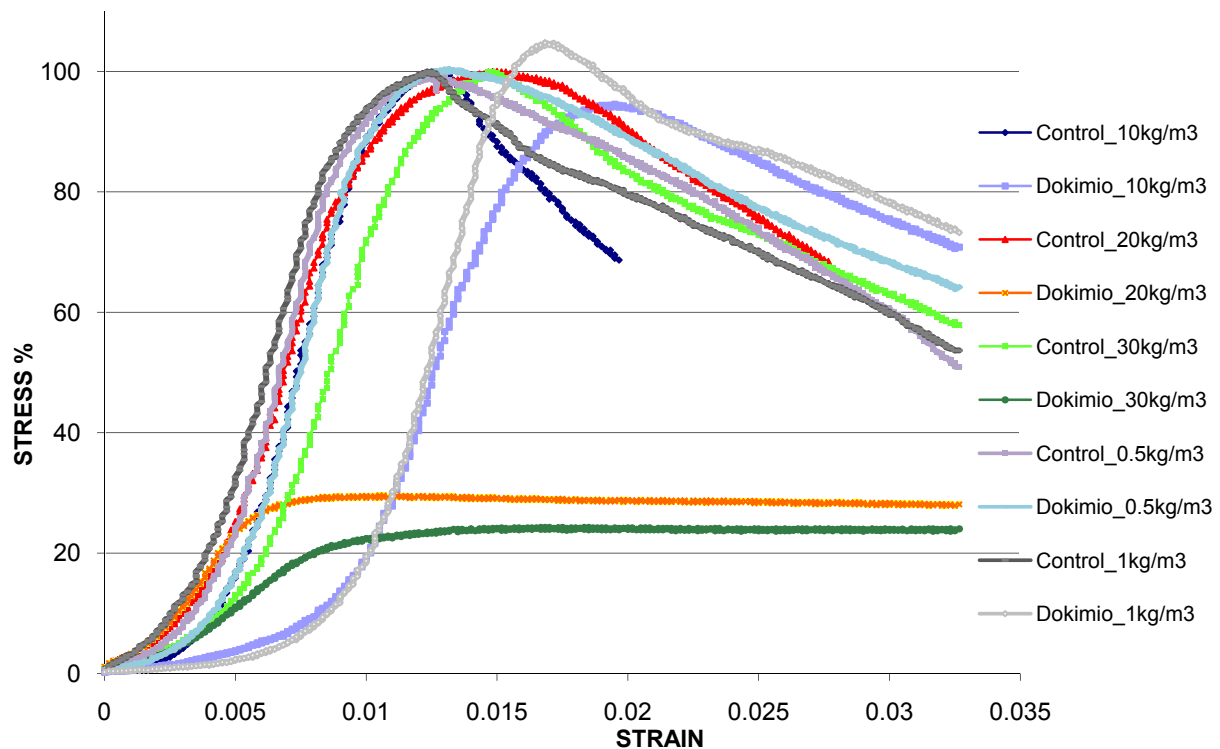
Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα 2ης σειράς δοκιμών

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ Μ.Θ. (MPa)	E (MPa)
✓ CONTROL_13_1	17,88	2841,48
Δ10_MA45_1	17,58	2807,97
Δ10_MA45_2	17,67	2715,03
Δ10_MA45_3	17,44	2858,35
Δ10_MA45_4	17,21	3269,49
✓ Δ10_MA45_5	17,48	2757,51
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	17,48	2874,97
✓ CONTROL_4	25,85	3597,09
Δ20_MA45_1	24,55	3678,01
Δ20_MA45_2	25,55	4063,13
Δ20_MA45_3	22,13	2790,35
Δ20_MA45_4	26,65	3801,42
Δ20_MA45_5	25,78	3669,14
✓ Δ20_MA45_6	25,40	3845,66
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	25,01	3641,28
✓ CONTROL_5	22,26	3340,30
Δ40_MA45_1	21,94	3037,19
Δ40_MA45_2	18,01	1795,85
✓ Δ40_MA45_3	21,23	2938,75
Δ40_MA45_4	21,46	2708,69
Δ40_MA45_5	22,51	2811,18
Δ40_MA45_6	22,24	3298,32
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	21,23	2765,00
✓ CONTROL_6	20,59	3506,53
Δ60_MA45_1	16,68	1669,91
✓ Δ60_MA45_2	17,14	2052,85
Δ60_MA45_3	18,61	2529,49
Δ60_MA45_4	15,40	1542,28
Δ60_MA45_5	19,36	3021,11
Δ60_MA45_6	18,97	2399,35
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	17,69	2202,50

Για τις επόμενες σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12 mm για περιεκτικότητες ινών 0.5, 1, 10, 20 και 30 kg/m³.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.3.



Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών με ίνες πολυπροπυλενίου (12mm)

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών $0,5\text{kg/m}^3$ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 0,29% με τυπική απόκλιση 3,46% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 6,56% με τυπική απόκλιση 16,44%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 1kg/m^3 παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 3,83% με τυπική απόκλιση 4,88% και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 7,09% με τυπική απόκλιση 6%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 10kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 6,99% με τυπική απόκλιση 1,78% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 29,1% με τυπική απόκλιση 6,6%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 20kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 70,15% με τυπική απόκλιση 3,06% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 61,23% με τυπική απόκλιση 14,79%.

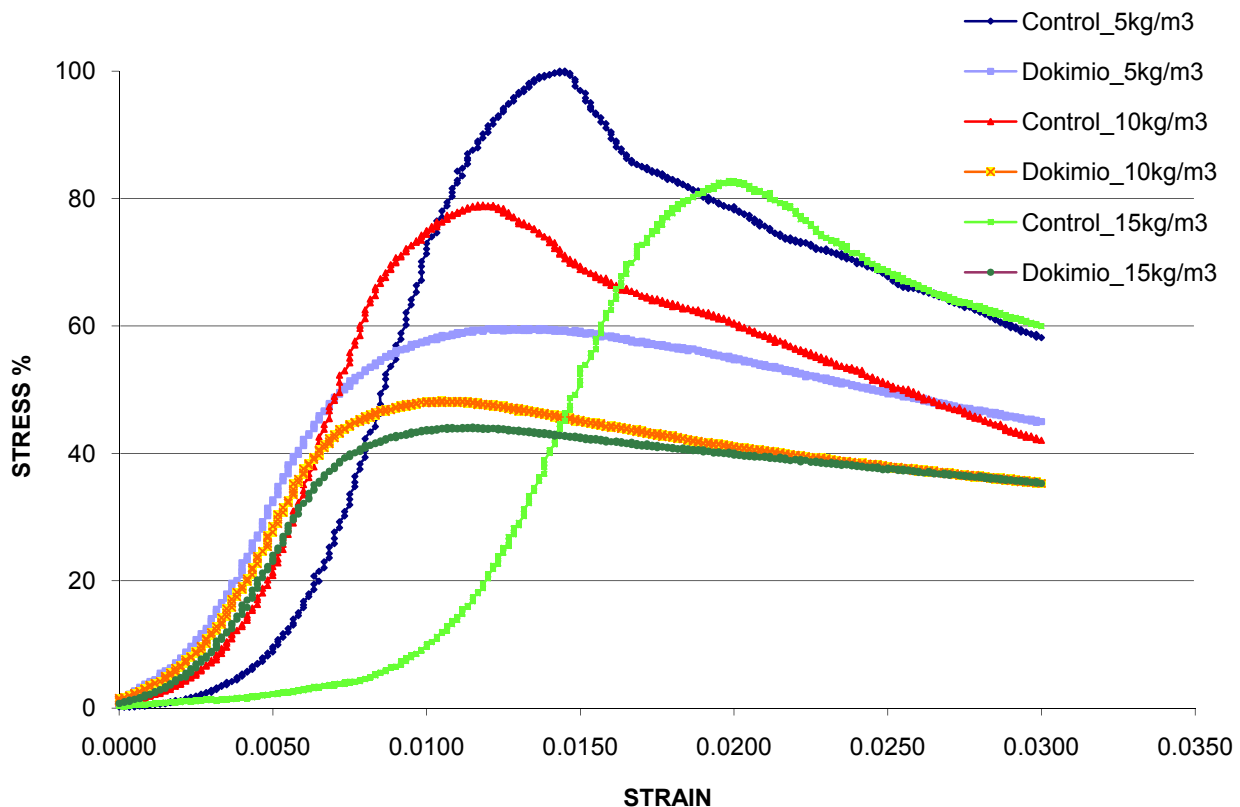
Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 30kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του

75,59% με τυπική απόκλιση 3,87% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 71,26% με τυπική απόκλιση 10,1%. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα 3ης σειράς δοκιμών

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ Μ.Θ. (MPa)	E (MPa)
✓ CONTROL_14_1	20,36	3335,29
Δ05_Π12_1	19,43	2561,85
Δ05_Π12_2	21,23	3758,53
✓ Δ05_Π12_3	20,44	2839,35
Δ05_Π12_4	20,69	3306,68
Δ05_Π12_5	19,84	2896,82
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	20,33	3116,42
✓ CONTROL_15_1	22,60	3355,66
✓ Δ1_Π12_1	23,68	3577,40
Δ1_Π12_2	22,70	3900,86
Δ1_Π12_3	21,97	3338,76
Δ1_Π12_4	24,57	3725,14
Δ1_Π12_5	24,59	3772,42
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	23,50	3611,70
✓ CONTROL_7	24,75	4173,82
Δ10_Π12_1	23,63	2868,99
Δ10_Π12_2	22,93	3109,53
Δ10_Π12_3	22,61	2580,71
✓ Δ10_Π12_4	23,40	3089,92
Δ10_Π12_5	22,67	3014,55
Δ10_Π12_6	22,86	3090,29
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	23,02	2959,00
✓ CONTROL_8	22,65	3265,05
Δ20_Π12_1	6,88	1093,86
✓ Δ20_Π12_2	6,70	1285,34
Δ20_Π12_3	6,45	1338,23
Δ20_Π12_4	6,63	1616,02
Δ20_Π12_5	6,95	1101,20
Δ20_Π12_6	6,93	1160,61
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	6,76	1265,88
✓ CONTROL_9	22,49	3059,73
Δ30_Π12_1	5,37	973,90
Δ30_Π12_2	5,24	965,35
✓ Δ30_Π12_3	5,46	716,99
Δ30_Π12_4	5,69	881,05
Δ30_Π12_5	5,40	917,02
Δ30_Π12_6	5,78	821,11
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	5,49	879,24

Για τις επόμενες σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18 mm για περιεκτικότητες ινών 5, 10 και 15 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.4.



Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών με ίνες πολυπροπυλενίου (18mm)

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 5kg/m³ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 39,8% με τυπική απόκλιση 6,25% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 34,75% με τυπική απόκλιση 7,7%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 10kg/m³ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 39% με τυπική απόκλιση 3,13% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 32,45% με τυπική απόκλιση 5,64%.

Στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 15kg/m³ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του

47,55% με τυπική απόκλιση 6,97% και μείωση του μέτρου ελαστικότητας, κατά μέσο όρο, της τάξης του 28,42% με τυπική απόκλιση 3,52%.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα 4ης σειράς δοκιμών

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ Μ.Θ. (MPa)	E (MPa)
✓ CONTROL_11	28,64	4141,10
Δ5_Π18_1	16,59	2693,50
✓ Δ5_Π18_2	17,07	2728,56
Δ5_Π18_3	19,40	3094,43
Δ5_Π18_4	16,82	2484,34
Δ5_Π18_5	16,92	2600,05
Δ5_Π18_6	16,68	2610,19
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	17,24	2701,85
✓ CONTROL_12	22,61	3566,04
Δ10_Π18_1	13,67	2539,50
Δ10_Π18_2	13,95	2403,21
✓ Δ10_Π18_3	13,81	2350,94
Δ10_Π18_4	13,00	2178,79
Δ10_Π18_5	14,15	2465,91
Δ10_Π18_6	14,15	2514,99
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	13,79	2408,89
✓ CONTROL_13	23,70	3125,11
Δ15_Π18_1	11,52	2165,08
Δ15_Π18_2	12,12	2313,11
Δ15_Π18_3	13,99	2247,33
Δ15_Π18_4	12,64	2277,65
✓ Δ15_Π18_5	12,52	2306,15
Δ15_Π18_6	11,80	2112,97
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	12,43	2237,05

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι:

1. Αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη παρατηρείται στα δοκίμια με χαλύβδινες ίνες, μήκους 55mm, για περιεχόμενο σε ίνες 20kg/m³, (0,42%) και στα δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου, μήκους 12mm, για περιεχόμενο σε ίνες 1kg/m³, (3,83%).
2. Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας παρατηρείται στα δοκίμια με χαλύβδινες ίνες, μήκους 45mm, για περιεχόμενο σε ίνες 10 και 20kg/m³, (περί 1,2%) και στα

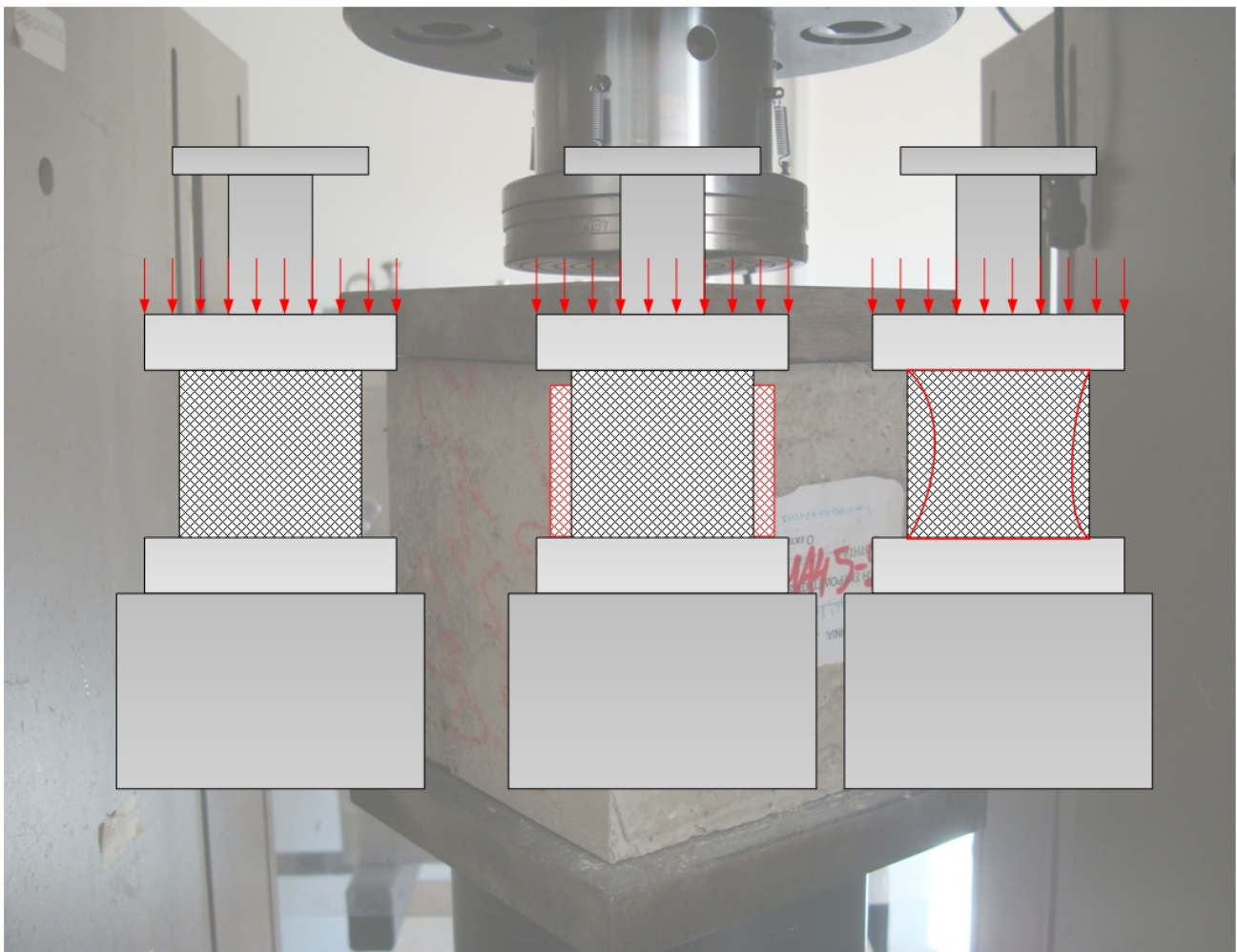
δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου, μήκους 12mm, για περιεχόμενο σε ίνες 1kg/m^3 , (7,09%).

3. Για τις υπόλοιπες περιεκτικότητες παρατηρείται μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας για τις μεν χαλύβδινες ίνες από 2,24% έως 14,08% και από 5,82% έως 37,19% αντίστοιχα, ενώ για τις δε ίνες πολυπροπυλενίου από 0,29% έως 75,59% και από 6,56% έως 71,26% αντίστοιχα.

5.1.1 Τρόπος αστοχίας των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη

Τα δοκίμια των δοκιμών καταπονούνται σε θλίψη κατά τον κατακόρυφο άξονα. Η εξέλιξη των δοκιμών γίνεται με έλεγχο της μετατόπισης.

Ανάλογα με το μέγεθος της τριβής που εμφανίζεται μεταξύ του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης, το δοκίμιο μπορεί να παραμορφωθεί με διαφορετικούς τρόπους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Τρόποι φόρτισης και παραμόρφωσης δοκιμών κατά τη φόρτιση

Στη διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών παρατηρήθηκαν ποικίλοι τρόποι αστοχίας, οι οποίοι εμφανίζονται στις Εικόνες 5.1 και 5.2.

Η αντοχή του δοκιμίου θεωρείται ότι υπολογίζεται σε σημεία μακριά από τα σημεία επιβολής του φορτίου, ώστε (σύμφωνα με την αρχή του **Saint Venant**) να θεωρείται ότι εφαρμόζεται ομοιόμορφο εντατικό πεδίο στο υλικό. Οι πλευρές του κυβικού δοκιμίου είναι ελεύθερες να παραμορφωθούν (Αγιουτάντης 2002).



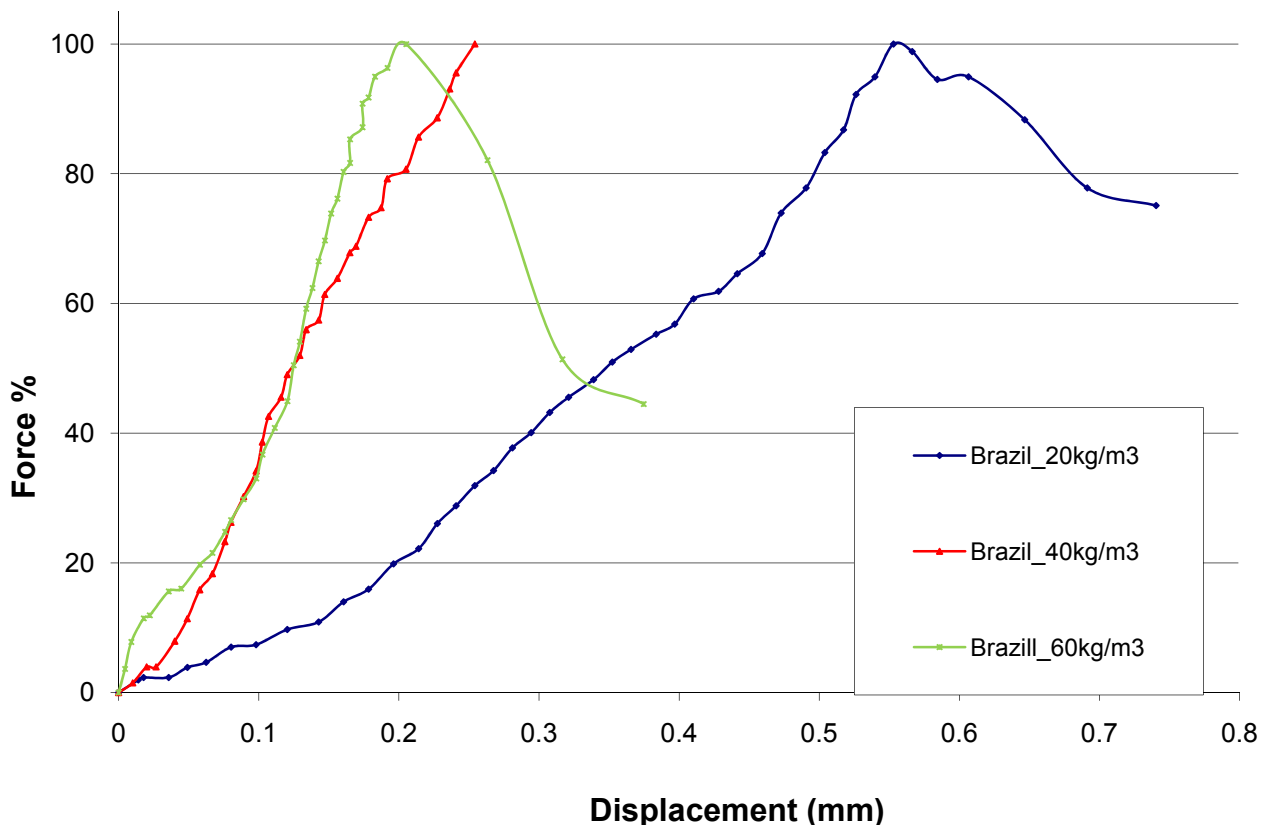
Εικόνα 5.2: Παραδείγματα αστοχίας δοκιμίων

5.2 Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού παρουσιάζονται σε διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά ανά είδος και περιεκτικότητα ινών, για κάθε σειρά δοκιμών.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμών Brazil-Control. Η αντοχή αυτή υπολογίσθηκε, κατά μέσο όρο ίση με **2,17MPa** για σκυρόδεμα κατηγορίας C16/20 και **2,41MPa** για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25. Επίσης, υπολογίζοντας την παράμετρο του μεγέθους του αδρανούς μέσα στο κυλινδρικό δίσκο, έγιναν δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια Brazil 50 και 75mm. Τα αποτελέσματα των δοκιμών Brazil με διάμετρο 75mm θα περιγραφούν παρακάτω.

Για τις πρώτες σειρές δοκιμών Brazil χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες μήκους 55 mm για περιεκτικότητες ινών 20, 40 και 60 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.5.



Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμών Brazil με χαλύβδινες ίνες (55mm)

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 20kg/m^3 παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 6,95% με τυπική απόκλιση 28,8% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 0,51% με τυπική απόκλιση 32,08%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 40kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 12,03% με τυπική απόκλιση 20,02% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 16,01% με τυπική απόκλιση 19,79%.

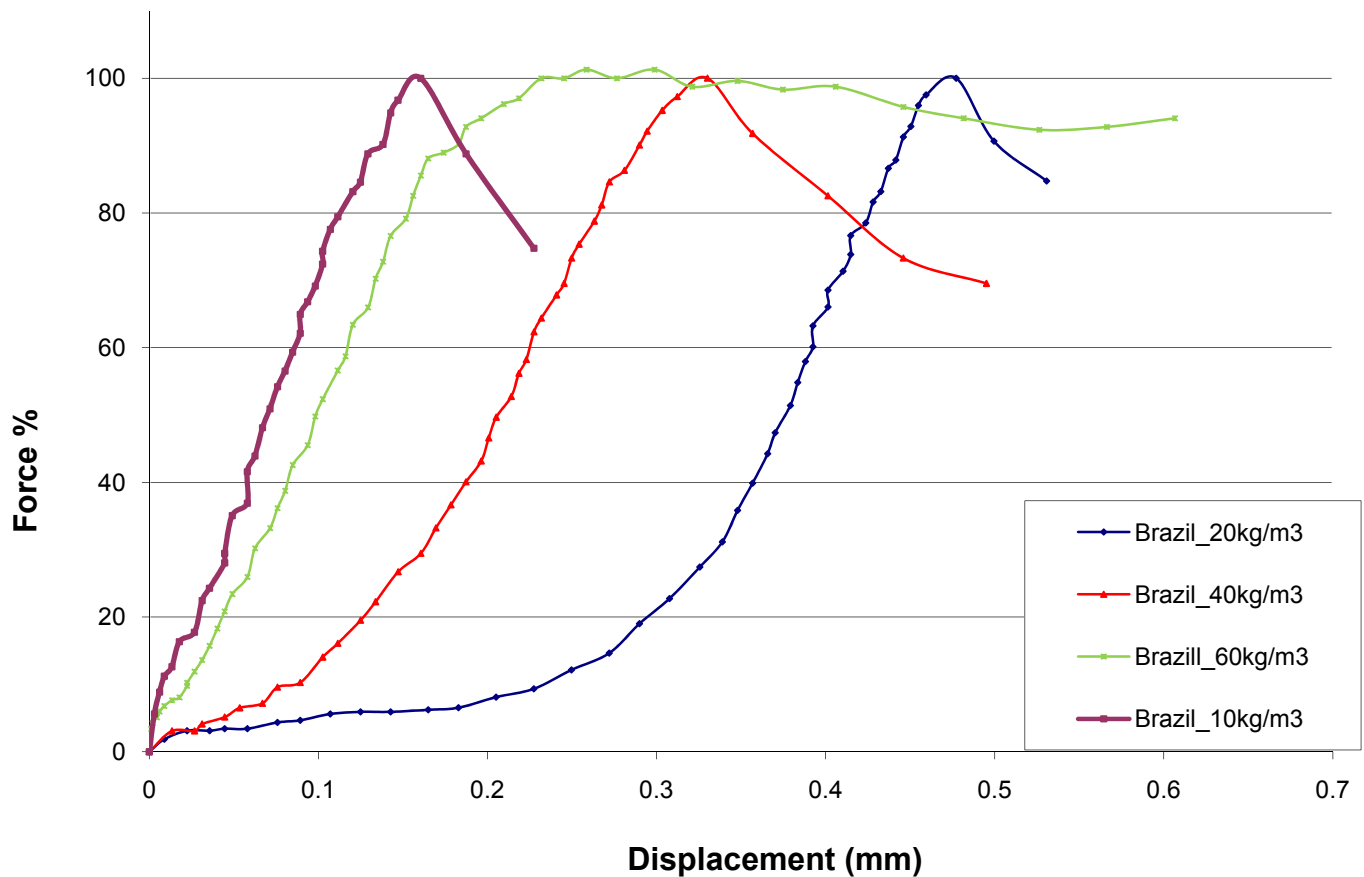
Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 60kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 2,07% με τυπική απόκλιση 21,45% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 6,13% με τυπική απόκλιση 22,13%.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα 1^{ης} σειράς δοκιμών Brazil

ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	T (MPa)	Fmax (kN)
BR_20_1	3.90	9.00
BR_20_2	3.04	7.03
BR_20_3	1.97	4.60
BR_20_4	2.06	4.78
BR_20_5	1.39	3.23
✓ BR_20_6	2.78	6.43
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.59	5.84
✓ BR_40_1	2.16	5.05
BR_40_2	1.35	3.15
BR_40_3	2.39	5.58
BR_40_4	1.90	4.45
BR_40_5	2.50	5.78
BR_40_6	2.40	5.60
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.12	4.93
BR_60_1	1.47	3.38
BR_60_2	2.79	6.58
BR_60_3	2.77	6.48
✓ BR_60_4	2.33	5.45
BR_60_5	2.62	6.15
BR_60_6	2.18	5.03
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.36	5.51

Για τις επόμενες σειρές δοκιμών Brazil χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες μήκους 45 mm για περιεκτικότητες ινών 10, 20, 40 και 60 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.6.



Διάγραμμα 5.6: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμών Brazil με χαλύβδινες ίνες (45mm)

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 10kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 7,44% με τυπική απόκλιση 25,73% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 6,88% με τυπική απόκλιση 25,72%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 20kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 27,42% με τυπική απόκλιση 9,19% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 24,14% με τυπική απόκλιση 9,5%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 40kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 23,49% με τυπική απόκλιση 8,54% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 20,27% με τυπική απόκλιση 9,04%.

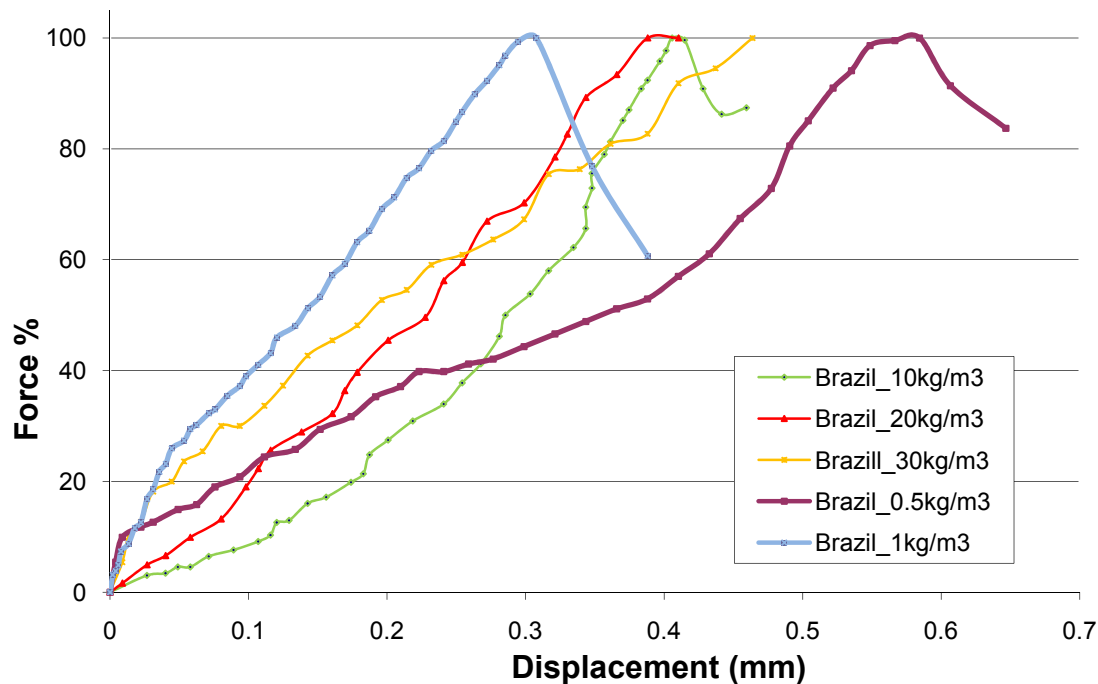
Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 60kg/m^3 παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 1,5% με τυπική απόκλιση 15,65% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 2,91% με τυπική απόκλιση 15,55%.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα 2^{ης} σειράς δοκιμών Brazil

ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	T (MPa)	Fmax (kN)
BR10_M45_1	2.93	7.15
BR10_M45_2	2.85	6.8
BR10_M45_3	2.10	5.1
✓ BR10_M45_4	2.22	5.35
BR10_M45_5	1.39	3.4
BR10_M45_6	2.56	6.3
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.34	5.69
BR_20_45_1	2.93	6.75
BR_20_45_2	3.46	8.10
✓ BR_20_45_3	3.47	8.02
BR_20_45_4	2.94	6.87
BR_20_45_5	3.71	8.70
BR_20_45_6	3.44	7.95
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.32	7.73
BR_40_45_1	3.62	8.52
BR_40_45_2	2.92	6.82
✓ BR_40_45_3	3.11	7.30
BR_40_45_4	3.10	7.32
BR_40_45_5	2.89	6.65
BR_40_45_6	3.25	7.52
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.15	7.36
BR_60_45_1	2.96	6.82
BR_60_45_2	2.24	5.25
BR_60_45_3	2.83	6.62
BR_60_45_4	1.95	4.50
✓ BR_60_45_5	2.55	5.95
BR_60_45_6	2.14	5.02
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.45	5.69

Για τις επόμενες σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12 mm για περιεκτικότητες ινών 0.5, 1, 10, 20 και 30 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.7.



Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμών Brazil με ίνες πολυπροπυλενίου (12mm)

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 0,5kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 7,78% με τυπική απόκλιση 22,83% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 7,35% με τυπική απόκλιση 22,7%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 1kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 16,32% με τυπική απόκλιση 9,84% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 14,77% με τυπική απόκλιση 10,51%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 10kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 17,8% με τυπική απόκλιση 36,84% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 14,87% με τυπική απόκλιση 36,46%.

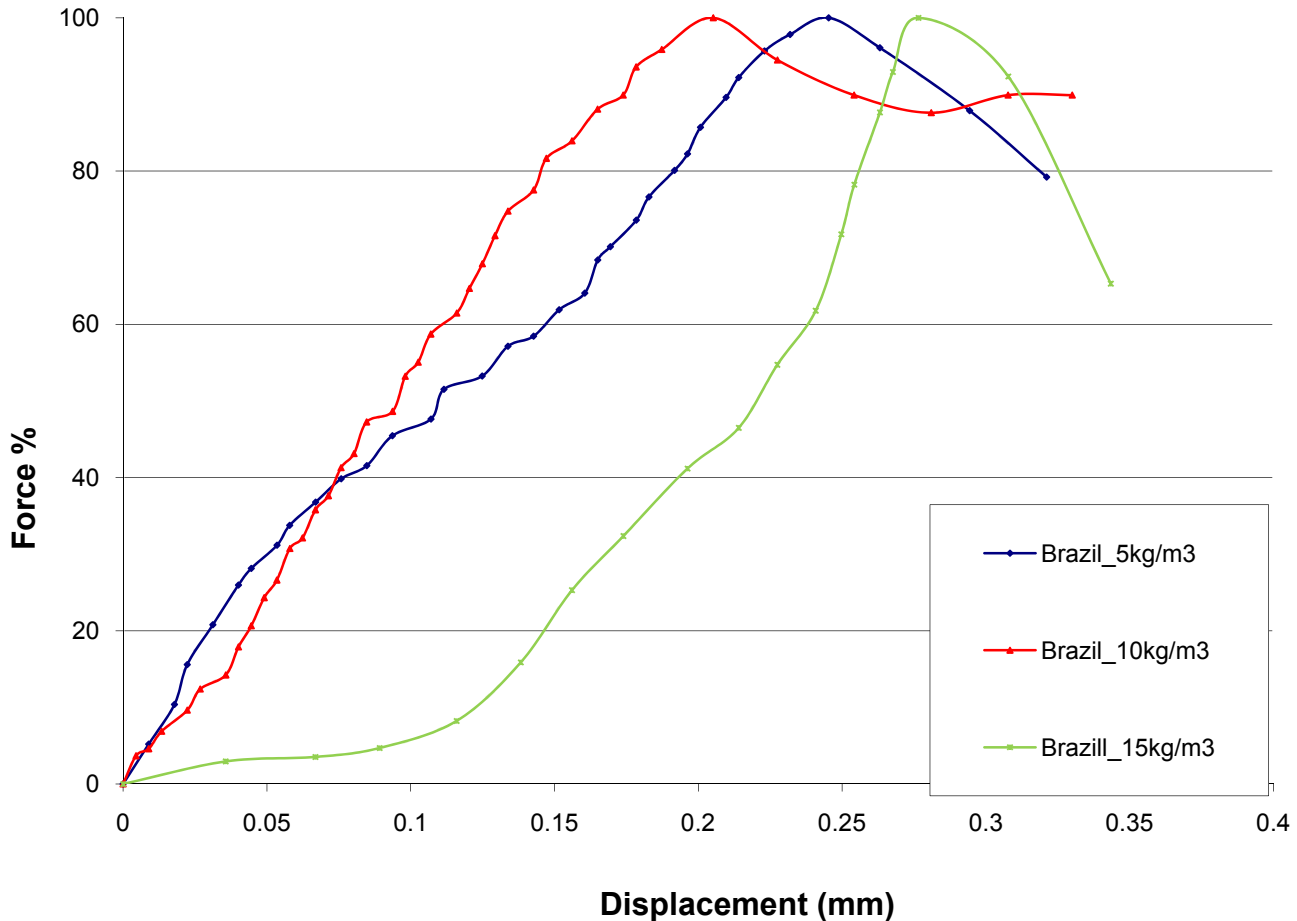
Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 20kg/m³ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 46,53% με τυπική απόκλιση 14,57% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 50,31% με τυπική απόκλιση 13,83%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 30kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 52,87% με τυπική απόκλιση 14,77% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 54,54% με τυπική απόκλιση 14,93%. Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα 3^{ης} σειράς δοκιμών Brazil

ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	T (MPa)	Fmax (kN)
✓ BR05_P12_1	2.26	5.52
BR05_P12_2	2.53	6.15
BR05_P12_3	2.09	5.1
BR05_P12_4	1.86	4.5
BR05_P12_5	2.06	5
BR05_P12_6	3.30	8.02
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.35	5.72
BR1_P12_1	3.28	7.92
✓ BR1_P12_2	2.92	7.12
BR1_P12_3	2.82	6.8
BR1_P12_4	3.02	7.32
BR1_P12_5	2.83	6.3
BR1_P12_6	2.41	5.82
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.88	6.88
✓ BR_10_12_1	2.77	6.55
BR_10_12_2	3.26	7.62
BR_10_12_3	4.26	10.02
BR_10_12_4	1.25	2.95
BR_10_12_5	2.53	6.00
BR_10_12_6	3.50	8.20
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.93	6.89
BR_20_12_1	1.21	2.85
BR_20_12_2	1.17	2.65
BR_20_12_3	1.55	3.60
BR_20_12_4	1.39	2.95
✓ BR_20_12_5	1.32	3.02
BR_20_12_6	0.99	2.35
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1.29	2.91
BR_30_12_1	1.22	2.85
BR_30_12_2	1.42	3.35
BR_30_12_3	0.96	2.25
BR_30_12_4	0.97	2.30
BR_30_12_5	1.07	2.50
✓ BR_30_12_6	1.17	2.75
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1.13	2.67

Για τις επόμενες σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18 mm για περιεκτικότητες ινών 5, 10 και 15 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.8.



Διάγραμμα 5.8: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμών Brazil με ίνες πολυπροπυλενίου (18mm)

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 5kg/m³ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 0,37% με τυπική απόκλιση 15,97% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 2,55% με τυπική απόκλιση 15,99%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 10kg/m³ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 8,42% με τυπική απόκλιση 28,38% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 11,22% με τυπική απόκλιση 28,28%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών 15kg/m³ παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του

27,85% με τυπική απόκλιση 24,96% και μείωση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 30,82% με τυπική απόκλιση 25,66%.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα 4^{ης} σειράς δοκιμών Brazil

ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	T (MPa)	Fmax (kN)
BR_5_18_1	2.15	5.07
BR_5_18_2	1.79	4.20
✓ BR_5_18_3	2.42	5.77
BR_5_18_4	2.80	6.62
BR_5_18_5	2.70	6.40
BR_5_18_6	2.64	6.22
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.42	5.72
BR_10_18_1	1.09	2.57
BR_10_18_2	2.30	5.45
✓ BR_10_18_3	2.12	5.02
BR_10_18_4	2.52	5.95
BR_10_18_5	2.87	6.77
BR_10_18_6	2.32	5.47
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.21	5.21
BR_15_18_1	2.3621	5.55
BR_15_18_2	1.5602	3.65
BR_15_18_3	1.1624	2.75
BR_15_18_4	1.4089	3.12
BR_15_18_5	2.1304	5.02
✓ BR_15_18_6	1.8095	4.25
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1.7389	4.06

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι:

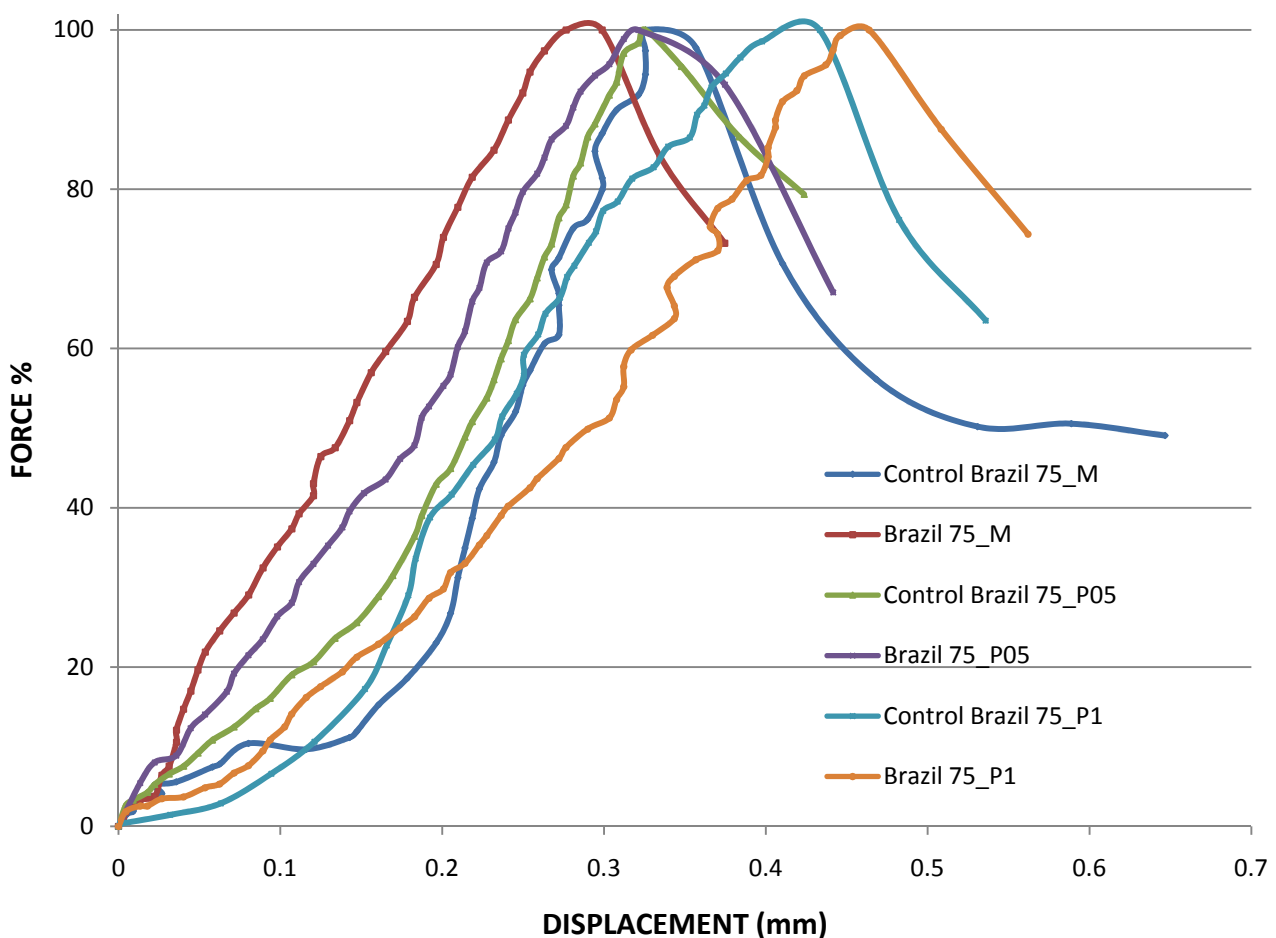
1. Η μέγιστη αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό παρατηρείται στα δοκίμια με χαλύβδινες ίνες, μήκους 45mm, για περιεχόμενο σε ίνες 20kg/m³, (27,42%) και στα δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου, μήκους 12mm, για περιεχόμενο σε ίνες 1 και 10kg/m³, (16,32 και 17,8% αντίστοιχα).
2. Αύξηση του φορτίου παρατηρείται στα δοκίμια με χαλύβδινες ίνες, μήκους 45mm, για περιεχόμενο σε ίνες 20kg/m³, (περί 24,14%) και στα δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου, μήκους 12mm, για περιεχόμενο σε ίνες 1 και 10kg/m³, (14,77 και 14,87% αντίστοιχα).

3. Για τις υπόλοιπες περιεκτικότητες παρατηρείται μείωση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό και του φορτίου για τις μεν χαλύβδινες ίνες από 2,07% έως 12,03% και από 0,51% έως 16,01% αντίστοιχα, ενώ για τις δε ίνες πολυπροπυλενίου από 8,42% έως 52,87% και από 2,55% έως 54,54% αντίστοιχα.

Το μήκος των ινών και το μέγεθος των αδρανών του σκυροδέματος αποτελούσαν παραμέτρους, οι οποίες ενδέχεται να επηρέαζαν την λειτουργία των ινών στα δοκίμια.

Για αυτό το λόγο κατασκευάστηκαν δοκίμια Brazil διαμέτρου 75mm, τα οποία εξετάστηκαν στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Για την πρώτη σειρά δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες μήκους 45 mm για περιεκτικότητα ινών 10 kg/m^3 , ενώ για τις επόμενες χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm για περιεκτικότητες ινών 0,5 και 1 kg/m^3 .

Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.9.



Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμών Brazil 75mm με χαλύβδινες ίνες (45mm) και ίνες πολυπροπυλενίου (12mm)

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα μεταλλικών ινών 10kg/m^3 παρατηρείται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 0,53% με τυπική απόκλιση 10,48% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 29,64% με τυπική απόκλιση 10,48%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών πολυπροπυλενίου $0,5\text{kg/m}^3$ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 10,41% με τυπική απόκλιση 7,6% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 36,78% με τυπική απόκλιση 7,4%.

Στα δοκίμια Brazil με περιεκτικότητα ινών πολυπροπυλενίου 1kg/m^3 παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, κατά μέσο όρο, της τάξης του 22,46% με τυπική απόκλιση 6,13% και αύξηση του φορτίου, κατά μέσο όρο, της τάξης του 46,05% με τυπική απόκλιση 6,25%.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9.

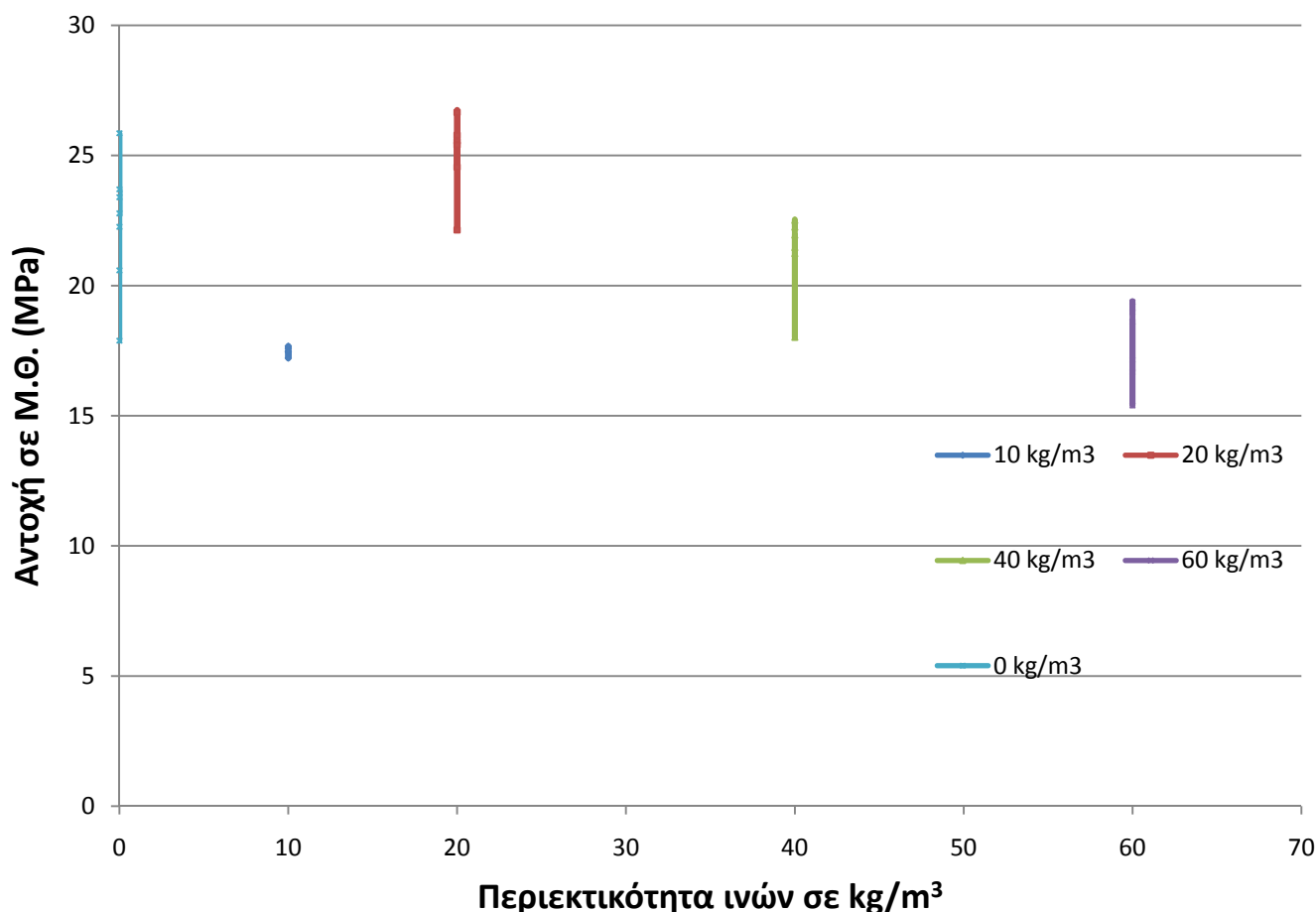
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα δοκιμών Brazil 75 mm

ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ			ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ		
ΔΟΚΙΜΙΟ	T (MPa)	Fmax (kN)	ΔΟΚΙΜΙΟ	T (MPa)	Fmax (kN)
Control 13_2 Brazil 75	T	F	Brazil 75	T	F
BR75_13_1	1.93	6.72	BR75_M_1	2.35	8.20
BR75_13_2	2.24	7.85	BR75_M_2	1.90	6.62
BR75_13_4	1.60	5.55	BR75_M_3	2.22	7.77
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1.92	6.71	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.16	7.53
Control 14_2 Brazil 75	T	F	Brazil 75	T	F
BR75_14_1	2.61	8.97	BR75_D05_1	2.20	7.62
BR75_14_2	2.20	7.62	BR75_D05_2	2.50	8.72
BR75_14_3	1.99	6.92	BR75_D05_3	2.56	8.80
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.27	7.84	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.42	8.38
Control 15_2 Brazil 75	T	F	Brazil 75	T	F
BR75_15_2	2.48	8.50	BR75_D1_1	2.92	10.22
BR75_15_3	2.73	9.52	BR75_D1_2	3.30	11.57
BR75_15_4	2.41	8.25	BR75_D1_4	3.10	10.82
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.54	8.76	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.11	10.87

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, γίνεται μία γενική σύγκριση των διάφορων περιεκτικοτήτων σε ίνες των δοκιμών ανά είδος ινών.

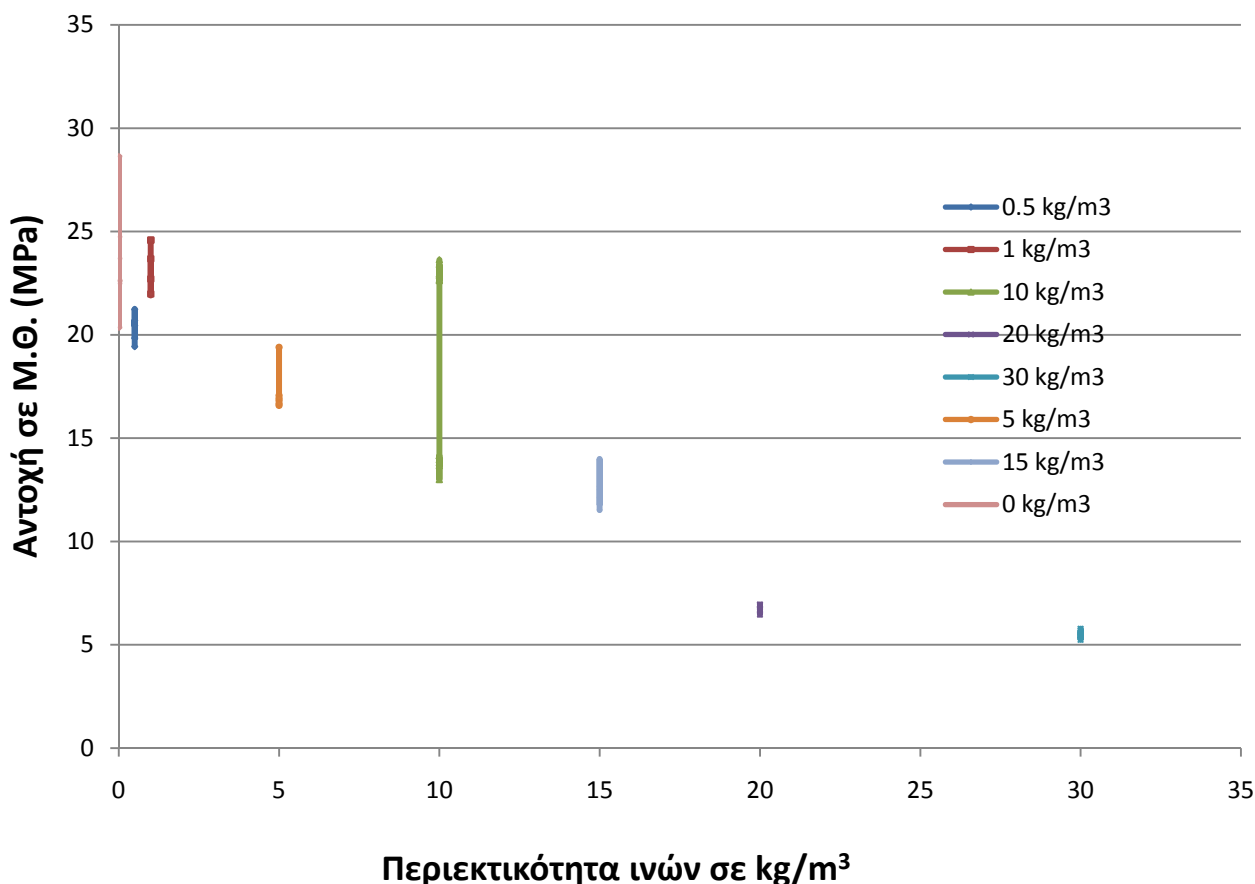
Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει μία παρατήρηση όσον αφορά τη διαλογή των δοκιμών και την ποιότητα του σκυρόδεματος που χρησιμοποιείται κάθε φορά στις δοκιμές. Για την συμπλήρωση κάθε μίας σειράς δοκιμών σε κάθε περιεκτικότητα ινών χρησιμοποιείται διαφορετικό σκυρόδεμα και για αυτό το λόγο παρουσιάζεται μία διακύμανση στις τιμές της αντοχής στην ίδια σειρά δοκιμών.

Στο διάγραμμα 5.10 είναι εμφανές πως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμών με χαλύβδινες ίνες αυξάνεται αισθητά μόνο για την περιεκτικότητα των 20kg/m³. Η περιεκτικότητα των 0kg/m³ σε ίνες, αναφέρεται στην κατηγορία των Brazil δοκιμών.



Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμών με χαλύβδινες ίνες

Στο διάγραμμα 5.11, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων με ίνες πολυπροπυλενίου αυξάνεται για τις περιεκτικότητες των 1 και 10 kg/m³.



Διάγραμμα 5.11: Διάγραμμα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων με ίνες πολυπροπυλενίου

Όσον αφορά τα δοκίμια Brazil, πρέπει να υπογραμμισθεί το φαινόμενο της καθίζησης την περίοδο της μορφοποίησης των δοκιμίων μέσα στο θάλαμο συντήρησης.

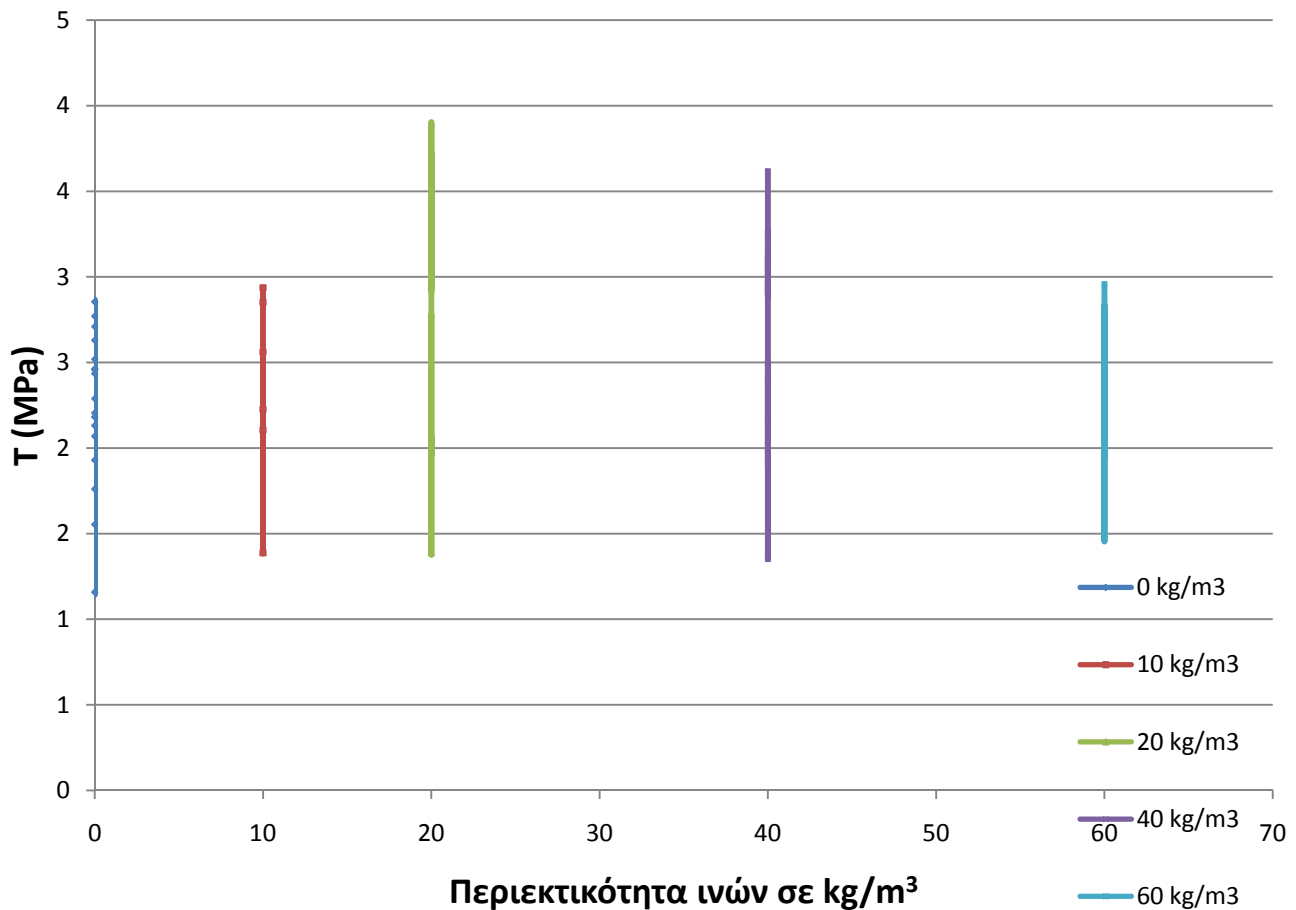
Όταν ο πολφός του σκυροδέματος τοποθετείται στην μήτρα μορφοποίησής του, τα μεγαλύτερα και βαρύτερα αδρανή υλικά καθιζάνουν στον πυθμένα της μήτρας, με αποτέλεσμα το κυβικό δοκίμιο να «οπλίζεται» περισσότερο στον πυθμένα του και λιγότερο στο ανώτερο τμήμα του.

Έτσι, τα δοκίμια Brazil που βρίσκονταν στον πυθμένα του δοκιμίου εμφάνισαν μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε εφελκυσμό, σε σχέση με αυτά που λήφθηκαν από το πάνω μέρος του κυβικού δοκιμίου κατά την πυρηνοληψία. Επομένως, ήταν

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

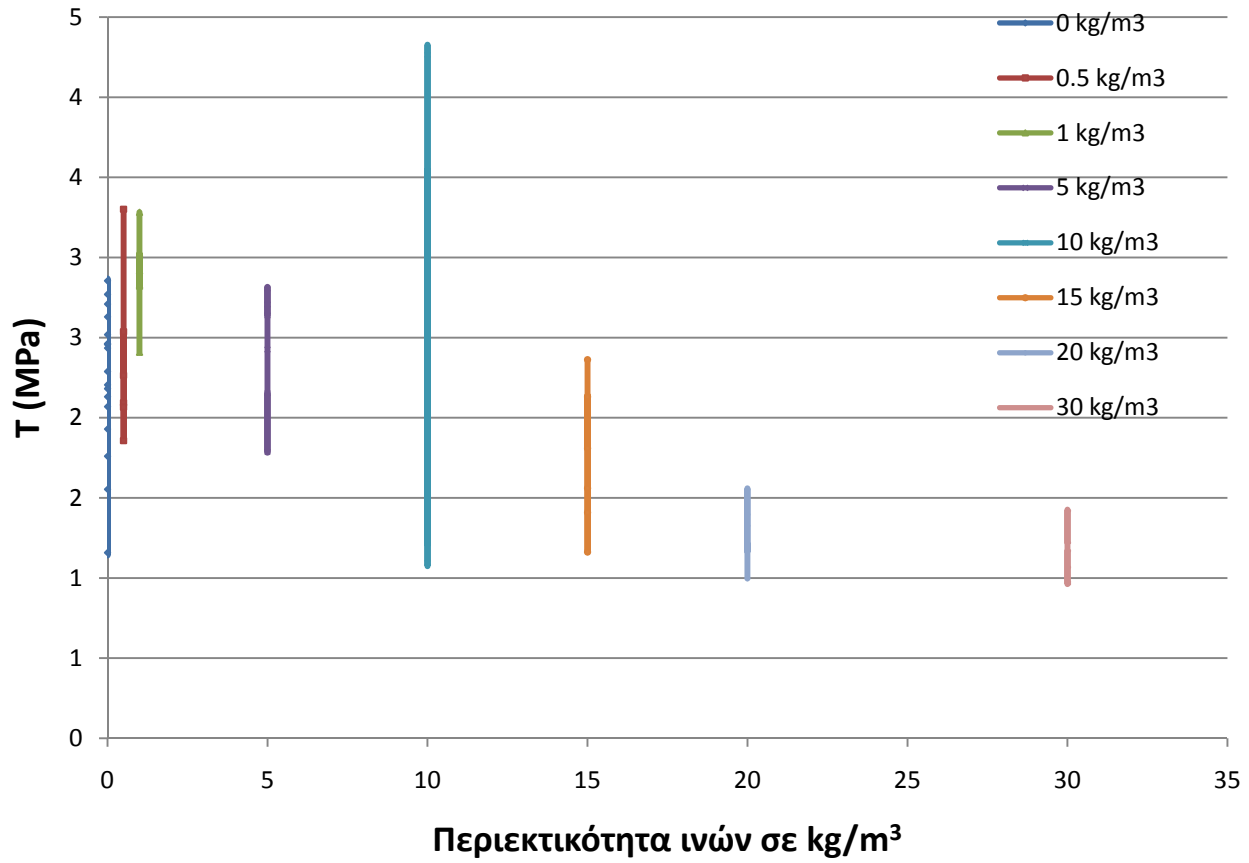
αναμενόμενο η διακύμανση της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμών Brazil να αυξάνεται.

Στο διάγραμμα 5.12, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό των δοκιμών με χαλύβδινες ίνες αυξάνεται αισθητά για την περιεκτικότητα των 20kg/m³ και λιγότερο για την περιεκτικότητα των 20kg/m³.



Διάγραμμα 5.12: Διάγραμμα αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό δοκιμών με χαλύβδινες ίνες

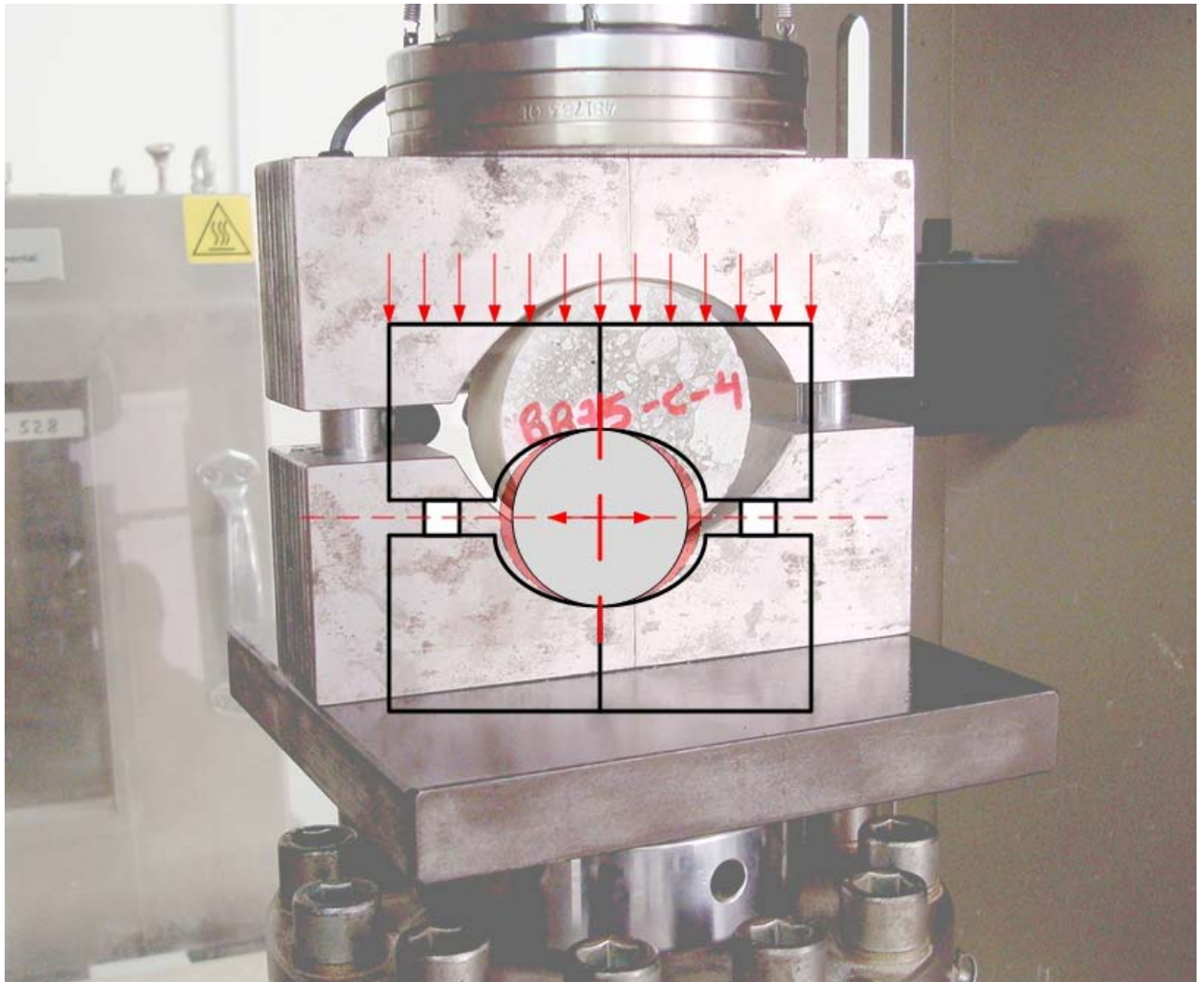
Στο διάγραμμα 5.13, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό των δοκιμών με ίνες πολυπροπυλενίου αυξάνεται αισθητά για την περιεκτικότητα των 10kg/m³ και λιγότερο για τις περιεκτικότητες των 0,5 και 1kg/m³.



Διάγραμμα 5.13: Διάγραμμα αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό δοκιμίων με ίνες πολυπροπυλενίου

5.2.1 Τρόπος αστοχίας των δοκιμών σε έμμεσο εφελκυσμό

Τα δοκίμια της δοκιμής καταπονούνται σε εφελκυσμό κατά τον οριζόντιο άξονα. Η εξέλιξη των δοκιμών γίνεται με έλεγχο του φορτίου, που ασκείται στο δοκίμιο και προκαλεί τον έμμεσο εφελκυσμό. Οι εφελκυστικές δυνάμεις που εμφανίζονται διαχωρίζουν το δοκίμιο στο μέσο του σχηματίζοντας μία κατακόρυφη ασυνέχεια.



Εικόνα 5.3: Τρόποι φόρτισης και αστοχίας δοκιμών Brazil κατά τη φόρτιση



Εικόνα 5.4: Παραδείγματα αστοχίας δοκιμών

Κεφάλαιο 6

6.1 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω δοκιμές θα αξιολογηθούν από την επιστημονική κοινότητα και θα αυξήσουν τα περιθώρια έρευνας πάνω σε ένα νέο υλικό, το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην υποστήριξη των σηράγγων.

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η προσθήκη ινών είτε χαλύβδινων, είτε πολυπροπυλενίου στη μάζα του σκυροδέματος, γενικά, αυξάνει την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη και την αντοχή του σε έμμεσο εφελκυσμό, όταν η περιεκτικότητα σε ίνες κυμαίνεται σε συγκεκριμένα εύρη.
2. Με βάση τα πειράματα τα οποία έγιναν και τα εύρη περιεκτικότητας σε ίνες τα οποία διερευνήθηκαν, η βέλτιστη **αντοχή σε μονοαξονική θλίψη** για τις **χαλύβδινες ίνες** εμφανίστηκε για τις ίνες, μήκους 55mm, για περιεκτικότητα ινών ίση με 20 kg/m³. Στη συγκεκριμένη περιεκτικότητα εμφανίστηκε μικρή αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, της τάξης του 0,42% με ταυτόχρονη μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 8,76% για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της τάξης των 20-25MPa.
3. Με βάση τα πειράματα τα οποία έγιναν και τα εύρη περιεκτικότητας σε ίνες τα οποία διερευνήθηκαν, η βέλτιστη **αντοχή σε μονοαξονική θλίψη** για τις **ίνες πολυπροπυλενίου** εμφανίστηκε για τις ίνες, μήκους 12mm, για περιεκτικότητα ινών ίση με 1 kg/m³. Στη συγκεκριμένη περιεκτικότητα εμφανίστηκε αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, της τάξης του 3,83% με ταυτόχρονη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 7,09% για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της τάξης των 20-25MPa.
4. Τα πειράματα του έμμεσου εφελκυσμού, τα οποία έγιναν για κυλινδρικά δοκίμια 50 και 75mm, δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα.

5. Με βάση τα πειράματα τα οποία έγιναν και τα εύρη περιεκτικότητας σε ίνες τα οποία διερευνήθηκαν για τα δοκίμια Brazil 50mm, η βέλτιστη **αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό** για τις **χαλύβδινες ίνες** εμφανίστηκε για τις ίνες, μήκους 45mm, για περιεκτικότητα ινών ίση με 20 kg/m^3 . Στη συγκεκριμένη περιεκτικότητα εμφανίστηκε αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, της τάξης του 27,42%. Σημαντική αύξηση της αντοχής παρατηρήθηκε και για τις ίνες μήκους 55mm για την ίδια περιεκτικότητα ινών (20 kg/m^3), της τάξης του 6,95% καθώς και για τις ίνες μήκους 45mm για περιεκτικότητες ινών 10 και 40 kg/m^3 , στις οποίες εμφανίζεται αύξηση της αντοχής κατά 7,44% και 23,49% αντίστοιχα.
6. Με βάση τα πειράματα τα οποία έγιναν και τα εύρη περιεκτικότητας σε ίνες τα οποία διερευνήθηκαν για τα δοκίμια Brazil 50mm, η βέλτιστη **αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό** για τις **ίνες πολυπροπυλενίου** εμφανίστηκε για τις ίνες, μήκους 12mm, για περιεκτικότητα ινών ίση με 10 kg/m^3 . Στη συγκεκριμένη περιεκτικότητα εμφανίστηκε αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, της τάξης του 17,8%. Σημαντική αύξηση της αντοχής παρατηρήθηκε για τις ίνες μήκους 12mm και για περιεκτικότητες ινών ίσες με 0,5 και 1 kg/m^3 , της τάξης του 7,78% και 16,32% αντίστοιχα.
7. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών Brazil με διάμετρο 75mm, έδειξε ότι για τις **χαλύβδινες ίνες**, μήκους 45mm και για περιεκτικότητα ινών ίση με 10 kg/m^3 υπήρξε μικρή μείωση της αντοχής τους σε έμμεσο εφελκυσμό της τάξης του 0,53% σε σχέση με το δοκίμιο control. Αντίθετα, για τις **ίνες πολυπροπυλενίου**, για περιεκτικότητες ινών 0,5 και 1 kg/m^3 παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής, σε εφελκυσμό σε σχέση με το δοκίμιο control, της τάξης του 10,41% και 22,46% αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τα δοκίμια Brazil των 50mm, στα δοκίμια Brazil των 75mm παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό της τάξης του 7,93% για τις χαλύβδινες ίνες και για περιεκτικότητα ινών 10 kg/m^3 , ενώ για τις ίνες πολυπροπυλενίου σε περιεκτικότητες ινών 0,5 και 1 kg/m^3 παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό της τάξης του 2,86% και 7,33% αντίστοιχα.
8. Επί προσθέτως, παρατηρήθηκε πως για υψηλές περιεκτικότητες ινών (μεγαλύτερες των 20 kg/m^3), ιδίως πολυπροπυλενίου, τα δοκίμια έχαναν το

ψαθυρό τους χαρακτήρα και εμφάνιζαν πλαστική συμπεριφορά. Οι μεγάλες περιεκτικότητες ινών στη μάζα του τσιμέντου μέσα στο σκυρόδεμα, αλλάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της μάζας αυτής με συνέπεια να μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Επιπλέον, η μεγάλη συγκέντρωση ινών στο σκυρόδεμα θεωρείται ότι δημιουργεί επίπεδα ολίσθησης στο εσωτερικό των δοκιμίων, καθώς αυξάνεται η φόρτιση, με αποτέλεσμα να επικρατεί η πλαστική συμπεριφορά καθώς αυξάνεται η τάση και η παραμόρφωση των δοκιμίων. Ως αποτέλεσμα, τα δοκίμια αποκτούν μακρύτερο πλαστικό κλάδο και παραμορφώνονται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο.

9. Από μικροσκοπική εξέταση, δεν ανιχνεύτηκε κάποια χημική αντίδραση των συστατικών του σκυροδέματος με τις ίνες καθώς δεν εμφανίστηκαν ίχνη διάβρωσης ή αλλαγή στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και η κατανομή τους μέσα στο δοκίμιο εμφάνισε ικανοποιητική αλληλοεμπλοκή τους με τους κόκκους των αδρανών υλικών του σκυροδέματος.

Κατά τη διάρκεια τέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών, παρατηρήθηκαν τα εξής:

1. Για τεχνικούς λόγους, η ονομαστική αντοχή του σκυροδέματος δεν αποτελούσε μία αμετάβλητη παράμετρο, γεγονός το οποίο επηρέασε και τα εξαγόμενα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.
2. Δόθηκε μεγάλη προσοχή στην πολύ καλή ανάμειξη του σκυροδέματος και των ινών (περισσότερο από 10 λεπτά), ώστε το μείγμα να καταστεί όσο πιο ομοιογενές γίνεται.
3. Λήφθηκε μόνο ένα δοκίμιο Control για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης
4. Στη σκυροδέτηση και τη χύτευση δεν χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα, όπως ρευστοποιητές, επιταχυντές πήξης κα.

6.2 Προτάσεις

1. Το σκυρόδεμα θα πρέπει να λαμβάνεται, εάν είναι δυνατόν, στην τοποθεσία που χρησιμοποιείται (οικοδομή, εργοτάξιο), ώστε να εξασφαλίζεται

περισσότερος χρόνος ανάμειξης και ομογενοποίησης του μείγματος που εξέρχεται από το σταθμό παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος.

2. Συνίσταται, ανάμειξη του σκυροδέματος και των ινών στη μπετονιέρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (περισσότερο από 15 λεπτά).
3. Η προσθήκη νερού στο σκυρόδεμα, αυξάνει την εργασιμότητά του κατά το στάδιο της χύτευσης των δοκιμίων, αλλά θα πρέπει να είναι ελεγχόμενη και όσο το δυνατό μικρότερη, ώστε να μειώνεται το φαινόμενο της καθίζησης των δοκιμίων κατά το στάδιο της μορφοποίησή τους.
4. Κατά τη διάρκεια της χύτευσης των δοκιμίων συνίσταται η καλύτερη απομάκρυνση των φυσαλίδων αέρα, που εγκλείονται στη μάζα του σκυροδέματος κατά το στάδιο της ανάμειξης, με διαδοχικές κρούσεις όπως προβλέπει ο Κανονισμός Σκυροδέματος.
5. Θα ήταν πολύ χρήσιμες κάποιες μετρήσεις του βάρους του δοκιμίων πριν τη θραύση τους. Η πιθανή διακύμανση του βάρους των δοκιμίων ενδέχεται να αποδεικνύει κάποια αύξηση ή μείωση του πορώδους των δοκιμίων, που δημιουργείται από εγκλεισμένες φυσαλίδες στη μάζα του σκυροδέματος κατά την σκυροδέτηση.

Βιβλιογραφία και αναφορές

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Ashour A. Samir, Wafa F. Faisal, Kamal I. Mohmd, (1999), “*Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams*”
2. ASTM International, Designation C 1116-03, “*Standard Specification for fiber-reinforced concrete and shotcrete*”
3. Brady, B.H.G and E.T. Brown (1985), “*Rock Mechanics for underground mining*”, George Allen and Unwin
4. Brandt, A., (2008), “*Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*”, Journal homepage: www.elsevier.com/locate/compstruct
5. Gao J., Sun Wei, Morino Keiji (1997), “*Mechanical Properties of steel fiber reinforced, high-strength, lightweight concrete*”
6. Hsie M., Tu Ch., Song P.S., (2007), “*Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete*”
7. Inomix/Sidenor S.A, (2008), *Μεταλλικές ίνες, Φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος*
8. Padmarajaiah, S.K., Ramaswamy, A. (2004), “*Flexural strength predictions of steel fiber reinforced high-strength concrete in fully/partially prestressed beam specimens*”
9. Sika – Fibers, (2008), *Συνθετικές ίνες, Φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος*
10. Wendehorst, R. (1975), “*Δομικά Υλικά*”, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ., (2002), *Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων*, Εκδοτικός Όμιλος ΙΩΝ, Αθήνα
2. Βουδικλάρης Θ.Γ., (2009), *Εργαστήρια ελέγχου δοκιμίων σκυροδέματος*

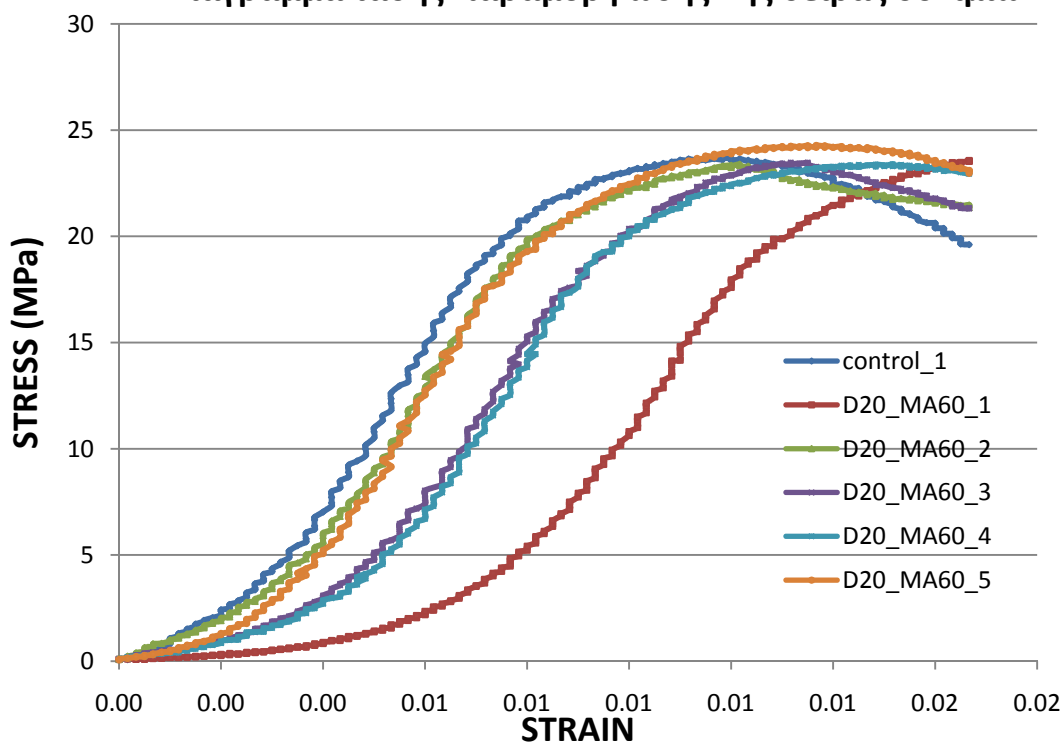
3. Γεωργακοπούλου, Μ., (2008), *Ενίσχυση στοιχείων με ινοπλισμένο σκυρόδεμα από χάλυβα και πλαστικά υλικά*,
4. *Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος 2000*, (2006), Επιμέλεια Έκδοσης ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε., Αθήνα
5. Καββαδάς Μ., (2007), *Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης υπογείων έργων - Ανάλυση και διαστασιολόγηση της μόνιμης επένδυσης*, Σειρά Μεταπτυχιακών διαλέξεων στο ΕΜΠ
6. Καββαδάς Μ., (2005), *Ειδικά γεωτεχνικά έργα - Γεωτεχνική σηράγγων*
7. Κεφαλιάκος, Δ., (1999), *Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, Εκδόσεις Αιτωλικές
8. Κωμοδρόμος Αιμ., (2008), *Σήραγγες και υπόγεια έργα*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
9. Μαρσέλος Ν., *Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 1997*, Εκδόσεις «π-Systems»
10. *Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος – ΝΚΤΟΧ 2008*, (2008), Επιμέλεια Έκδοσης ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε., Αθήνα
11. Σοφιανός Α., (2002), *Εκσκαφή σε στρωσιγενές πέτρωμα*, Κεφάλαιο 4
12. Σοφιανός Α., (2008), *Μέτρα υποστήριξης σηράγγων*
13. Σοφιανός Α.Ι., Καπένης Α.Π., (1999), *Συμπεριφορά χαμηλού θόλου των υπογείων οροφών για ακραία παραμορφωσιμότητα του πετρώματος*, Επιστημονικές εκδόσεις ΤΕΕ, V, τεύχ. 1-2

Εξώφυλλο & Οπισθόφυλλο

Πηγή: www.atlascopco.com

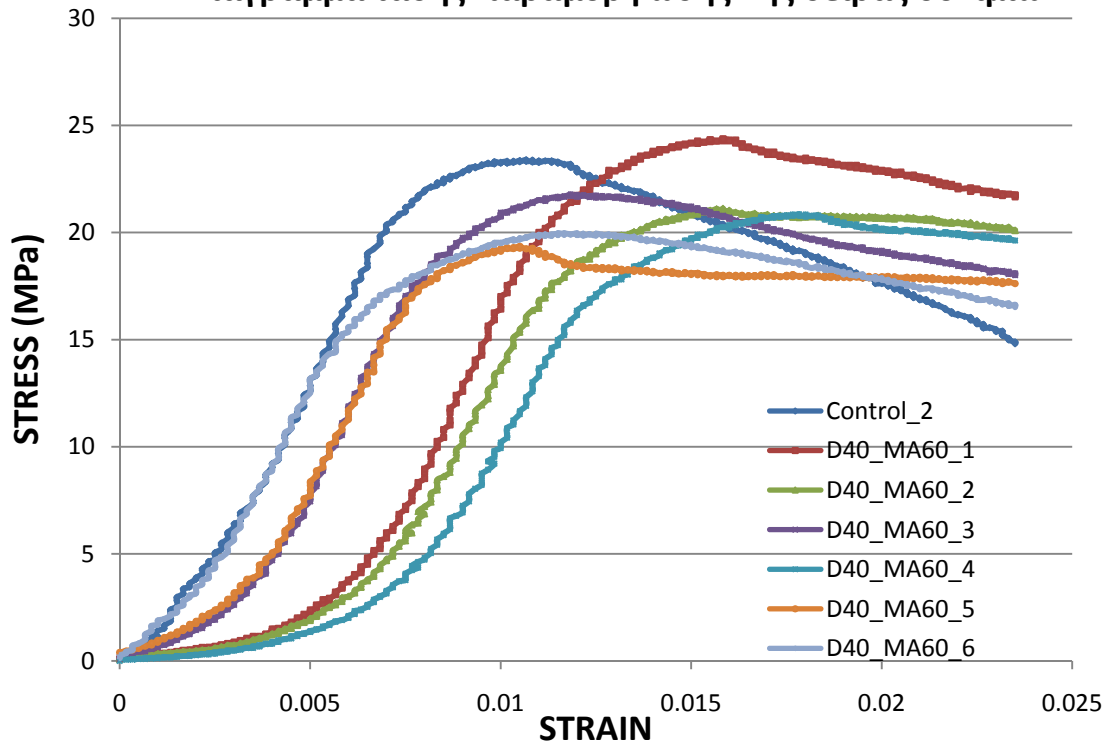
Παράρτημα

Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης 1ης σειράς δοκιμών

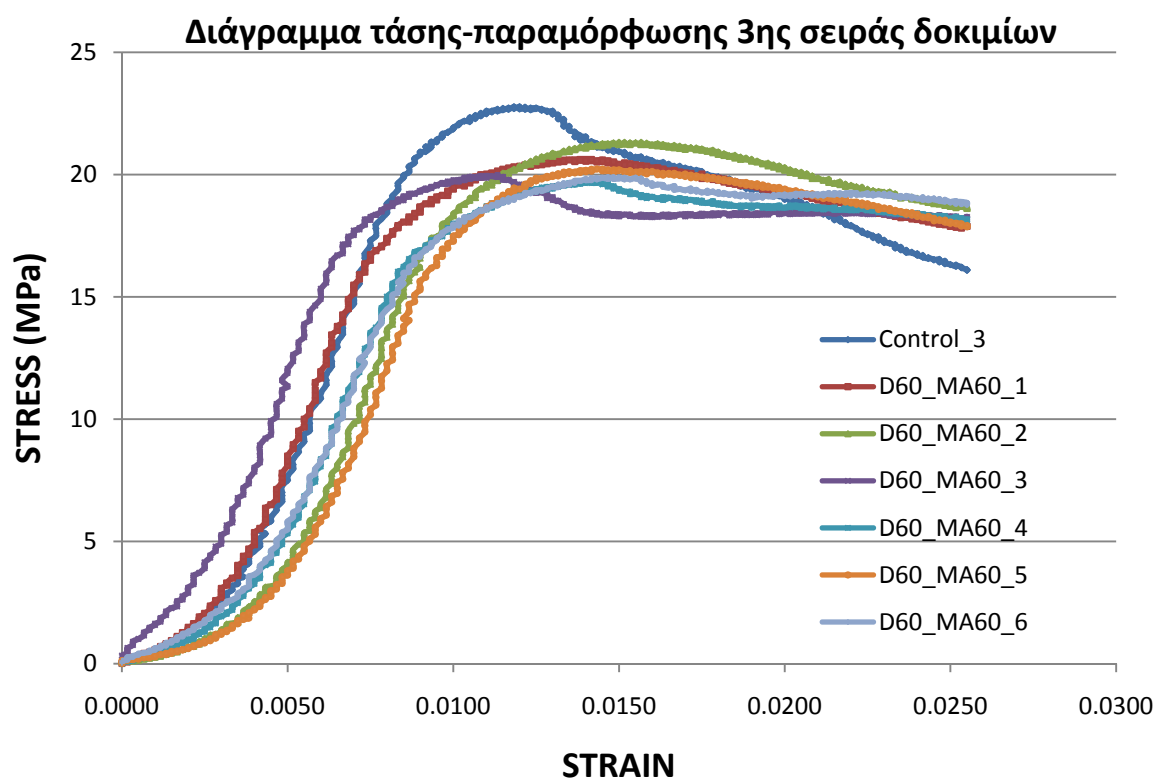


Διάγραμμα Α.1: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες, μήκους 55mm σε περιεκτικότητα 20kg/m³

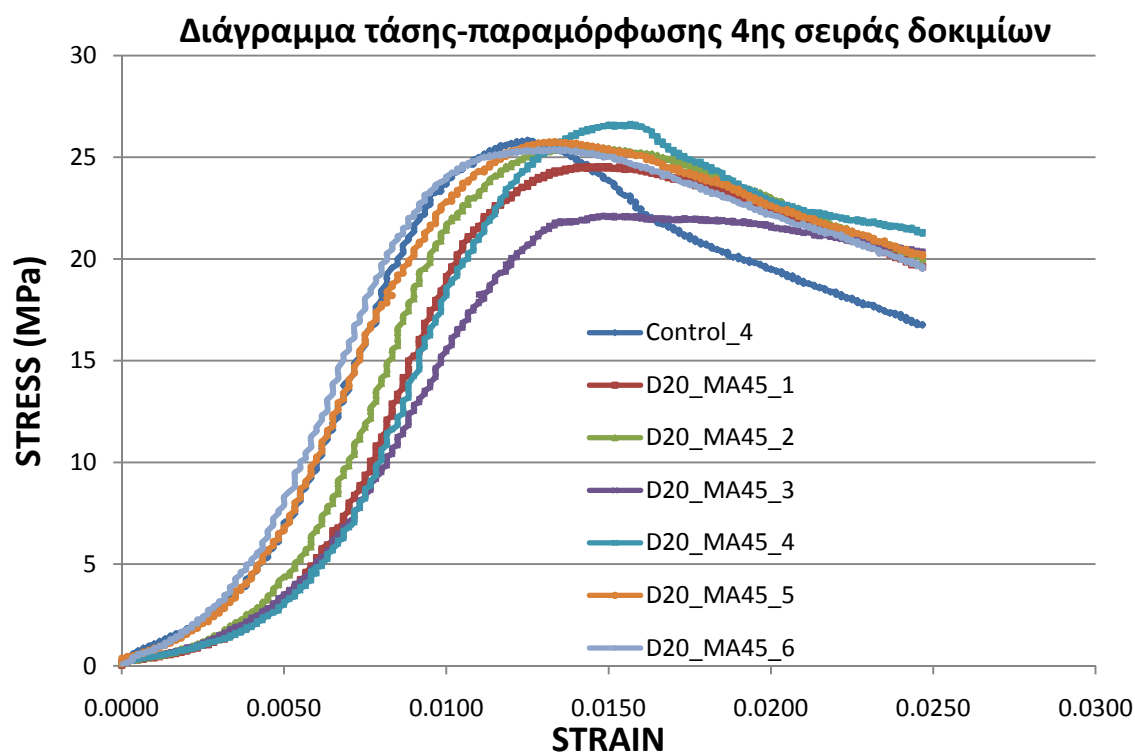
Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης 2ης σειράς δοκιμών



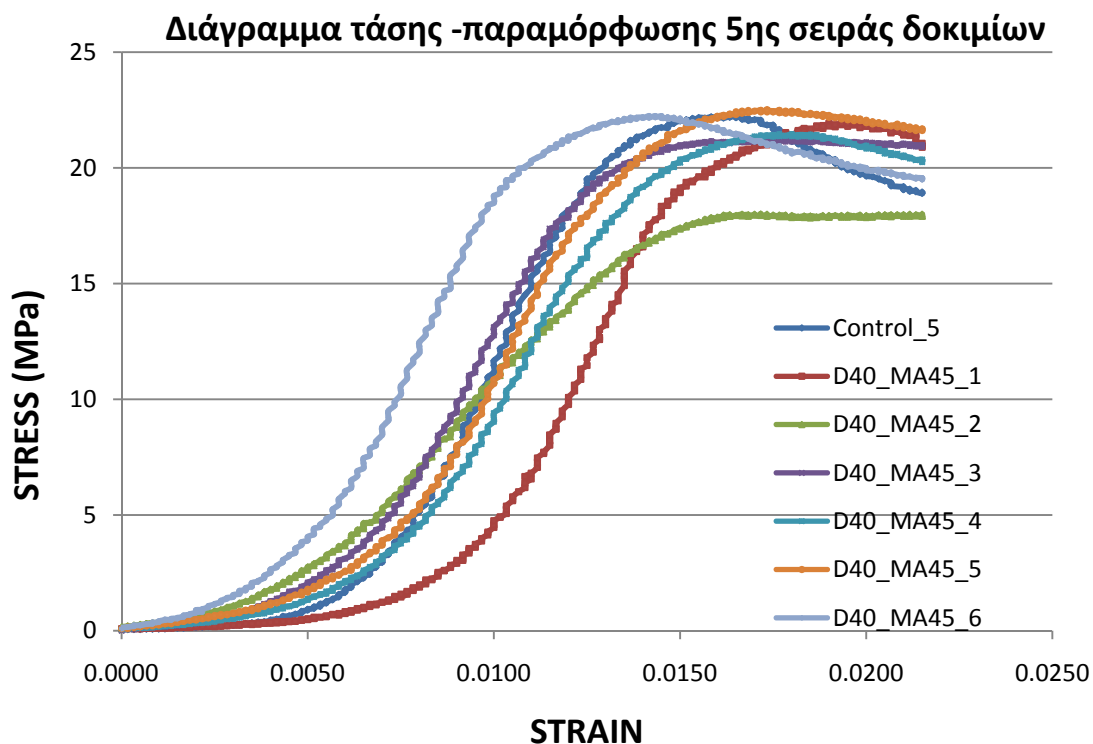
Διάγραμμα Α.2: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 55mm σε περιεκτικότητα 40kg/m³



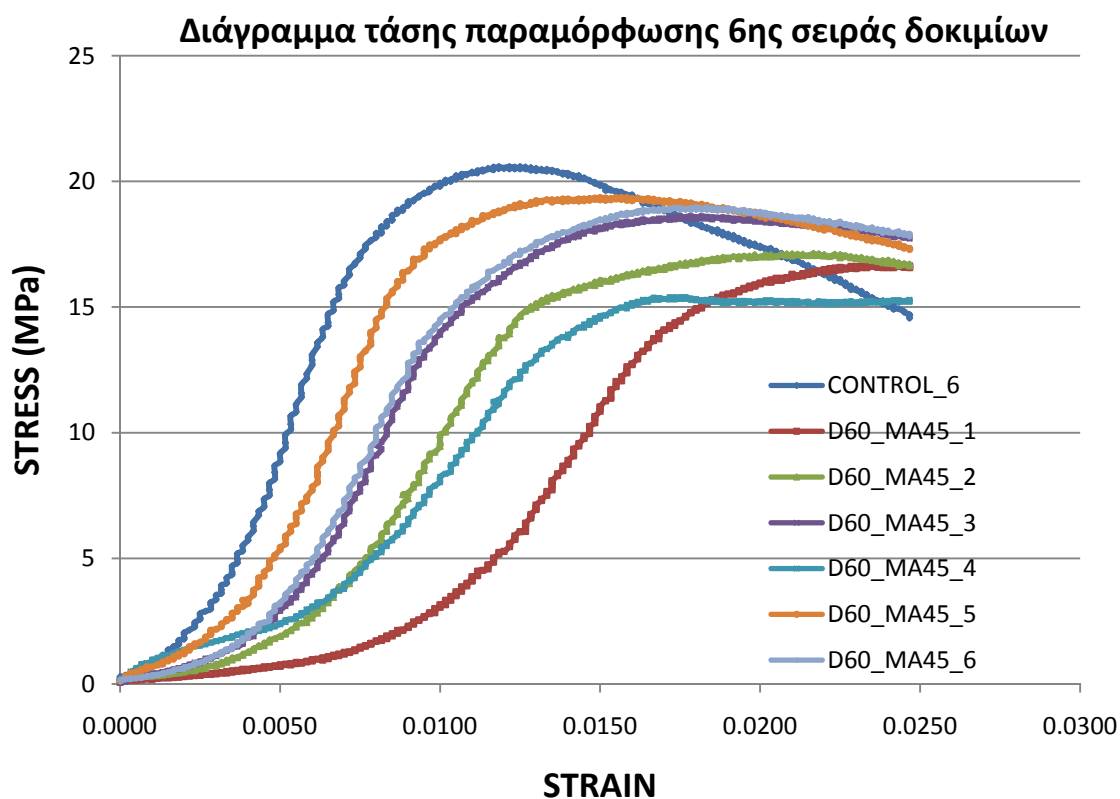
Διάγραμμα Α.3: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 55mm σε περιεκτικότητα 60kg/m³



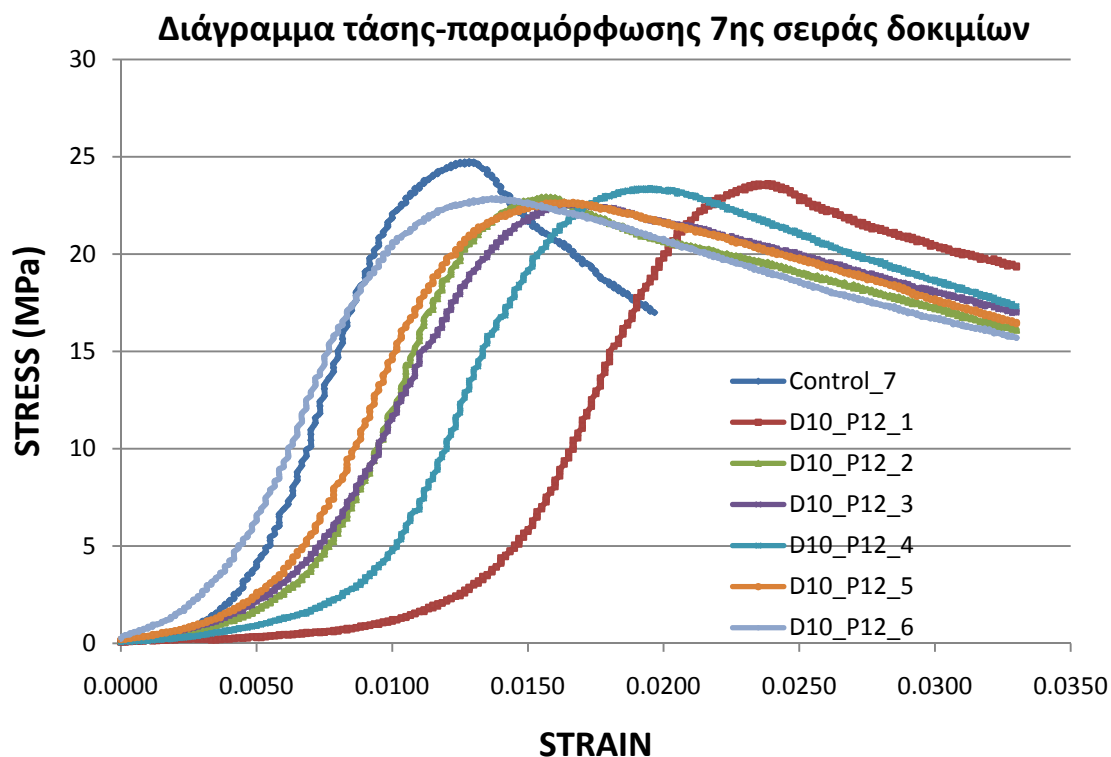
Διάγραμμα Α.4: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 20kg/m³



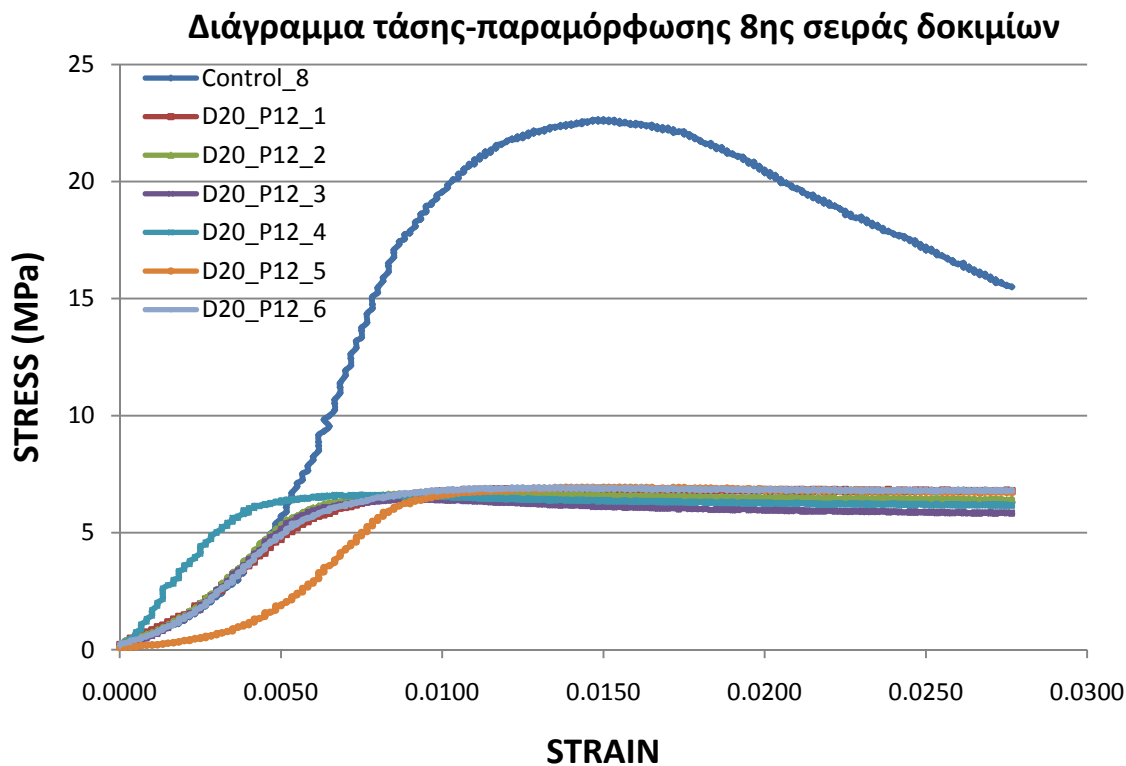
Διάγραμμα A.5: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 40kg/m³



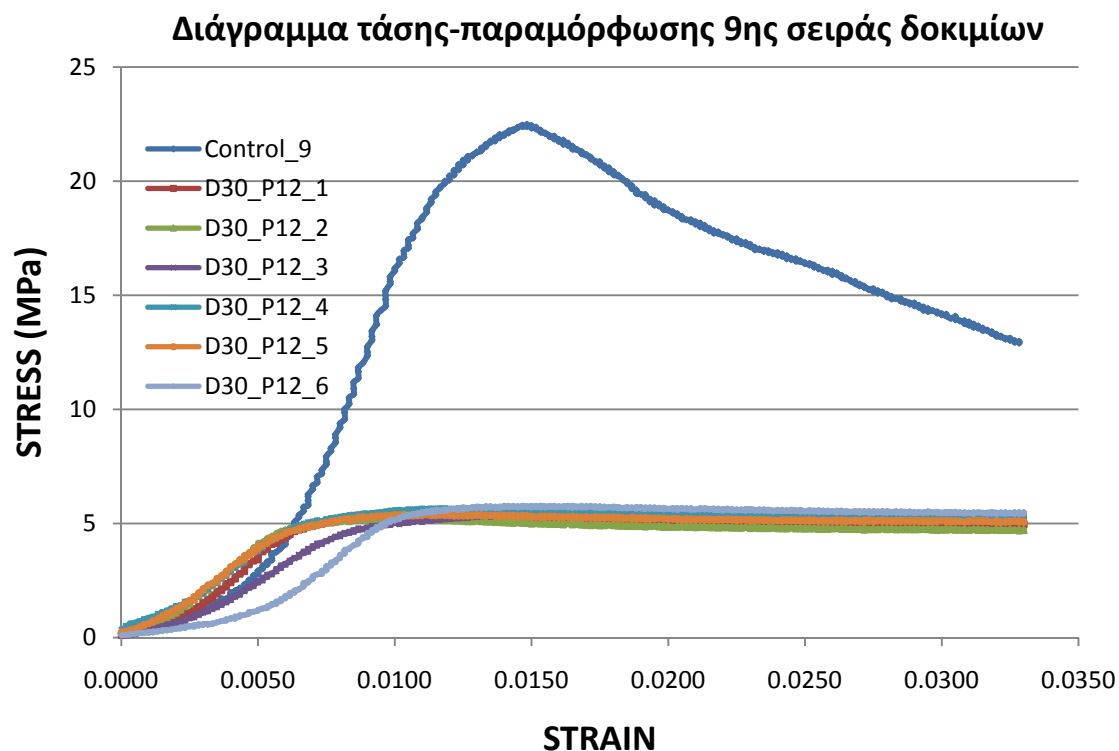
Διάγραμμα A.6: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 60kg/m³



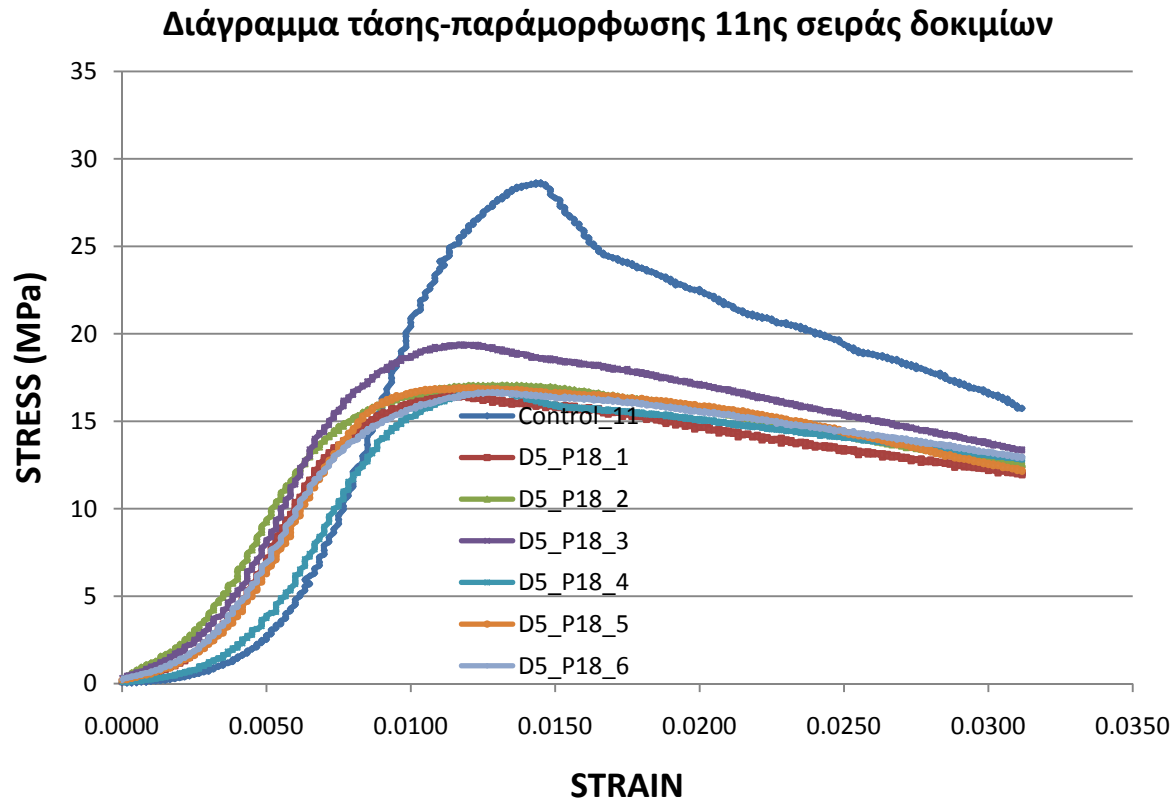
Διάγραμμα A.7: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 10kg/m^3



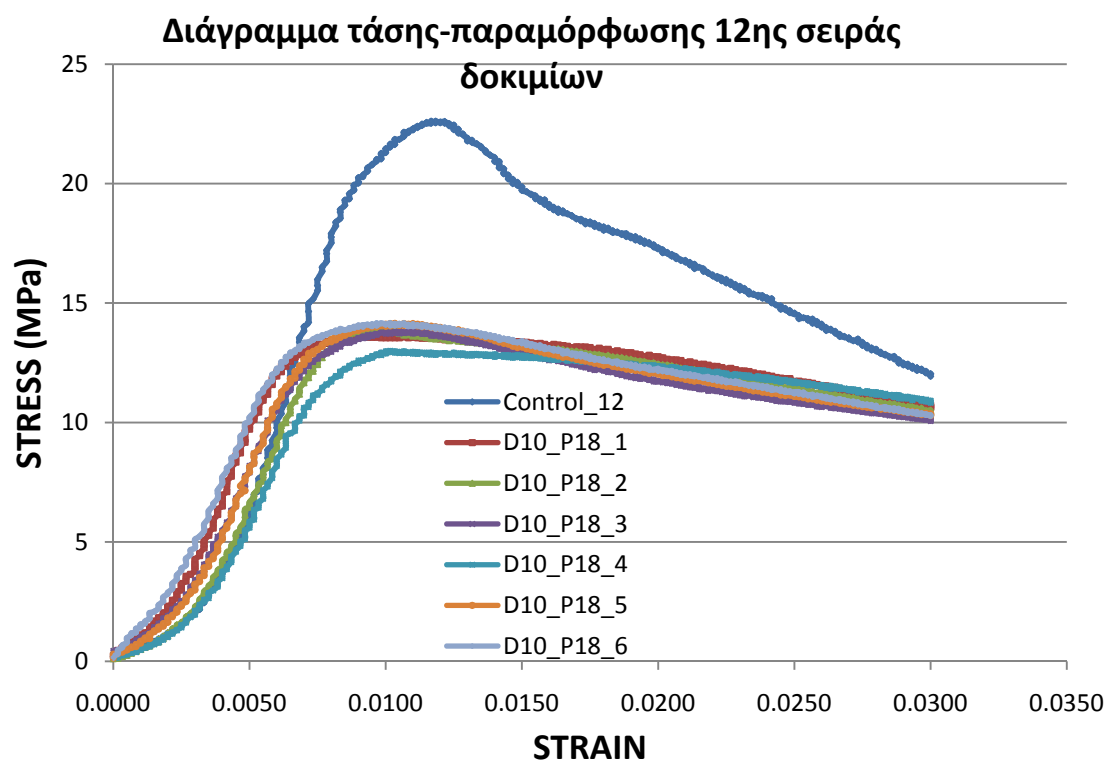
Διάγραμμα A.8: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 20kg/m^3



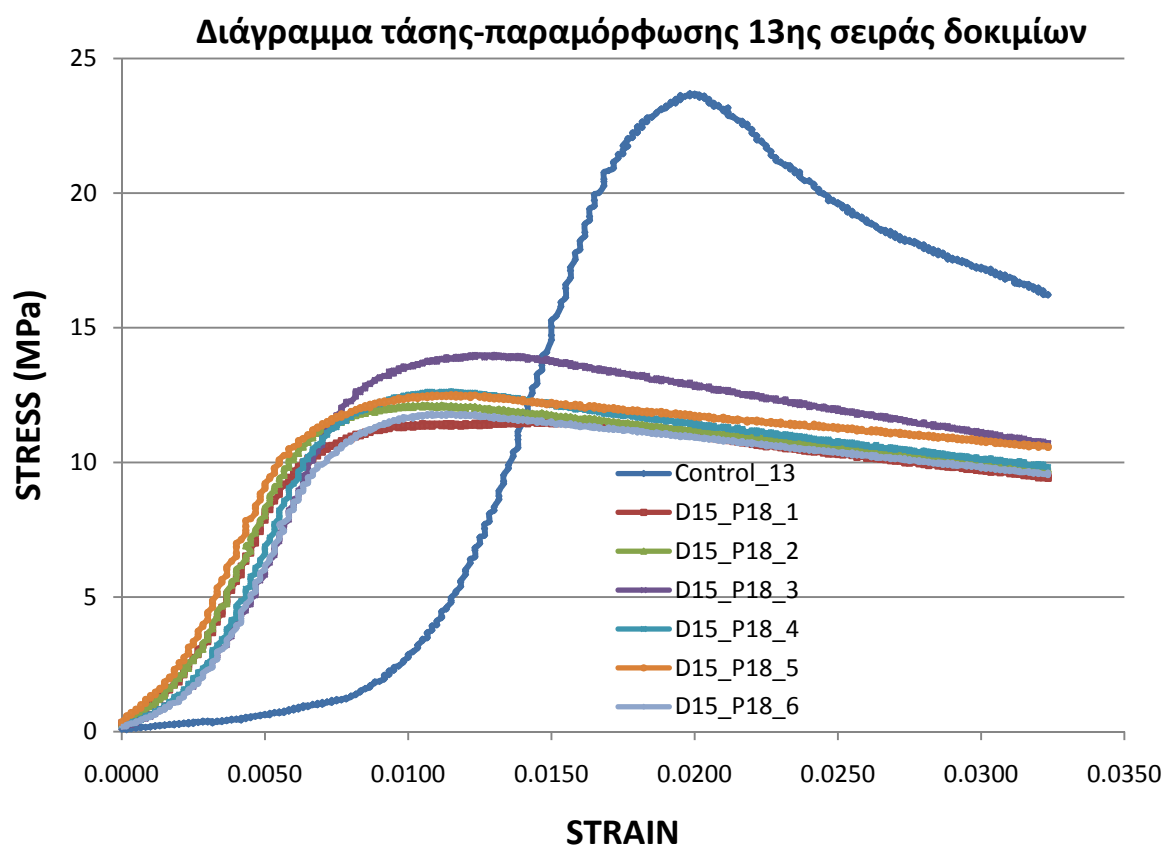
Διάγραμμα A.9: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 30kg/m³



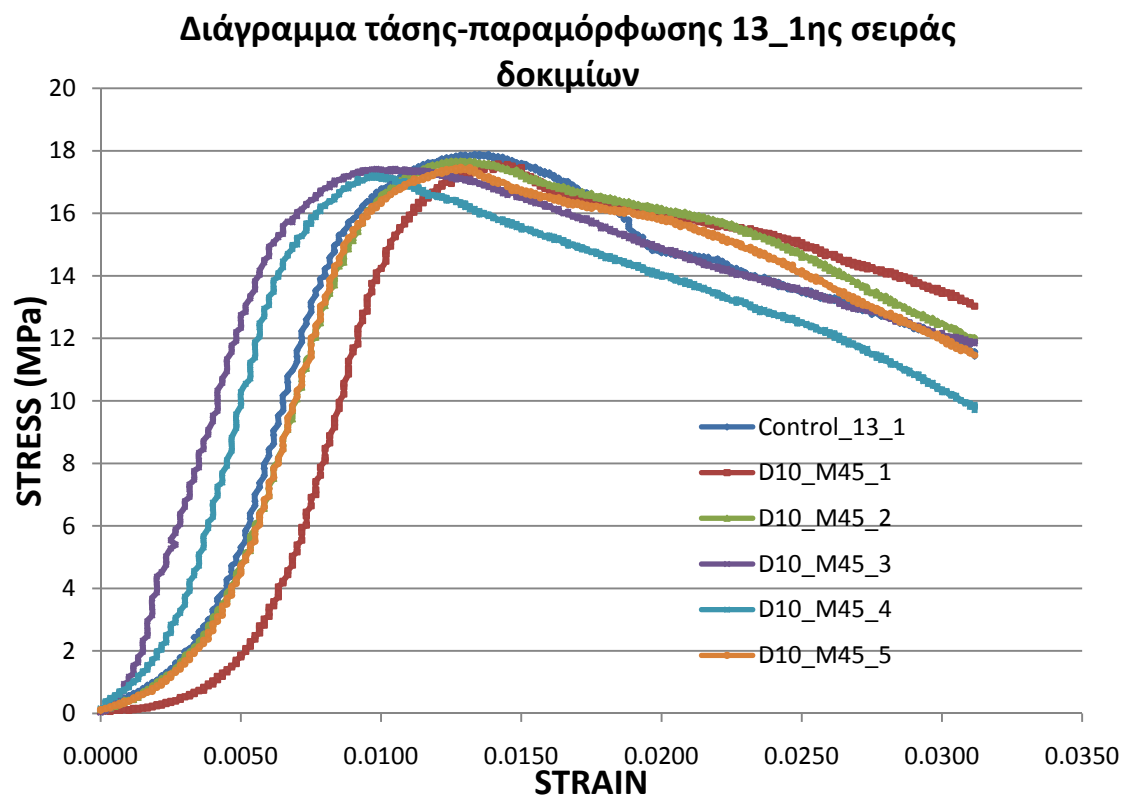
Διάγραμμα A.10: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18mm σε περιεκτικότητα 5kg/m³



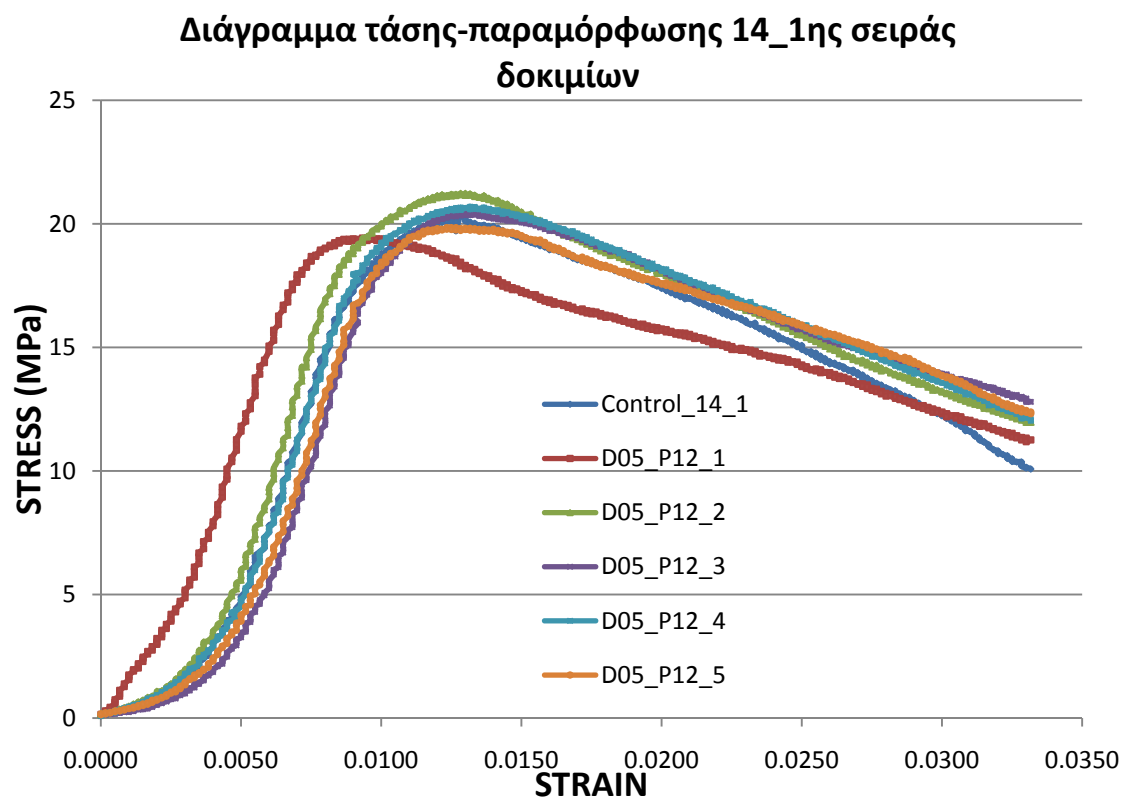
Διάγραμμα A.11: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18mm σε περιεκτικότητα 10kg/m³



Διάγραμμα A.12: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18mm σε περιεκτικότητα 15kg/m³

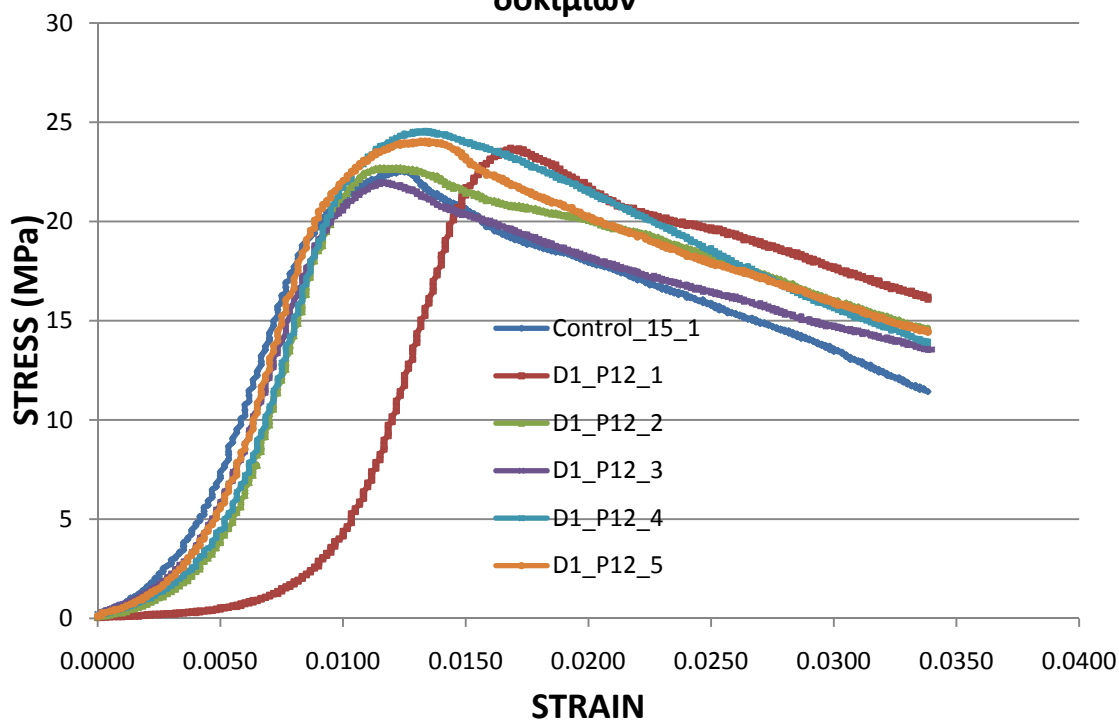


Διάγραμμα A.13: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 10kg/m^3

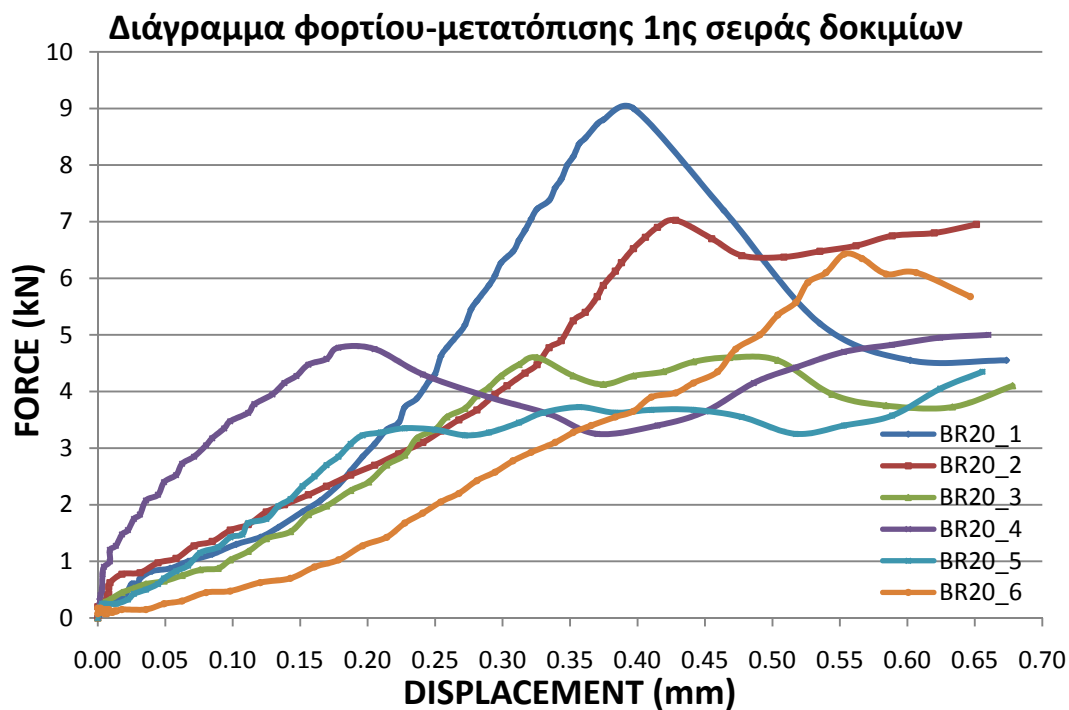


Διάγραμμα A.14: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα $0,5\text{kg/m}^3$

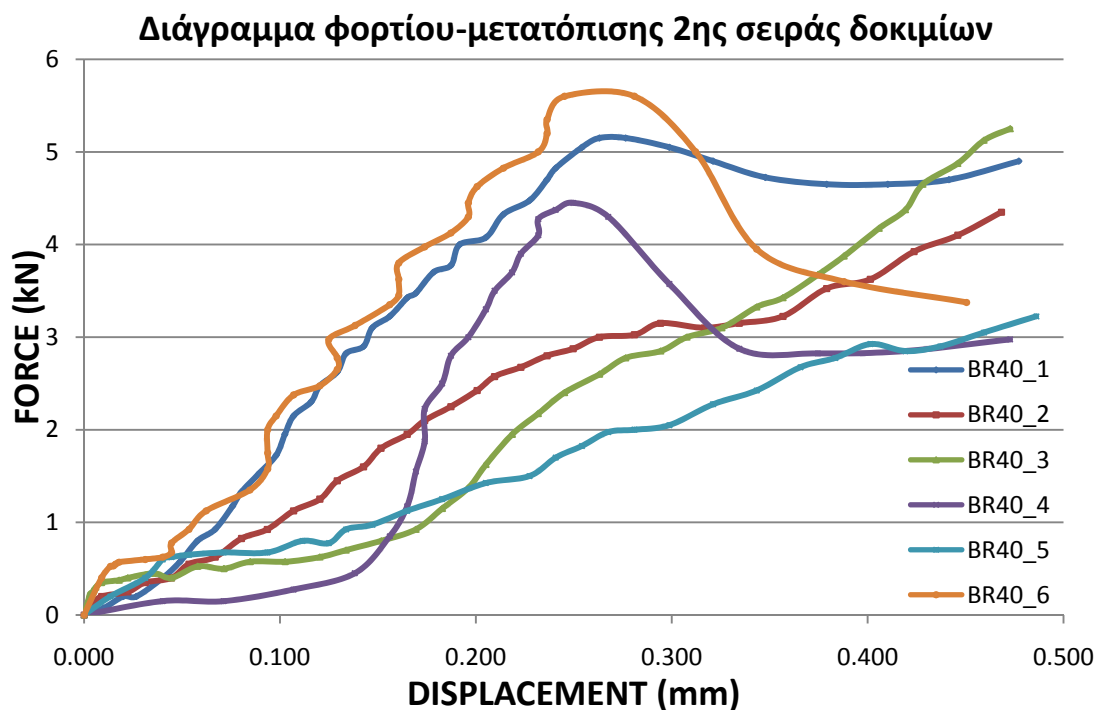
Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης 15_1ης σειράς δοκιμών



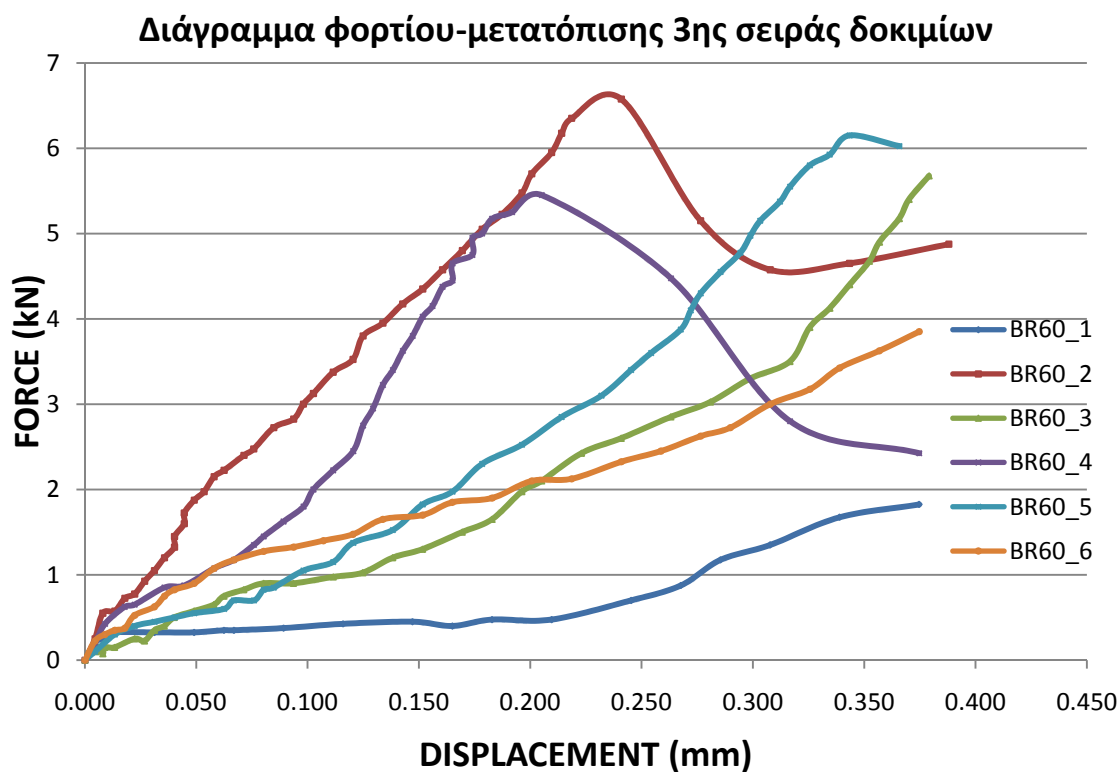
Διάγραμμα A.15: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 1kg/m³



Διάγραμμα A.16: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 55mm σε περιεκτικότητα 20kg/m³

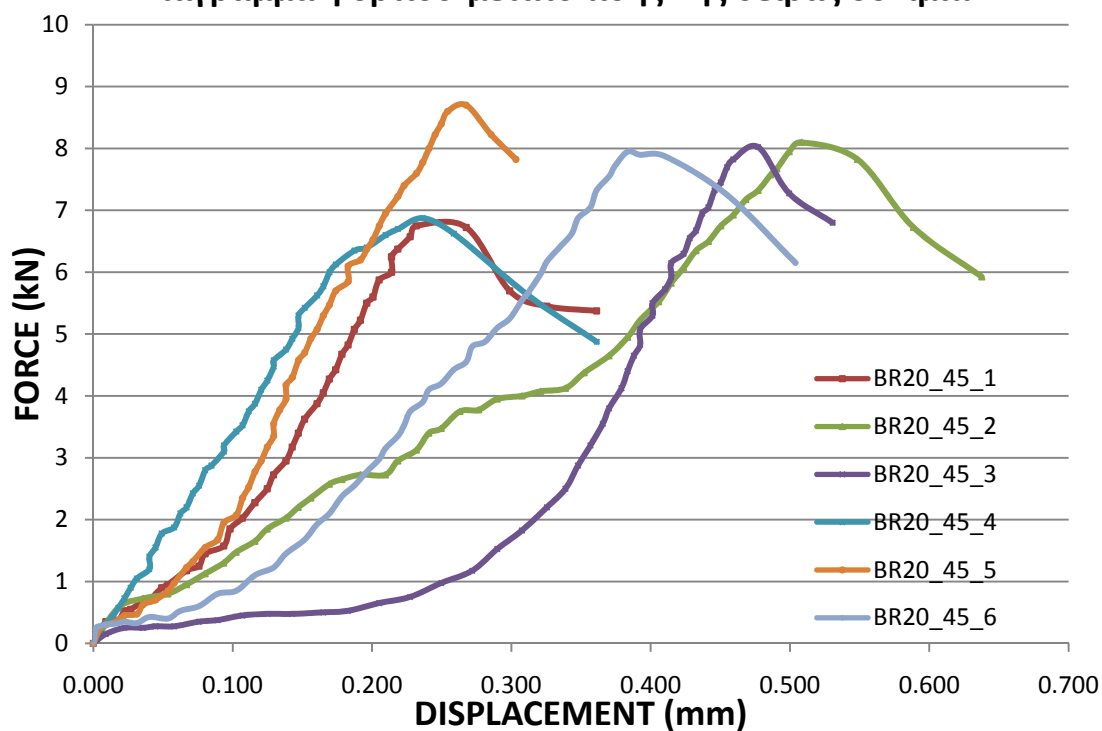


Διάγραμμα A.17: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 55mm σε περιεκτικότητα 40kg/m^3

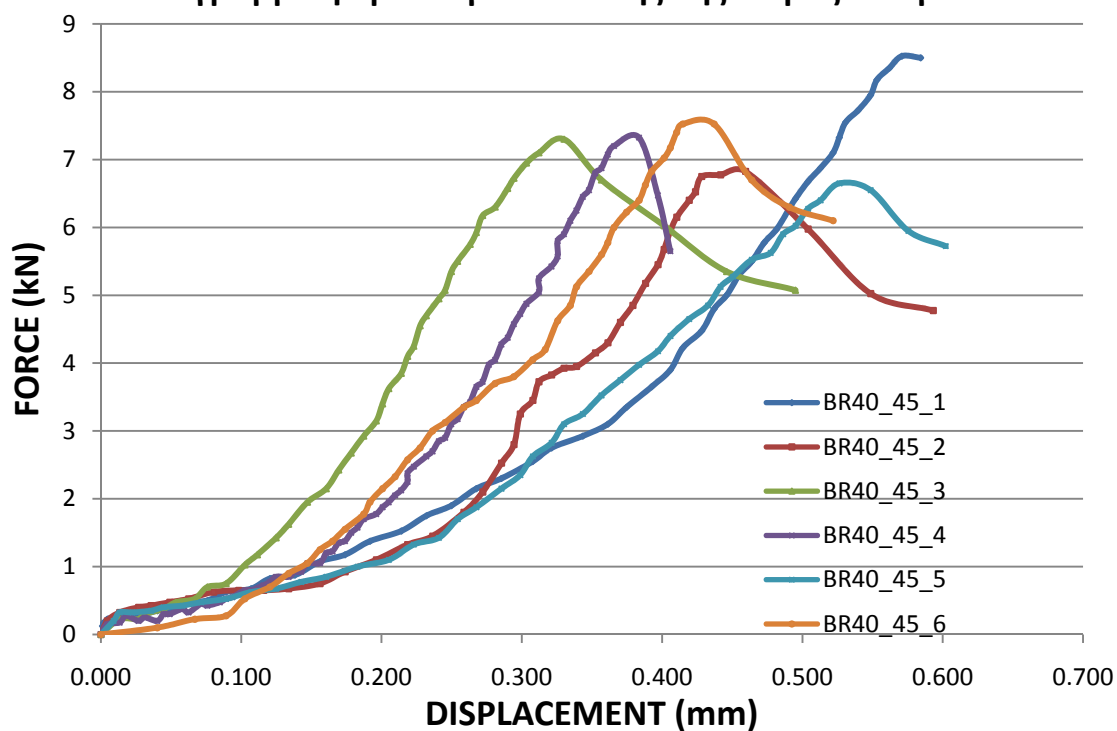


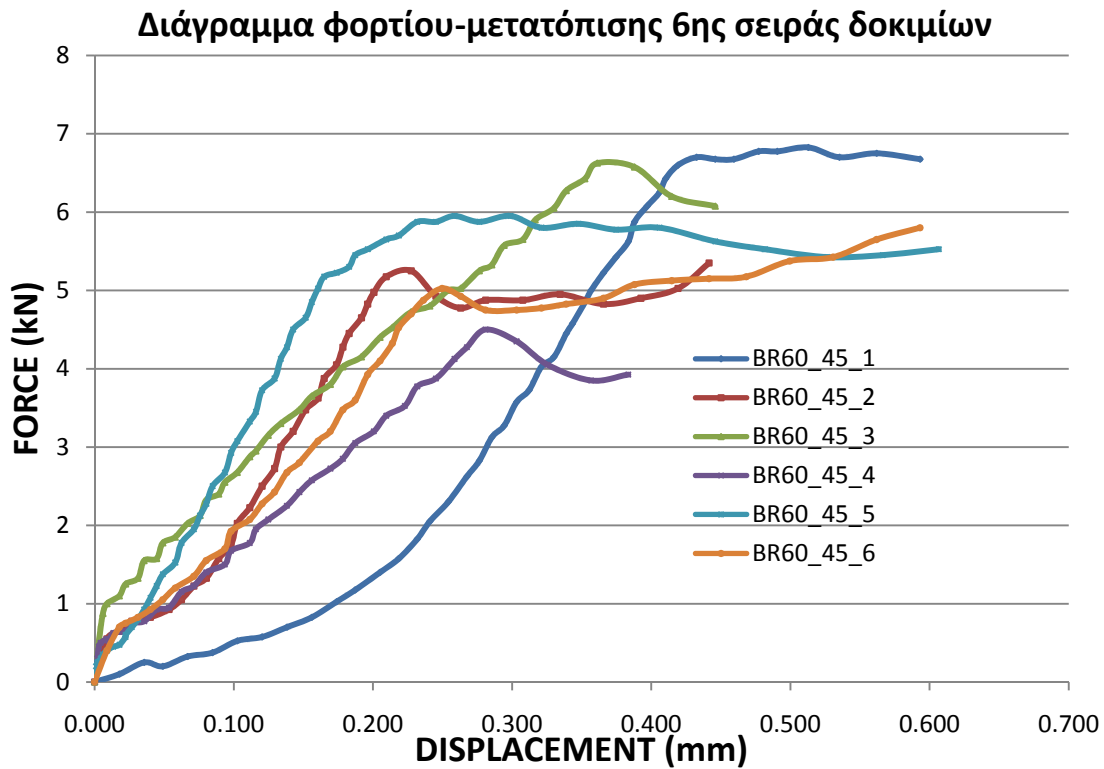
Διάγραμμα A.18: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 55mm σε περιεκτικότητα 60kg/m^3

Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 4ης σειράς δοκιμών

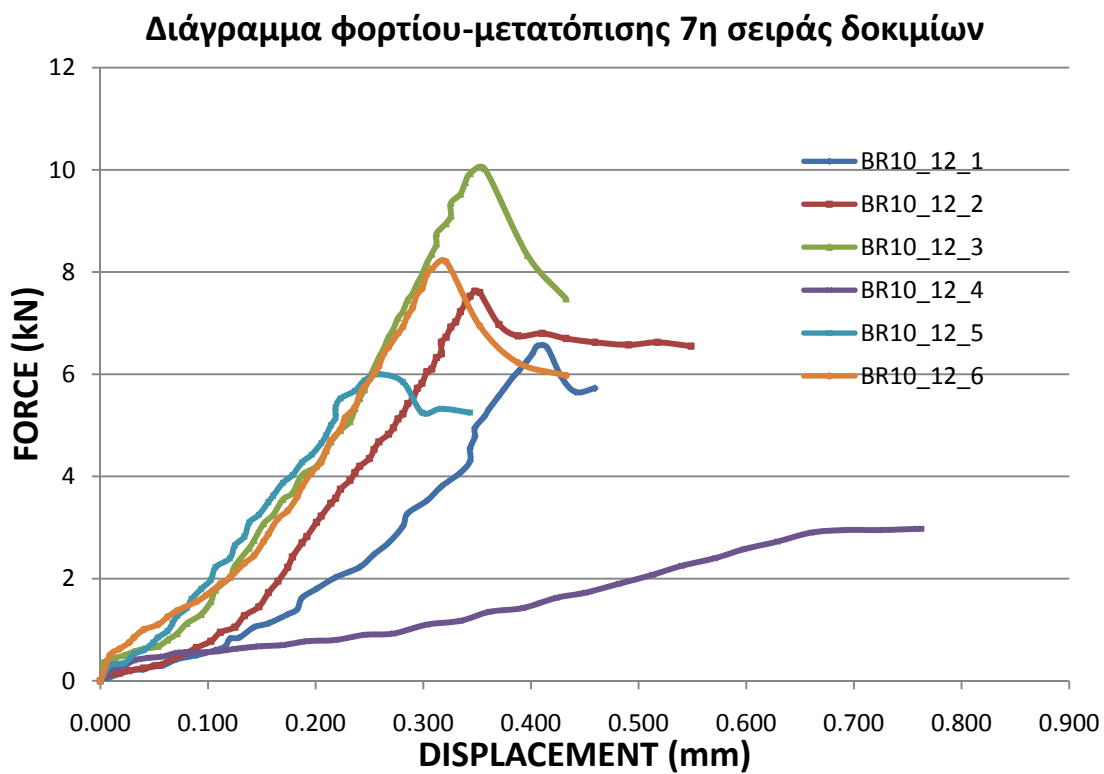
Διάγραμμα A.19: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 20kg/m³

Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 5ης σειράς δοκιμών

Διάγραμμα A.20: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 40kg/m³

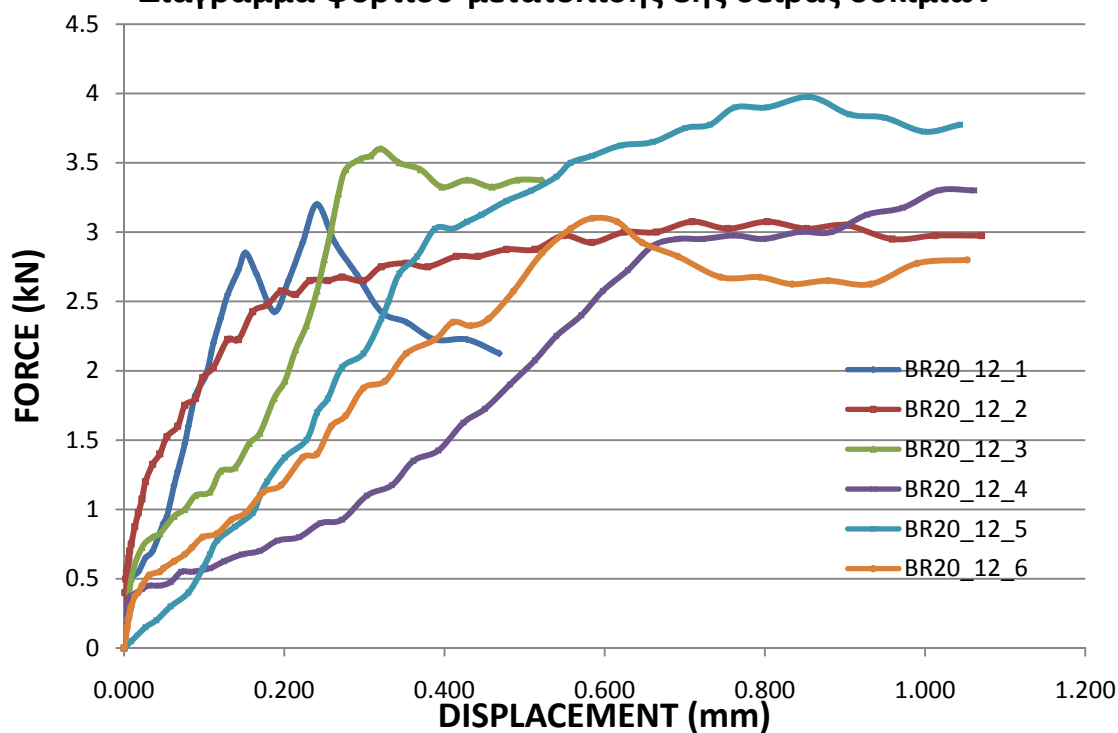


Διάγραμμα A.21: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 60kg/m^3

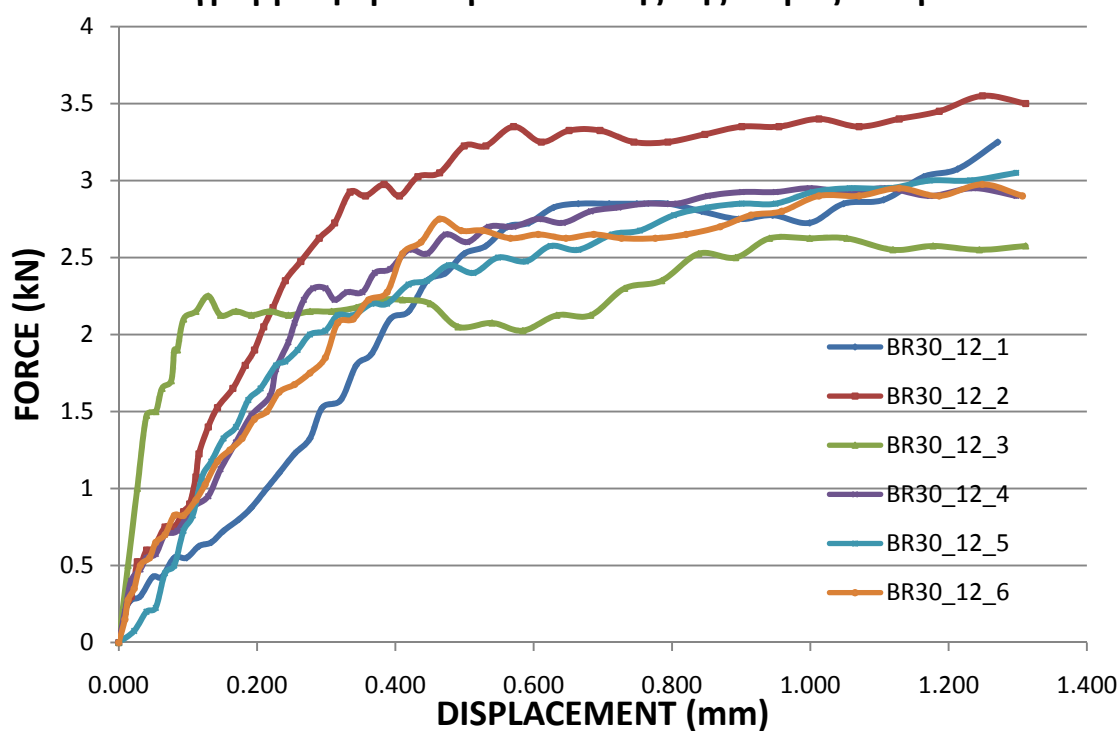


Διάγραμμα A.22: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 10kg/m^3

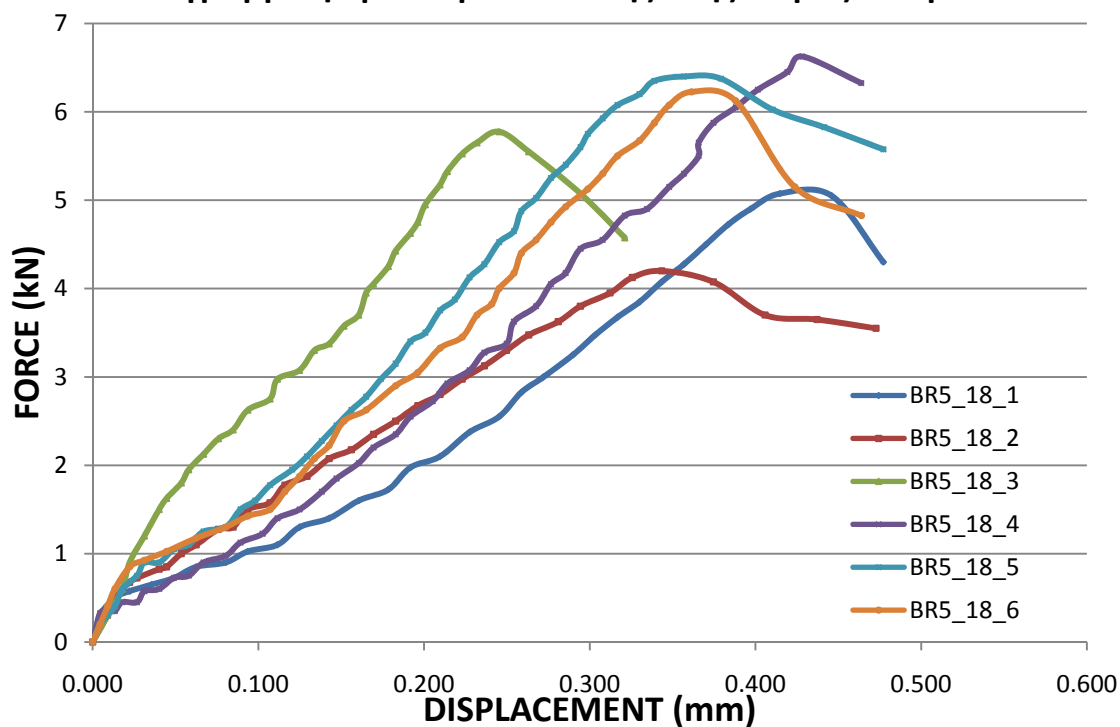
Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 8ης σειράς δοκιμών

Διάγραμμα A.23: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 20kg/m³

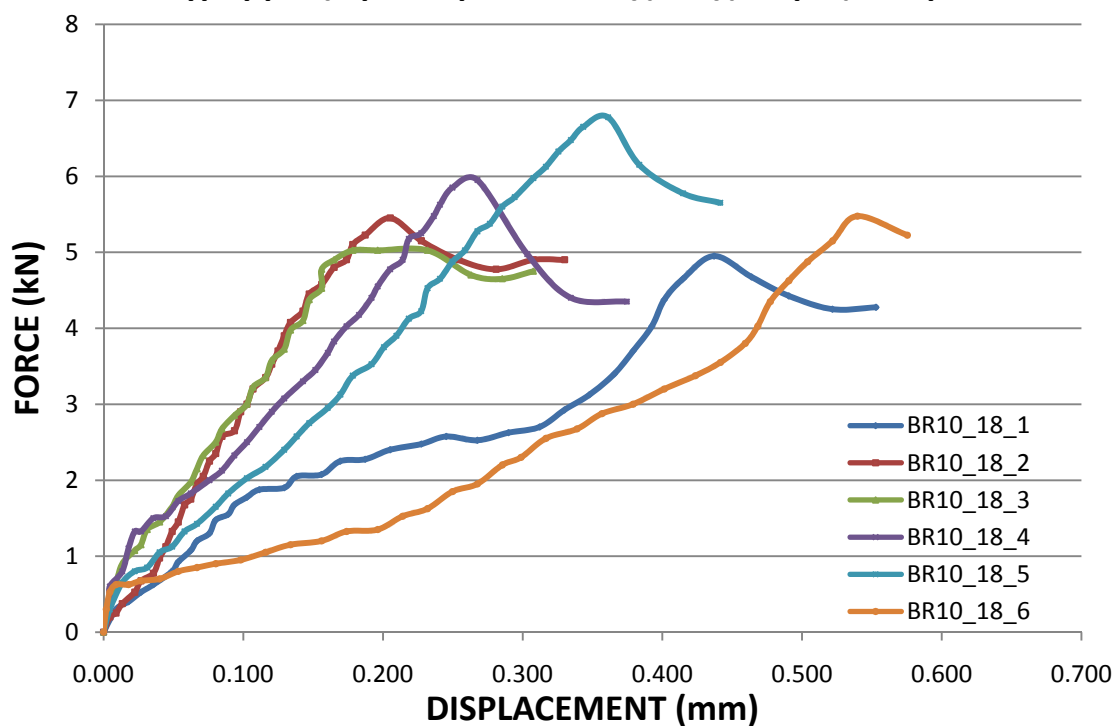
Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 9ης σειράς δοκιμών

Διάγραμμα A.24: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 30kg/m³

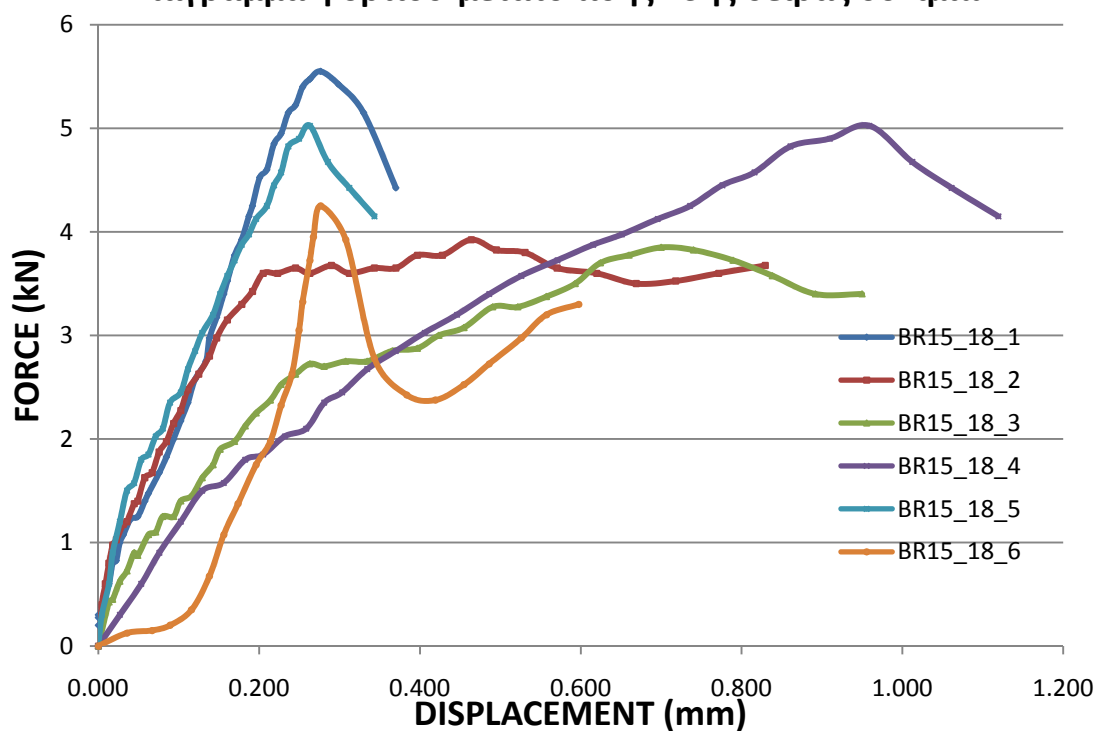
Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 11ης σειράς δοκιμών

Διάγραμμα A.25: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18mm σε περιεκτικότητα 5kg/m³

Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 12ης σειράς δοκιμών

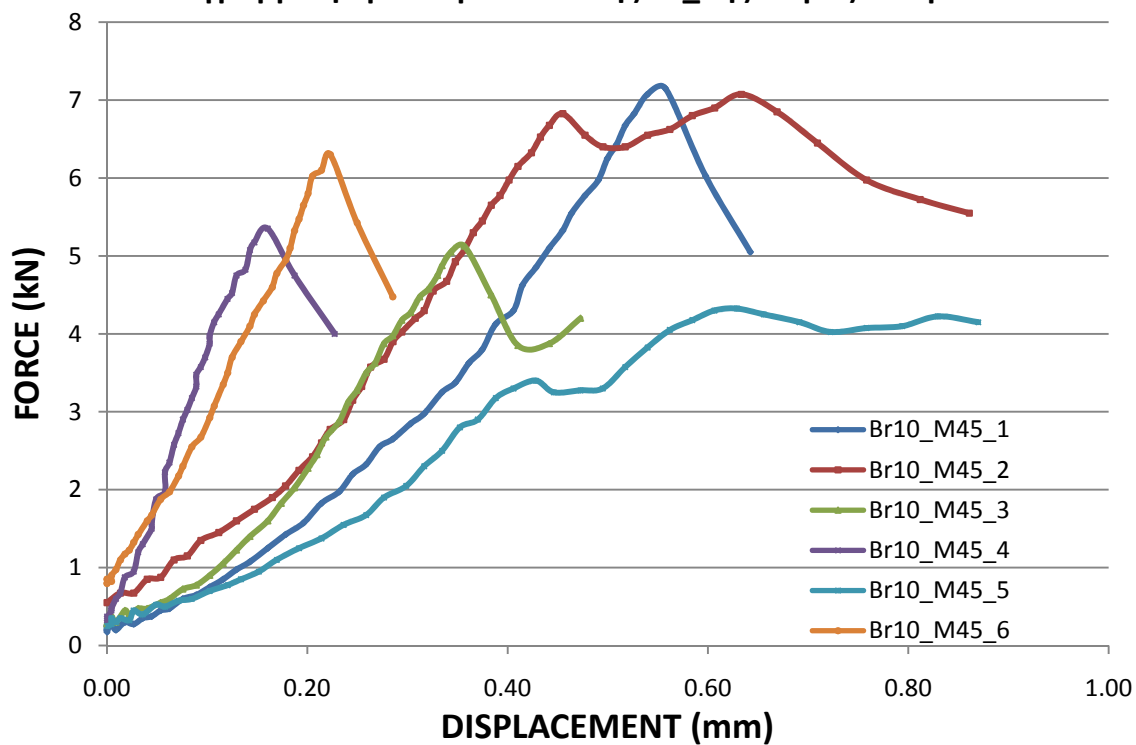
Διάγραμμα A.26: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18mm σε περιεκτικότητα 10kg/m³

Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 13ης σειράς δοκιμών

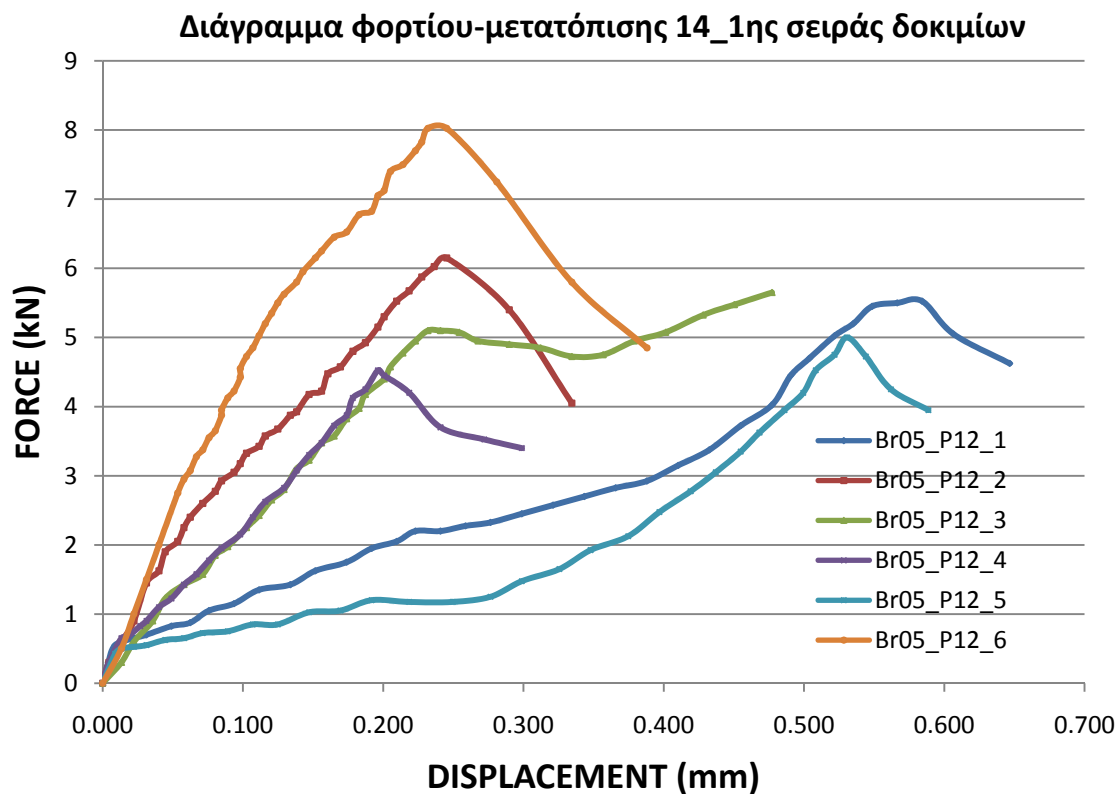


Διάγραμμα A.27: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 18mm σε περιεκτικότητα 15kg/m³

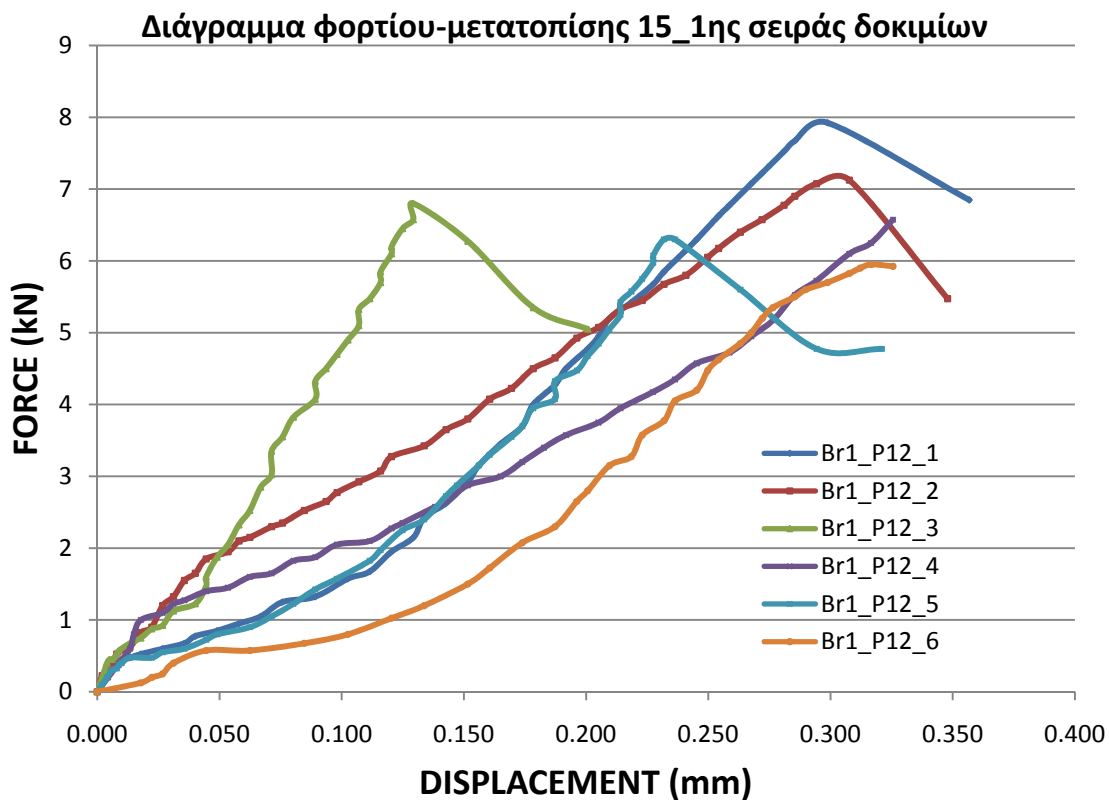
Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης 13_1ης σειράς δοκιμών



Διάγραμμα A.28: Δοκίμια με χαλύβδινες ίνες μήκους 45mm σε περιεκτικότητα 10kg/m³



Διάγραμμα A.29: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα $0,5\text{kg/m}^3$



Διάγραμμα A.30: Δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm σε περιεκτικότητα 1kg/m^3

