



Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα μηχανικών ορυκτών πόρων



**Πειραματική διερεύνηση μηχανικών ιδιοτήτων
δομικών ωμοπλίνθων**

Διπλωματική εργασία
Επαμεινώνδας Ε. Θεοχάρης

Εξεταστική επιτροπή

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Στειακάκης Εμμανουήλ, Λέκτορας

Δρ. Κωνσταντίνος Κακλής, Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλειολόγος

Χανιά 2010

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των δομικών ωμοπλίνθων, καθώς και η συσχέτιση με τη σύσταση τους.

Κατά το πρώτο στάδιο έγιναν εργαστηριακές δοκιμές για την ταξινόμηση του εδάφους (πηλός) και στη συνέχεια παρασκευάστηκαν ωμόπλινθοι δύο διαφορετικών αναλογιών άχυρου (0% άχυρο και 2% άχυρο w/w). Κατόπιν ακολούθησαν οι εξής εργαστηριακές δοκιμές:

- Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ωμοπλίνθων
- Δοκιμές κάμψης σε δοκίμια ωμοπλίνθων
- Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil)
- Δοκιμές διάτμησης σε διπλέτες (δύο ωμόπλινθοι δομημένοι με ενδιάμεσο πηλοκονίαμα)

Προσδιορίστηκε η μηχανική αντοχή των ωμόπλινθων όπως προέκυψε από τις αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές και υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας (E) η συνοχή (S_0) και η γωνία εσωτερικής τριβής (φ) της διεπιφάνειας πηλοκοκιάματος-ωμοπλίνθου. Τέλος ερμηνεύτηκε ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων.

Πρόλογος

Για τη συμβολή τους στην πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη για την πολύτιμη βοήθεια του. Επιπλέον τον κ. Εμμανουήλ Στειακάκη και τον κ. Κωνσταντίνο Κακλή για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και την αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης τον κ. Στυλιανό Μαυριγιαννάκη και τον κ. Διονύση Βαβαδάκη για το χρόνο που αφιέρωσαν.

Η εργασία αυτή δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια του κ. Γιάννη Σταγκίδη παραδοσιακού αγγειοπλάστη και της κ. Έλλης Γεωργιάδου για την προτροπή της για το θέμα της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της «Ανέλιξης».

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Πρόλογος	3
Κεφάλαιο 1ο Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 2ο Περί πηλού	8
2.1 Ο πηλός ως οικοδομικό υλικό	8
2.2 Σύνθεση πηλού	13
2.3 Ο πηλός συγκριτικά	15
2.4 Παραδοσιακές ωμόπλινθοι ή πλιθί (adobe)	17
Κεφάλαιο 3ο Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας	19
3.1 Ταξινόμηση εδάφους κατά (ASTM)	19
3.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση	19
3.2.2 Όρια Atterberg	21
3.1 Παραγωγή ωμοπλίνθων	22
Κεφάλαιο 4ο Εργαστηριακές δοκιμές	28
4.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	28
4.2 Δοκιμή κάμψης	34
4.3 Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (Brazil)	38
4.4 Δοκιμές διάτμησης	43
Κεφάλαιο 5° Συμπεράσματα και προτάσεις	53
Βιβλιογραφία	55
Παραρτήματα	57

Κεφάλαιο 1ο Εισαγωγή

Στην εποχή της κλιματικής αλλαγής και της αναγκαίας αντιμετώπισής της μέσα από την αναθεώρηση του τρόπου ζωής μας, κατατάσσεται και η ανάγκη αναθεώρησης των τεχνικών και γενικότερα της φιλοσοφίας του «κτίζειν». Η εξοικονόμηση ενέργειας και η ισορροπία ανάμεσα στο δομημένο και στο φυσικό περιβάλλον αποτελούν ζητήματα, που απασχολούν σήμερα τον μηχανικό. Στον αιώνα μας, που κυριαρχεί το τσιμέντο και τα υλικά υψηλής τεχνολογίας και αυξημένων δυνατοτήτων, ένα βασικό ερώτημα που τίθεται είναι εάν οι ωμόπλινθοι και η ωμοπλινθοδομή παρουσιάζουν κατασκευαστικό ενδιαφέρον.

Η έρευνα πάνω στον πηλό σαν δομικό υλικό προήλθε από αυτό τον προβληματισμό. Για πολύ κόσμο η χρήση του πηλού για δόμηση αποτελεί παρελθόν και είναι συνδεδεμένο με παλιά κτίρια και ερείπια. Όμως σήμερα σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες (Γερμανία, Γαλλία, Ηνωμένες Πολιτείες, Δανία, κ.α.) γίνονται έρευνες και επικαιροποίηση των επιστημονικών και τεχνικών γνώσεων για τη δόμηση με πηλό. Σ' αυτές τις χώρες γίνονται και αρκετές εφαρμογές και προσπάθειες βελτιστοποίησης της δόμησης με αυτό το υλικό (Μπέη, 2004).

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται στοιχεία για τους ωμόπλινθους και τις ωμοπλινθοδομές καθώς και τα πλεονεκτήματα της δόμησης με πηλό.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές για τη ταξινόμηση του εδάφους (πηλός) που χρησιμοποιήθηκε και η διαδικασία παρασκευής των ωμοπλίνθων και.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν για να προσδιοριστούν οι μηχανικές αντοχές των ωμόπλινθων, οι πίνακες των τιμών καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε δοκιμή. Επιπλέον ερμηνεύεται ο τρόπος αστοχίας των δοκιμών και αξιολογούνται οι μετρήσεις.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές

Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν στοχεύουν στη σύγκριση των τιμών των μηχανικών αντοχών των ωμοπλίνθων με τα υλικά υψηλής τεχνολογίας. Ο στόχος είναι η συμβολή στη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων έτσι ώστε να καθοριστεί αν οι ωμόπλινθοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση της οικολογικής δόμησης σε σύγχρονες κατασκευές.

Κεφάλαιο 2ο Περί πηλού

2.1 Ο πηλός ως οικοδομικό υλικό

Ο πηλός είναι το αρχαιότερο υλικό δόμησης αλλά ταυτόχρονα και ένα από τα πιο σύγχρονα στην έρευνα δομικών υλικών. Χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών (καταφύγια, τείχη, κατοικίες, οδοποιία) και μορφών (ωμόπλινθος, καλουπωτός πηλός, risé, zambour κ.λπ.). Από αυτές η κυριότερη είναι η κατασκευή φερόντων τοίχων κτιρίων που προορίζονται κυρίως για κατοικίες. Ο πηλός είτε ως δομική πλίνθος είτε ως συνδετικό κονίαμα σε λιθοδομές ή σε ξύλινα πλαίσιακα συστήματα, ανάλογα με την τοπική διαθεσιμότητα του αλλά και τις κλιματολογικές συνθήκες του τόπου, απετέλεσε ως τον 18ο αιώνα (προ βιομηχανική εποχή) υλικό δόμησης καθολικής χρήσης (σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα) σε όλο τον κόσμο (Γεωργακοπούλου, 2008).

Στην Ευρώπη, από τον 18ο αιώνα η βιομηχανική ανάπτυξη και η ανάπτυξη των αστικών κέντρων δημιούργησε ανάγκες υψηλότερων κτιρίων και μαζικής παραγωγής δομικών υλικών. Οι βιομηχανίες ή βιοτεχνίες οπτόπλινθων (μεγαλύτερης αντοχής και αξιοπιστίας πλίνθων) αντικατέστησαν την τοπική παραγωγή ωμοπλίνθων. Η χρήση του πηλού περιορίστηκε σε ορισμένα σημεία του πλανήτη κυρίως σε λιγότερο αναπτυγμένες αγροτικές κοινωνίες, οι οποίες κατασκεύαζαν μόνες τους τα σπίτια τους. Με την εμφάνιση νέων υλικών όπως ο χάλυβας και το τσιμέντο (μέσα του 19^{ου} αιώνα για τον δυτικό κόσμο, αρχές του 20^{ου} αιώνα για την Ελλάδα) η χρήση του πηλού εγκαταλείφθηκε πλήρως. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα η χρήση των ωμοπλίνθων σταματά στα τέλη τη δεκαετία του 1950. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών συναντώνται σήμερα στα Κορέστεια στην περιοχή Καστοριάς, στα χωριά του θεσσαλικού κάμπου και στα νησιά του Αιγαίου (Σχήμα 2.1) (Μπέη, 2004).

Η εγκατάλειψη των ωμοπλίνθων αλλά και γενικότερα του πηλού στη δόμηση δεν είναι φυσικά μόνο αποτέλεσμα της εισαγωγής νέων υλικών στη δόμηση ή της ανάγκης των κοινωνιών να υιοθετούν ευκολότερης τεχνολογίας και εφαρμογής υλικά όπως το σκυρόδεμα. Η τρωτότητα των «πηλοκατασκευών» στις σεισμικές δράσεις και στην επαφή τους με το νερό κατέστησε τις τοιχοποιίες αυτές ακατάλληλες ως δομικό σύστημα. Μια προσεκτικότερη εξέταση του ζητήματος δείχνει ότι η κακή συμπεριφορά των κατασκευών από ωμοπλινθοδομές στις σεισμικές δράσεις δεν οφειλόταν μόνο στην «ακαταλληλότητα» του υλικού.



Σχήμα 2.1: Διώροφη κατοικία στα Κορέστεια, Καστοριά (Γεωργακοπούλου, 2008)

Η τοιχοποιία από ωμοπλίνθους αποτελεί υλικό που δεν υπόκειται σε κανονισμούς σχεδιασμού (μέχρι πρόσφατα δεν υπόκειντο σε κανονισμούς ούτε η τοιχοποιία από οπτόπλινθους). Τα κτίρια από τοιχοποιία, παραδοσιακά, κατασκευαζόταν σε εμπειρική βάση. Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της ωμοπλινθοδομής είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Η επικρατούσα αντίληψη στην κοινωνία θεωρεί ότι οι «πλίθινες κατασκευές» είναι αναξιόπιστες ως προς τη φέρουσα ικανότητά τους κυρίως σε σεισμικά φορτία αλλά και σε ίδια βάρη (Γεωργακοπούλου, 2008).

Όταν λοιπόν, εμφανιζόταν ζημιές στις κατασκευές αυτές μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα όχι μόνο δεν γινόταν προσπάθεια αποκατάστασης τους για τη βελτίωση της σεισμικής τους συμπεριφοράς, αλλά προτεινόταν η κατεδάφιση των κατασκευών αυτών ως προσφιλής λύση. Ακόμη και όταν, κυρίως για λόγους οικονομικούς, γινόταν προσπάθεια για τη βελτίωση της σεισμικής τους συμπεριφοράς, η χρήση χαμηλής ποιότητας υλικών που διέθετε η ντόπια παραγωγή, δεν επέφεραν καμία βελτίωση, ενώ συνήθως δεν δινόταν προσοχή σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Μέχρι τώρα δεν διατίθεται καμία ικανή μέθοδος υπολογισμού και διαστασιολόγησης για την αξιολόγηση των υπάρχοντων κατασκευών από πηλό ή τον σχεδιασμό νέων. Όμως, οι ωμοπλινθοδομές σπάνια συναντώνται μόνες τους. Συνήθως εμφανίζονται σε συνδυασμό με οριζόντια ξύλινα διαφράγματα ή εντός ξύλινου πλαισιακού συστήματος. Παραδείγματα αποτελούν οι βαλκανικές κατοικίες, διώροφες ή τριώροφες όπου ο δεύτερος και τρίτος όροφος συνήθως αποτελείται από τσατμά (ξύλινο πλαισιακό σύστημα) με πηλοκονίαμα ή ωμοπλίνθους ως υλικό πλήρωσης (Σχήμα 2.2). Η τρωτότητα των ωμοπλινθοδομών έτσι περιορίζεται. Η τοιχοποιία από ωμοπλίνθους αποτελεί δομικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς τόσο της χώρας μας όσο και του υπόλοιπου κόσμου. Υπολογίζεται ότι το ένα τρίτο των κτιρίων του κόσμου είναι πλιθόκτιστα (Morel, 2001).



Σχήμα 2.2: Διώροφη κατοικία στο Λαγκαδά Θεσσαλονίκης (Αθανασόπουλος, 1991)

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανθρωπότητα έχει συνειδητοποιήσει την αναγκαιότητα διατήρησης της πολιτισμικής κληρονομιάς. Προκειμένου λοιπόν να διατηρηθεί αυτή η κληρονομιά επιβάλλεται η μελέτη του υλικού όσον αφορά στη συμπεριφορά του, ώστε να προκύψουν κατάλληλα συμπεράσματα για τις δομοστατικές επεμβάσεις στα κτίρια αυτά. Πρέπει γι' αυτό το λόγο να δοθούν απαντήσεις σε μια σειρά ερωτημάτων όπως π.χ. τι αντοχές έχουν αυτές οι τοιχοποιίες (μηχανικά χαρακτηριστικά), ποια η συμπεριφορά τους στις σεισμικές καταπονήσεις, ποια η συμπεριφορά τους μαζί με τα πλαίσιακά ξύλινα συστήματα με τα οποία συναντώνται. Όλα αυτά απασχολούν την παγκόσμια

επιστημονική κοινότητα τα πολύ τελευταία χρόνια και αρκετά ερευνητικά κέντρα όπως η CraTERRE (Γαλλία), πανεπιστήμια της Ευρώπης, των Η.Π.Α και της Αφρικής στρέφεται προς την έρευνα του υλικού αυτού. Από την άλλη μεριά, το ενεργειακό πρόβλημα και η αλλαγή του κλίματος λόγω ρύπανσης έχει αναγκάσει τις κοινωνίες των ανθρώπων στην επανεκτίμηση των φυσικών, οικολογικών και χαμηλού κόστους υλικών. Σήμερα, η παραγωγή τσιμέντου (που στη χώρα μας φτάνει ίσως τα υψηλότερα ποσοστά στην Ευρωπαϊκή Ένωση) ευθύνεται για το 7,5% της έκλυσης CO₂ στην ατμόσφαιρα καθώς και για την πολλαπλή επιβάρυνση του περιβάλλοντος με μη ανακυκλώσιμα υλικά παραπροϊόντων. Η έρευνα γύρω από ένα φυσικό υλικό όπως ο πηλός αποτελεί ίσως μια εναλλακτική μορφή φτηνής οικολογικής δόμησης τουλάχιστον για τοιχοποιίες πλήρωσης ή ακόμη και φέρουσες χαμηλών κτιρίων, στο πλαίσιο του πνεύματος της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής (Σχήμα2.3) (Γεωργακοπούλου, 2008).

ΥΛΙΚΑ	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΠΡΟΛΕΥΣΗΣ	ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ	ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ
πηλός	■	■	■	■
άμμος	■	■	■	■
λίθοι γενικά	■	■	■	■
κισσηρόδεμα	■	■	■	■
κισσηρόπλινθοι	■	■	■	■
τσιμεντόλιθοι	■	■	■	■
σκυρόδεμα	■	■	■	■
οπλισμένο σκυρόδεμα	■ ■	■	■ ■ ■	■
κέραμοι	■ ■	■	■	■
οπτόπλινθοι διάτρητοι	■ ■	■	■	■
αφροσκυρόδεμα	■ ■	■	■	■
τσιμέντο	■ ■	■	■	■
ασβέστης	■ ■ ■	■	■	■
ξύλεια	■	■	■	■
φελός	■	■	■	■
μοριο - ινσανίδες	■ ■ ■	■	■	■ ■
σίδηρος	■ ■ ■	■	■ ■ ■	■ ■
χάλυβας	■ ■ ■	■	■ ■ ■	■ ■
κασσίτερος	■ ■ ■	■ ■ ■	■	■ ■ ■
μόλυβδος	■ ■ ■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ ■
ψευδάργυρος	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■	■ ■ ■
χαλκός	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■	■ ■ ■ ■
αλουμίνιο	■ ■ ■ ■	■	■	■ ■
μονώσεις Heraklith	■	■	■	■
μονώσεις τεχνητών ινών	■ ■ ■ ■	■	■	■
υαλοπίνακες	■ ■ ■ ■	■	■	■
πολυαιθυλένιο	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■
PVC	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■
πολυπροπυλένιο	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■
πολυστερίνη	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■
πολυουρεθάνη	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■
	kWh/t 1 - 100 ■ 100 - 500 ■ ■ 500 - 1.000 ■ ■ ■ 1.000 - 10.000 ■ ■ ■ ■ 10.000 - 25.000 ■ ■ ■ ■ ■	Αφθονοί ■ Μέτριοι ■ ■ Λίγοι ■ ■ ■ Εξασπνιζόμενοι ■ ■ ■ ■ Σπάνιοι ■ ■ ■ ■ ■	Πλήρης ■ Μεγάλη ■ ■ Μεσαία ■ ■ ■ Μικρή ■ ■ ■ ■ Ελάχιστη ■ ■ ■ ■ ■	Καμία ■ Ελέγχμη ■ ■ Σοβαρή ■ ■ ■ Μεγάλη ■ ■ ■ ■ Μέγιστη ■ ■ ■ ■ ■

Σχήμα 2.3: Πίνακας αξιολόγησης οικοδομικών υλικών (Γεωργιάδου,1996)

Οι κατασκευές από πηλό που επί αιώνες προστάτευαν τον άνθρωπο από τις υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες αποτελούν υπόδειγμα μελέτης από πλευράς δομικής φυσικής αφού χωρίς πρόσθετα μονωτικά υλικά επιτυγχάνεται το εσωτερικό κλίμα που σήμερα επιδιώκεται με επιπλέον μόνωση. Η συνειδητοποίηση αυτής της κατάστασης, σε συνδυασμό με την πληθώρα των πλεονεκτημάτων της φτηνής δομικής μεθόδου της τοιχοποιίας από ωμοπλίνθους οδήγησε στην επανεκτίμηση του υλικού πηλός κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το υλικό στη δόμηση στις σύγχρονες οικονομικές συνθήκες, πρέπει να διερευνηθούν οι βέλτιστες συνθήκες χρήσης του και να επαληθευθεί ότι ο πηλός και οι κατασκευές του ανταποκρίνονται πλήρως στους γενικότερους κανονισμούς ποιότητας, αντοχής και ανθεκτικότητας των κτιρίων. Προκύπτει η ανάγκη σύνταξης κανονισμών για τον ασφαλή σχεδιασμό των πηλοκατασκευών, ενώ γίνεται εμφανής η ανάγκη διερεύνησης της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας και των βασικών παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά της μέσω πειραματικών και αναλυτικών μεθόδων.

Όσον αφορά στα ιστορικά κτίρια που αποτελούνται από ωμοπλίνθους ή πηλοκονιάματα, οι μελετητές μηχανικοί και συντηρητές έχοντας αδυναμία να αξιολογήσουν το υλικό, μη έχοντας κανονισμούς ή ερευνητικά δεδομένα να στηριχθούν, σε πολλές περιπτώσεις αναγκάζονται να καθαιρέσουν και να απομακρύνουν τα υλικά αυτά από το ιστορικό κτίριο αντικαθιστώντας τα με άλλα πιο αξιόπιστα και οικεία σε αυτούς ως προς τη μηχανική συμπεριφορά τους και την ανθεκτικότητά του. Εξάλλου, στην οικολογική δόμηση σε σύγχρονες κατασκευές, η εφαρμογή των πηλοκατασκευών γίνεται και γινόταν σε πιλοτικό επίπεδο σε κάποιες περιοχές της Ευρώπης, κυρίως σε κατοικίες στη Δανία, Ολλανδία, Γαλλία, Γερμανία, λίγο περισσότερο στην πολιτεία του Νέου Μεξικού (Η.Π.Α.) στην Αυστραλία και στην Νέα Ζηλανδία και ακόμη περισσότερο σε χώρες υπό ανάπτυξη. Στις πιο πολλές από τις προηγούμενες περιπτώσεις σύγχρονων κατασκευών δεν εφαρμόστηκε κανένα πλαίσιο κανονισμών δόμησης. Στην καλύτερη περίπτωση εφαρμόστηκαν κάποιοι κανονισμοί με μορφή οδηγιών ή συστάσεων, που συνήθως βασίστηκαν στη δομική παράδοση κατασκευής τοιχοποιιών από ωμοπλίνθους κάθε χώρας. Και στις δυο περιπτώσεις, τόσο στις ιστορικές κατασκευές, όσο και στις σύγχρονες κατασκευές, υπάρχει έλλειμμα γνώσης (Μπέη, 2004).

2.2 Σύνθεση πηλού

Ο πηλός, είναι ένα υλικό ποικίλης σύστασης που αφθονεί στη γη. Τα χαρακτηριστικά του διαφοροποιούνται από τη μια περιοχή στην άλλη. Αποτελείται από

ένα μείγμα (σε διαφορετικές αναλογίες), από χάλικες, άμμους, ιλύες και αργίλους. Στο μείγμα προστίθενται άλατα, οξείδια και οργανικά υλικά. Ειδικότερα, τα διαφορετικά συστατικά του πηλού κατατάσσονται ως εξής (Γεωργακοπούλου, 2008) :

- Χοντρόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά, όπως το ρύζι, οι χάλικες και τα σκύρα (4 έως 32mm) και η άμμος (80μm έως 4mm). Αυτά τα στοιχεία εξασφαλίζουν τη συνοχή του υλικού. Για να προσδώσουν αντοχή στο υλικό, πρέπει να υπάρξει ένα ελάχιστο όριο επαφής μεταξύ των αδρανών ώστε να ενεργοποιηθούν εσωτερικές δυνάμεις συνοχής.
- Λεπτόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά τα οποία αποκαλούνται ιλύες. Πρόκειται για άμμο λεπτόκοκκη (2 έως 80μm), που απορροφά λίγο νερό. Οι ιλύες μειώνουν σε κάποιο ποσοστό την τριβή μεταξύ των αδρανών (κατά τη συμπίκνωση) και τη σταθερότητα των κόκκων γεμίζοντας τα κενά μεταξύ τους.
- Λεπτόκοκκα χημικώς ενεργά συστατικά αργιλο-πυριτικής βάσεως. Η άργιλος, χρησιμοποιείται σε όλο το κείμενο, με την ορυκτολογική της έννοια. Τα αργιλικά μόρια είναι φορτισμένα ηλεκτρικά, οι φυλλόμορφες στοιβάδες είναι γενικά φορτισμένες αρνητικά. Σε διάλυμα νερού, δημιουργείται ένα δυναμικό μεταξύ των μορίων και του διαλύματος Προσθέτοντας στο δυναμικό αυτό ανιόντα ή κατιόντα είναι δυνατό να τροποποιηθεί η συμπεριφορά των μορίων. Ενδυναμώνοντας τα, ταξινομούνται σε στοιβάδες ενώ αντίθετα διαχωρίζονται. Εν ξηρώ, τα μόρια πλησιάζουν, οι δυνάμεις συνοχής Van der Waals υπερέχουν και προκαλούν συγκόλληση των αργιλικών μορίων μεταξύ τους αλλά και με τα αδρανή. Αυτός είναι και ο ορισμός της συνοχής, που αποτελεί πολύ γνωστό όρο της εδαφομηχανικής (Meshyawn,1995).
- Άλλα στοιχεία λεπτόκοκκα και δραστικά. Μερικά στοιχεία μπορούν να έχουν πολύ θετικές επιδράσεις στη συμπεριφορά των εδαφών και να ευνοούν κάποιες χημικές αντιδράσεις παρουσία υδραυλικών πρόσθετων όπως τα οξείδια του σιδήρου σε εδάφη από λατερίτη (λατερικά εδάφη). Άλλα στοιχεία μπορεί να επιδρούν αρνητικά στη συμπεριφορά των εδαφών όπως είναι τα θειικά οξέα, τα χλωρικά οξέα και τα οργανικά υλικά (Leroux and Toubeau,1987).

2.3 Ο πηλός συγκριτικά

Σε σύγκριση με τα συνήθη βιομηχανοποιημένα υλικά δόμησης, ο πηλός έχει τρία μειονεκτήματα (Μπέη, 2004):

1. Ο πηλός δεν είναι τυποποιημένο υλικό δόμησης

Ανάλογα από το μέρος που εξάγεται το χώμα, έχει διαφορετικά ποσοστά και είδη αργίλου, ιλύος, άμμου και λοιπών συστατικών. Γι'αυτό το λόγο, τα χαρακτηριστικά του μπορεί να αλλάζουν από τόπο σε τόπο καθώς και η προετοιμασία της σωστής σύνθεσής του για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Είναι αναγκαστικό να είναι γνωστή η ακριβής σύσταση του χώματος για τα ακριβή χαρακτηριστικά του και την αλλαγή τους με πρόσθετα εάν κριθεί αναγκαίο.

2. Ο πηλός συρρικνώνεται όταν στεγνώσει

Λόγω της εξάτμισης του νερού που χρησιμοποιείται για να παραχθεί το μίγμα του πηλού (το οποίο είναι αναγκαστικό για να ενεργοποιηθούν οι συνδετικές δυνάμεις και να υπάρξει η δυνατότητα εργασίας του) παρατηρούνται ρωγμές από την συρρίκνωση. Η συρρίκνωση μπορεί να μειωθεί, με τη μείωση του ποσοστού της αργίλου και του νερού, με τη βελτιστοποίηση της κοκκομετρικής σύστασης και με τη χρήση προσθέτων.

3. Ο πηλός δεν είναι αδιάβροχος

Πρέπει να προστατεύεται από τη βροχή και την υγρασία, ιδίως όταν βρίσκεται ακόμα σε υγρή μορφή. Οι τοίχοι από πηλό, μπορούν να προστατευτούν με επιμήκυνση της στέγης, κατάλληλα επιφανειακά καλύμματα, κ.α.

Από την άλλη πλευρά ο πηλός έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα κοινά βιομηχανικά υλικά δόμησης) (Γεωργακοπούλου, 2008).

1. Ο πηλός εξισορροπεί την υγρασία

Έχει την ικανότητα να απορροφά και να αποδίδει υγρασία πιο γρήγορα και σε υψηλότερο βαθμό από όλα τα άλλα υλικά δόμησης. Γι'αυτό το λόγο είναι κατάλληλος για να εξισορροπεί το εσωτερικό κλίμα. Πειράματα στο εργαστήριο για πειραματικές κατασκευές' του Πανεπιστημίου του Kassel στη Γερμανία, δείχνουν ότι όταν η σχετική υγρασία σε ένα δωμάτιο φτάσει ξαφνικά από το 50% στο 80%, άψητα τούβλα είναι ικανά να απορροφήσουν 30 φορές περισσότερο υγρασία από τα ψημένα τούβλα σε μια χρονική περίοδο 2 ημερών. Ακόμα και σε μια δοκιμαστική

αίθουσα με υγρασία 95% σε περίοδο 6 μηνών, οι ωμόπλινθοι δεν υγροποιούνται, δεν χάνουν τη σταθερότητά τους, ούτε υπερβαίνουν την ισορροπία τους σε περιεκτικότητα υγρασίας, η οποία είναι περίπου 5% - 7% του βάρους τους. (ισορροπία της περιεκτικότητας της υγρασίας λέγεται η μέγιστη υγρασία που μπορεί να απορροφήσει ένα στεγνό υλικό) (Minke, 2000).

2. Ο πηλός αποθηκεύει θερμότητα

Όπως όλα τα βαριά υλικά, ο πηλός έχει μεγάλη θερμοχωρητική ικανότητα. Σαν αποτέλεσμα, σε κλιματικές ζώνες που οι ημερήσιες θερμοκρασιακές διαφορές είναι έντονες, ή όπου είναι απαραίτητη η αποθήκευση ηλιακής ενέργειας με μορφή θερμότητας, ο πηλός μπορεί να εξισοροπήσει το εσωτερικό κλίμα.

3. Ο πηλός εξοικονομεί ενέργεια και μειώνει τη περιβαλλοντική ρύπανση

Για την προετοιμασία, τη μεταφορά και τη χρήση του πηλού στη κατασκευή, χρειάζεται μόνο το 1% από την ενέργεια που χρησιμοποιείται για παραγωγή, μεταφορά και χρήση των ψημένων τούβλων ή του ενισχυμένου σκυροδέματος. Έτσι, οι τεχνικές του πηλού δεν παράγουν σχεδόν καθόλου περιβαλλοντική ρύπανση.

4. Ο πηλός είναι πάντα επαναχρησιμοποιήσιμος

Το άψητο έδαφος μπορεί να ανακυκλωθεί όσες φορές χρειαστεί. Αφού έρθει σε επαφή με νερό, ο στεγνός πηλός μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Επομένως, ο πηλός δεν μπορεί ποτέ να είναι ένα άχρηστο υλικό που μολύνει το περιβάλλον.

5. Ο πηλός εξοικονομεί κόστος μεταφοράς και υλικό

Στο ίδιο το οικόπεδο προς κατασκευή υπάρχει χώμα και η ποσότητα από την εσκαφή για τα θεμέλια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για κατασκευή με πηλό. Έαν η σύσταση είναι ελειπής σε άργιλο, πρέπει να προστεθεί αργιλώδες χώμα και εάν υπάρχει παραπάνω από το επιθυμητό άργιλος, τότε να προστεθεί άμμος. Σε σύγκριση με άλλα υλικά δόμησης, το κόστος μπορεί να μειωθεί κατα πολύ εάν γίνει χρήση του χώματος από την εσκαφή. Ακόμα κι αν το χώμα μεταφερθεί από άλλο μέρος, είναι συνήθως πιο οικονομικό από τα βιομηχανικά υλικά δόμησης.

6. Ο πηλός είναι το ιδανικό υλικό για ιδιοκατασκευή

Οι τεχνικές των κατασκευών με πηλό μπορούν εύκολα να εκτελεστούν από μη-επαγγελματίες έχοντας τη καθοδήγηση ενός ατόμου με εμπειρία για να ελέγχει τη

διαδικασία της κατασκευής. Οι τεχνικές είναι εντατικής εργασίας, χρειάζονται φτηνά εργαλεία και μηχανές και γι' αυτό θεωρούνται ιδανικές για ιδιοκατασκευές.

7. Ο πηλός συντηρεί την ξυλεία και άλλα οργανικά υλικά

Εξαιτίας της χαμηλής ισορροπίας του σε περιεκτικότητα υγρασίας (από 0,4% έως 6% του βάρους του), και της υψηλής τριχοειδούς ιδιότητάς του, συντηρεί τα στοιχεία ξυλείας με τα οποία βρίσκεται σε επαφή, δεδομένου ότι κρατά το ξύλο ξηρό. Κανονικά, κανένα μύκητας ή έντομο δε θα καταστρέψει τέτοιο ξύλο, αφού τα έντομα χρειάζονται ένα ελάχιστο 14% - 18% υγρασίας, ενώ οι μύκητες για να αναπτυχθούν πάνω από 20%. Ομοίως, ο πηλός μπορεί να συντηρήσει τις μικρές ποσότητες αχύρου που αναμιγνύονται μέσα στο μείγμα του. Εντούτοις, εάν χρησιμοποιηθεί ελαφρύ μείγμα πηλού και αχύρου, με πυκνότητα λιγότερο από 500-600 kg/m³, αυτή η δυνατότητα συντήρησης του πηλού μπορεί να μην είναι ικανοποιητική λόγω της υψηλής τριχοειδούς ιδιότητας του αχύρου όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλες αναλογίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το άχυρο μπορεί να αποσυνθεθεί εάν παραμένει υγρό κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης περιόδου.

8. Ο πηλός απορροφά τους ρύπους

Συχνά έχει ειπωθεί ότι οι χωμάτινοι τοίχοι βοηθούν στον καθαρισμό του μολυσμένου εσωτερικού αέρα, αλλά μέχρι τώρα, αυτό ακόμα δεν έχει αποδειχθεί επιστημονικά. Είναι γεγονός ότι οι χωμάτινοι τοίχοι μπορούν να απορροφήσουν τους ρύπους που διαλύονται στο νερό. Παραδείγματος χάριν, εγκαταστάσεις επίδειξης υπάρχουν στο Βερολίνο στις οποίες αφαιρούνται τα φωσφορικά άλατα από 600m³ λυμάτων ανά ημέρα χρησιμοποιώντας αργιλώδες χώμα. Τα φωσφορικά άλατα δεσμεύονται από τα μεταλλεύματα αργίλου και εξάγονται από τα λύματα. Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι, δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία ξένη ουσία που αφήνεται στο ύδωρ, τα φωσφορικά άλατα μετατρέπονται στο φωσφορικό άλας ασβεστίου και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως λίπασμα.

2.4 Παραδοσιακές ωμόπλινθοι ή πλιθί (adobe)

Η μέθοδος παραγωγής των adobe, είναι πολύ παλιά χιλιάδων χρόνων, με καταγωγή από τη Μεσοποταμία. Το όνομα τους βγαίνει από το λήμμα «τουμπ» λέξη αιγυπτιακή που δηλώνει τις ωμοπλίνθους. Σε γενικές γραμμές, συνίσταται στην κατασκευή πλίνθων μέσα σε καλούπια ανοιχτά πάνω και κάτω και στη συμπίκνωσή τους με το χέρι. Η αρχή παραγωγής τους βασίζεται στη μείξη ενός πηλού πολύ αργιλικού, συχνά με προσθήκη

ινών (άχυρα, ζωικές τρίχες κ.α.), ή μερικές φορές πρόσθετων (άμμοι, χάλικες, κεραμικά). Ακολουθεί το γέμισμα των καλουπιών πάνω στο έδαφος και η συμπίκνωσή τους με το χέρι. Τα μπλοκ που κατασκευάζονται έτσι αφαιρούνται από το καλούπι τους και στεγνώνουν στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η περιεχόμενη υγρασία του μείγματος είναι λίγο μικρότερη από το όριο υδαρότητας του πηλού που χρησιμοποιείται. Για τους συνήθεις πηλούς, η περιεχόμενη υγρασία παρουσιάζει ποσοστά από 25% έως 35%. Αυτή η μέθοδος είχε διάφορες παραλλαγές στη διάρκεια των αιώνων. Η παραγωγή των adobe είναι πολύ διαδεδομένη τεχνική. Αυτός ο παραδοσιακός τρόπος κατασκευής των ωμοπλίνθων ήταν πολύ γνωστός και στον ελληνικό χώρο, μέχρι και λίγο μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, κυρίως σε αγροτικές περιοχές. Απαντάται στις περιοχές όπου παραδοσιακά υπήρχαν τα λεγόμενα κεραμαριά (δανειοθάλαμοι πηλού) σε πεδινές περιοχές, κοντά σε ποταμούς και λίμνες, όπου άνθιζε η αγγειοπλαστική (Θεσσαλία, Μακεδονία, νησιά του βορείου Αιγαίου, Κρήτη και αλλού). Στον υπόλοιπο κόσμο απαντάται στη Γαλλία, στην περιοχή της Ντωφινέ (κοντά στη Λυών και στη Γκρενόμπλ) στις Η.Π.Α. (Νέο Μεξικό και Αριζόνα), στην Υεμένη, στην Ινδία, στη Μέση Ανατολή και Βόρεια Αφρική. Οι πόλεις Shibah και Tarim στη Βόρεια Υεμένη που κατασκευάστηκαν μεταξύ του 15ου και 19ου αιώνα, αποτελούνται από 'ουρανοξύστες' από adobe ύψους 30 μέτρων περίπου. Η παραγωγή των adobe στις περισσότερες χώρες είναι χειροτεχνική, αλλά στις Η.Π.Α. λόγω της μεγάλης διάδοσής τους αναπτύχθηκε εντατική παραγωγή με εκατοντάδες adobe την ώρα (Μπέη, 2004).

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί αξιοσημείωτη ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με τη καταλληλότητα των εδαφών για τη χρήση τους στη δόμηση. Η καταλληλότητα του εδάφους ορίζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση, την πλαστικότητα, και τη συνοχή του. Ο πηλός πρέπει να έχει αρκετά μεγάλο ποσοστό λεπτών κόκκων έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη συνοχή για την παραγωγή των ωμοπλίνθων. Το ποσοστό αυτό δεν πρέπει να ξεπερνά ένα ορισμένο όριο που μπορεί να βλάψει την αντοχή και την ανθεκτικότητα τους. Όταν το αργιλικό περιεχόμενο ποσοστό στον πηλό είναι από 5% έως 20% θεωρείται ότι οι συμπιεσμένες ωμόπλινθοι μπορούν να σταθεροποιηθούν με τσιμέντο. Η διάμετρος του μέγιστου κόκκου που προτείνεται για τη σταθεροποίηση με τσιμέντο κυμαίνεται από 6mm έως 20mm. Τα καταλληλότερα εδάφη για σταθεροποίηση με τσιμέντο είναι αυτά που έχουν δείκτη πλαστικότητας μεταξύ 2,5% και 30%. Για πηλούς με υψηλότερους δείκτες πλαστικότητας η υδράσβεστος αποτελεί καταλληλότερο σταθεροποιητή (Houben and Guillaud, 1994). Οι πηλοί πρέπει να μην περιέχουν οργανικά υλικά και διαλυτά άλατα σε ποσοστά που μπορούν να αλλοιώσουν τις ιδιότητες των ωμοπλίνθων. Για τις σταθεροποιημένες ωμοπλίνθους το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό οργανικού υλικού κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 2% (Houben and Guillaud, 1994).

Κεφάλαιο 3ο Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας

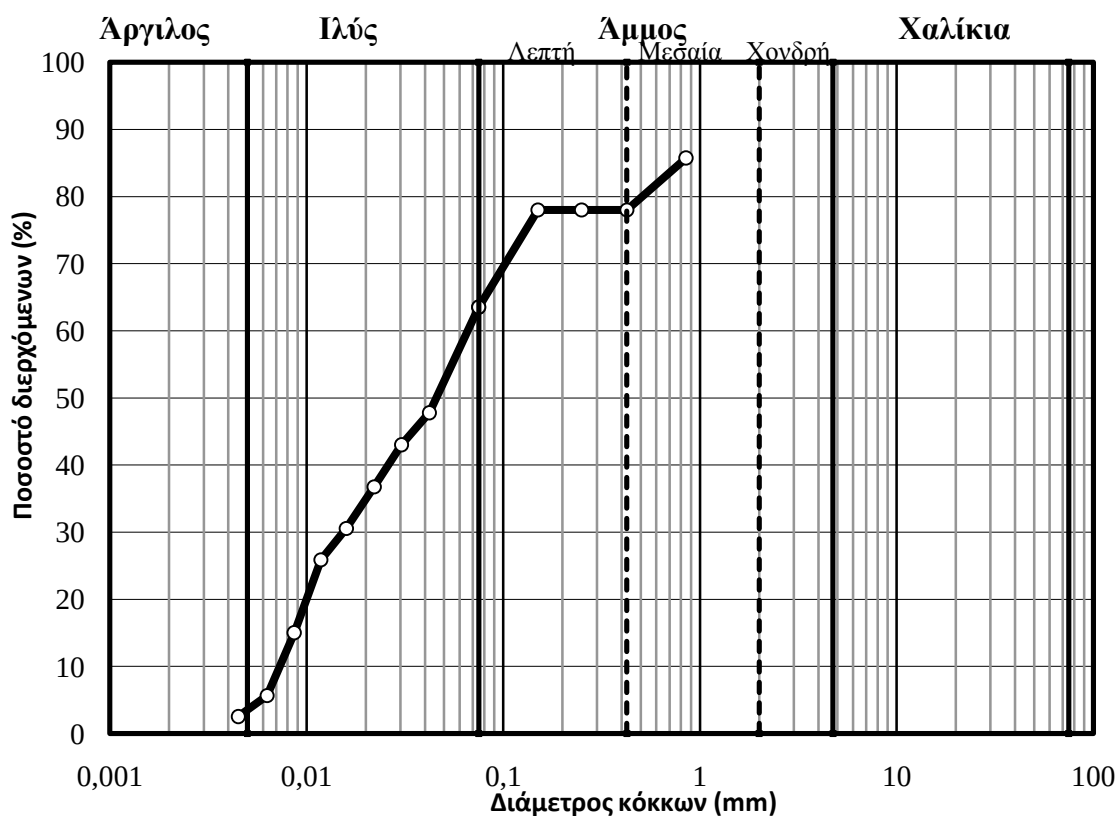
3.1 Ταξινόμηση εδάφους κατά (ASTM)

3.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί μέθοδο ταυτοποίησης και ταυτόχρονα ταξινόμησης του (Στειακάκης, 2010). Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε στο εργαστήριο της Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής του Πολυτέχνειου Κρήτης.

Κατά το πρώτο στάδιο για το έδαφος με κοκκους $>0,075$ mm χρησιμοποιήθηκε η μηχανική μέθοδος (υγρή κοσκινισή) όπου ξηρό δείγμα εδάφους μετά από πλύση κοσκινίζεται μέσα από μια σειρά κοσκίνων και καταγράφεται το βάρος που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο. Η σειρά των κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά είναι: 20,40,60,100,200.

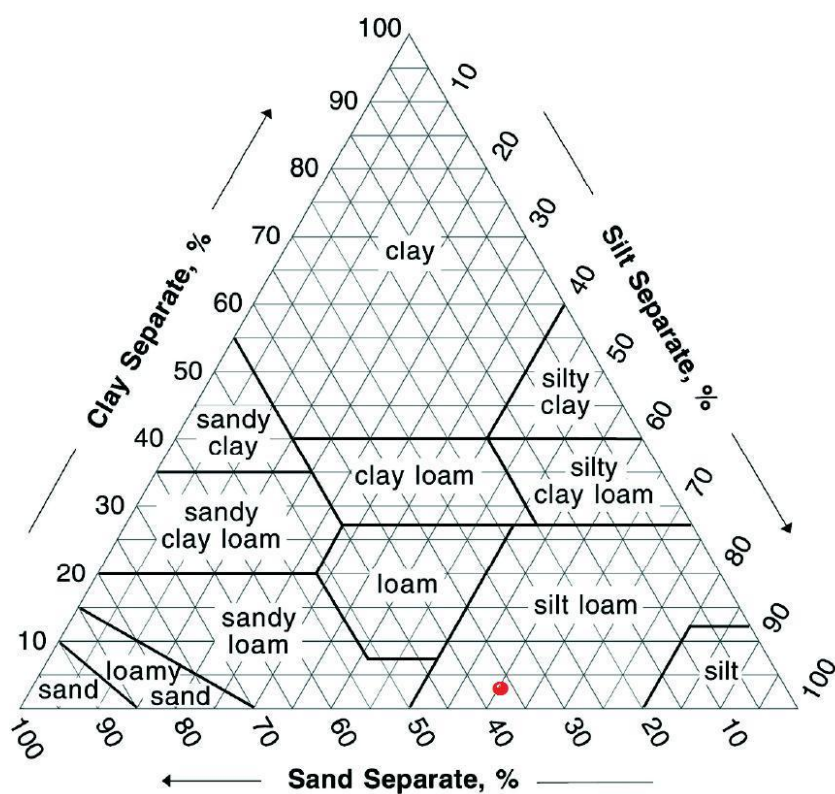
Κατά το δεύτερο στάδιο χρησιμοποιήθηκε η υδρομετρική μέθοδος (μέθοδος του αραιόμετρου) για τον καθορισμό των κόκκων μεγέθους <0.075 mm. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού.



Σχήμα 3.1: Κοκκομετρική καμπύλη δείγματος

Πίνακας 3.1: Ποσοστά κλασμάτων με βάση τα πρότυπα ASTM

Κλάσμα	Αναλογίες (κ.β)
Αργίλου	3,5%
Ιλύος	60,02%
Λεπτής άμμου	14,48%
Μεσαίας άμμου και υπόλοιπα χονδρόκοκκα	22%



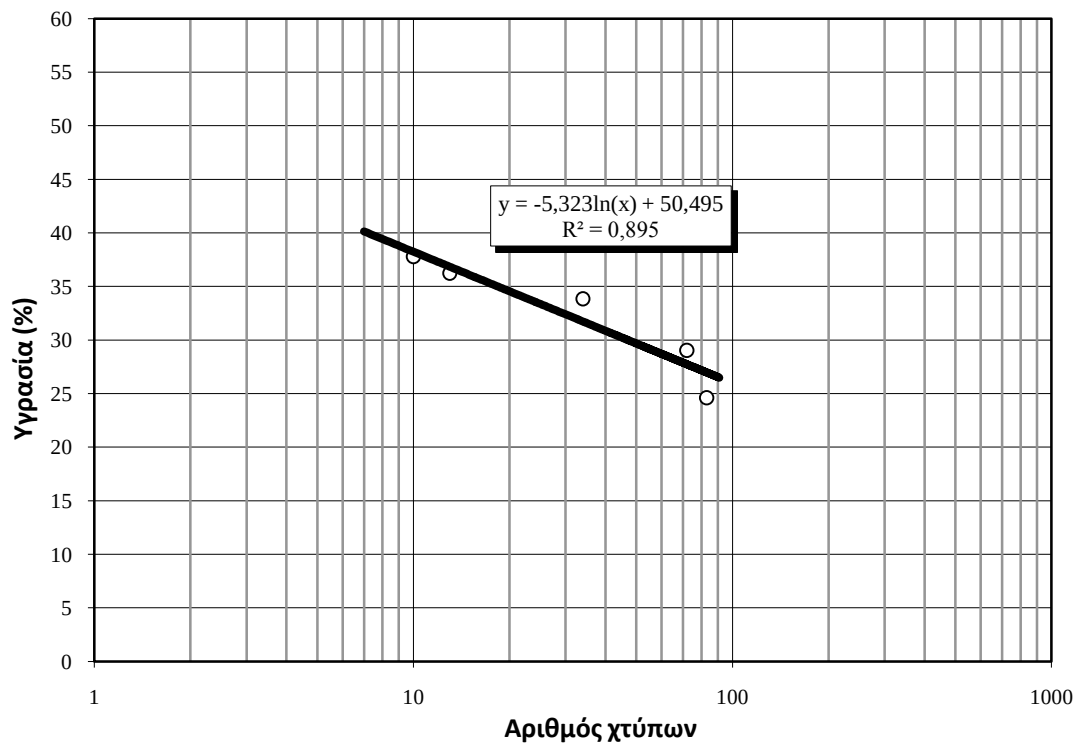
Σχήμα 3.2: Ταξινόμηση μειγμάτων εδαφών βάσει των ποσοστών τριών βασικών εδαφών.

Το υλικό βάση της κοκκομετρίας του, ταξινομείται με την εδαφολογική του ονομασία ως ιλυώδης πηλός όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση με μορφή τριγώνου των τριών βασικών συστατικών των εδαφικών μειγμάτων (Σχήμα 3.2).

Υπολογίστηκε το ενεργό μέγεθος των κόκκων $d_{10}=0,007$ και ο συντελεστής ομοιομορφίας $C_u=10$. Το έδαφος χαρακτηρίστηκε ως καλά διαβαθμισμένο.

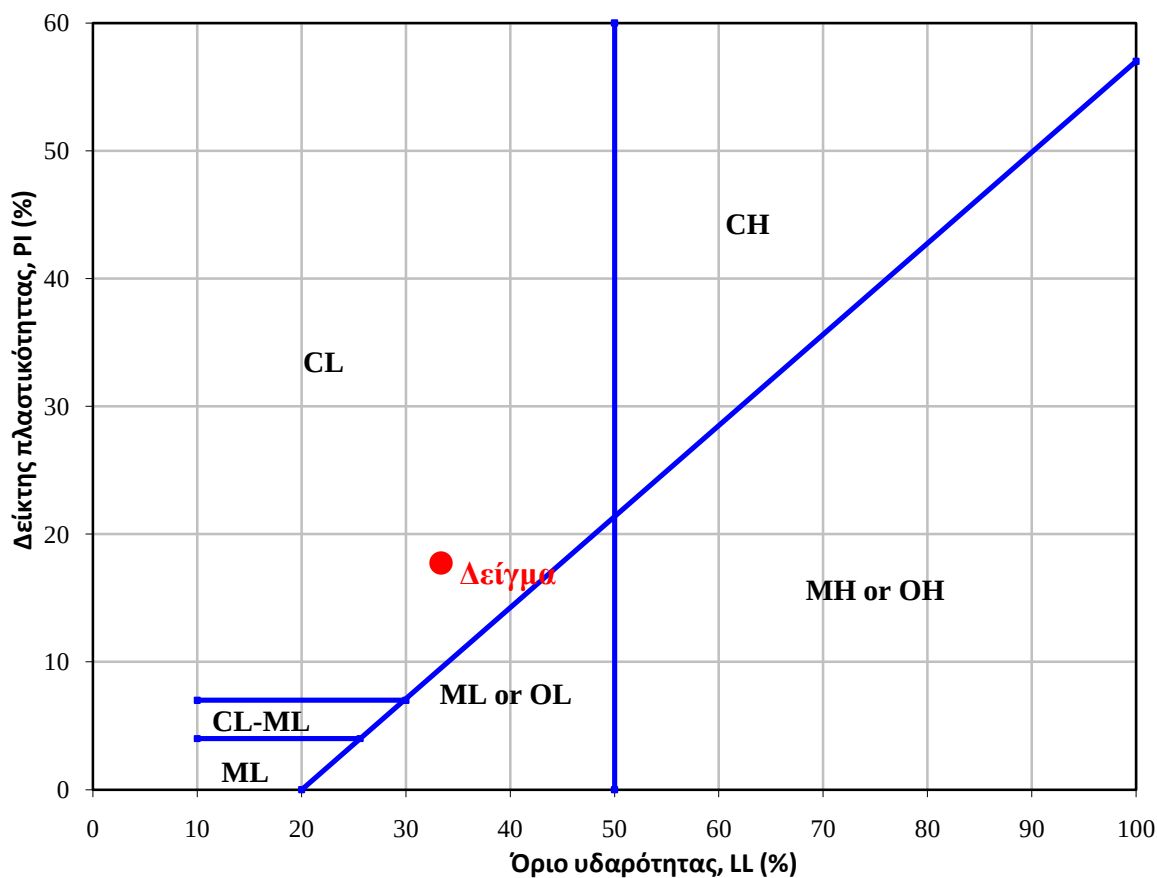
3.2.2 Όρια Atterberg

Τα όρια Atterberg καθορίστηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας και πλαστικότητας αντίστοιχα. Η κατάταξη του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έγινε βάσει της προδιαγραφής ASTM D2487.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ορίου υδαρότητας δείγματος

Το όριο υδαρότητας όπως προσδιορίζεται από το διάγραμμα (Σχήμα 3.3) είναι **LL= 33,36%**, το όριο πλαστικότητας όπως προκύπτει από τις δοκιμές είναι **PL= 15,62%** και ο δείκτης πλαστικότητας είναι **PI= 17.74%**.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα πλαστικότητας του δείγματος κατά ASTM D2487

Το έδαφος από με το διάγραμμα πλαστικότητας (Σχήμα 3.4) χαρακτηρίζεται ως **CL** και πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS - ASTM D2487), χαρακτηρίζεται ως **ιλυώδης άργιλος χαμηλής πλαστικότητας**.

Αναλυτικά οι μετρήσεις για την ταξινόμηση του εδάφους παρουσιάζονται στο παράρτημα Α

3.1 Παραγωγή ωμοπλίνθων

Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ωμοπλίνθων, καθώς και η συσχέτιση των χαρακτηριστικών αυτών με τη σύστασή τους. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν ωμοπλίνθοι δύο

αναλογιών πηλού-άχυρου για τις εξής δοκιμές: Μονοαξονικής θλίψης, κάμψης και αντιδιαμετρικής θλίψης. Για κάθε δοκιμή κατασκευάστηκαν 6 δοκίμια χωρίς άχυρο και 6 δοκίμια με άχυρο. Επιπλέον για τις δοκιμές διάτμησης απαιτήθηκαν 12 δοκίμια χωρίς άχυρο και 12 με άχυρο τα οποία ανά δυάδες (της ίδια σύστασης) σχημάτισαν διπλές. Δηλαδή δύο ωμόπλινθοι δομημένοι με ενδιάμεσο πηλοκονίαμα (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Αριθμός δοκιμών που παρασκευάστηκαν για κάθε δοκιμή και η κωδικοποίησή τους

Δοκιμές	Αριθμός δοκιμών χωρίς άχυρο (A)	Αριθμός δοκιμών με άχυρο (B)
Μονοαξονική θλίψη (Θ)	6	6
Κάμψη (Κ)	6	6
Αντιδιαμετρική θλίψη (Ε)	6	6
Διάτμηση (Δ)	12	12

Για την παραγωγή των ωμόπλινθων και των πηλοκονιαμάτων επιλέχθηκαν δυο ευρέως απαντώμενα υλικά, ο πηλός και το άχυρο. Αποφασίστηκε η επιλογή τέτοιων πρώτων υλών, ώστε να προσομοιάσουν με αυτές των παραδοσιακών ωμοπλίνθων και το κόστος τους να είναι κατά το δυνατόν χαμηλό. Σχεδιάστηκαν δύο συνθέσεις η πρώτη με 0% άχυρο και η δεύτερη με 2% άχυρο w/w. Ο πηλός που χρησιμοποιήθηκε συλλέχτηκε από τα Πιέρια Όρη συγκεκριμένα από την περιοχή Ρυάκια. Οι ωμόπλινθοι ήταν συμπαγείς με διαστάσεις σχεδιασμού 250x120x80 mm. Η επιλογή των διαστάσεων έγινε ύστερα από σχετική έρευνα στις διαστάσεις ωμοπλίνθων που συναντώνται στις παραδοσιακές κατασκευές στον ελλαδικό χώρο και βάσει του βάρους τους, ώστε να είναι εύκολη η δόμηση τους.

Η προσθήκη του άχυρου στο μίγμα πηλού για την παραγωγή των ωμόπλινθων γίνεται για να μειωθεί η συρρίκνωση του ωμόπλινθου κατά την ξήρανση του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σχετική περιεκτικότητα σε άργιλο μειώνεται και μια ορισμένη ποσότητα νερού απορροφάται στους πόρους των ινών. Επιπλέον η χρήση ινών χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η θερμική μόνωση (Minke, 2006).

Πρώτο στάδιο (προετοιμασία)

Ο πηλός αφού συλλέχθηκε τοποθετήθηκε σε μεγάλα δοχεία με νερό όπου απομακρύνθηκαν ξένα σώματα όπως πέτρες, ξύλα κτλ. Αναδεύτηκε καλά το μίγμα και κατόπιν τα σωματίδια του πηλού που αιωρούνταν (το θολό νερό) διήλθε από σήτα και τοποθετήθηκε σε νέο δοχείο με νερό. Μετά από κάποιο χρόνο ο πηλός διαχωρίστηκε από το νερό αφού καθιζάνει δημιουργώντας ίζημα. Το ίζημα αυτό απλώθηκε σε επίπεδη επιφάνεια έτσι ώστε να απομακρυνθεί η περίσσια υγρασία μέσω εξάτμισης και όταν ο πηλός απέκτησε την επιθυμητή πλαστικότητα τοποθετήθηκε μέσα σε νάιλον αεροστεγείς συσκευασίες ώστε να μην χάσει την υγρασία του. Η υγρασία μέσα στη συσκευασία ήταν $25\% \pm 2w/w$ (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Πηλός που έχει την επιθυμητή πλασιμότητα

Δεύτερο στάδιο (παραγωγή)

Για την παρασκευή των ωμόπλινθων με άχυρο αρχικά το άχυρο κόπηκε σε τμήματα μήκους 6-7cm (περίπου) και στη συνέχεια εμβαπτίστηκε σε νερό και αφέθηκε να στραγγίξει. Για κάθε ωμόπλινθο χρησιμοποιήθηκε 2,5kg πηλός και 50g άχυρο.

Αναμίχθηκε το άχυρο με τον πηλό μέχρι να γίνει όσο το δυνατόν πιο ομοιογενές (Σχήμα 3.2). Κατόπιν λήφθηκε η ανάλογη ποσότητα και έγινε πλήρωση του καλούπιού με το μίγμα. Το μίγμα τοποθετήθηκε σταδιακά στο καλούπι και συμπυκνώθηκε σταδιακά με το χέρι (Σχήμα 3.3). Η ανώτερη επιφάνεια διαμορφώθηκε λεία με σπάτουλα. Οι ωμόπλινθοι χωρίς άχυρο παράχθηκαν ακριβώς με την ίδια διαδικασία χωρίς την προσθήκη άχυρου.



Σχήμα 3.2: Ανάμιξη πηλού και άχυρου



Σχήμα 3.3: Πλήρωση καλουπιού με το μίγμα

Οι ωμόπλινθοι που προορίστηκαν για την τοιχοποιία δηλαδή οι ωμόπλινθοι που σχημάτισαν διπλέτες διαβρέχτηκαν πρώτα με νερό στο επίπεδο όπου τοποθετήθηκε το κονίαμα και στη συνέχεια απλώθηκε το πηλοκονίαμα, δηλαδή ο πηλός αλλά με μεγαλύτερη υγρασία από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των ωμόπλινθων. Το πάχος αρμού επιλέχτηκε να είναι 1cm.

Τρίτο στάδιο (ξήρανση)

Μετά τη συμπίκνωση αφού στέγνωσαν οι ωμόπλινθοι τόσο ώστε να μπορούν να απομακρυνθούν από τα καλούπια η ωμόπλινθος ακολούθησε έναν κύκλο ξήρανσης κατά τη διάρκεια του οποίου, ένα μεγάλο ποσοστό του περιεχόμενου νερού εξατμίστηκε. Ο βαθμός ξήρανσης είναι συνάρτηση του χρόνου της ξήρανσης και των συνθηκών στις οποίες πραγματοποιείται (σχετική υγρασία, θερμοκρασία). Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε σκιερό μέρος και καλύφθηκαν με νάilon, έτσι ώστε να απομακρυνθεί σταδιακά η υγρασία για να αποφευχθεί η ρηγμάτωση. Τα δοκίμια κατά τη διάρκεια της ξήρανσης αναποδογυρίστηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη ξήρανση και αφέθηκαν μέχρι να στεγνώσουν τελείως (Σχήμα

3.4). Οι εργαστηριακές δοκιμές έγιναν 2 μήνες (περίπου) μετά από την παρασκευή των ωμοπλίνθων. (Προσωπική επικοινωνία Σταγκίδης, 2010).



Σχήμα 3.4: Ωμόπλινθος που έχει στεγνώσει

Κεφάλαιο 4ο Εργαστηριακές δοκιμές

4.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

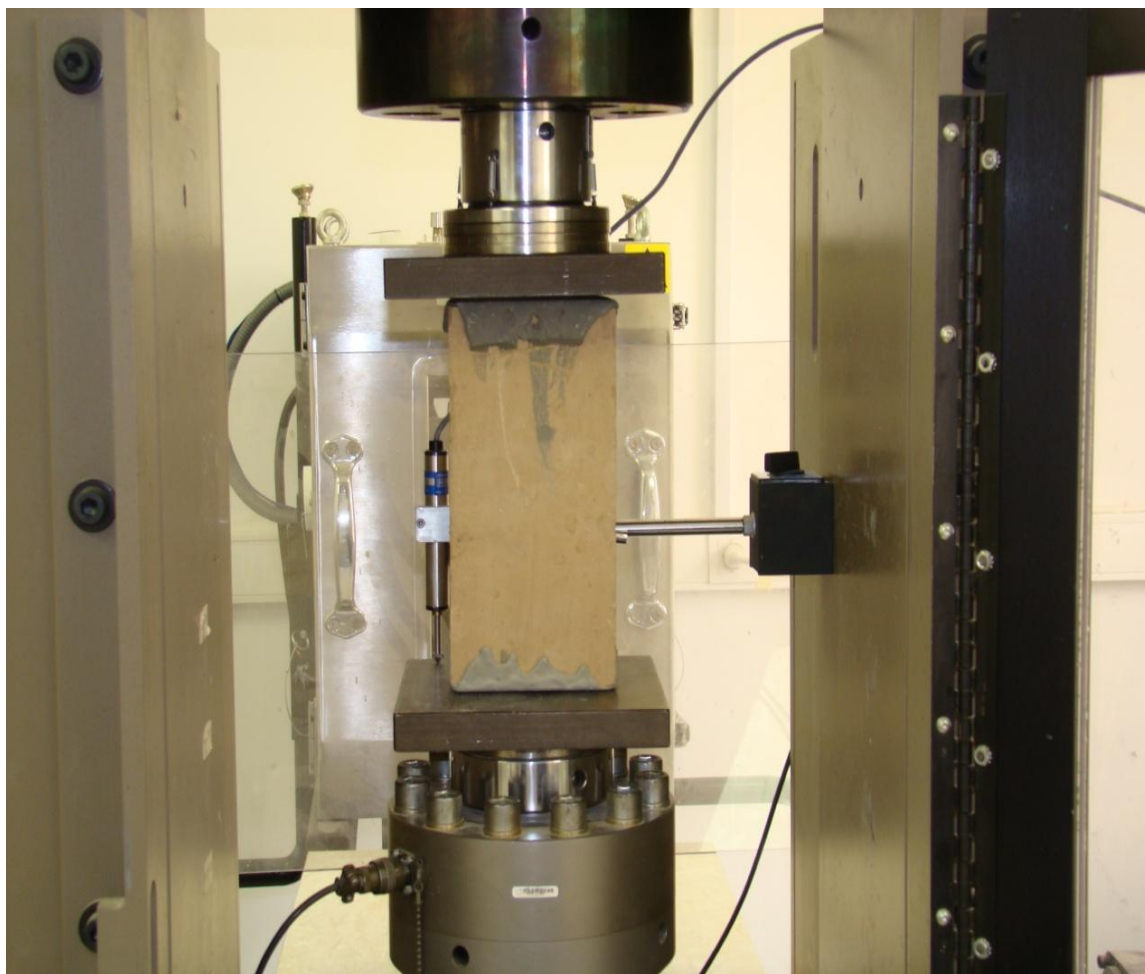
Πρώτο μέλημα ήταν ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής των ωμοπλίνθων εφόσον η τοιχοποιία χαρακτηρίζεται κυρίως ως θλιβόμενο στοιχείο. Στόχος της δοκιμής ήταν ο προσδιορισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε μεμονωμένα δοκίμια ωμοπλίνθων C_0 καθώς και του μέτρου ελαστικότητας E .

Οι δοκιμές έγιναν σε 6 ωμοπλίνθους χωρίς άχυρο και σε 6 με άχυρο. Αρχικά επειδή ότι οι πλάκες φόρτισης της μηχανής ασκούσαν ενισχυτική επιρροή στη θλιπτική αντοχή λόγω της τριβής του δοκιμίου σε αυτές. Για την ισοκατανομή της θλιπτικής δύναμης και την, κατά το δυνατόν, μείωση των τριβών μεταξύ δοκιμίου και χαλύβδινων πλακών της μηχανής όλα τα δοκίμια καλύφθηκαν με λεπτή στρώση 3-5mm αυτοεπιπεδούμενης τσιμεντοκονίας (καπέλωμα) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η εμπορική ονομασία της τσιμεντοκονίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν Finomix, Flow 110. Αφού παρασκευάστηκε το μίγμα (τσιμεντοκονία- νερό) σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή στη συνέχεια το μίγμα απλώθηκε στους ωμοπλίνθους με τη βοήθεια σπάτουλας. Λόγω ότι ο πηλός είναι πολύ υγροσκοπικός τα δοκίμια διαβρέχτηκαν με νερό προτού εφαρμοστεί το καπέλωμα. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί η ταχεία αφυδάτωση του μίγματος. Στη συνέχεια τα δοκίμια αφέθηκαν να στεγνώσουν μέχρι να αναπτύξει η τσιμεντοκονία μέγιστη μηχανική αντοχή.



Σχήμα 4.1: Δοκίμιο που έχει κατελωθεί

Μετρήθηκαν οι διαστάσεις δοκιμίου με ακρίβεια 0,001 mm. Το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιβαλλόταν χωρίς διακοπές με σταθερό ρυθμό μετατόπισης 0,001mm/s και το μέγιστο φορτίο καταγράφηκε με ακρίβεια 1%. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται φωτογραφία δοκιμίου πριν αστοχήσει στη συσκευή θλιπτικών δοκιμών και στο Σχήμα 4.3 φωτογραφία του δοκιμίου αφού έχει αστοχήσει.



Σχήμα 4.2: Φωτογραφία δοκιμίου πριν αστοχήσει στη συσκευή θλιπτικών δοκιμών



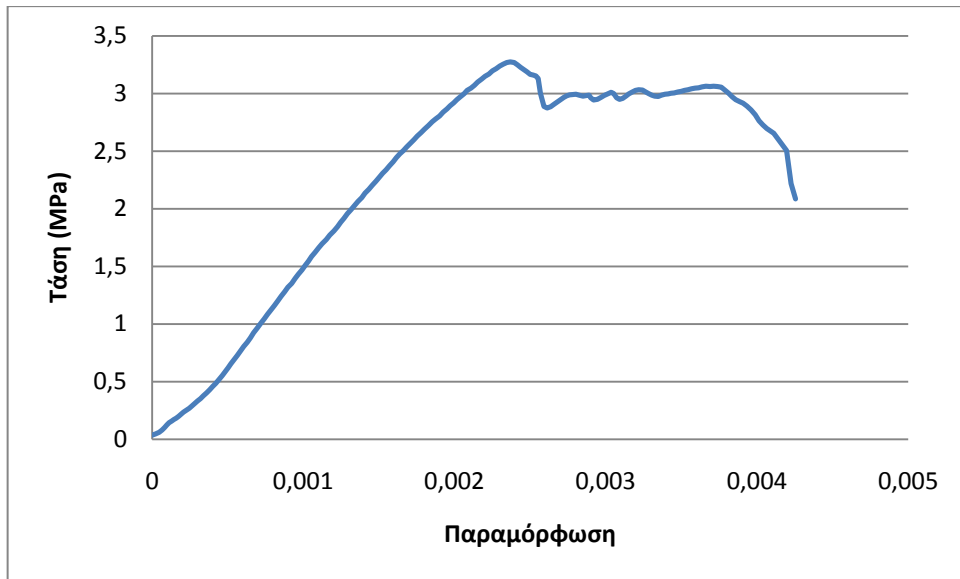
Σχήμα 4.3: Φωτογραφία δοκιμίου που έχει αστοχήσει στη συσκευή θλιπτικών δοκιμών

Υπολογίστηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (C_0) για κάθε δοκίμιο, σύμφωνα με τη σχέση (Αγιουτάντης, 2002):

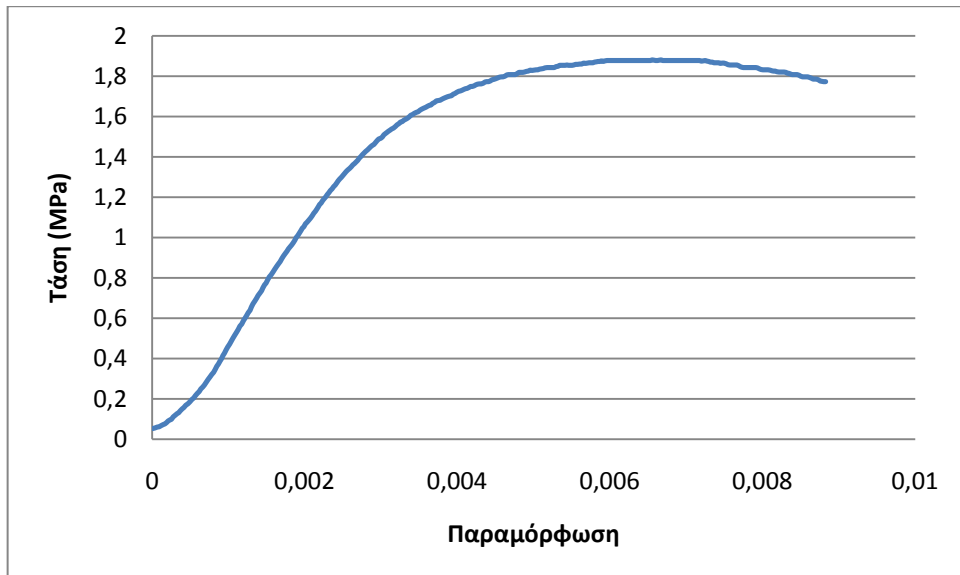
$$C_0 = \frac{F_{\max}}{A} \text{ (MPa)}$$

όπου: $F_{\max}$ το μέγιστο φορτίο που δέχτηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και A η επιφάνεια του δοκιμίου.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο και υπολογίστηκε το μέσο μέτρο ελαστικότητας E (MPa) από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης. Παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά διαγράμματα ένα για κάθε σύσταση. Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το διάγραμμα για ωμόπλινθο χωρίς άχυρο και στο Σχήμα 4.5 το διάγραμμα ωμόπλινθου με άχυρο. Επιπλέον παρουσιάζονται οι πίνακες των τιμών C_0 και E για κάθε δοκίμιο για κάθε σύσταση καθώς και οι μέσοι όροι αυτών (Πίνακας 4.1 και Πίνακας 4.2).



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμιο χωρίς άχυρο



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμιο με άχυρο

Πίνακας 4.1: Τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας των δοκιμών χωρίς άχυρο και οι μέσοι όροι αυτών

Δοκίμιο	C ₀ (MPa)	E (MPa)
1	3,275	1624,575
2	2,789	1406,473
3	2,605	1033,091
4	2,541	1198,297
5	3,594	1189,746
6	2,921	581,026
M.O	2,954	1172,201

Πίνακας 4.2: Τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας των δοκιμών με άχυρο μέσοι όροι αυτών

Δοκίμιο	C ₀ (MPa)	E (MPa)
1	1,880	590,277
2	1,403	208,830
3	1,761	378,421
4	1,754	266,959
5	1,810	311,124
6	1,375	205,633
M.O	1,664	326,874

Στο Σχήμα 4.4 παρατηρείται ότι ο πρώτος κλάδος του διαγράμματος δηλαδή μέχρι τη θραύση του δοκιμίου είναι γραμμικός και περιγράφει ελαστική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ψαθυρή καθώς δεν υπάρχει πλαστικός κλάδος.

Στο Σχήμα 4.5 που αναφέρεται στο δοκίμιο με άχυρο παρατηρείται η εμφάνιση πλαστικής περιοχής ανάμεσα από το πέρας του ελαστικού κλάδου και τη μέγιστη τάση.

Ο τρόπος αστοχίας όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες των ωμοπλίνθων μετά την αστοχία είναι αξονική κατάτμηση και δεν εμφανίζουν διατμήτικα επίπεδα.

Για τις παραδοσιακές πλίνθους οι τιμές της θλιπτικής αντοχής κυμαίνονταν μεταξύ 1,5 έως 3 MPa κατά τον Hodder. Όμως, ο G. Hodder αναφέρει τιμές αντοχών

διαφόρων κατασκευών πηλού χωρίς να γνωστοποιεί τη μέθοδο ελέγχου που χρησιμοποίησε. Για το λόγο αυτό οι τιμές που παρουσιάζονται είναι ενδεικτικές (Hodder, 1990).

Από τον Πίνακα 4.1 και τον Πίνακα 4.2 φαίνεται ότι η προσθήκη άχυρου στο μίγμα των ωμοπλίνθων μειώνει αισθητά την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη καθώς και το μέτρο ελαστικότητας.

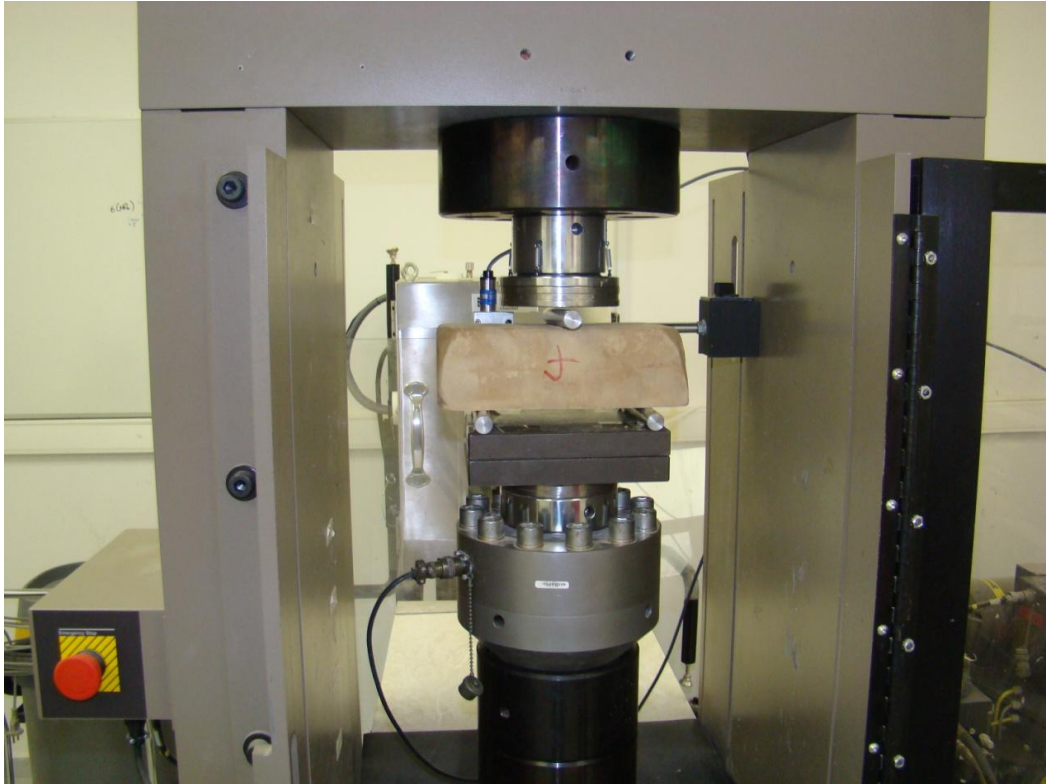
Η φωτογραφική τεκμηρίωση της διαδικασίας κατελώματος των ωμόπλινθων και το πλήρες αρχείο των διαγραμμάτων για όλα τα δοκίμια για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης παρουσιάζονται στο παράρτημα Β και Γ αντίστοιχα.

4.2 Δοκιμή κάμψης

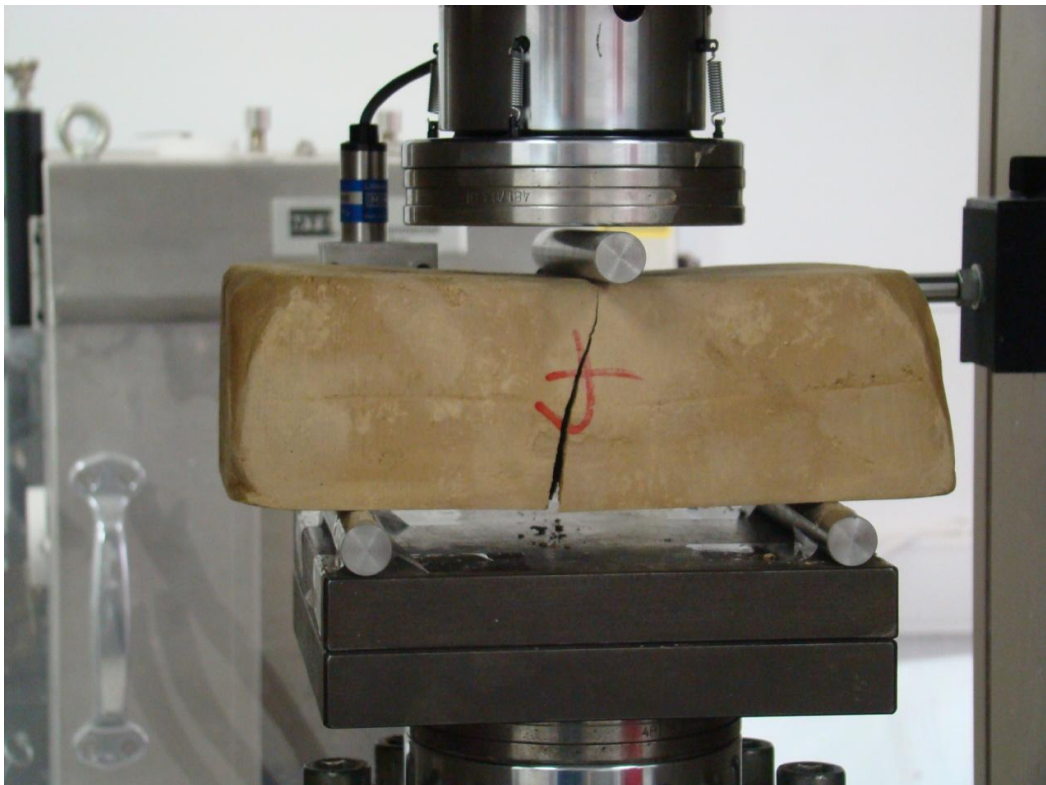
Στόχος της δοκιμής κάμψης ήταν η διερεύνηση της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη. Οι δοκιμές έγιναν σε μεμονωμένα δοκίμια ωμοπλίνθων. Σε 6 ωμόπλινθους χωρίς άχυρο και σε 6 με άχυρο.

Αρχικά μετρήθηκαν οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου με ακρίβεια 0,001 mm. Οι δοκιμές έγιναν με έλεγχο μετατόπισης με ρυθμό 0,01%mm/s της πλήρους κλίμακας μετατόπισης μηχανής, το οποίο για 50mm εύρος πλήρους κλίμακας της μηχανής ισοδυναμεί με 0,005mm/s.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται φωτογραφία δοκιμίου στη συσκευή κάμψης πριν αστοχήσει και στο Σχήμα 4.7 φωτογραφία του δοκιμίου αφού έχει αστοχήσει.



Σχήμα 4.6: Φωτογραφία δοκιμίου πριν αστοχήσει στη συσκευή κάμψης



Σχήμα 4.7: Φωτογραφία δοκιμίου που έχει αστοχήσει στη συσκευή κάμψης

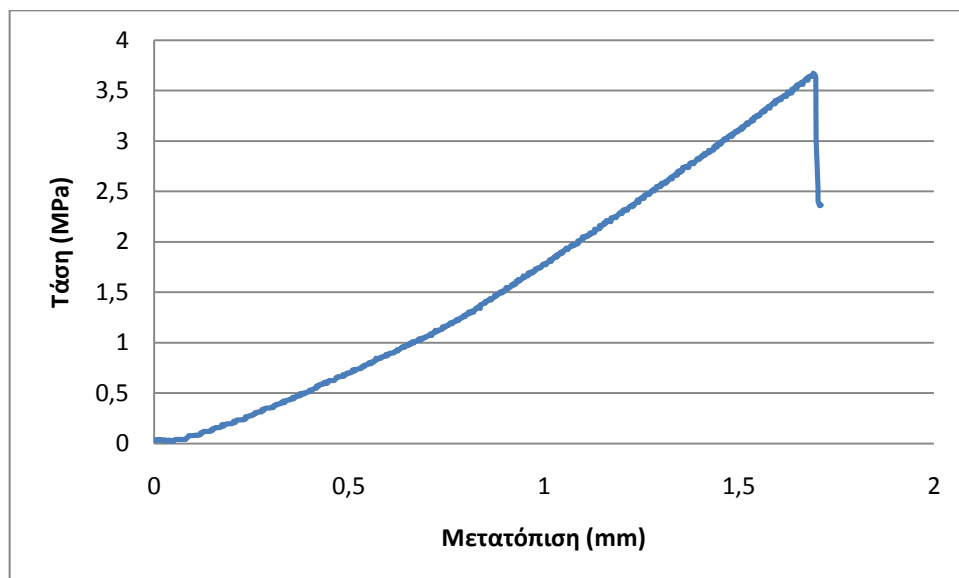
Υπολογίστηκε η μέγιστη τάση (σ) που δέχτηκε κάθε δοκίμιο από τον τύπο (Lama and Vutukuri,1974):

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{P I_s}{b h^2} \text{ (MPa)}$$

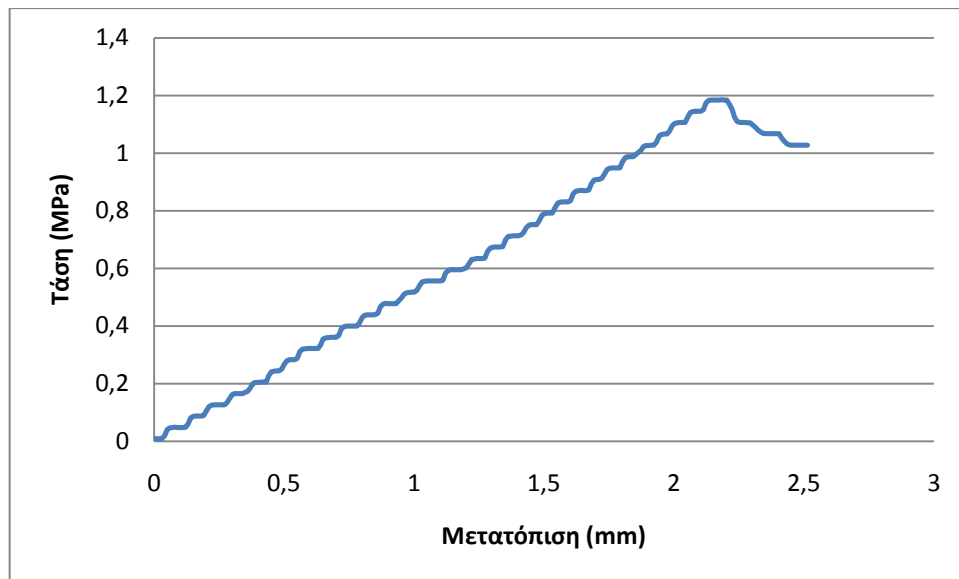
όπου: b είναι το πλάτος, h το ύψος του δοκιμίου, I_s το άνοιγμα κεφαλών της συσκευής και P η δύναμη που ασκείται.

Πρέπει να σημειωθεί ότι από τις μετρήσεις αφαιρέθηκε η δύναμη που αντιστοιχεί στο βάρος που αντιστοιχεί στις δύο πλάκες έδρασης του δοκιμίου. Δηλαδή από τις τιμές της δύναμης αφαιρέθηκαν 0,3 kN. Η απόσταση ανάμεσα από τους κυλίνδρους έδρασης του δοκιμίου ήταν $I_s=15,5\text{cm}$. Η μετατόπιση μετρήθηκε με LVDT που εδραζόταν στη κάτω πλάκα έδρασης.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσης-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο. Παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά διαγράμματα ένα για κάθε σύσταση. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα για ωμόπλινθο χωρίς άχυρο και στο Σχήμα 4.9 το διάγραμμα ωμόπλινθου με άχυρο. Επιπλέον παρουσιάζονται οι πίνακες των τιμών τάσης για κάθε δοκίμιο για κάθε σύσταση καθώς και οι μέσοι όροι αυτών (Πίνακας 4.3 και Πίνακας 4.4). Στον Πίνακα 4.3 εξαιρέθηκε η τιμή τάσης του δοκιμίου 4 λόγω της μεγάλης απόκλισης που είχε η τιμή του από τις υπόλοιπες. Επομένως ο μέσος όρος που αναγράφεται αντιστοιχεί σε 5 δοκίμια.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για δοκίμιο χωρίς άχυρο



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για δοκίμιο με άχυρο

Πίνακας 4.3: Τιμές μέγιστης τάσης των δοκιμών χωρίς άχυρο και οι μέσοι όροι αυτών
(*εξαιρείται το δοκίμιο 4)

Δοκίμιο	σ (MPa)
1	3,672
2	3,402
3	1,046
4	0,601*
5	3,656
6	3,702
M.O	3,096*

Πίνακας 4.4: Τιμές μέγιστης τάσης των δοκιμίων με άχυρο και οι μέσοι όροι αυτών

Δοκίμιο	σ (MPa)
1	1,327
2	1,185
3	1,634
4	1,195
5	1,669
6	1,172
M.O	1,364

Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 φαίνεται ότι η τάση συναρτήσει της μετατόπισης ακολουθεί παρόμοια πορεία για τις δύο συστάσεις, δηλαδή αυξάνεται γραμμικά μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Ωστόσο στο Σχήμα 4.9 παρατηρείται μια μικρή διακύμανση της τάσης λόγω της ύπαρξης άχυρου.

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 4.3 και 4.4 φαίνεται ότι η προσθήκη άχυρου στο μίγμα των ωμοπλίνθων μειώνει αισθητά την αντοχή τους σε κάμψη.

Το πλήρες αρχείο των διαγραμμάτων για όλα τα δοκίμια για τη δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στο παράρτημα Δ.

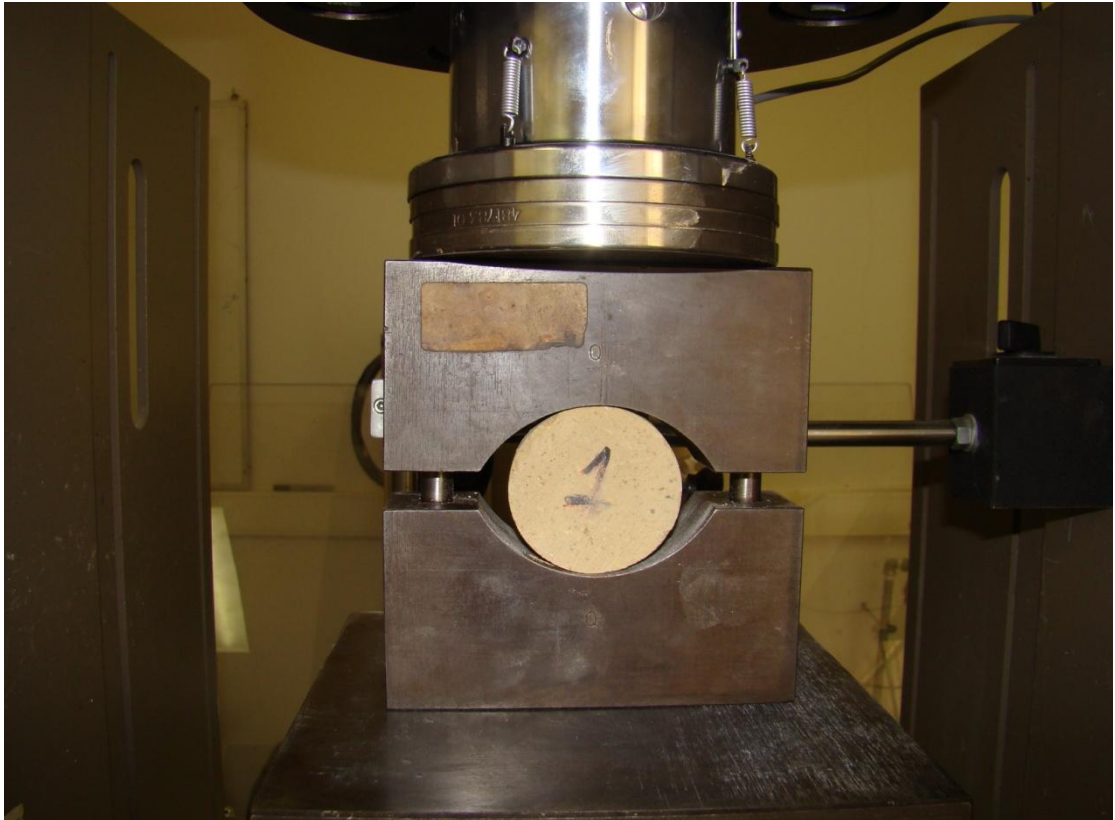
4.3 Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (Brazil)

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Υπό τις συνθήκες αυτές φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

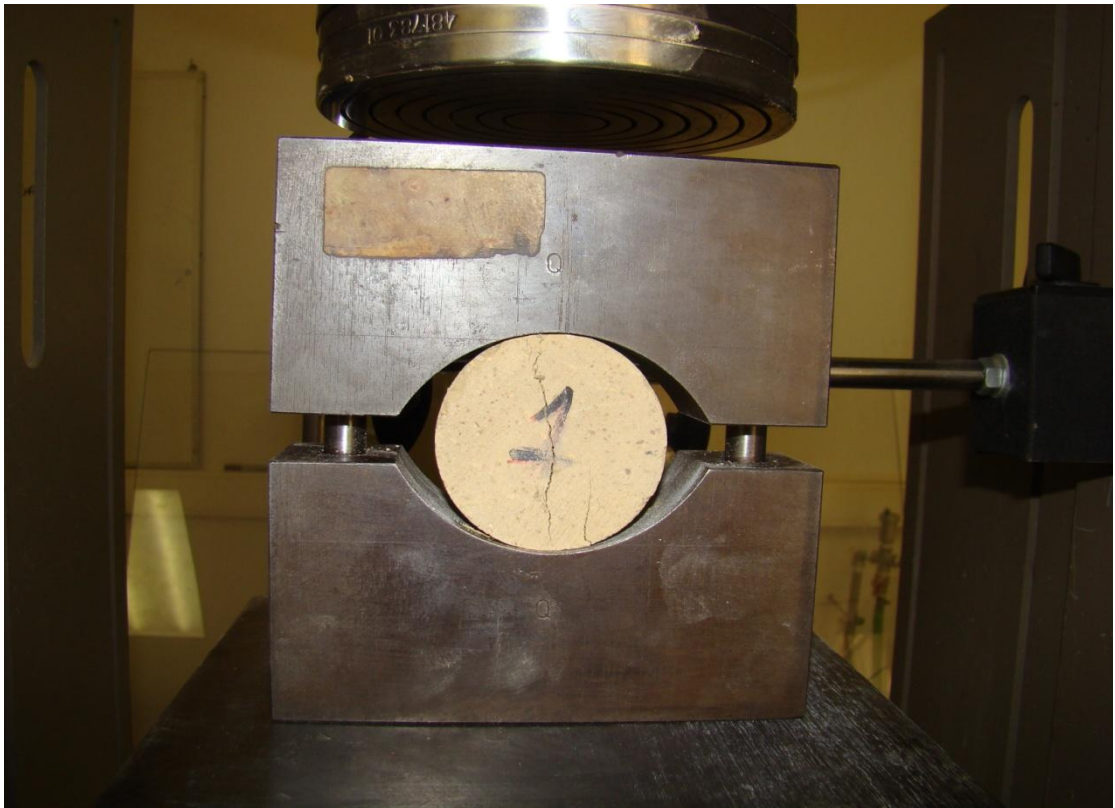
Η μέθοδος Brazil βασίζεται στην πειραματική παρατήρηση σύμφωνα με την οποία τα περισσότερα πετρώματα που βρίσκονται σε δισδιάστατα εντατικά πεδία αστοχούν σε εφελκυσμό όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση είναι θλιπτική με τιμή μικρότερη από το τριπλάσιο της εφελκυστικής (Αγιουτάντης, 2002).

Αρχικά από τους ωμοπλίνθους με τη χρήση κοπτικού μηχανήματος διαμορφώθηκαν δοκίμια τύπου Brazil. Μετρήθηκαν οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου με ακρίβεια 0,001mm. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν 200N/s. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται

φωτογραφία δοκιμίου στη συσκευή φόρτισης πριν αστοχήσει και στο Σχήμα 4.11 φωτογραφία δοκιμίου αφού έχει αστοχήσει.



Σχήμα 4.10: Φωτογραφία δοκιμίου πριν αστοχήσει στη συσκευή φόρτισης



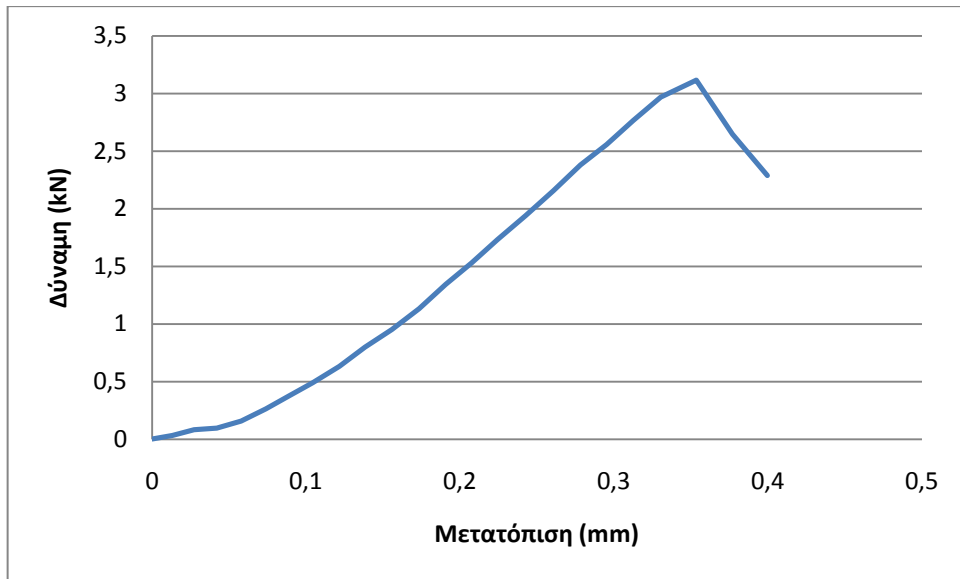
Σχήμα 4.11: Φωτογραφία δοκιμίου αφού έχει αστοχήσει στη συσκευή φόρτισης

Υπολογίστηκε η αντοχή σε εφελκυσμό (T_0) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Αγιουτάντης, 2002):

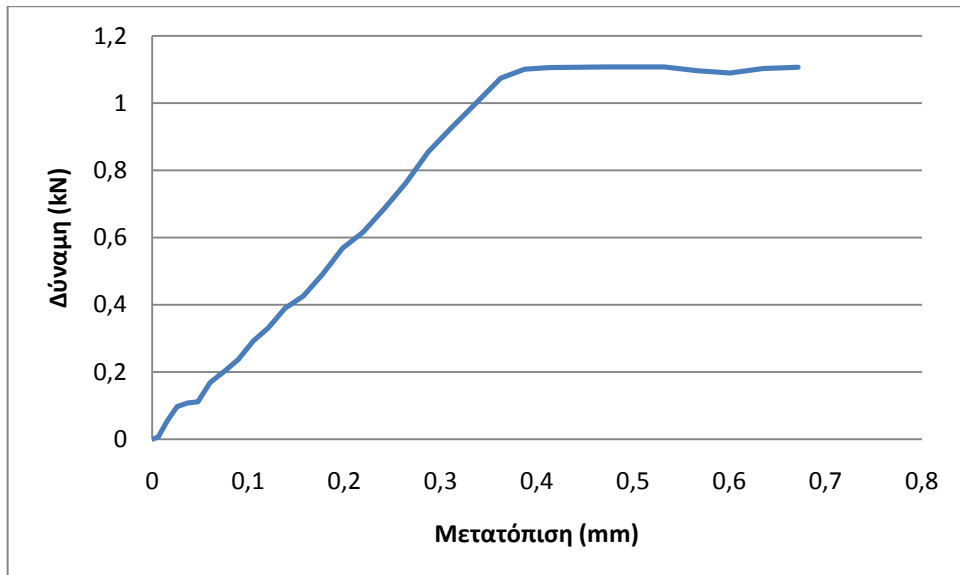
$$T_0 = \frac{2 F_{\max}}{\pi D t} \quad (\text{MPa})$$

Όπου: $F_{\max}$ το μέγιστο φορτίο που δέχτηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει, D η διάμετρος και t το πλάτος του δοκιμίου.

Στη συνέχεια έγιναν τα διαγράμματα δύναμης- μετατόπισης. Παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά διαγράμματα ένα για κάθε σύσταση. Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται το διάγραμμα για ωμόπλινθο χωρίς άχυρο και στο Σχήμα 4.13 το διάγραμμα ωμόπλινθου με άχυρο. Επιπλέον παρουσιάζονται οι πίνακες των τιμών εφελκυστικής αντοχής για κάθε δοκίμιο για κάθε σύσταση καθώς και οι μέσοι όροι αυτών (Πίνακας 4.5 και Πίνακας 4.6).



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για δοκίμιο χωρίς άχυρο



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για δοκίμιο με άχυρο

Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμών χωρίς άχυρο και οι μέσοι όροι αυτών

Δοκίμιο	T₀ (MPa)
1	1,547
2	1,184
3	1,523
4	1,550
5	1,429
6	1,675
M.O	1,485

Πίνακας 4.6: Τιμές αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμών χωρίς με και οι μέσοι όροι αυτών

Δοκίμιο	T₀ (MPa)
1	0,603
2	0,547
3	0,611
4	0,818
5	0,700
6	0,649
M.O	0,655

Τα δοκίμια και των δύο συστάσεων ακολούθησαν παρομοιο τρόπο θραύσης δηλαδή η ρωγμή αναπτύχθηκε παράλληλα με τον άξονα φόρτισης.

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 4.5 και 4.6 φαίνεται ότι η προσθήκη άχυρου στο μίγμα των ωμοπλίνθων μειώνει αισθητά την αντοχή τους σε κάμψη.

Το πλήρες αρχείο των διαγραμμάτων για όλα τα δοκίμια για τη δοκιμή της αντιδιαμετρικής θλίψης παρουσιάζονται στο παράρτημα Ε.

4.4 Δοκιμές διάτμησης

Στόχος της δοκιμής διάτμησης ήταν η πειραματική διερεύνηση των αιτίων ψαθυρής αστοχίας της διεπιφάνειας ωμοπλίνθου και πηλοκονιάματος στην τοιχοποιία, η οποία προκαλείται από το συνδυασμό διατμητικής και ορθής τάσης παράλληλα και κάθετα στον αρμό αντίστοιχα. Αυτή η ψαθυρή αστοχία αποτελεί βασική αδυναμία της τοιχοποιίας από τη σκοπιά της μηχανικής.

Οι δοκιμές διάτμησης έγιναν σε διπλέτες, δηλαδή δύο ωμόπλινθοι δομημένοι με ενδιάμεσο πηλοκονίαμα. Οι διπλέτες πριν τις δοκιμές διάτμησης δοκίμια καλύφθηκαν με λεπτή στρώση αυτοεπιπεδούμενης τσιμεντοκονίας όπως και στην δοκιμή θλίψης. Στη συνέχεια μετρήθηκαν οι διαστάσεις κάθε διπλέτας με ακρίβεια 0,001 mm. Οι δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενη μετατόπιση, με ρυθμό 0,01% mm/s της πλήρους κλίμακας μετατόπισης μηχανής, το οποίο για 50mm εύρος πλήρους κλίμακας της μηχανής ισοδυναμεί με 0,005mm/s.

Για την τοποθέτηση των δοκιμών στο πλαίσιο φόρτισης κατασκευάστηκαν ειδικές βάσεις στήριξης μέσω των οποίων η κατακόρυφη ασκούμενη δύναμη μπορεί να μεταφερθεί στο δοκίμιο σε δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα το καθένα από τα οποία σχηματίζει γωνία 45° με την κατακόρυφο. Οι κεκλιμένες βάσεις στήριξης των ωμοπλίνθων είχαν δυνατότητα περιστροφής κατά άξονες ορθογώνιους μεταξύ τους και με τον άξονα φόρτισης, ώστε να μπορεί να εξασφαλιστεί η σωστή έδραση των ωμοπλίνθων. Η γωνία της κατακόρυφης τάσης με το επίπεδο αστοχίας υπολογίστηκε περίπου ίση με 135° . Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται φωτογραφία της διπλέτας στη συσκευή διάτμησης πριν αστοχήσει και στο Σχήμα 4.15 φωτογραφία της διπλέτας αφού έχει αστοχήσει.



Σχήμα 4.14: Φωτογραφία διπλέτας πριν αστοχήσει στη συσκευή διάτμησης



Σχήμα: 4.15: Φωτογραφία διπλέτας αφού έχει αστοχήσει στη συσκευή διάτμησης

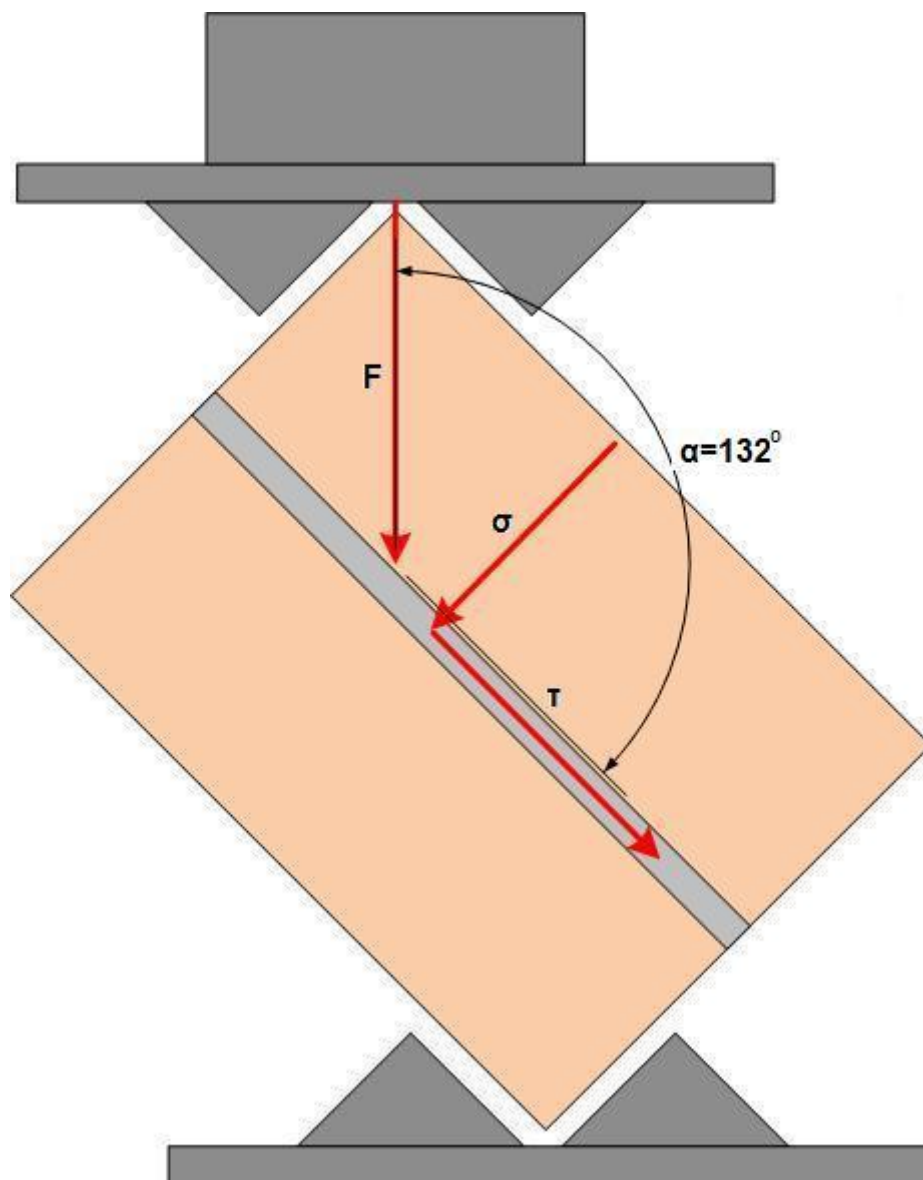
Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ορθή τάση (σ) στο επίπεδο διάτμησης και η διατμητική τάση (τ) στο επίπεδο διάτμησης από τους παρακάτω τύπους (Vutukuri, et al,1974):

$$\sigma = \frac{F \sin \alpha}{bl}$$

$$\tau = \frac{F \cos \alpha}{bl}$$

Όπου: F η κατακόρυφη δύναμη, α η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφη δύναμη F με το επίπεδο αστοχίας, b το πλάτος του επιπέδου αστοχίας και l το μήκος της επιφάνειας αστοχίας.

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η διάταξη της συσκευής κάμψης, καθώς και η δύναμη F και οι τάσεις σ, τ

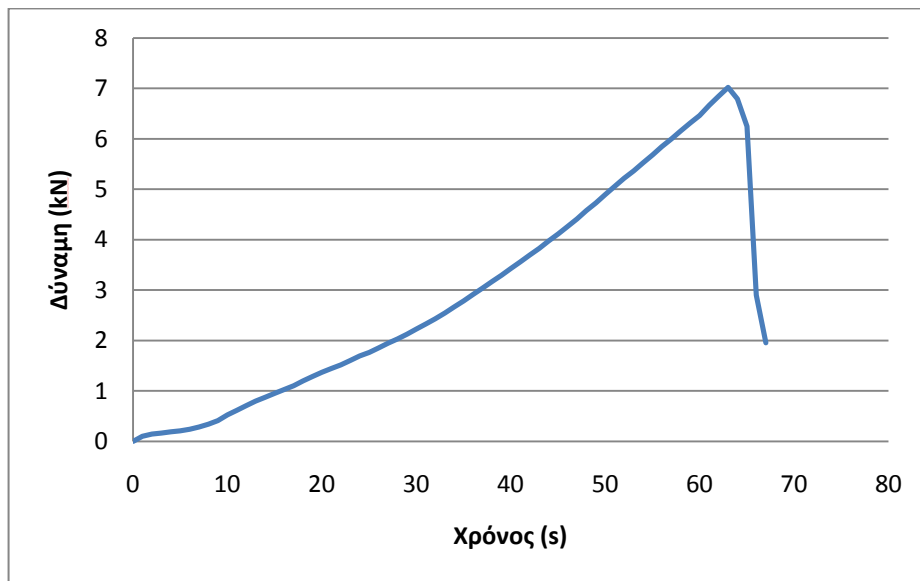


Σχήμα 4.16: Απεικόνιση της δύναμης F και των τάσεων σ, τ

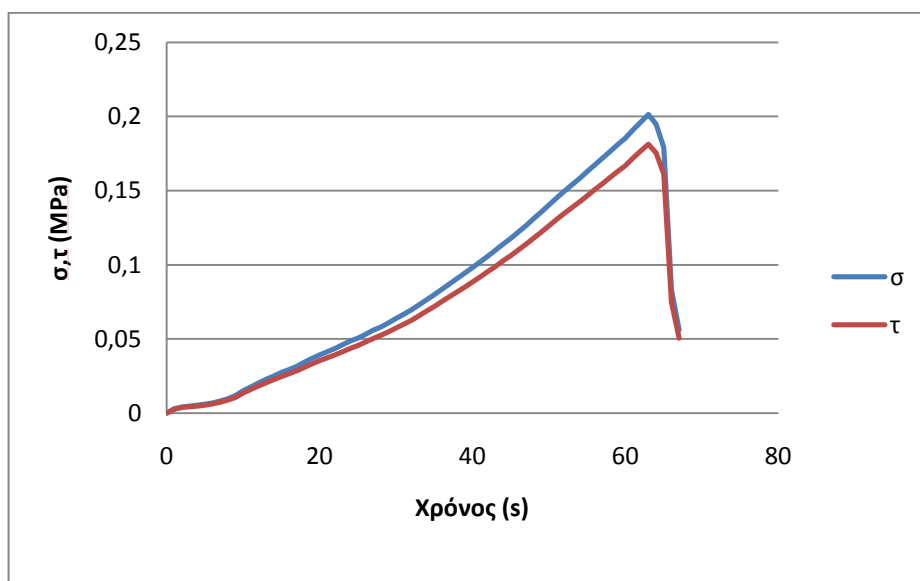
Είναι γενικά αποδεκτό, ότι οι βασικές αδυναμίες της τοιχοποιίας από τη σκοπιά της μηχανικής συμπεριφοράς, είναι η μικρή εφεκυστική αντοχή και η ανεπαρκής και ψαθυρή απόκριση σε οριζόντια φορτία. Αυτό οφείλεται στον ψαθυρό χαρακτήρα των πλίνθων, του κονιάματος και ιδιαίτερα στην ύπαρξη της διεπιφάνειας μεταξύ τους κατά μήκος των οριζόντιων αρμών που είναι τα αδύνατα επίπεδα της τοιχοποιίας. Η αδυναμία των αρμών οφείλεται όχι μόνο στις χαμηλές μηχανικές αντοχές του κονιάματος, αλλά και στο συνδυασμό των δράσεων της διατμητικής και ορθής τάσης

παράλληλα και κάθετα στον αρμό αντίστοιχα, καθώς και της εφελκυστικής τάσης που ευθύνονται για την ψαθυρή αστοχία της διεπιφάνειας πλίνθου και κονιάματος (Μπέη, 2004).

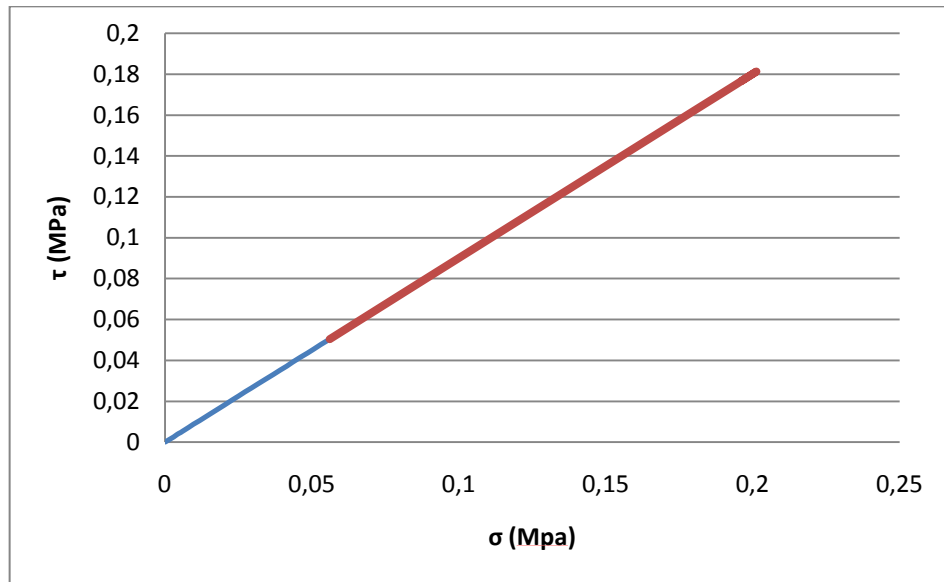
Παρουσιάζονται τρία ενδεικτικά διαγράμματα ένα για κάθε σύσταση. Στο Σχήμα 4.17 στο Σχήμα 4.18 και στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζονται διαγράμματα για ωμόπλινθο χωρίς άχυρο και στο Σχήμα 4.20, Σχήμα 4.21 και Σχήμα 4.22 διαγράμματα ωμόπλινθου με άχυρο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες των τιμών σ και τ για κάθε δοκίμιο για κάθε σύσταση (Πίνακας 4.7 και Πίνακας 4.8).



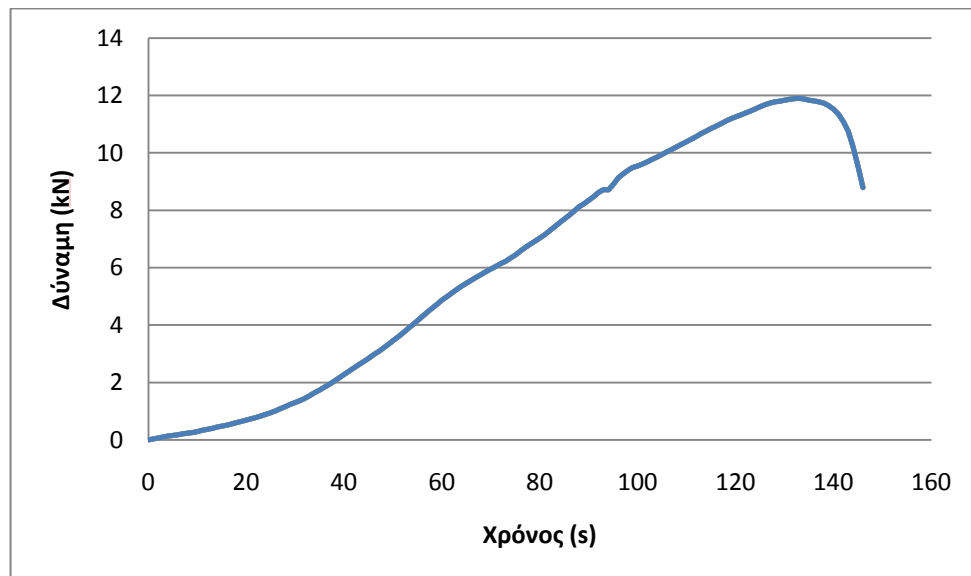
Σχήμα 4.17: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για δοκίμιο χωρίς άχυρο



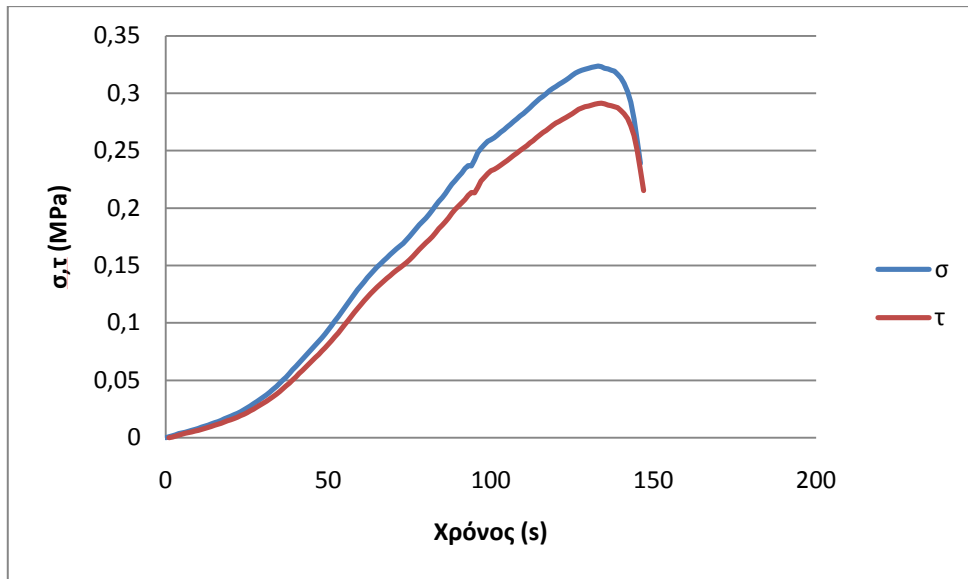
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ορθής και διατμητικής τάσης-χρόνου για δοκίμιο χωρίς άχυρο



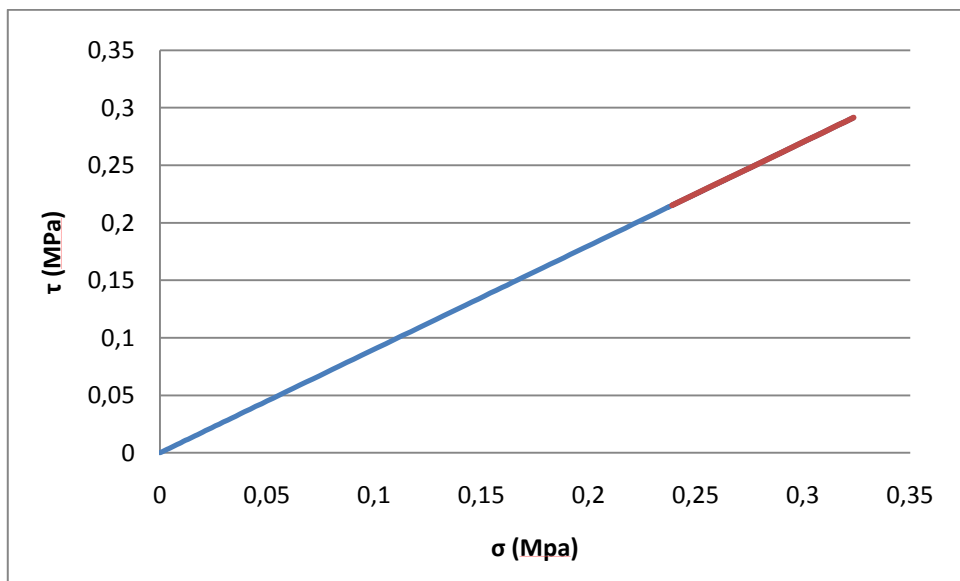
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα διατμητικής τάσης-ορθής τάσης για δοκίμιο χωρίς άχυρο



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για δοκίμιο με άχυρο



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα ορθής και διατμητικής τάσης-χρόνου για δοκίμιο με άχυρο



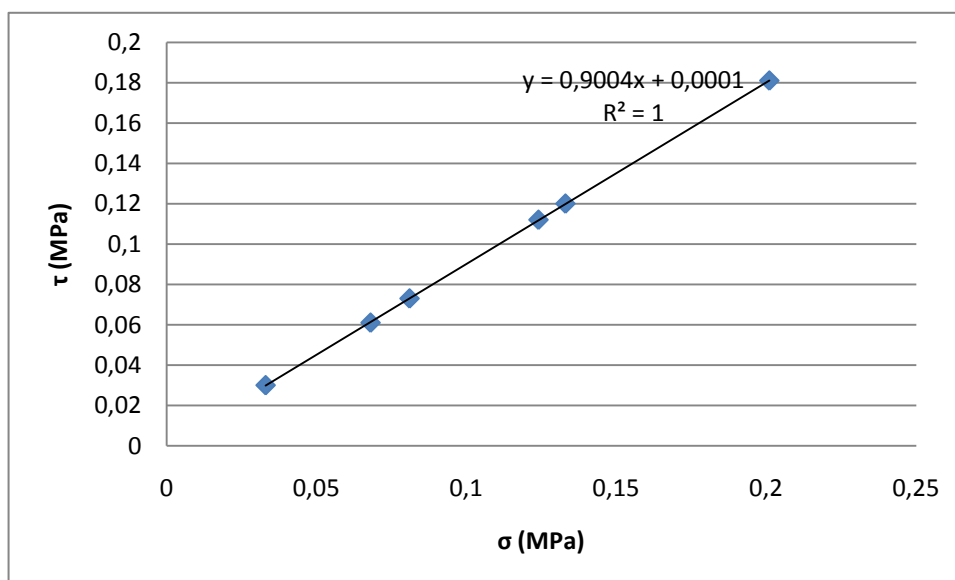
Σχήμα 4.22 : Διάγραμμα διατμητικής τάσης-ορθής τάσης για δοκίμιο με άχυρο

Πίνακας 4.7: Τιμές ορθής και διατμητικής τάσης των δοκιμών χωρίς άχυρο

Δοκίμιο	σ (MPa)	τ (MPa)
1	0,201	0,181
2	0,133	0,120
3	0,081	0,073
4	0,124	0,112
5	0,068	0,061
6	0,033	0,030

Πίνακας 4.8: Τιμές ορθής και διατμητικής τάσης των δοκιμών με άχυρο

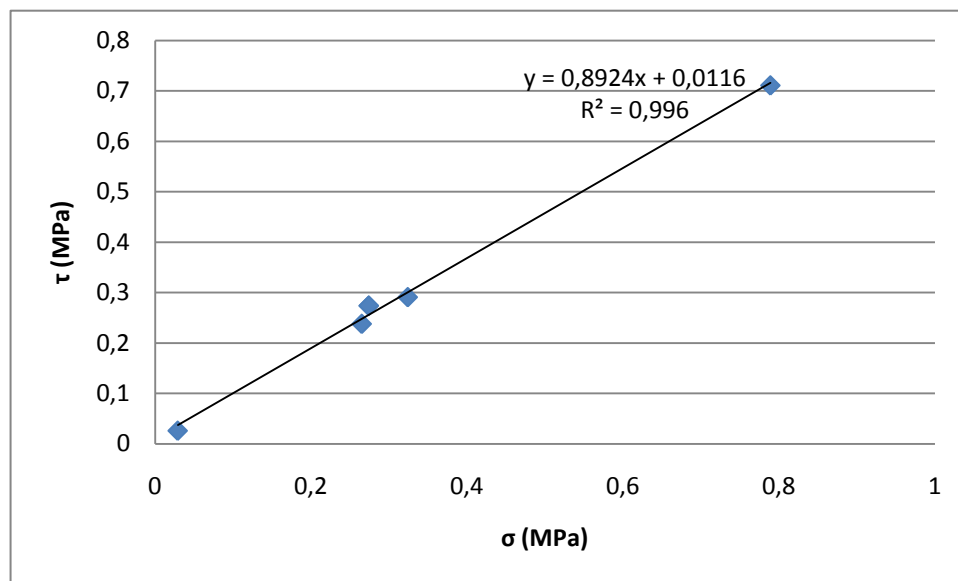
Δοκίμιο	σ (MPa)	τ (MPa)
1	0,324	0,291
2	0,274	0,274
3	0,029	0,026
4	0,789	0,711
5	0,274	0,274
6	0,265	0,238



Σχήμα 4.23 : Διάγραμμα μέγιστων διατμητικών τάσεων - αντίστοιχων ορθών τάσεων

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές τάσεις ως προς τις αντίστοιχες ορθές τάσεις οι οποίες συσχετίζονται με ευθεία στο διάγραμμα σ - τ . Ο

συντελεστής συσχέτισης (R^2) είναι ίσος με 1. Η αποτέμνουσα στον άξονα τ αντιστοιχεί με τη συνοχή ($S_0=0,0001$) της διεπιφάνειας (ωμοπλίνθου- πηλοκοκονιάματος). Η κλίση της ευθείας ισούται με 42° που αποτελεί τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) της διεπιφάνειας (ωμοπλίνθου- πηλοκοκονιάματος).



Σχήμα 4.24 : Διάγραμμα μέγιστων διατμητικών τάσεων - αντίστοιχων ορθών τάσεων

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές τάσεις ως προς τις αντίστοιχες ορθές τάσεις οι οποίες συσχετίζονται με ευθεία στο διάγραμμα σ-τ. Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) είναι ίσος με 1. Η αποτέμνουσα στον άξονα τ αντιστοιχεί με τη συνοχή ($S_0=0,0116$) της διεπιφάνειας (ωμοπλίνθου- πηλοκοκονιάματος). Η κλίση της ευθείας ισούται με $41,7^\circ$ που αποτελεί τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) της διεπιφάνειας (ωμοπλίνθου- πηλοκοκονιάματος).

Στο Σχήμα 4.17 και Σχήμα 4.20 δίνονται τα διαγράμματα δύναμης-χρόνου για τις δύο συστάσεις. Στο πρώτο η απόκριση είναι σχεδόν γραμμική ενώ η καμπύλη στρέφει τα κοίλα της προς τα πάνω. Στο δεύτερο υπάρχει μία σαφής καμπυλότητα της απόκρισης όπου τα κοίλα στρέφονται προς τα κάτω, εμφανίζοντας πλαστική περιοχή.

Όσον αφορά τη θραύση το δοκίμιο χωρίς άχυρο αστοχεί απότομα ενώ το δοκίμιο με άχυρο παρουσιάζει παραμένουσα αντοχή μετά τη θραύση.

Στο Σχήμα 4.18 και Σχήμα 4.21 δίνονται τα διαγράμματα ορθής και διατμητικής τάσης συναρτήσει του χρόνου. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν αντίστοιχη μορφή με αυτά της δύναμης-χρόνου όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Στο Σχήμα 4.19 και Σχήμα 4.22 δίνονται τα διαγράμματα διατμητικής τάσης ως συνάρτηση της ορθής τάσης έτσι όπως εξελίσσονται σε κάθε πείραμα. Παρατηρείται και στις δυο περιπτώσεις ότι η μορφή της καμπύλης ακολουθεί μια γραμμική σχέση (σ-τ). Μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής η διαδρομή αποφόρτισης επανέρχεται στις χαμηλότερες τιμές ακολουθώντας τη διαδρομή φόρτισης.

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 4.7 και 4.8 φαίνεται ότι η προσθήκη άχυρου στο μίγμα των ωμοπλίνθων μειώνει την αντοχή τους σε κάμψη.

Το πλήρες αρχείο των διαγραμμάτων για όλα τα δοκίμια για τη δοκιμή διάτμησης παρουσιάζεται στο παράρτημα ΣΤ.

Κεφάλαιο 5^ο Συμπεράσματα και προτάσεις

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση μηχανικών ιδιοτήτων των ωμοπλίνθων, καθώς και η συσχέτιση των ιδιοτήτων αυτών με τη σύσταση τους. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν ωμόπλινθοι δύο συστάσεων (χωρίς άχυρο και με άχυρο) και έγιναν οι ακόλουθες δοκιμές:

- Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε μεμονωμένα δοκίμια ωμοπλίνθων
- Δοκιμές κάμψης σε μεμονωμένα δοκίμια ωμοπλίνθων
- Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil)
- Δοκιμές διάτμησης σε διπλέτες (δύο ωμόπλινθοι δομημένοι με ενδιάμεσο πηλοκονίαμα)

Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία των μετρήσεων, κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα και υπολογίστηκαν οι επιμέρους παράμετροι. Στον Πίνακα 5.1 δίνονται τα συνοπτικά αποτελέσματα για τις αντοχές που υπολογίστηκαν καθώς και για το μέσο μέτρο ελαστικότητας (E) τη συνοχή (S_0) και τη γωνία εσωτερικής τριβής (φ) της διεπιφάνειας πηλοκοκιάματος-ωμοπλίνθου.

Πίνακας 5.1: Μέσοι όροι παραμέτρων για τα δοκίμια με άχυρο και χωρίς άχυρο και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών

Παράμετροι	Μ.Ο τιμών για δοκίμια χωρίς άχυρο και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών (MPa)	Μ.Ο τιμών για δοκίμια με άχυρο και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών (MPa)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	2,954 ± 0,408	1,664 ± 0,218
Αντοχή σε κάμψη	3,096 ± 1,152	1,364 ± 0,230
Αντοχή σε εφελκυσμό	1,485 ± 0,167	0,655 ± 0,095
Αντοχή σε διάτμηση	$S_0=0,0001$ $\varphi=42^\circ$	$S_0=0,0116$ $\varphi=41,7^\circ$
Μέτρο ελαστικότητας	1172,201 ± 354,783	326,874 ± 144,575

Εν γένει από όλες τις δοκιμές (Πίνακας 5.1) συνάγεται ότι η προσθήκη άχυρου στο μείγμα παρασκευής των ωμοπλίνθων μειώνει αισθητά τις μηχανικές αντοχές τους εκτός από τις διατμητικές αντοχές. Επιπλέον μειώνει το μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο προσδίδει μια συνιστώσα πλαστικής συμπεριφοράς η οποία φαίνεται από τις δοκιμές

που έγιναν. Επίσης όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία η προσθήκη άχυρου βελτιώνει κάποια χαρακτηριστικά (π.χ θερμομονωτικές ιδιότητες) που είναι επιθυμητά στη δόμηση.

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil) ενώ αναμενόταν (Μπέη, 2004) το άχυρο να αυξήσει την εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων παρατηρήθηκε από τις δοκιμές το αντίθετο.

Προτάσεις

Προτείνεται η διερεύνηση των ακόλουθων θεμάτων τα οποία θεωρείται ότι θα συντελέσουν στην καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη χαρακτηρισμό των υλικών αυτών.

- Η αυξομείωση του ποσοστού άχυρου στο μίγμα παρασκευής των ωμόπλινθων έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη σχέση μηχανικών αντοχών και άλλων φυσικών παραμέτρων.
- Ο πειραματικός υπολογισμός της διατμητικής αντοχής συναρτήσει του πάχους του πηλοκονιάματος.
- Η μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής σε μεγαλύτερα δοκίμια ωμοπλίνθων από αυτά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία με διαστάσεις που να προσεγγίσουν τις διαστάσεις εφαρμογής τους.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγιουτάντης Ζ.Γ. (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
- Μπέη Γ. (2004). Τοιχοποιία από πηλό: πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων και τοίχων από Συμπιεσμένες Ωμόπλινθους, διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ.
- Γεωργακοπούλου Ο. και Μ (2008). Δόμηση με πηλό, Διπλωματική εργασία Α.Π.Θ
- Στειακάκης Ε. (2010). Εργαστηριακές ασκήσεις τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Houben H.and Guillaud H. (1994). Earth construction – A Comprehensive Guide, Intermediate Technology Publications, London
- Lama R.D and Vutukuri V.S. (1974). Handbook on Mechanical Propertier of Rocks, Testing Techiquer and Results
- Leroux A., Toubeau P. (1987). Importance des minéraux accessoires dans la terre stabili-sée, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, no 149, p.7-11, Mai- Juin
- Meshyawn S.R (1995). Geotechnica 13 – Experimental theology of clayey soils,. ed. AA. Balkema
- Minke, G. (2000). Earth – Contstruction Handbook ,WITpress, Southampton
- Minke, G. (2006). Building With Earth – Design and Technology of a Sustainable Architecture', BIRKHAUSER
- Morel J.C., Mesbah A., Oggero M., Walker P.(2001). Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, Building and Environment, vol. 36, pp.1119-1126
- Vutukuri V.S., Lama R.D., Saluja S.S. (1974). Handbook on mechanical properties of rocks: Testing Techniques and Results, trans tech publications
- Hodder G., (1990) Structural design of earth buildings, Conference earth buildings for the 90's, p.105-128, Auckland, New Zealand

Προσωπική επικοινωνία

- Σταγκίδης Γ. (2010). Παραδοσιακός αγγειοπλάστης, Κολυνδό Πιερίας

Φωτογραφικό υλικό

- Αθανασόπουλος Γ. (1991). Ελληνική Παραδοσιακή Αρχιτεκτονική - Λαγκαδάς, Μέλισσα, Τόμος 8
- Ο. και Μ. Γεωργακοπούλου (2008). Δόμηση με πηλό, Διπλωματική εργασία Α.Π.Θ

Πίνακες

- Γεωργιάδου Ε. (1996). Βιοκλιματικός Σχεδιασμός και Καθαρές Τεχνολογίες Δόμησης, παρατηρητής, Θεσσαλονίκη

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Κοκκομετρική ανάλυση						
Ανάλυση μεγέθους κόκκων με κόσκινα (για διάμετρο κόκκων > 0.075 mm)						
Αρχική μάζα ξηρού δείγματος (g):			154,39			
Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος οπών d (mm)	Μάζα καθαρού κοσκίνου (g)	Μάζα κοσκ. με δείγμα (g)	Μάζα συγκρ. κόκκων (g)	Ποσοστό (%) συγκρ. κόκκων	Ποσοστό διερχ. κόκκων (%)
20	0,85	377,33	399,36	22,03	14,27	85,73
40	0,425	350,74	362,67	11,93	7,73	78,00
60	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	78,00
100	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	78,00
200	0,075	298,84	321,20	22,36	14,48	63,52
Συλλέκτης	-	282,72	380,77	98,05	63,51	-
				154,37	99,99	

Ανάλυση μεγέθους κόκκων με αραιόμετρο (για διάμετρο κόκκων < 0.075 mm)									
Μάζα ξηρού δείγματος (g):			40,56						
Ειδικό βάρος εδαφικών κόκκων:			2,67	Συντελεστής διόρθωσης ειδικού βάρους:			0,9955		
Διόρθωση μνήσκου (g):			0,50	Διόρθωση παράγοντα διασποράς (g):			-7,92		
Χρόνος (min)	Αρχ. ανάγνωση (g)	Θερμοκρασία (°C)	Ιξώδες (g·sec/cm ²)	Διόρθ. θερμοκρασίας (g)	Διορθ. ανάγνωσης (g)	Βάθος βύθισης (cm)	Διάμετρος κόκκων d (mm)	Ποσ. κόκκων εν αιωρήσει (%)	Ποσ. επί του συνόλου (%)
1	34	27,2	8,73E-06	4,08	30,7	11,29	0,0421	75,26	47,80
2	31	27,0	8,77E-06	4,02	27,6	11,73	0,0304	67,74	43,03
4	27	26,9	8,79E-06	3,99	23,6	12,30	0,0220	57,85	36,74
8	23	27,0	8,77E-06	4,02	19,6	12,87	0,0159	48,11	30,56
15	20	27,0	8,77E-06	4,02	16,6	13,30	0,0118	40,74	25,88
30	13	27,1	8,75E-06	4,05	9,6	14,29	0,0087	23,64	15,01
60	7	27,1	8,75E-06	4,05	3,6	15,15	0,0063	8,91	5,66
120	5	27,1	8,75E-06	4,05	1,6	15,43	0,0045	4,00	2,54

<u>Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας</u>					
Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός χτύπων	Μάζα υποδοχέα (g)	Μάζα υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Μάζα υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Υγρασία (%)
1	83	43,1	45,48	45,01	24,61
2	72	46,51	52,51	51,16	29,03
3	34	47,47	54,43	52,67	33,85
4	13	39,14	49,97	47,09	36,23
5	10	47,87	57,24	54,67	37,79

<u>Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας</u>					
Αριθμός δοκιμίου	Μάζα υποδοχέα (g)	Μάζα υποδοχέα με υγρό δείγμα (g)	Μάζα υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g)	Υγρασία (%)	
1	46,58	47,05	46,97	20,51	
2	47,39	47,75	47,7	16,13	
3	41	41,63	41,56	12,50	
4	42,84	43,35	43,29	13,33	

Παράρτημα Β

Φωτογραφική τεκμηρίωση κάλυψης δοκιμίων με αυτοεπιπεδούμενη τσιμεντοκονία

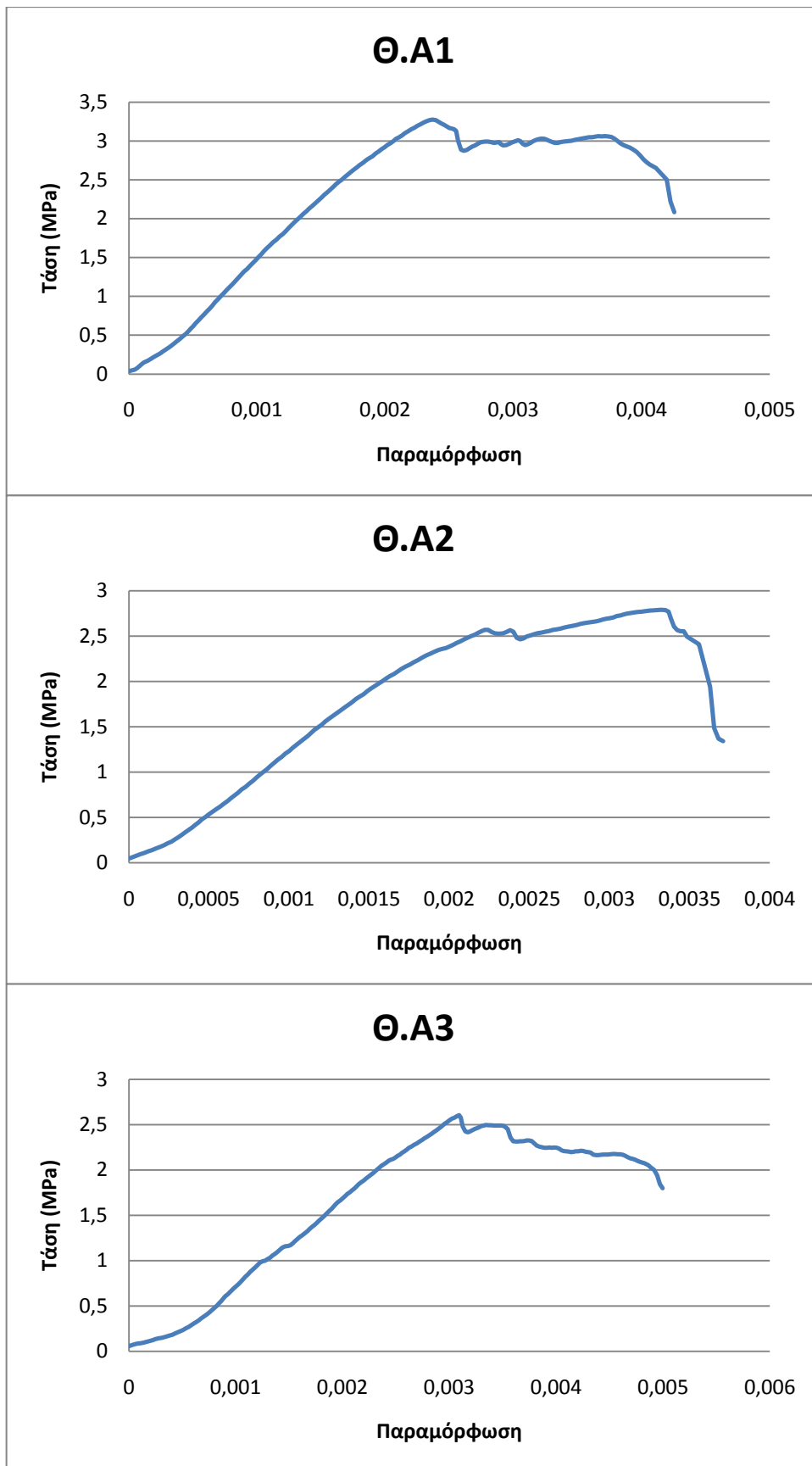


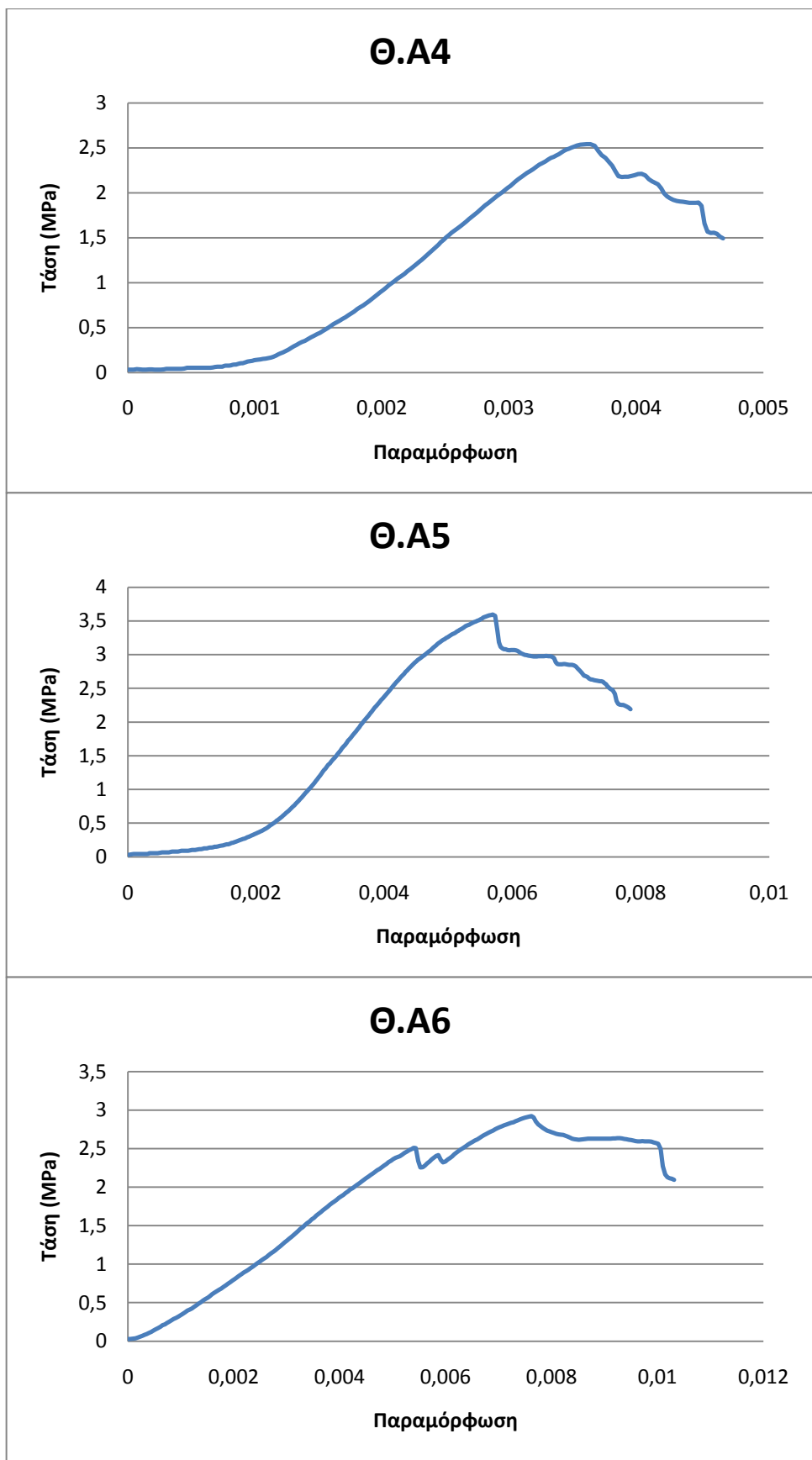


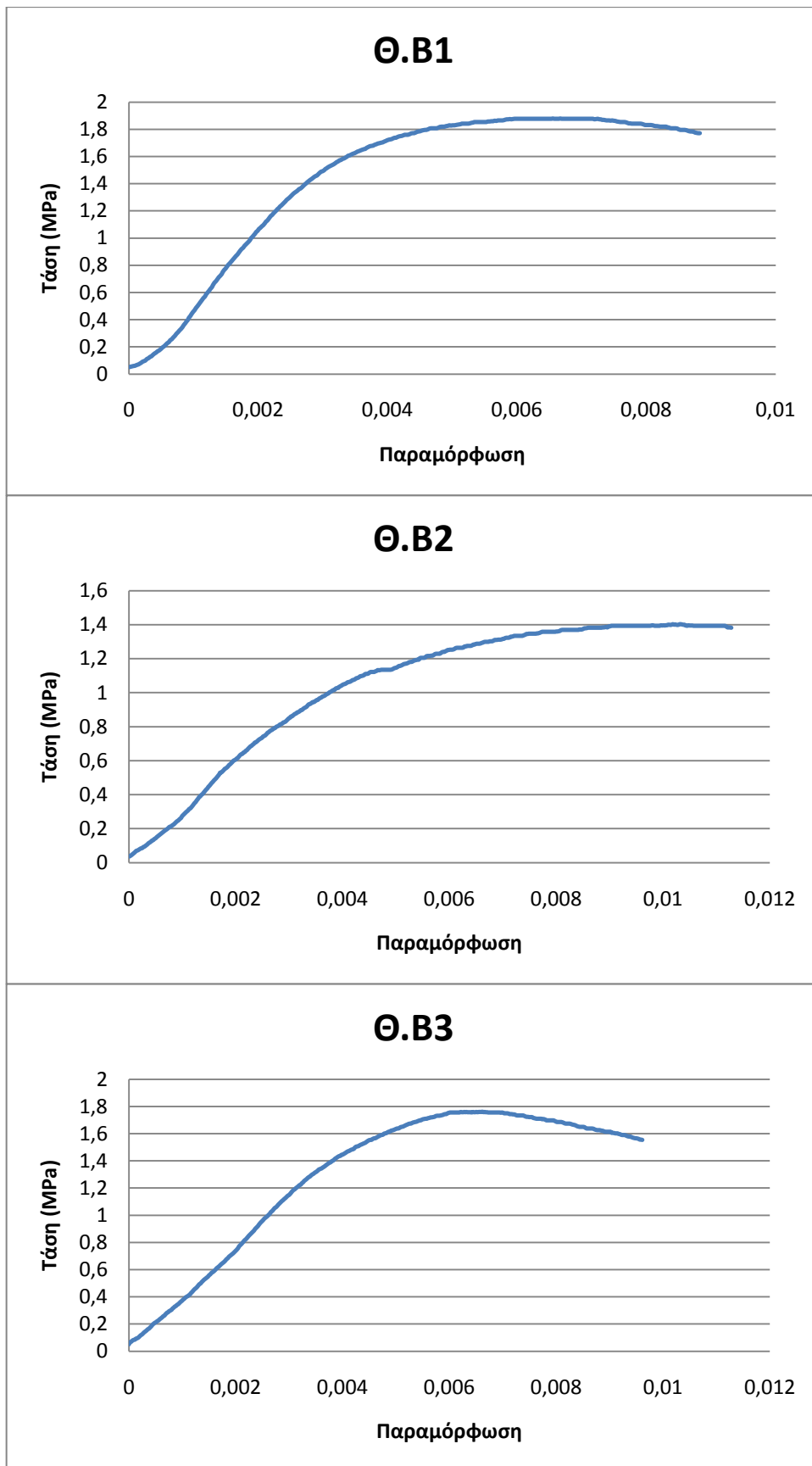


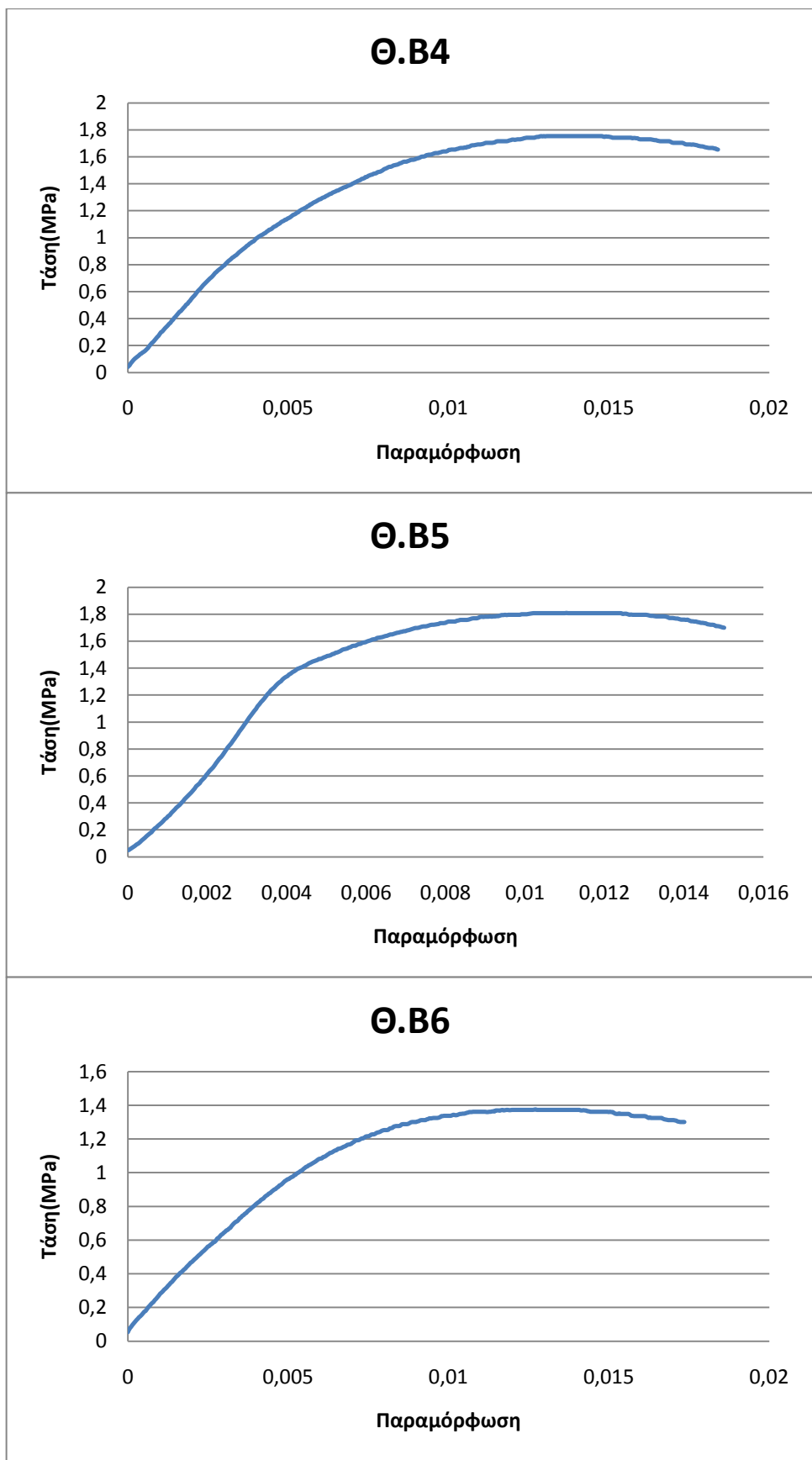
Παράρτημα Γ

Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης



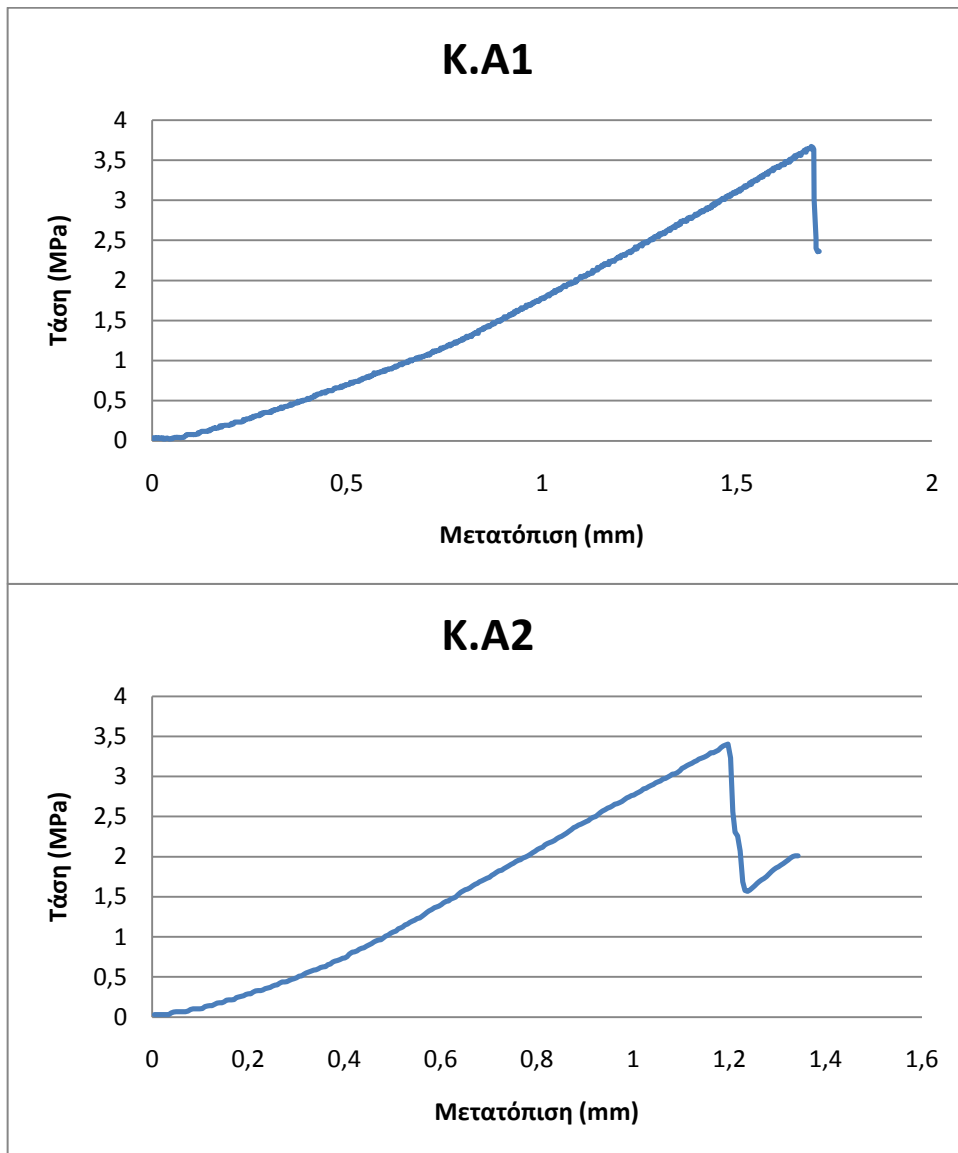


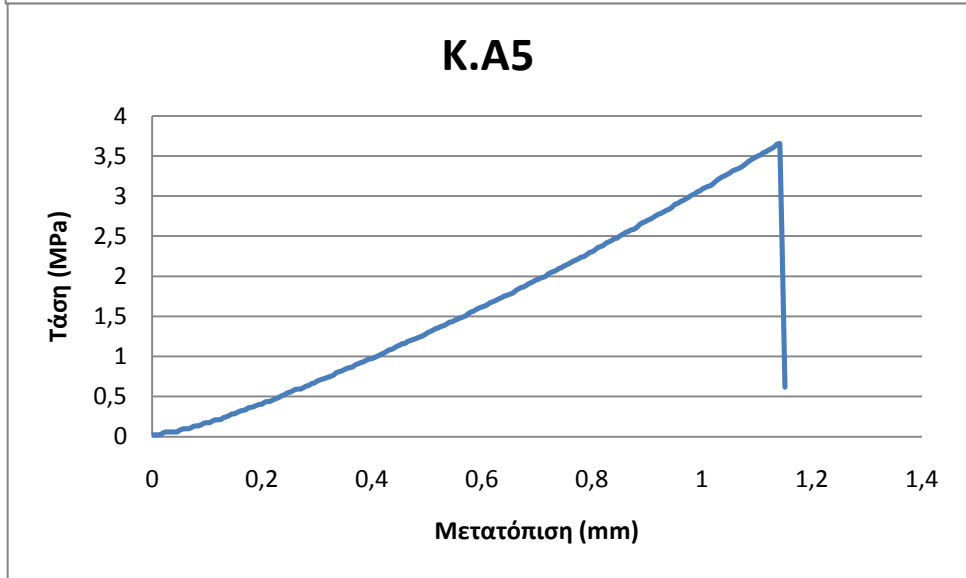
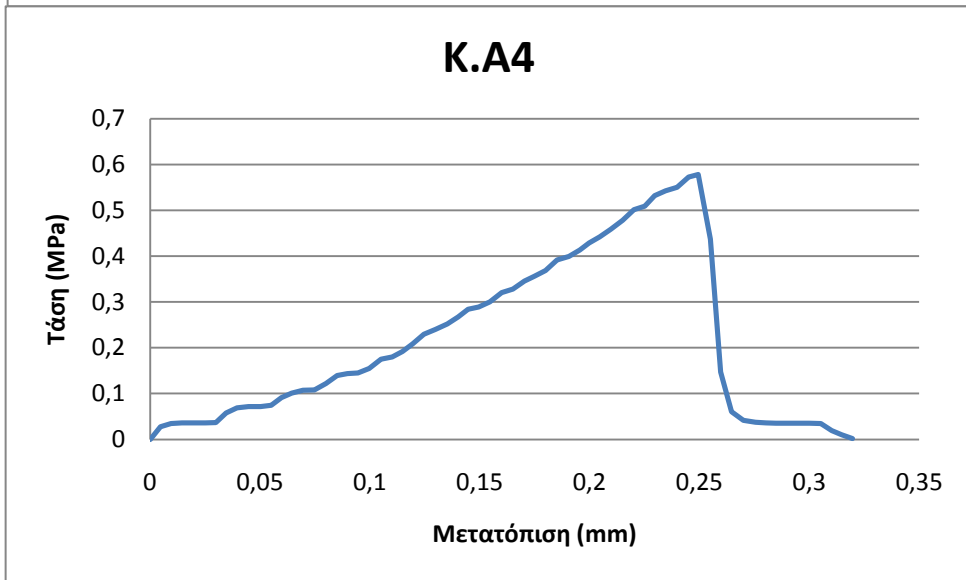
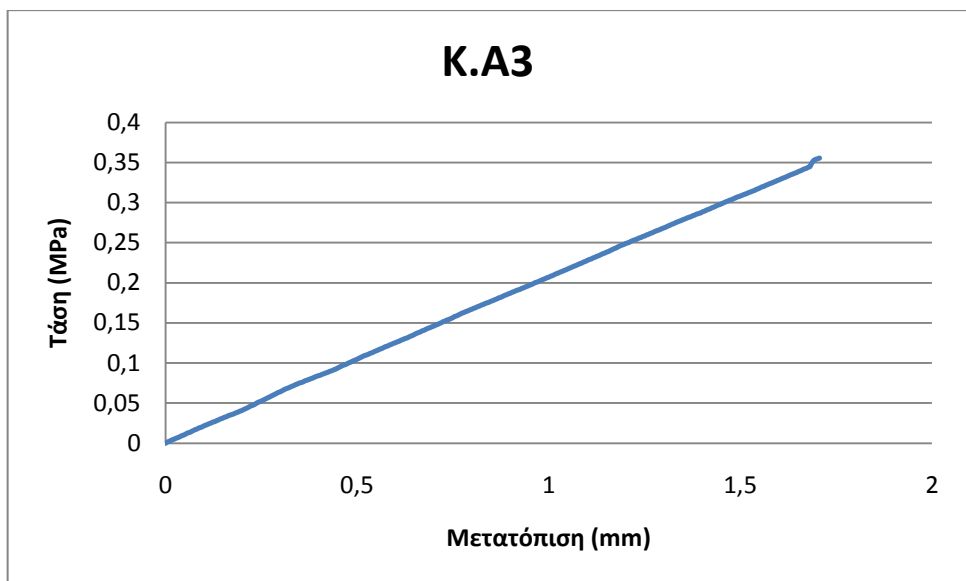


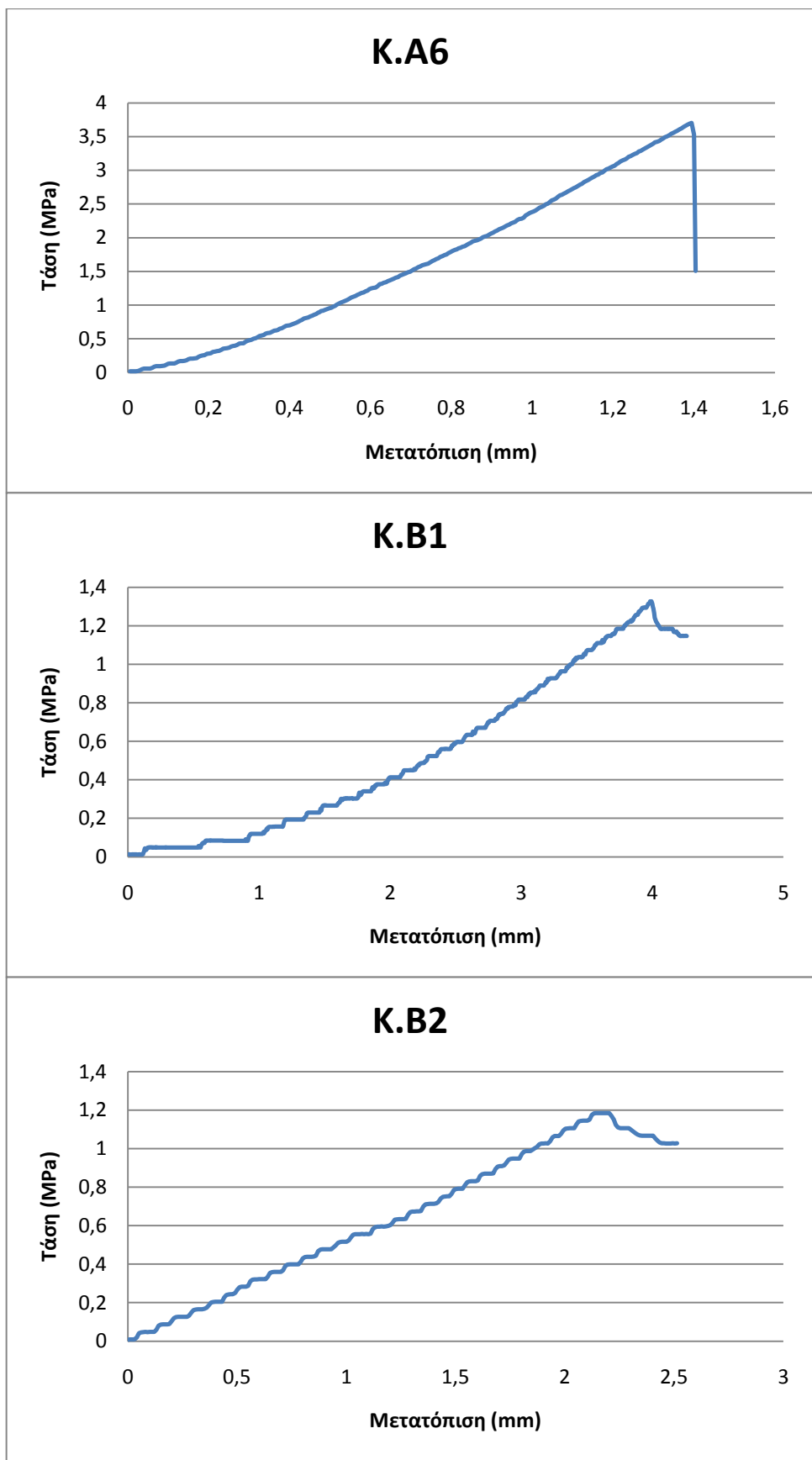


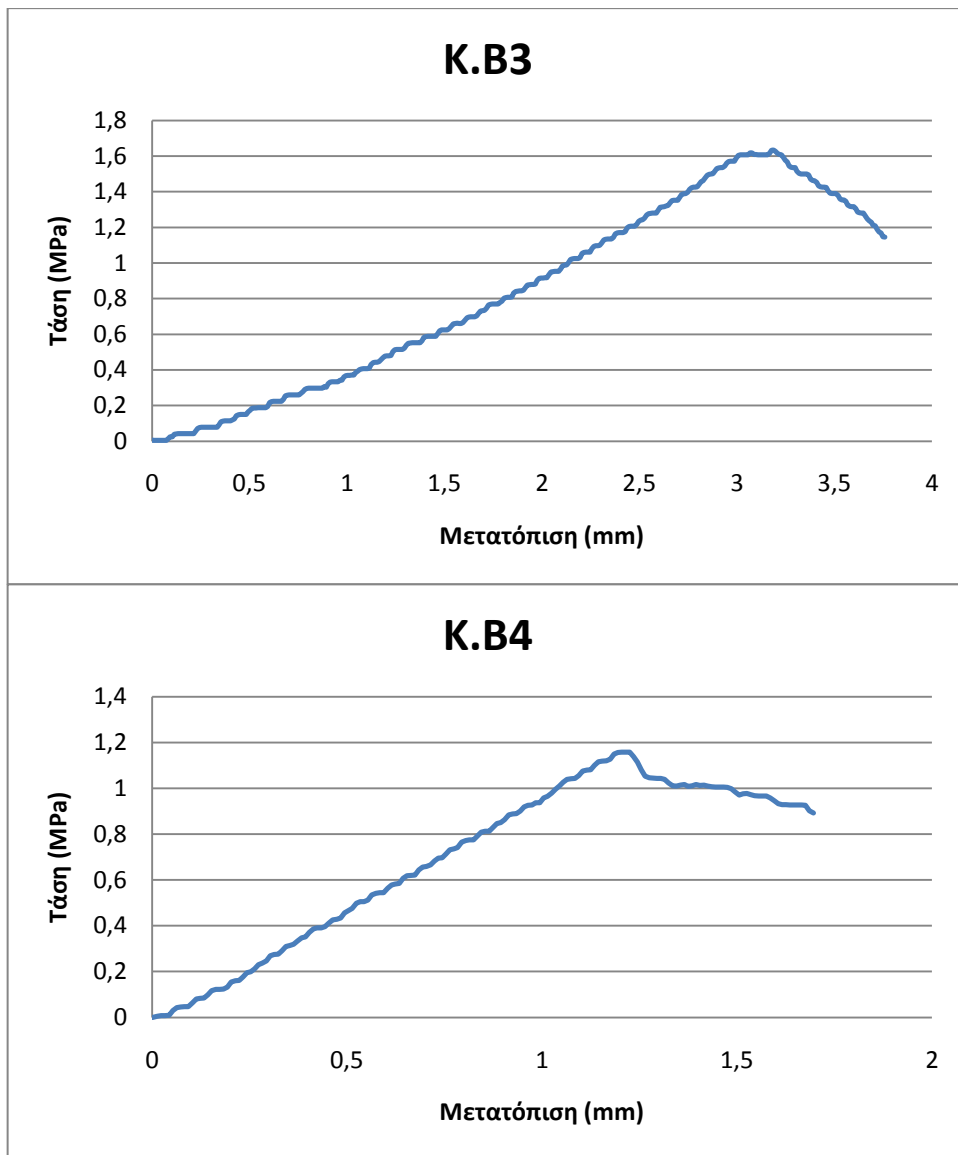
Παράρτημα Δ

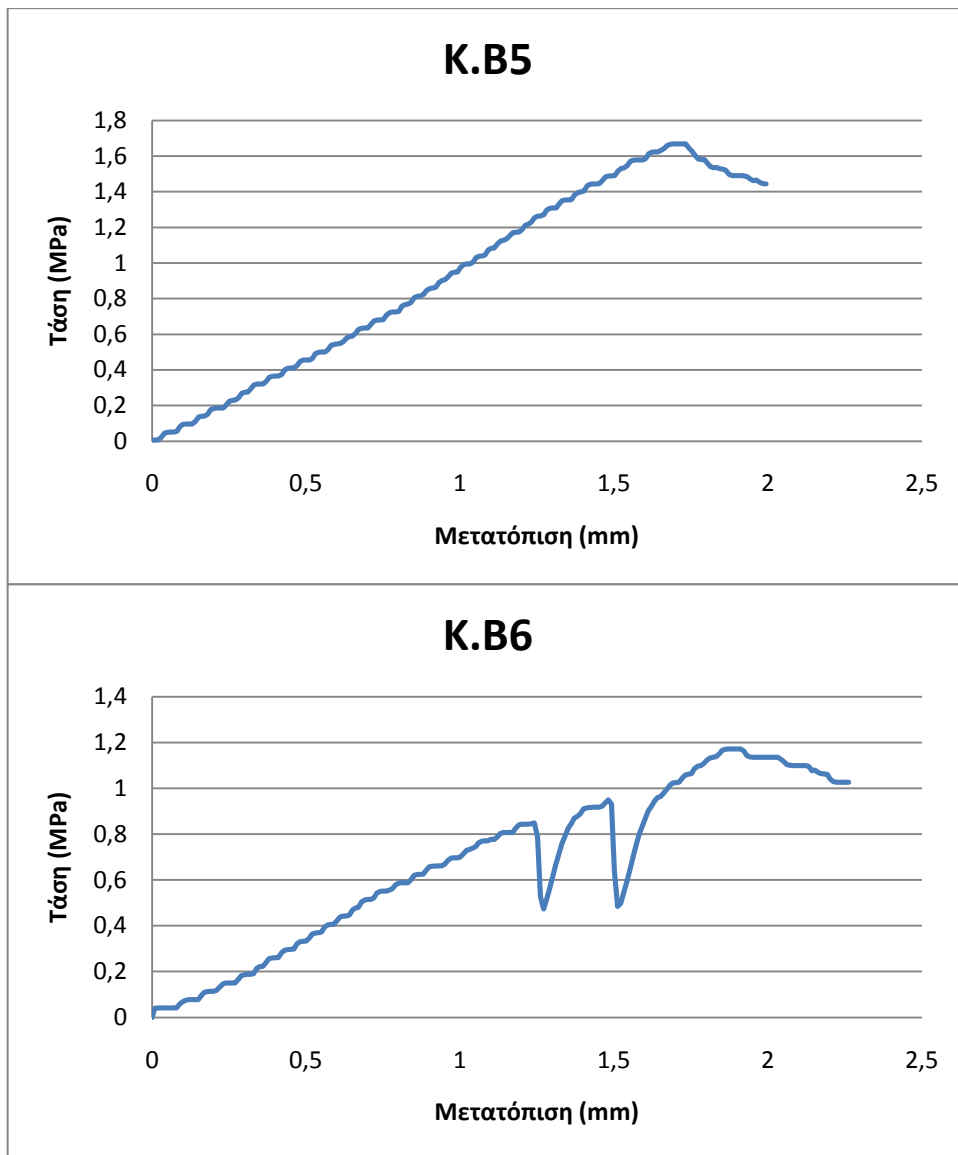
Διαγράμματα τάσης-μετατόπισης για τη δοκιμή της κάμψης







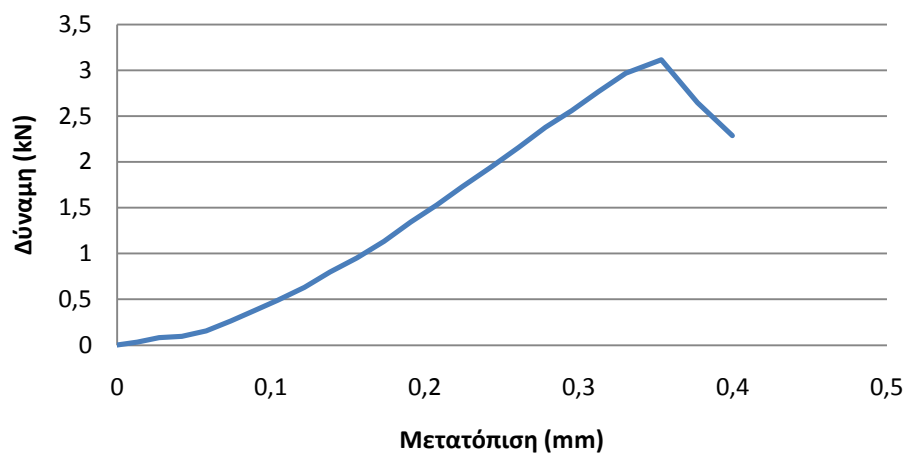




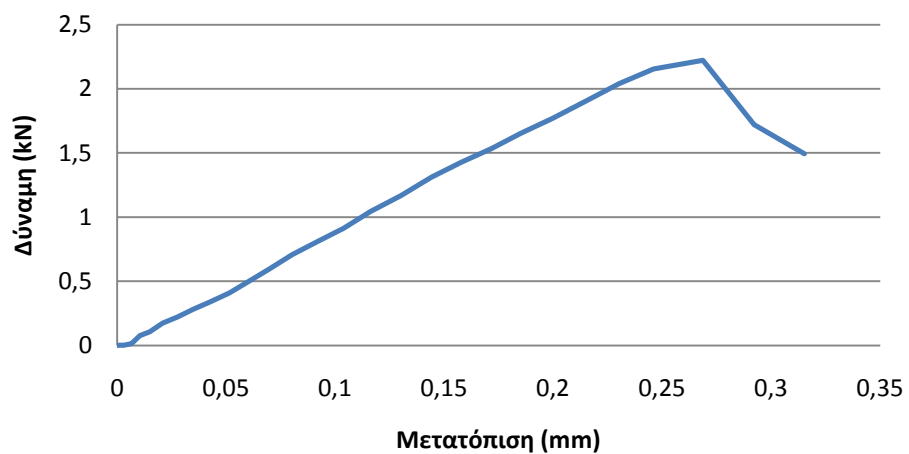
Παράρτημα Ε

Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης για τη δοκιμή της αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil)

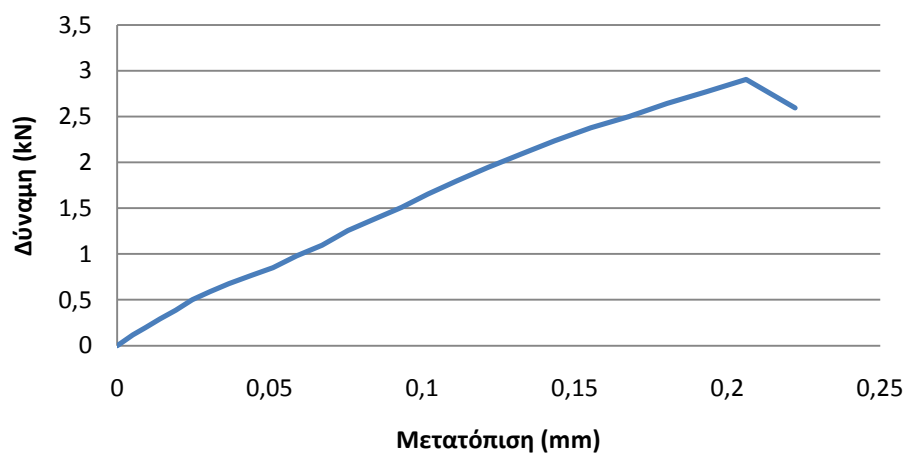
Ε.Α1



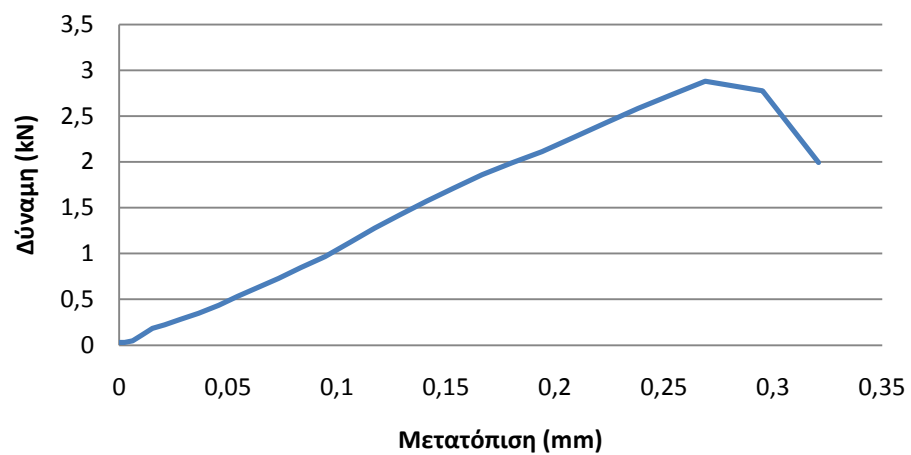
Ε.Α2



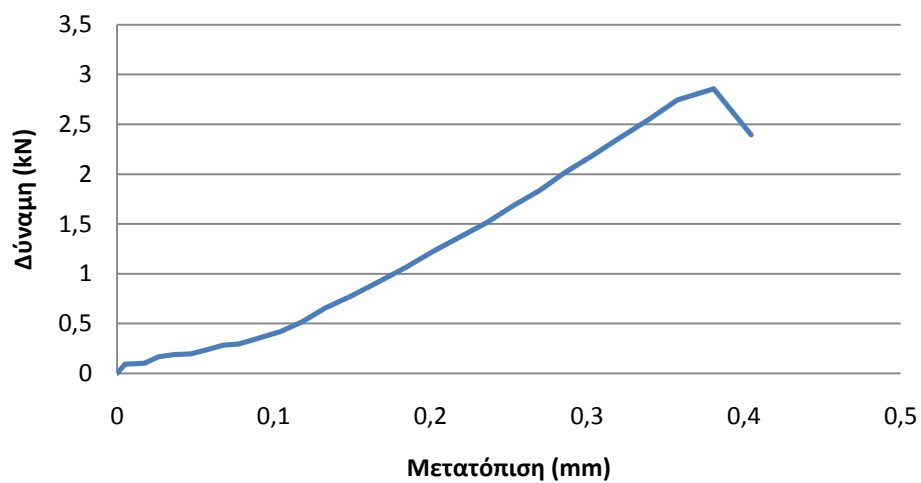
Ε.Α3



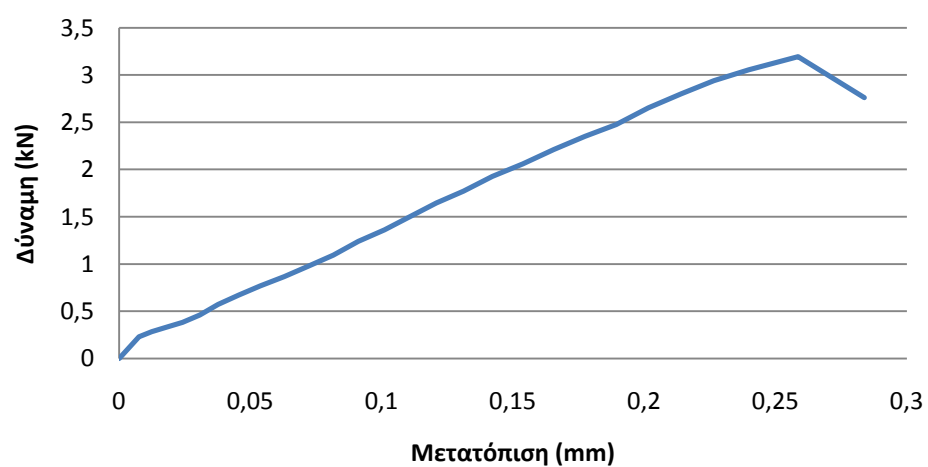
Ε.Α4

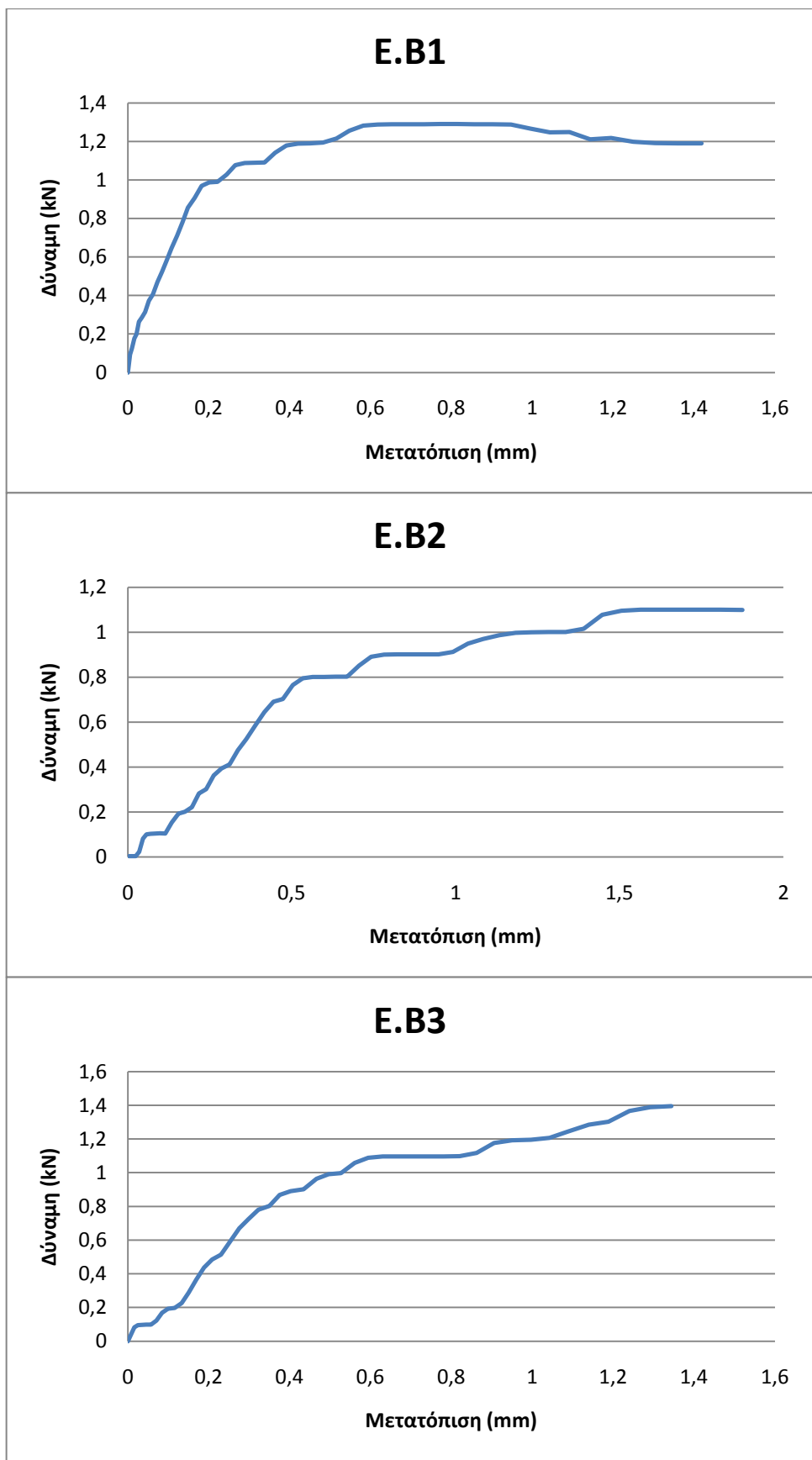


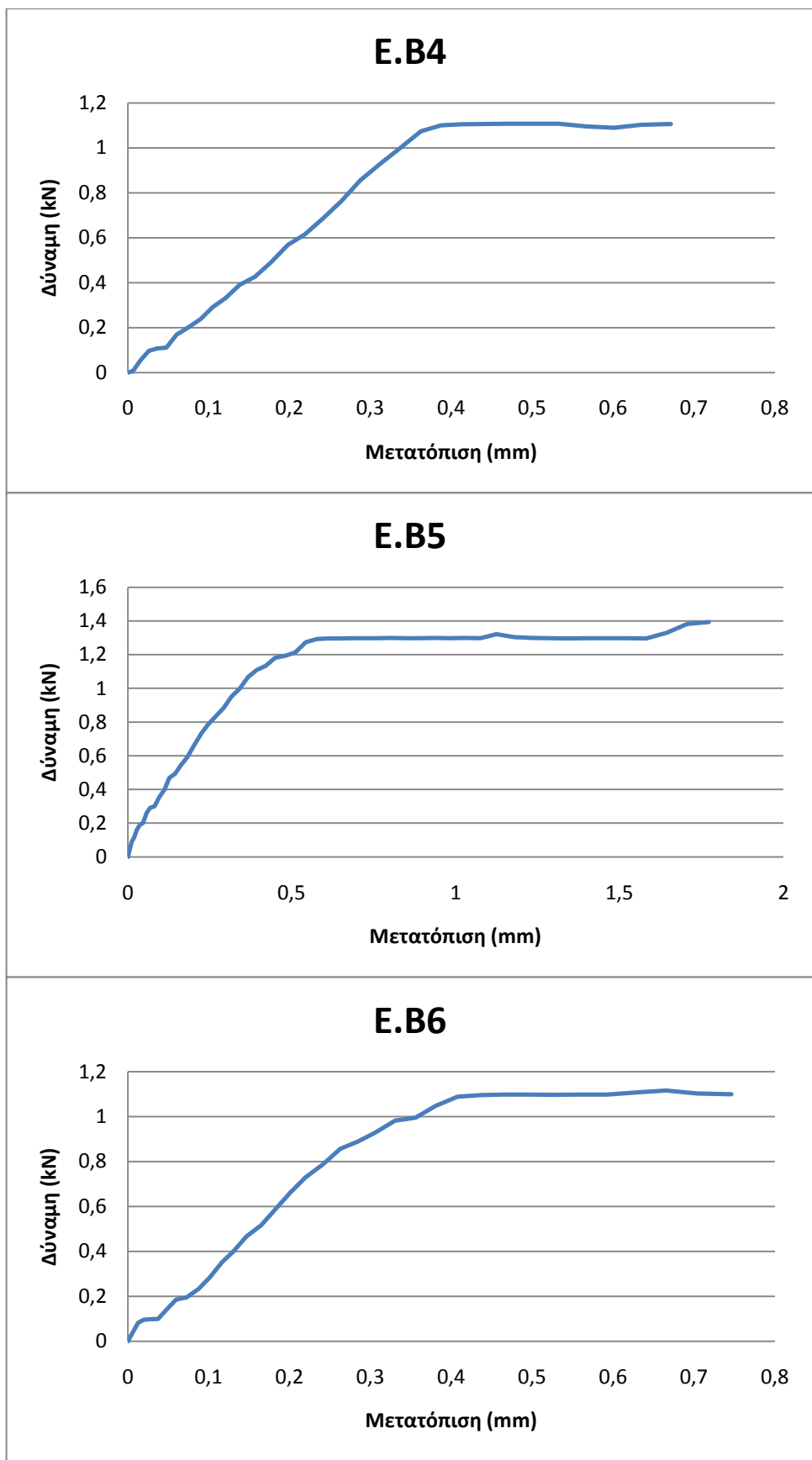
Ε.Α5



Ε.Α6

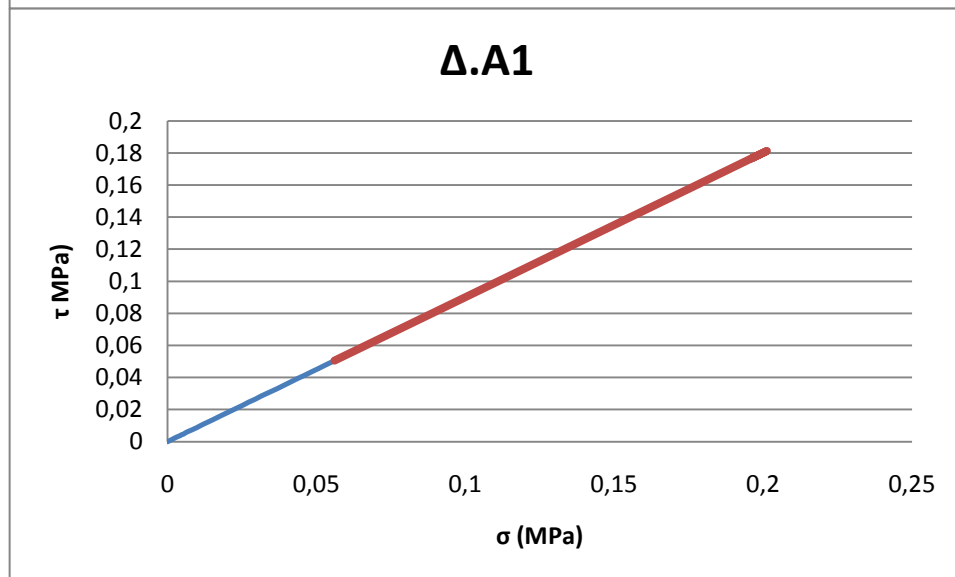
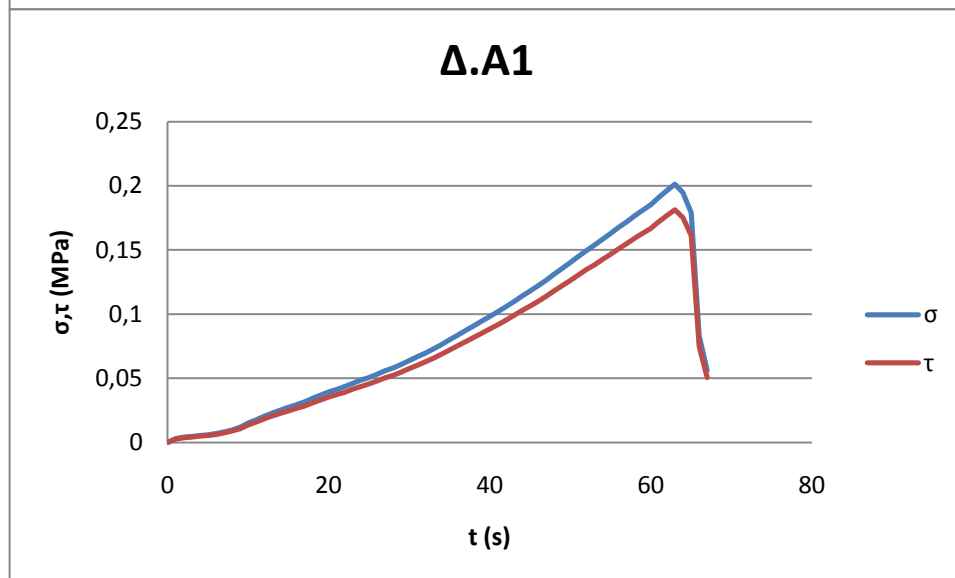
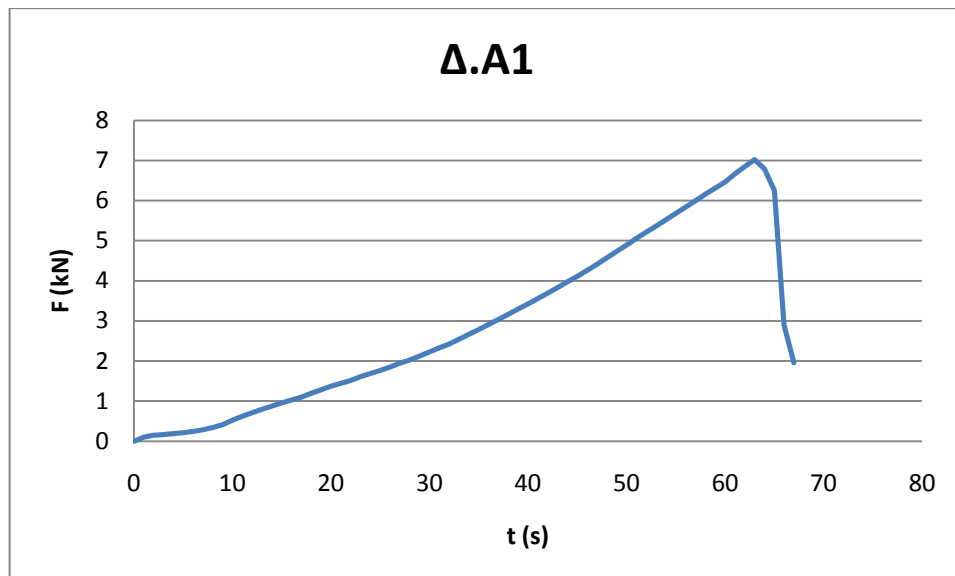


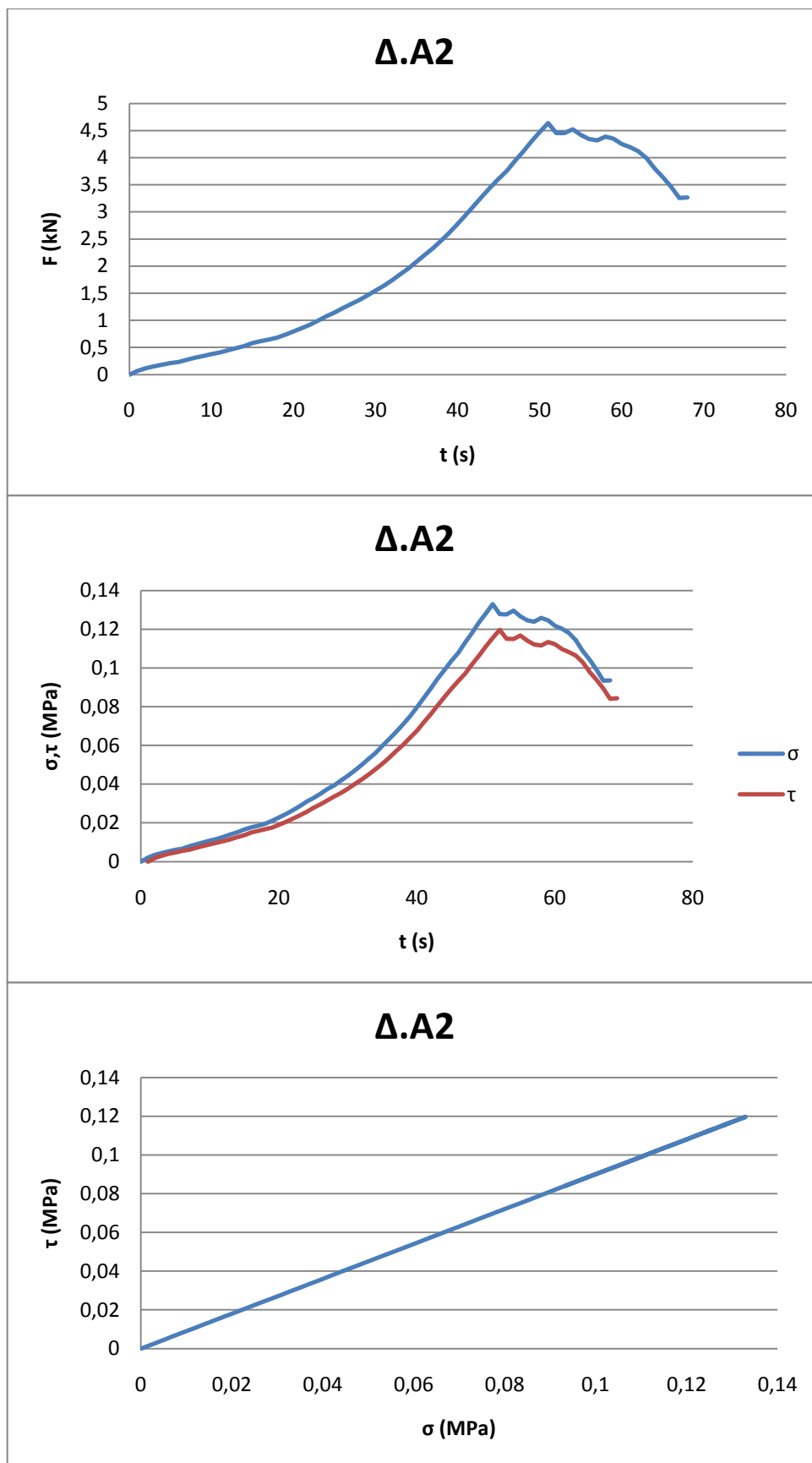


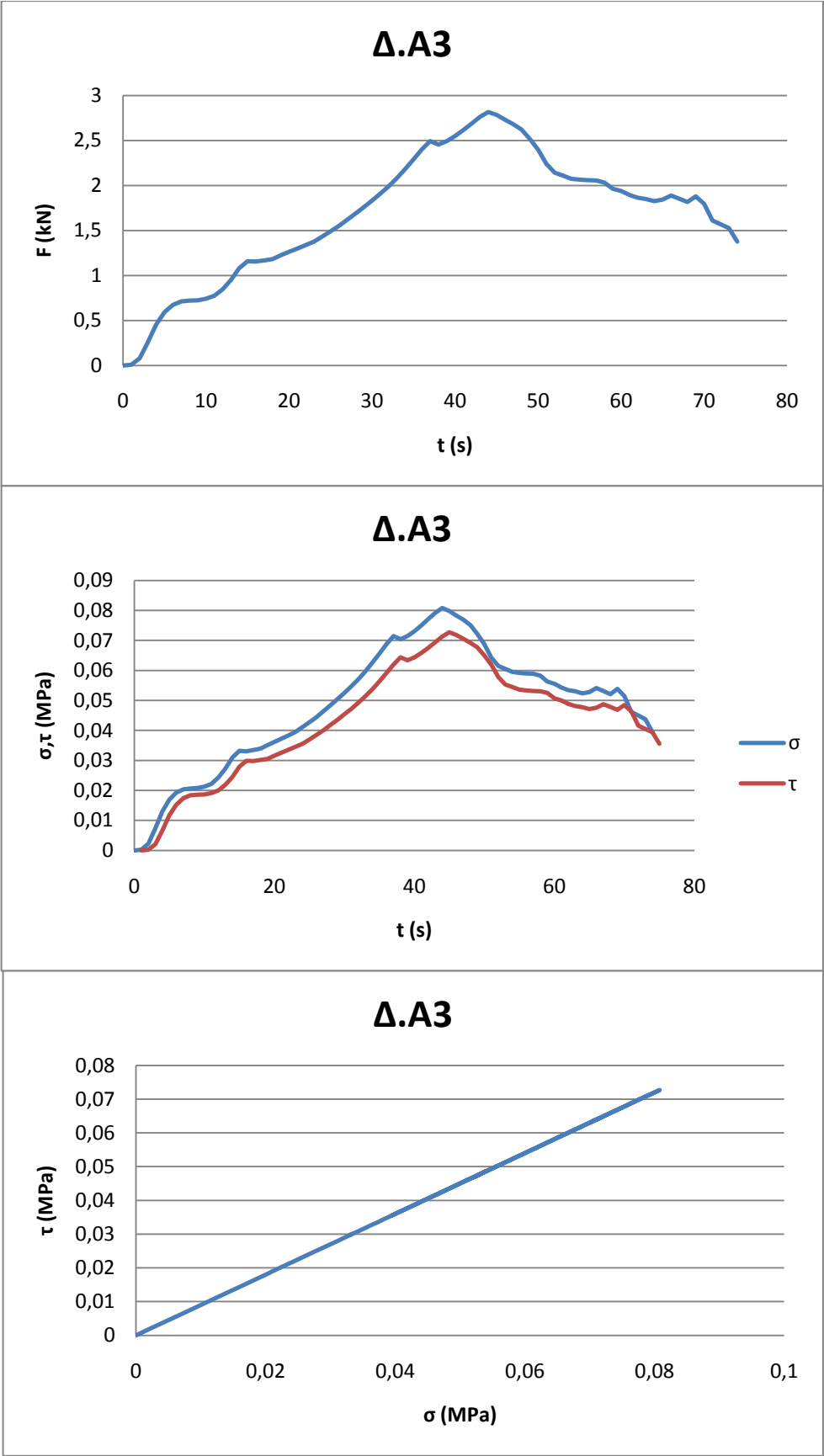


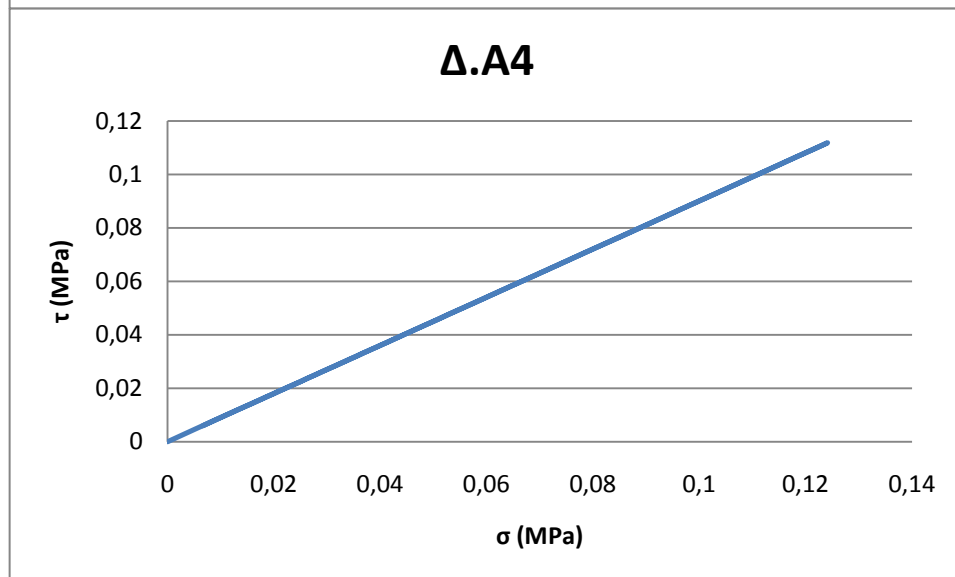
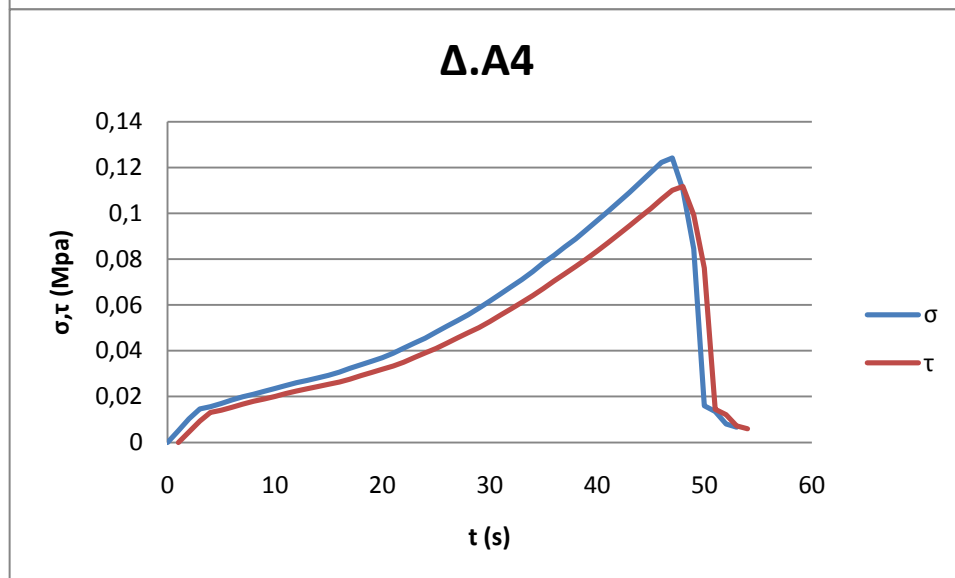
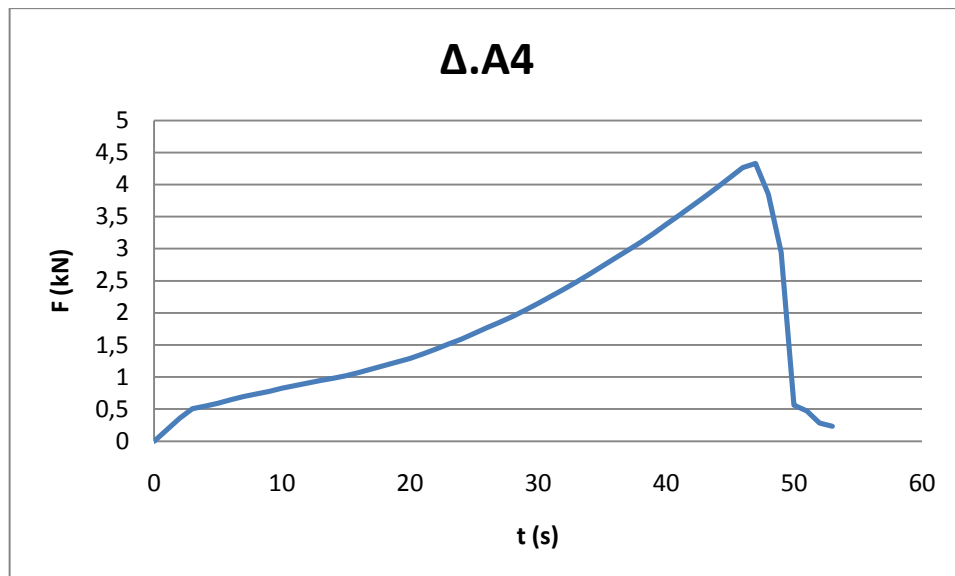
Παράρτημα ΣΤ

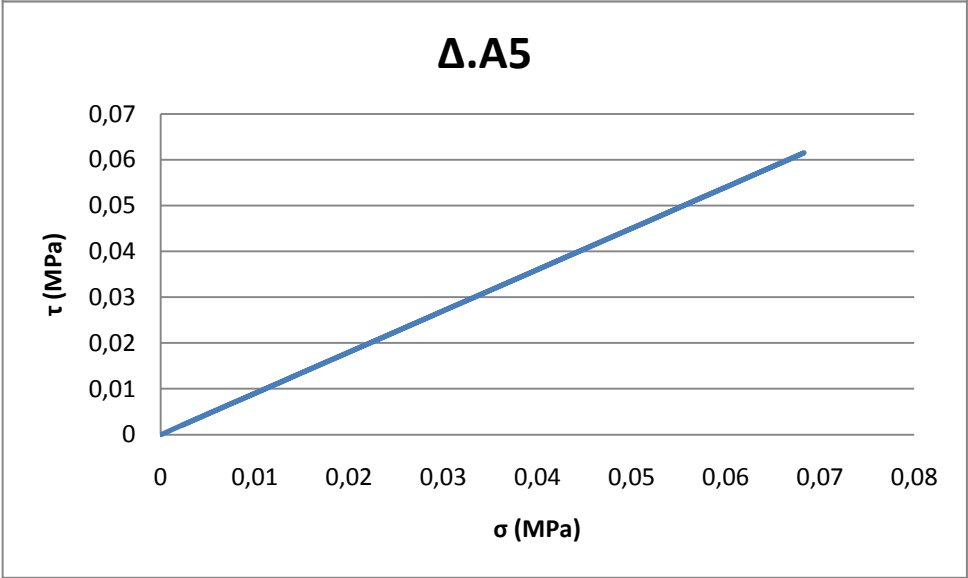
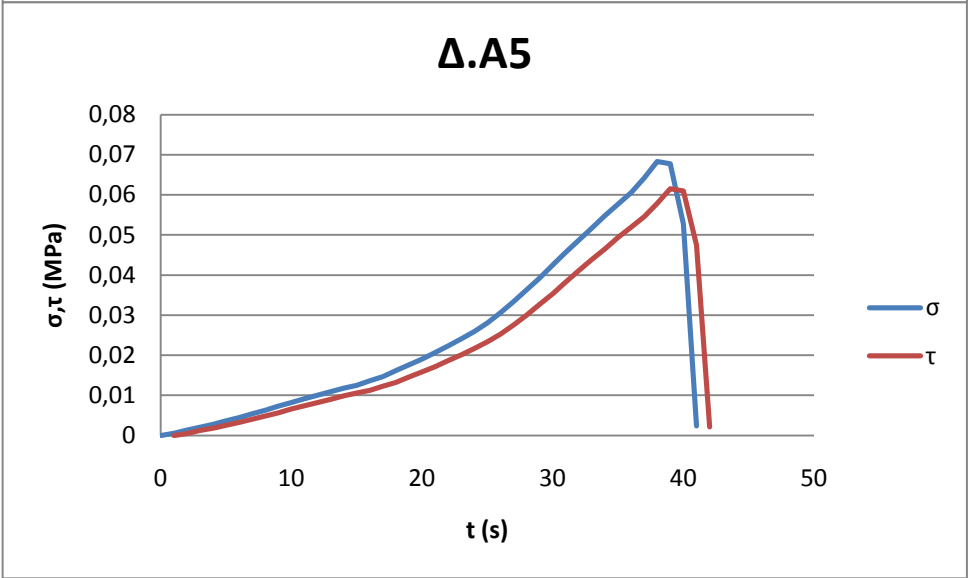
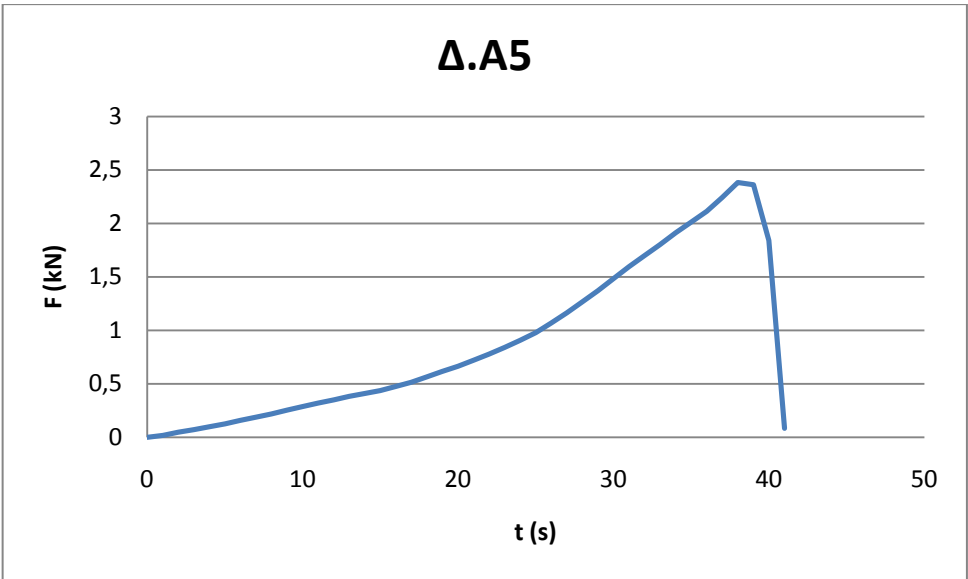
Διαγράμματα δύναμης-χρόνου, ορθής και διατμητικής τάσης-χρόνου, διατμητικής τάσης-ορθής τάσης

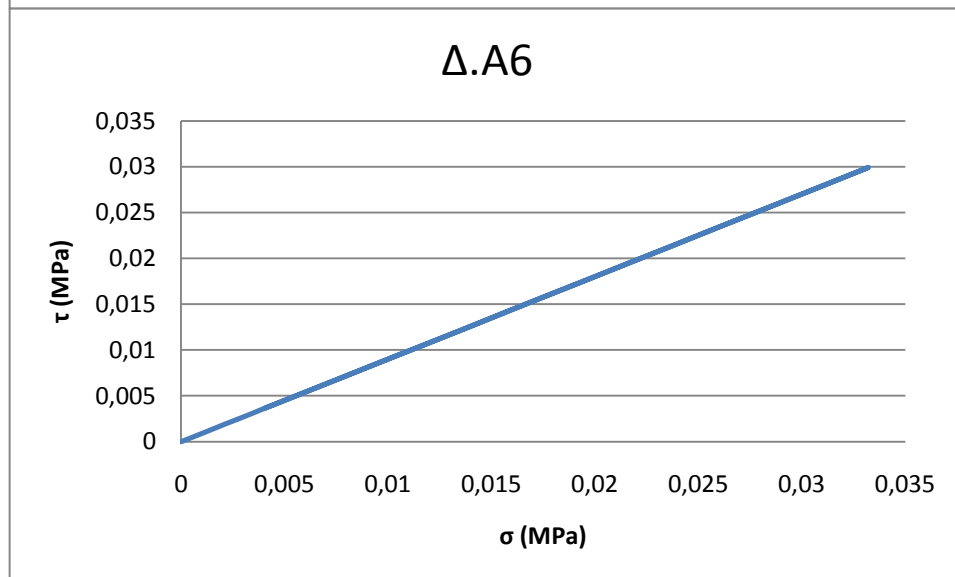
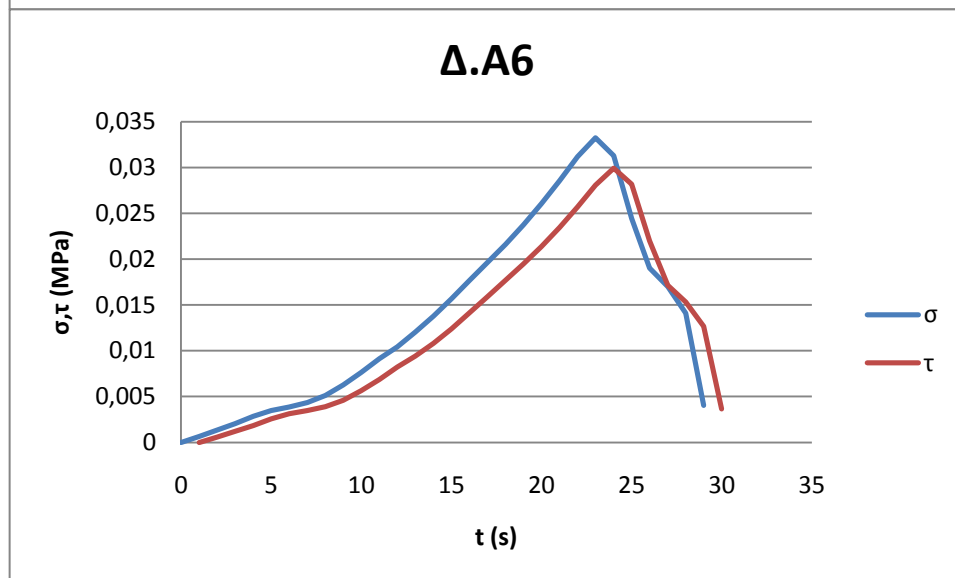
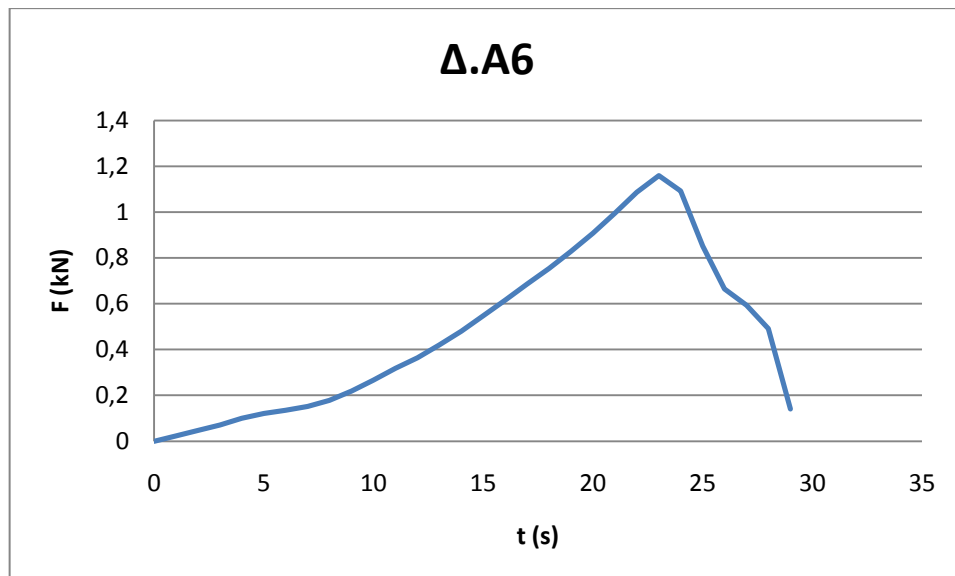


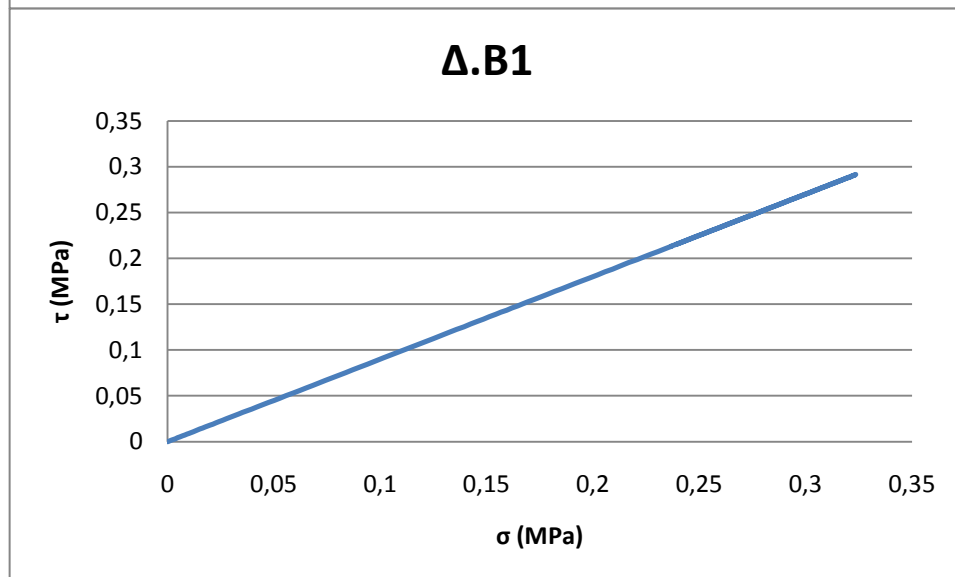
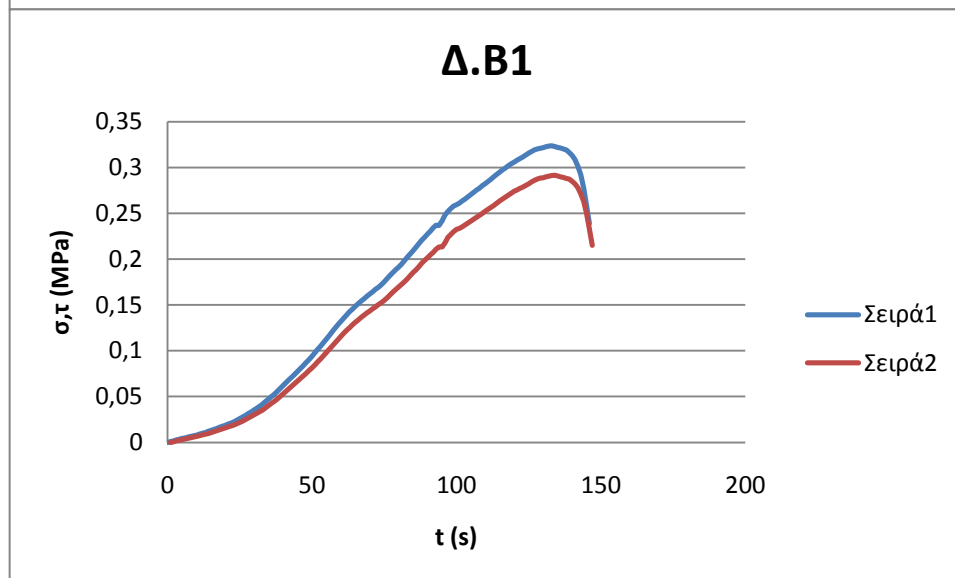
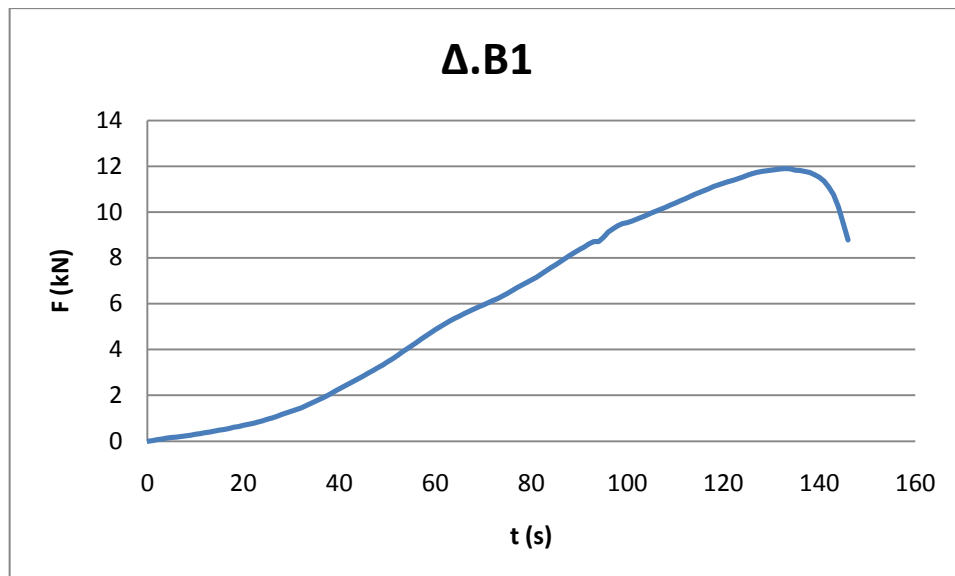




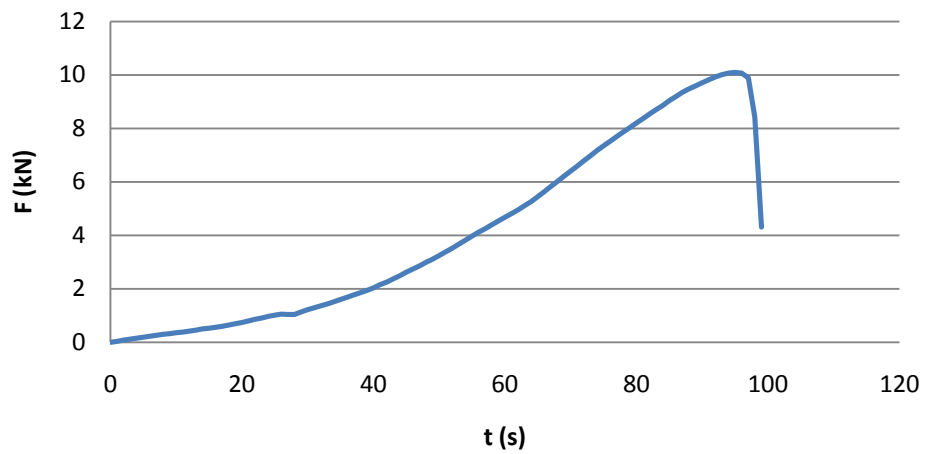




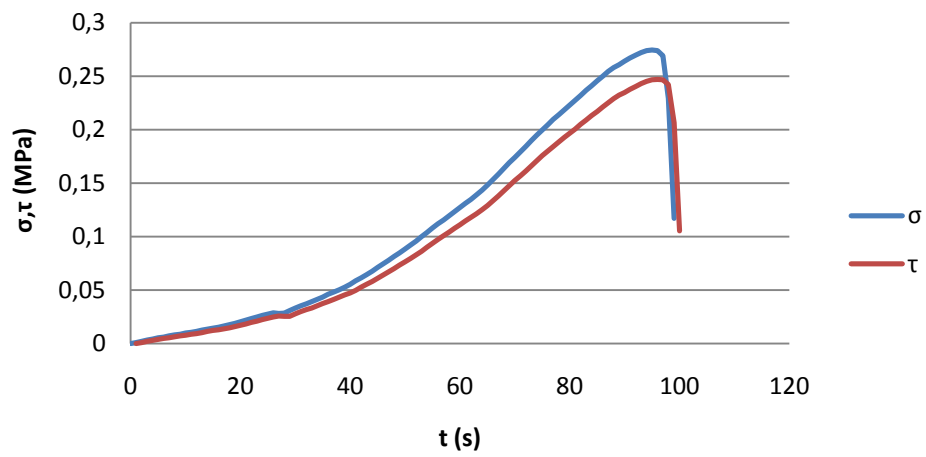




$\Delta.B2$



$\Delta.B2$



$\Delta.B2$

