

Διερεύνηση των δυνατοτήτων σταθεροποίησης αργιλικών εδαφικών υλικών με χρήση ιπταμένης τέφρας με υψηλή περιεκτικότητα σε άσβεστο με ή και χωρίς τσιμέντο.

Κόλιας Στυλιανός

Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ.

Κασελούρη-Ρηγοπούλου Βασηλεία.

Χημικός Μηχανικός Καθηγήτρια ΕΜΠ

Καραχάλιος Αναστάσιος.

Πολιτικός Μηχανικός

Λέξεις Κλειδιά: Ιπταμένη τέφρα, Τσιμέντο, Σταθεροποίηση, Μηχανικά χαρακτηριστικά, Οδόστρωμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε στο εργαστήριο η δυνατότητα σταθεροποίησης αργιλικών εδαφικών υλικών (CL,CH) με χρήση ιπταμένης τέφρας (I.T.) με μεγάλη περιεκτικότητα σε άσβεστο. Εξετάστηκαν τρία είδη αργιλικών εδαφικών υλικών με διάφορα ποσοστά ακατέργαστης ιπταμένης τέφρας ή και τσιμέντου ως προς την επίδραση τους στα ακόλουθα χαρακτηριστικά: (α) όρια Atterberg, (β) δοκιμή συμπίκνωσης-Proctor, (γ) αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, (δ) αντοχή σε εφελκυσμό (αντιδιαμετρική θλίψη-διάρρηξη, άμεσο εφελκυσμό και σε κάμψη), (ε) μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, (στ) CBR και (ζ) ποιοτική διερεύνηση των προϊόντων ενυδάτωσης της ιπταμένης τέφρας και του τσιμέντου με την χρήση συσκευής περίθλασης ακτίνων X και Θερμοζυγού. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε ανάλυση τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων διατομών οδοστρώματος και υπολογισμός πάχους σταθεροποιημένης στρώσης αργιλικών εδαφών σταθεροποιημένων με ιπταμένη τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο όταν καταπονούνται από την κατασκευαστική κυκλοφορία ή και την κυκλοφορία λειτουργίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται λίαν ενθαρρυντικά για ορισμένα είδη αργίλων και η χρήση σταθεροποιημένων στρώσεων με ΙΤ ή και τσιμέντο θα μπορούσε να επεκταθεί σημαντικά στις περιπτώσεις κατασκευής νέων οδοστρωμάτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σταθεροποίηση εδαφικών στρώσεων είναι μία από τις τεχνικές βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών έτσι ώστε να καταστούν κατάλληλα και ευκόλως εργάσιμα (ιδίως σε συνθήκες μεγάλης περιεχόμενης υγρασίας) για χρήση σε έργα πολιτικού μηχανικού (εξυγιαντικές στρώσεις, επιχώματα μικρού, μέσου ή και μεγάλου ύψους, έργα αυτό υποστήριξης εδαφικών στρώσεων κ.λ.π.) και ειδικότερα σε έργα οδοποιίας.

Η τεχνική της σταθεροποίησης εδαφικών υλικών με χρήση ιπταμένης τέφρας χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλές χώρες παγκοσμίως [1,2,3,4,5,6] με ικανοποιητικά τεχνοοικονομικά αποτελέσματα (μείωση απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος).

Τα νέα βελτιωμένα εδαφικά υλικά που προκύπτουν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε οδοστρώματα οδών ή και αεροδρομίων σε στρώσεις έδρασης ή υπόβασης. Οι στρώσεις από σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά παρουσιάζουν αυξημένη φέρουσα ικανότητα με συνέπεια την μείωση του απαιτούμενου πάχους των στρώσεων των υπό μελέτη οδοστρωμάτων και επομένως μικρότερο κόστος κατασκευής [1].

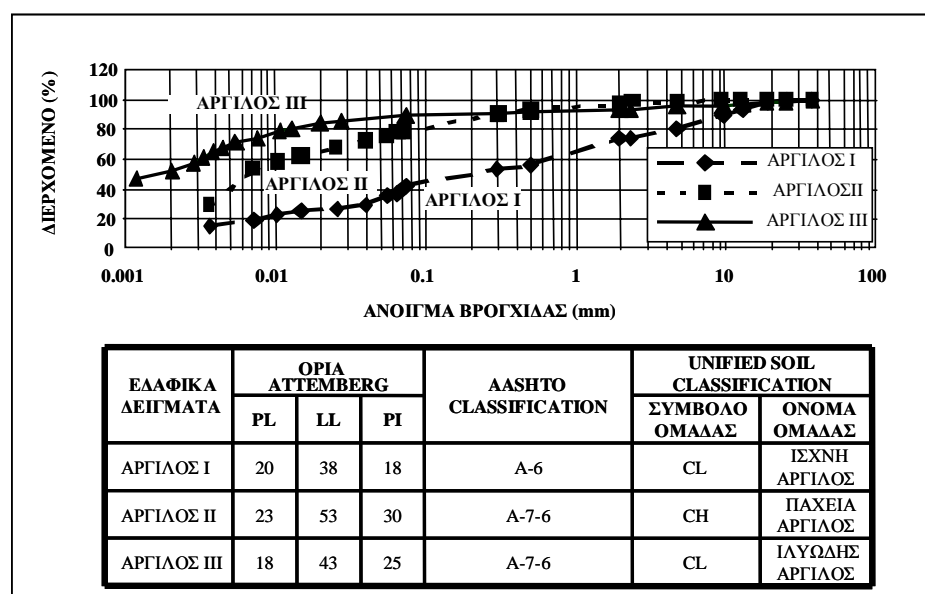
Η ετήσια παραγωγή ιπταμένης τέφρας στην Ελλάδα ανέρχεται σε 10 εκ. τόνους περίπου [11] (7,6 εκ. περιοχή Πτολεμαΐδας και 2,4 εκ. περιοχή Μεγαλόπολης). Η Ελληνική ιπταμένη τέφρα παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες λόγω του μεγάλου περιεχόμενου ποσοστού CaO. Η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη και για την μείωση της πλαστικότητας των εδαφικών υλικών και σε ορισμένες περιπτώσεις ποζολανικές ιδιότητες.

Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα χρήσης ακατέργαστης ασβεστούχου ιπταμένης τέφρας περιοχής Καρδιάς Πτολεμαΐδος για την σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών μέσης ή και μεγάλης πλαστικότητας για να χρησιμοποιηθούν ως στρώσεις έδρασης σε αυτοκινητοδρόμους ή ως υποβάσεις σε δρόμους ελαφρότερης κυκλοφορίας.

2. ΥΛΙΚΑ

2.1 Εδαφικά Υλικά

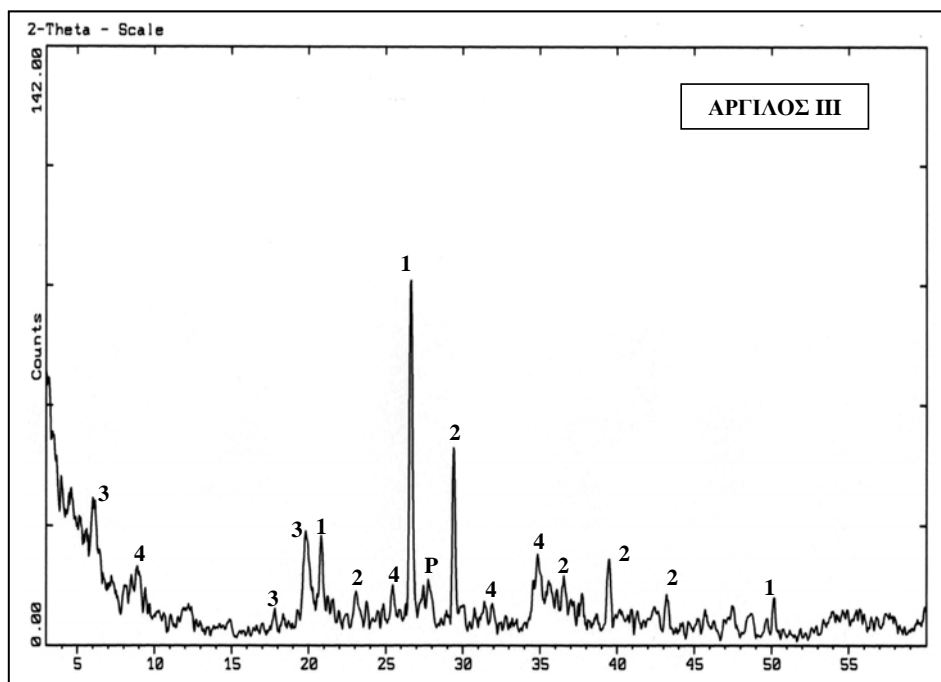
Χρησιμοποιήθηκαν τρία εδαφικά υλικά τα οποία θα καλούνται για λόγους συντομίας Άργιλος I, Άργιλος II και Άργιλος III. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών (όρια Atterberg, κοκκομετρική διαβάθμιση, κατάταξη εδαφικών δειγμάτων). Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η χημική ανάλυση του εδαφικού δείγματος Άργιλος III με χρήση της συσκευής περίθλασης ακτίνων X (XRD). Τα κύρια ορυκτολογικά στοιχεία του εδαφικού δείγματος είναι : Ο χαλαζίας, το CaCO₃ μοντμοριλλονίτης (Al₂O₃·4SiO₂·xH₂O) με μικρό ποσοστό μοσκοβίτη KAl₂Si₂AlO₁₀(OH)₂ and πλαγκιοκλαστο (P).



Σχήμα 1: Φυσικές ιδιότητες εδαφικών δειγμάτων

2.2 Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε παράχθηκε στον ατμοηλεκτρικό σταθμό Καρδιάς περιοχής Πτολεμαΐδας και αντιπροσωπεύει την παραγωγή τέφρας του σταθμού κατά την διάρκεια μίας τυπικής εβδομάδας και για τα δύο δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν ανά ημέρα αναμίχθηκαν καλά και στο τέλος δημιουργήθηκαν δυο ομογενή υλικά που στο εξής θα καλούνται ως Ιπτάμενη Τέφρα I και Ιπτάμενη Τέφρα II. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των δύο δειγμάτων της τέφρας είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε άσβεστο (45-49%) καθώς και το ποσοστό ελεύθερης ασβέστου. Η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζεται στο πίνακα 1.



Σχήμα 2: Χημική Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X εδαφικού δείγματος Αργίλου ΙΙΙ (1:Χαλαζίας, 2:CaCO₃ (Καλκίτης), 3:Μοντοριλλονίτης (Al₂O₃ 4SiO₂ x H₂O), Μοσκοβίτης (KAl₂Si₂AlO₁₀(OH)₂), P:Πλαγιόκλαστο

Πίνακας1 : Χημική ανάλυση δειγμάτων Ιπταμένης τέφρας Καρδιάς

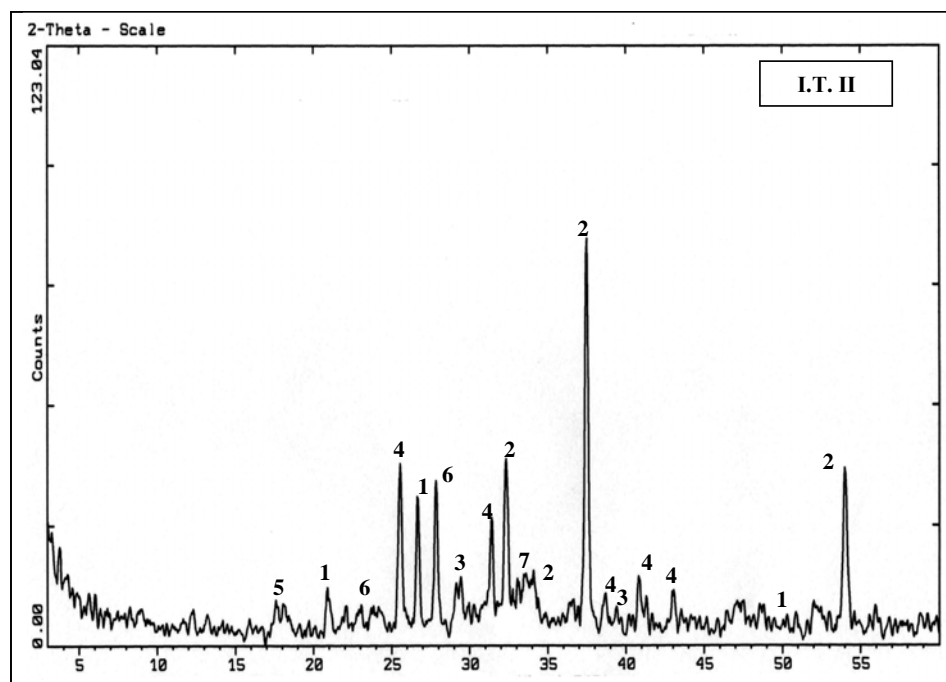
Οξείδιο	Ποσοστό	
	I.T. I ⁽¹⁾	I.T. II ⁽²⁾
SiO ₂	19,9	25,24
Fe ₂ O ₃	5,72	5,08
MgO	3,65	4,229
CaO	48,97	44,77
Na ₂ O	0,6	0,28
K ₂ O	0,45	0,69
Al ₂ O ₃	9,26	10,20
SO ₃	7,25	6,49
Απώλεια πύρωσης	3,01	2,65
Ελεύθερη άσβεστος	18,31	16,73

2.3 Τσιμέντο

Ως δευτερεύων σταθεροποιητής σε μέρος της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEN II B-M/32.5

2.4 Υδράσβεστος

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του υδραυλικού και του ποζολανικού χαρακτήρα της ιπταμένης τέφρας χρησιμοποιήθηκε υδράσβεστος σε μορφή ξηρής κόνεως .



Σχήμα 3: Χημική Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X IT II (1:Quartz 2:Ελεύθερο CaO 3:CaCO₃ (Καλκίτης) 4:CaSO₄, 5:Ca(OH)₂, 6:Αλβίτης (NaAlSiO₃, 7: 3CaOSiO₂/2CaOSiO₂

3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

3.1 Μίγματα

Στην εργαστηριακή αυτή έρευνα, η ιπταμένη τέφρα χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστά 5%, 10% και 20% κατά ξηρό βάρος εδαφικού υλικού ενώ το τσιμέντο σε ποσοστά 2% και 4% κατά ξηρό βάρος εδαφικού υλικού, για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο ως δευτερεύων σταθεροποιητής. Επιπρόσθετα επιλέχθηκαν και μίγματα στα οποία ο κύριος σταθεροποιητής ήταν το τσιμέντο, για λόγους συγκριτικούς παρόλο που τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ως μη αξιόπιστα λόγω της μικρής ομοιογένειας που επιτυγχάνεται με την ανάμιξη λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών μέσης ή μεγάλης πλαστικότητας, με τσιμέντο.

Σε δευτερεύον επίπεδο της εργασίας αυτής έγινε προσπάθεια για να διερευνηθεί ο βαθμός του υδραυλικού (CaO) και του ποζολανικού (SiO₂) χαρακτήρα της ιπταμένης τέφρας και πως επηρεάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά από τα περιεχόμενα ποσοστά των παραπάνω οξειδίων. Για το λόγο αυτό αντικαταστάθηκε η ιπταμένη τέφρα που περιέχεται στα προς εξέταση μίγματα με ισοδύναμη ποσότητα υδροξειδίου του ασβεστίου.

3.2 Παρασκευή δοκιμίων

Η διαδικασία της παρασκευής δοκιμίων περιλάμβανε τα παρακάτω στάδια: α) Ξήρανση του εδαφικού υλικού με την χρήση κλιβάνου σε θερμοκρασία μέχρι 70 οC. β) Θρυμματισμό των συσσωματωμάτων. γ) Κοσκίνισμα του θραυσθέντος εδαφικού υλικού με την χρήση του κοσκινού Νο 4 δ) Καθορισμός των αναγκαίων ποσοτήτων των υλικών για την δημιουργία των σωστών μιγμάτων και ανάμιξη αυτών. Σε μία προσπάθεια επίτευξης ομοιογενέστερης ανάμιξης η Ι.Τ προαναμίχθηκε με το νερό και στη συνέχεια το μίγμα αναμίχθηκε με το εδαφικό υλικό όπως εφαρμόζεται συχνά στις σύγχρονες μεθόδους επιτόπου αναμίξεως σταθεροποιητών σε μορφή σκόνης για περιβαλλοντικούς λόγους. ε) Αναμονή 24-ωρών για την ανάπτυξη της αρχικής δράσης της ιπταμένης τέφρας καθώς και για την ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας σε όλη τη μάζα του εδαφικού υλικού. στ) Τελική ανάμιξη του μίγματος και σύνθλιψη (με τα χέρια) των συσσωματωμάτων έτσι ώστε τα δοκίμια που θα κατασκευαστούν να έχουν την ίδια περίπου σύσταση και πυκνότητα. Κατά την φάση αυτή αναμιγνύεται το τσιμέντο σε περίπτωση παρασκευής μίγματος με συνδυασμό Ι.Τ. και τσιμέντου η) Ζύγιση των αναγκαίας ποσότητας εδαφικού μίγματος. η) εισαγωγή του μίγματος μέσα στο τύπο, συμπύκνωση, παραμονή του δοκιμίου μέσα στον τύπο για 1 min περίπου και εξόλκωση του δοκιμίου. θ) Περιέλιξη των δοκιμίων με πλαστική μεμβράνη και συντήρηση των δοκιμίων σε θάλαμο συντήρησης όπου οι συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας είναι σταθερές (RH=91-95%, T=20-25°C). Τα κυλινδρικά δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο h/d=1/2 παρασκευάστηκαν έτσι ώστε να έχουν προκαθορισμένη πυκνότητα ίση προς τη μέγιστη της αντίστοιχης δοκιμής συμπύκνωσης. Η παρασκευή έγινε σύμφωνα με το πρότυπο BS 1924 Test 10 με την διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν απολύτως κυλινδρικά δοκίμια αντί των ελαφρώς κωνικών δοκιμίων που προβλέπονται στο BS. Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 7,28 και 90 ημερών. Το άνω όριο των 90 ημερών επιλέχθηκε διότι στο χρόνο αυτό αναμένεται να έχει συντελεστεί στο μεγαλύτερο ποσοστό η χημική δραστηριότητα που αναπτύσσεται μέσα στο μίγμα λόγω της δράσεως της ΙΤ. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την ανάμιξη του μίγματος εδαφικού υλικού, ιπταμένης τέφρας και νερού.

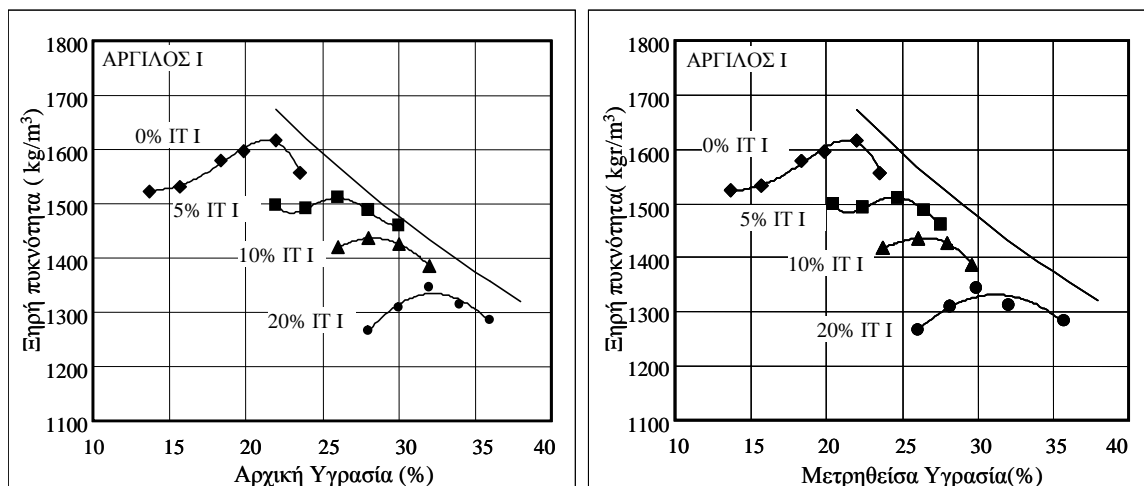
4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Όρια Atterberg

Όλα τα εδαφικά υλικά (Άργιλος Ι, Άργιλος ΙΙ, Άργιλος ΙΙΙ) μετατράπηκαν σε μη πλαστικά μετά από 24 ώρες από την ανάμιξη τους με ιπταμένη τέφρα με ποσοστά 5,10 και 20% κατά βάρος ξηρού υλικού.

4.1 Δοκιμή Συμπύκνωσης

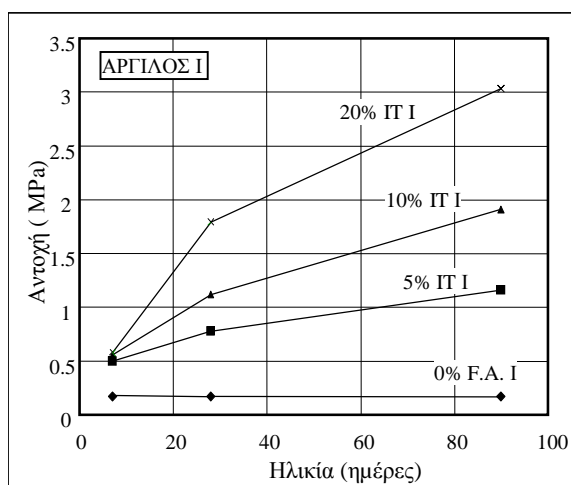
Τα αποτελέσματα της δοκιμής συμπύκνωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 4. Συμπερασματικά μπορεί να λεχθεί ότι: α) παρατηρείται διαφορά μεταξύ της αρχικής υγρασίας που προστέθηκε στο εδαφικό μίγμα και της υγρασίας που μετρήθηκε στο εδαφικό μίγμα μετά το πέρας της δοκιμής, όπως ακριβώς ορίζεται στο αντίστοιχο πρότυπο (ASTM D 698-78). Δεδομένου ότι είχαν ληφθεί όλα τα αναγκαία μέτρα για την αποφυγή της εξατμίσεως (ανάμιξη και παραμονή σε πλαστική σακούλα για 24 ώρες κ.λ.π.) η μεταβολή αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στη χημική δέσμευση νερού λόγω της δράσης της ιπταμένης τέφρας. β) Παρατηρείται αύξηση της βέλτιστης υγρασίας και μείωση της μέγιστης ξηρής πυκνότητας σε σχέση με το περιεχόμενο ποσοστό ιπταμένης τέφρας. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα διαγράμματα υγρασίας πυκνότητας σε περίπτωση σταθεροποιήσεως με υδράσβεστο και είναι ενδεικτικά της μεθόδου αυτής.



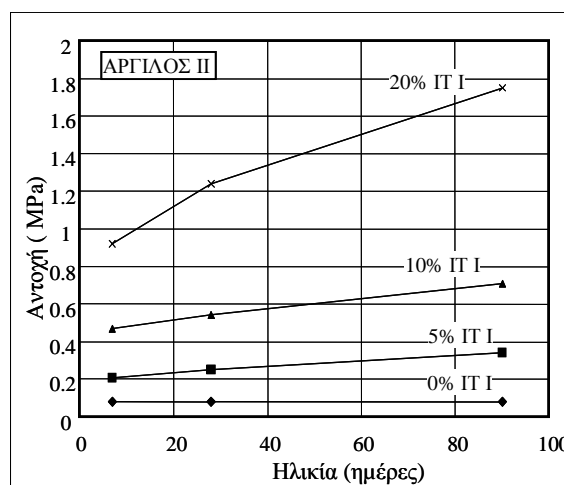
Σχήμα 4: Δοκιμή συμπίκνωσης Αργίλου I (Αρχική και Μετρηθείσα Υγρασία)

4.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη-Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

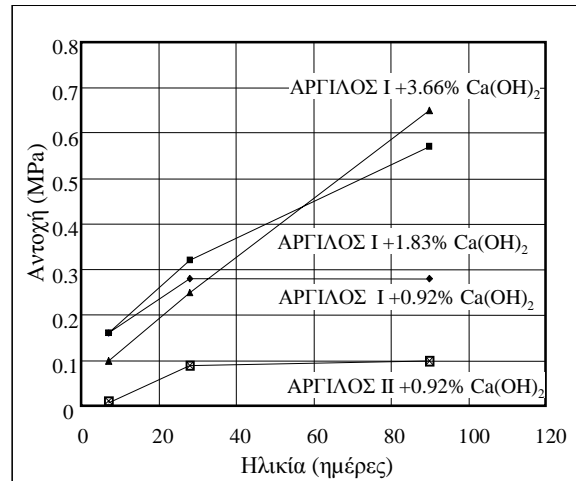
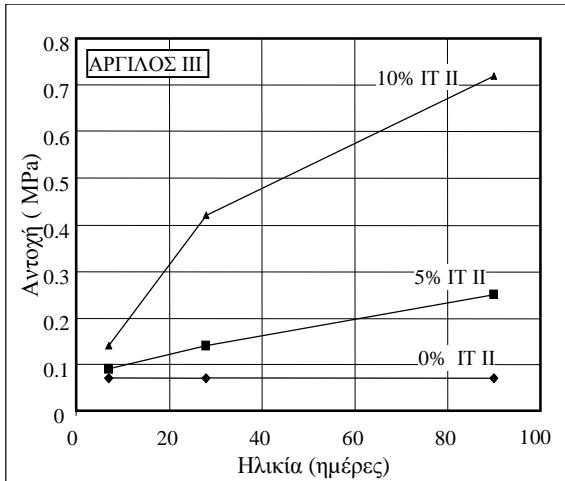
Παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm με ποσοστά IT 5, 10 και 20% κ.β ξηρού υλικού. Ο προσδιορισμός της αντοχής σε θλίψη έγινε σε ηλικία 7, 28 και 90 ημερών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5,6 και 7. Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε θλίψη με την προσθήκη υδρασβέστου για την διερεύνηση του χαρακτήρα δράσης της IT. Εξετάστηκε επίσης και η επίδραση της χρησιμοποίησης τσιμέντου είτε ως μοναδικού σταθεροποιητικού μέσου (Αργίλος III) είτε σε συνδυασμό με IT και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 9,10 και 11. Παρατηρείται γενικά ότι τα τρία διαφορετικά είδη υλικών που χρησιμοποιήθηκαν διαφοροποιούνται αξιοσημείωτα ως προς την αντοχή σε θλίψη, τόσο σε περίπτωση χρήσης μόνον IT όσο και σε περίπτωση συνδυασμού IT και τσιμέντου (Π 35), γεγονός το οποίο παρατηρείται επίσης στις σταθεροποιήσεις με υδράσβεστο ή με τσιμέντο ή με υδράσβεστο και τσιμέντο. Στα σχήματα 12 και 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσος εφελκυσμός) ενώ στο σχήμα



Σχήμα 5: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20%–Αργίλος I

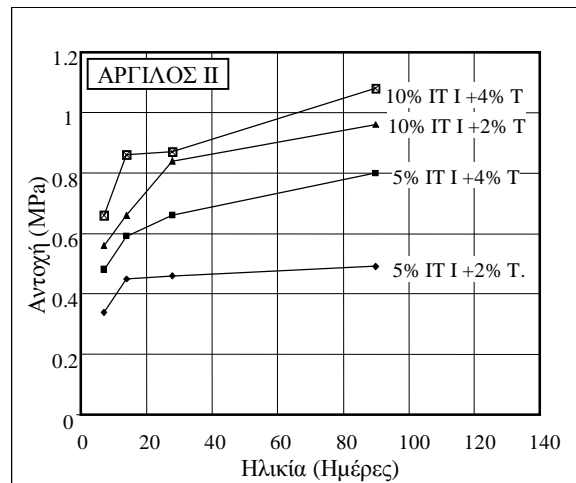
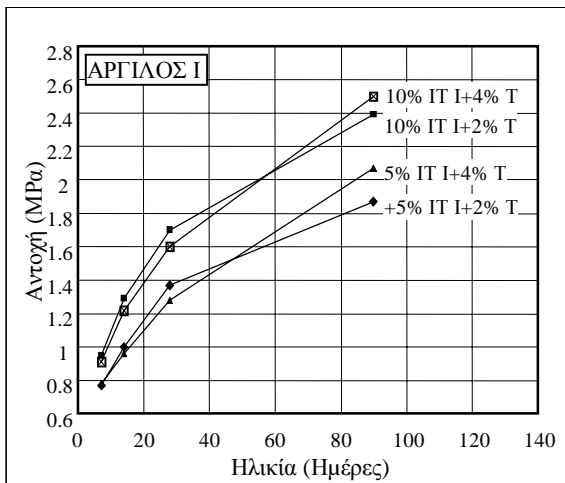


Σχήμα 6: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20%–Αργίλος II



Σχήμα 7: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20% -Αργίλος III

Σχήμα 8: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με διάφορα ποσοστά Ca(OH)₂



Σχήμα 9: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20% και τσιμέντου 2και 4%-Αργίλος I

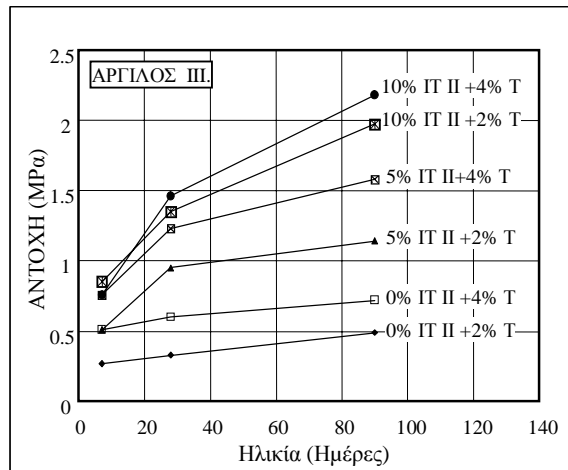
Σχήμα 10: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20% και τσιμέντου 2 και 4%-Αργίλος II

Πίνακας 2 : Επίδραση του υδρεμποτισμού στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

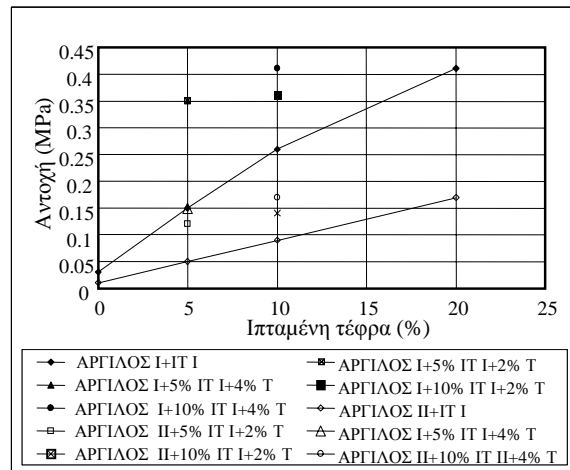
	Αντοχή σε θλίψη μετά από υδρ/σμο (MPa)			Ποσοστό απομένουσας αντοχής* (%)			Αντοχή σε θλίψη μετά από υδρ/σμο (MPa)			Ποσοστό απομένουσας αντοχής* (%)			
	ΑΡΓΙΛΟΣ I					ΑΡΓΙΛΟΣ II							
IT	5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20	
Τσιμέντο (%)	0	0,95	1,79	2,79	81,9	93,7	92,1	0,16	0,54	1,42	47,1	76,01	83,0
	2	1,65	1,77	-	88,2	85,5	-	0,39	0,80	-	79,5	83,33	-
	4	2,07	2,35	-	86,6	94,0	-	0,66	0,99	-	82,5	91,67	-

* $f_{\xi\eta\rho\delta} / f_{\text{υδρεμ.}} \times 100$

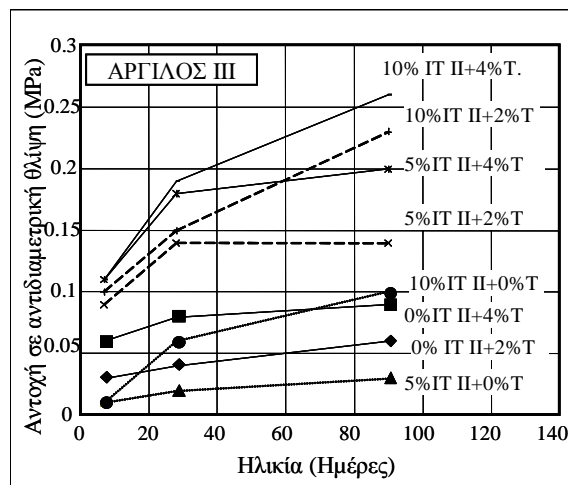
14 παρουσιάζεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη. Η επίδραση του υδρεμποτισμού στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παρουσιάζεται στον πίνακα 2. Σε όλες τις περιπτώσεις με εξαίρεση της αργίλου II με 5% και 10% IT ικανοποιείται το όριο για το ποσοστό απομένουσας αντοχής 0.8 (Πίνακας 2).



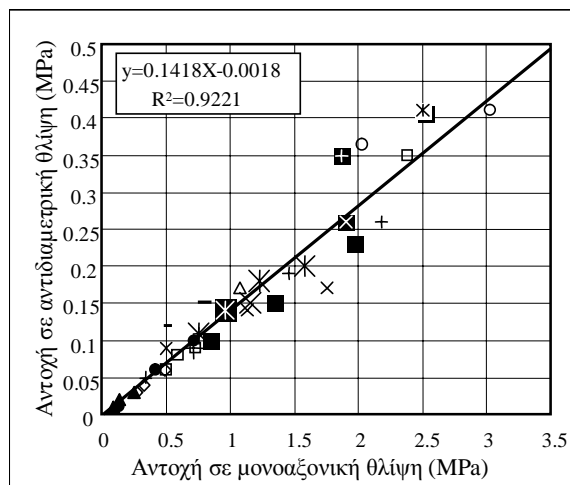
Σχήμα 11: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20% και τσιμέντου 2 και 4%–Αργίλος III



Σχήμα 12: Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20% και τσιμέντου 2 και 4%



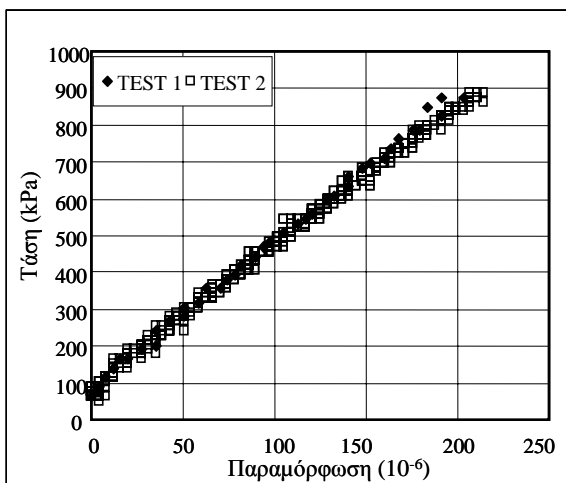
Σχήμα 13: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιεχόμενα ποσοστά IT 0,5,10 και 20% και τσιμέντου 2 και 4%–Αργίλος III



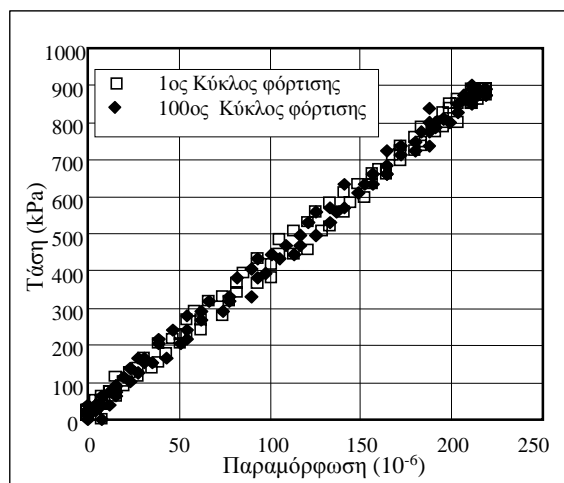
Σχήμα 14: Συσχέτιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό

4.3 Μέτρο Ελαστικότητας

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια κυλινδρικά διαστάσεων 7cm.x14cm. τα οποία κατασκευάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο BS1924. Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκε με 4 μεθόδους επιβολής επιπόνησης οι οποίες περιλάμβαναν φορτίσεις μέχρι το 1/3 της αντοχής α)σε δύο ταχύτητες επιβολής φορτίου – μικρή και μεγάλη β) με δυναμική φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής και γ)με επιβολή σταθερής ταχύ-



Σχήμα 15: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για αργή και γρήγορη ταχύτητα φόρτισης

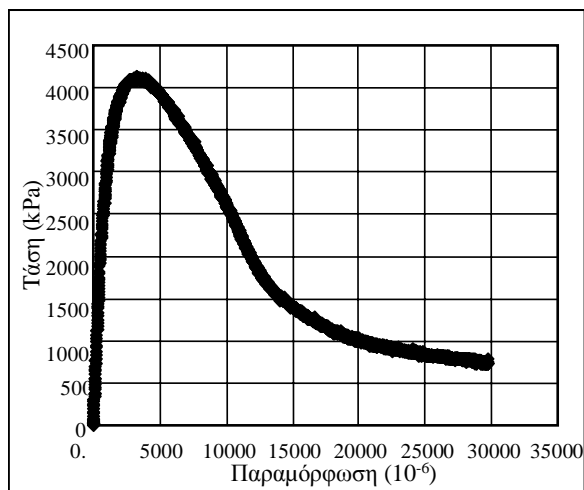


Σχήμα 16: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για ημιτονοειδή φόρτιση (1^{ος} και 100^{ος} κύκλος φόρτισης)

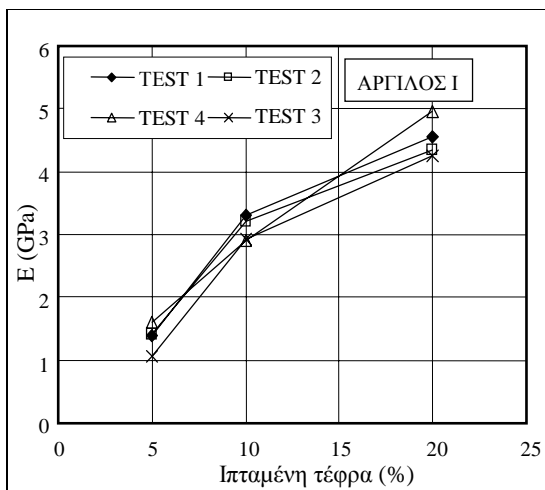
τητας παραμόρφωσης μέχρι θραύσεως του δοκιμίου. Η έρευνα αυτή έγινε σε μία προσπάθεια να διερευνηθεί η συμπεριφορά των υλικών αυτών στις διάφορες μορφές φορτίσεων στις οποίες υποβάλλονται οι σταθεροποιημένες στρώσεις στα οδοστρώματα. Κατά τις δοκιμές κατάγράφονταν οι τάσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας προσδιορίστηκε από την παραμόρφωση που καταγραφόταν στο 1/3 περίπου της αντοχής του υλικού. Ειδικότερα οι μέθοδοι επιπόνησης του δοκιμίου ήσαν οι ακόλουθες: α) TEST 1 – Μεγάλη ταχύτητα επιβολής φορτίου. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται μέχρι το επιβαλλόμενο φορτίο να φτάσει την τιμή P/3 (P: φορτίο θραύσεως σε μονοαξονική θλίψη) σε χρόνο 0,30 sec. β) TEST 2 – Μικρή ταχύτητα επιβολής φορτίου. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται με ταχύτητα φόρτισης ίση με 0,2N/mm²/sec όπως προβλέπεται από τα αντίστοιχα πρότυπα προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος. TEST 3 – Σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης . Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται έτσι ώστε η ταχύτητα παραμόρφωσης να είναι ίση περίπου με 1 mm./min. TEST 4- Δυναμική φόρτιση. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται με συνεχείς κύκλους ημιτονοειδών φορτίσεων έτσι ώστε η περίοδος της φόρτισης να είναι 0,60sec και το εύρος της ίσο με P/3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 15,16,17,18 και 19 και στον πίνακα 3. Είναι φανερό ότι η μέθοδος φόρτισης δεν επηρεάζει τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας . Συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της αντοχής σε θλίψη και σε εφελκυσμό επιτυγχάνεται και σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Η αύξηση αυτή είναι συνάρτηση της ηλικίας του ποσοστού της Ι.Τ. και του τσιμέντου. Τα βελτιωμένα αυτά μηχανικά χαρακτηριστικά των σταθεροποιημένων αργιλικών εδαφικών υλικών τα καθιστά κατάλληλα για χρήση στη κατάσκευή στρώσεων έδρασης σε οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων ή και υπόβασεων σε οδοστρώματα σε οδούς ελαφριάς κυκλοφορίας.

Πίνακας 3: Μέτρο ελαστικότητας σε μονοαξονική θλίψη

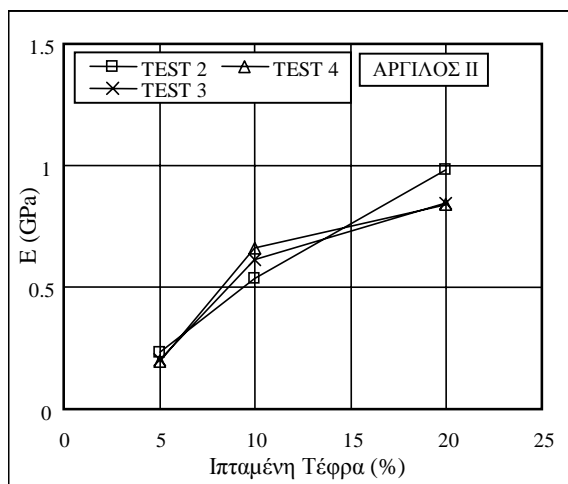
IT (%)	ΑΡΓΙΛΟΣ I				ΑΡΓΙΛΟΣ II			
	TEST 1 (GPa)	TEST 2 (GPa)	TEST 3 (GPa)	TEST 4 (GPa)	TEST 1 (GPa)	TEST 2 (GPa)	TEST 3 (GPa)	TEST 4 (GPa)
5	1,397	1,414	1,601	1,071	0,238	0,232	0,196	0,204
10	3,301	3,202	2,897	2,924	0,727	0,535	0,660	0,612
20	4,566	4,350	4,952	4,251	-	0,982	0,838	0,843



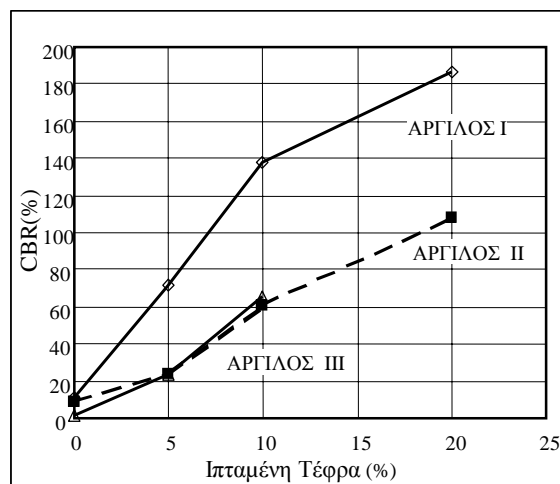
Σχήμα 17: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για φόρτιση με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης



Σχήμα 18: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και περιεχόμενου ποσοστού ΙΤ (Αργίλος Ι)



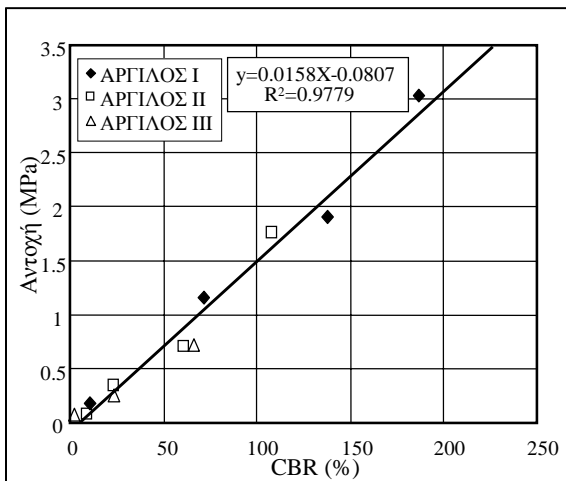
Σχήμα 19: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και περιεχόμενου ποσοστού ΙΤ (Αργίλος ΙΙ)



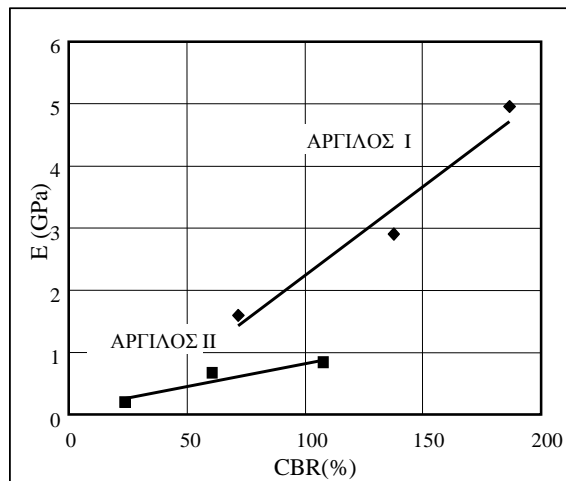
Σχήμα 20: Συσχέτιση CBR και περιεχόμενου ποσοστού ΙΤ

4.4 CBR

Το CBR προσδιορίστηκε για τα 3 εδαφικά υλικά και για ποσοστά ιπταμένης τέφρας 5%, 10% και 20% σε ηλικία δοκιμών 90 ημερών. Τα δοκίμια του CBR είχαν υποστεί την διαδικασία του υδρεμοτισμού για 7 ημερών. Τα αποτελέσματα του CBR παρουσιάζονται στο σχήμα 20. Είναι φανερό ότι οι τιμές του CBR παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη αύξηση ήδη από ποσοστά Ι.Τ. που υπερβαίνουν το 5% γεγονός που επιβεβαιώνει την δυνατότητα σημαντικής μείωσης του απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος. Στο σχήμα 21 παρουσιάζεται η συσχέτιση της θλιπτικής αντοχής με την τιμή CBR για τα τρία αυτά εδαφικά υλικά ενώ στο σχήμα 22 η συσχέτιση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και CBR. Ανάλογα αποτελέσματα αναφέρονται και από τον Maclean [6]



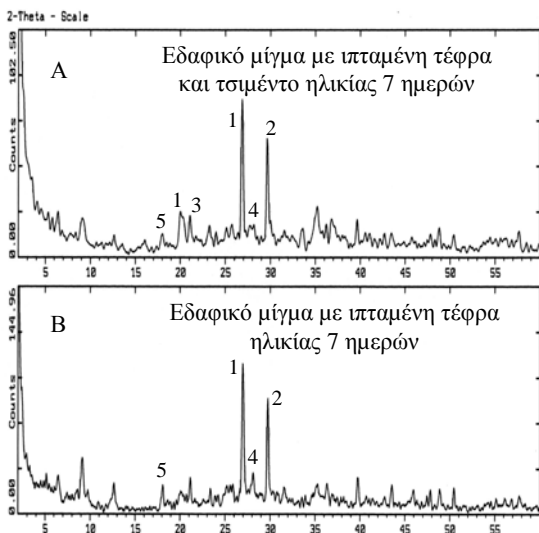
Σχήμα21: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και περιεχόμενου ποσοστού IT (Αργίλος II)



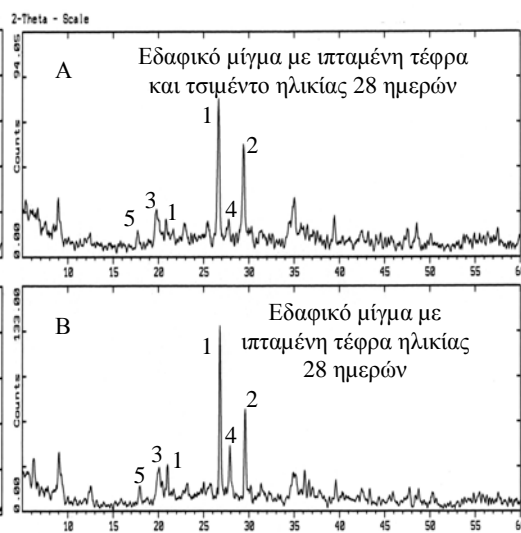
Σχήμα 22: Συσχέτιση CBR και μέτρου ελαστικότητας

4.5 Περίθλαση ακτίνων X- Θερμική και θερμοστατική ανάλυση

Στην εργασία αυτή έγινε προσπάθεια ποιοτικής διερεύνησης των προϊόντων ενυδάτωσης της ιπταμένης τέφρας και της επίδρασης της προσθήκης τσιμέντου σε αυτά. Εξετάστηκαν αντιπροσωπευτικά δύο μίγματα Αργίλου III με 10% IT και 10% IT με επιπρόσθετο 4% τσιμέντο. Τα μίγματα εξετάστηκαν σε ηλικίες 7,28 και 90 ημερών. Στο σχήμα 23,24 παρουσιάζονται ενδεικτικά η ανάλυση XRD για τα δύο μίγματα και για ηλικίες 7 και 28 ημέρες. Τα προϊόντα ενυδάτωσης της IT (τομπερμορίτης, γυψοντίνης ($Al_2Si_2O_8 \cdot 4H_2O$), πορτλαντίνης ($Ca(OH)_2$), κ.λ.π.) αυξάνονται με το χρόνο και με την προσθήκη τσιμέντου λόγω της αντίδρασης του $Ca(OH)_2$ με το SiO_2 . Για την διερεύνηση χρονικά της δράσης της ιπταμένης τέφρας, μέσω της θερμοστατικής ανάλυσης επιλέχθηκε η εξέταση του τομπερμορίτη στα $14 A^\circ$ [10]. Τα.



Σχήμα23: Τυπικά διαγράμματα XRD Αργίλου III ηλικίας 7 ημερών.



Σχήμα 24: Τυπικά διαγράμματα XRD Αργίλου III ηλικίας 28 ημερών

1: SiO_2 χαλαζίας, 2: $CaCO_3$, 3: $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot xH_2O$, 4: Τομπερμορίτης 5: $Ca(OH)_2$,

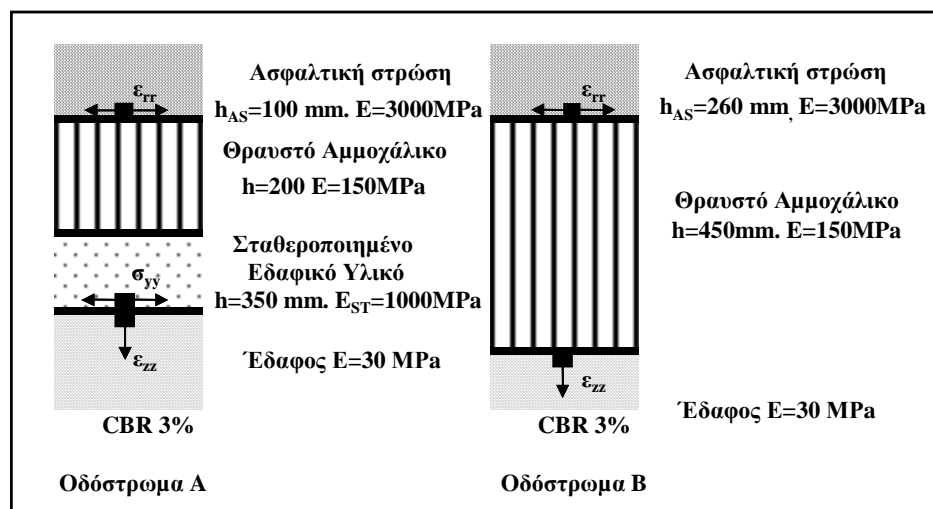
αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4 όπου φαίνεται ότι η δράση της ΙΤ συνεχίζεται και σε ηλικία 6 μηνών

Πίνακας 4: Αποτελέσματα θερμοστατικής ανάλυσης Τομπερμορίτη 14Α°

Ηλικία	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	
	0	4
3 ημέρες	0,71	0,78
7 ημέρες	0,77	0,80
28 ημέρες	0,82	0,92
180 ημέρες	1,10	1,05
270 ημέρες	1,12	1,07

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Οι στρώσεις από σταθεροποιημένα υλικά ρηγματώνονται λόγω επιβαλλομένων παραμορφώσεων είτε λόγω συστολής ξήρανσης είτε λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Υπάρχει διεθνώς η πεποίθηση ότι οι στρώσεις αυτές θα πρέπει να προστατεύονται ευθύς αμέσως μετά την κατάσκευή τους [7,8]. Για το λόγο αυτό συνίσταται η άμεση κάλυψη με στρώση από θραυστό αμμοχάλικο ΠΤΠ Ο 150/155. Οι στρώσεις από θραυστό αμμοχάλικο εκτός του ότι προστατεύουν την σταθεροποιημένη στρώση από τις καιρικές συνθήκες μειώνουν τις επιβαλλόμενες τάσεις είτε της εργοταξιακής κυκλοφορίας (φάση κατασκευής) είτε της κανονικής λειτουργίας (φάση λειτουργίας) της οδού [9].



Σχήμα 25: Ισοδύναμα Οδοστρώματα

Στο σχήμα 25 [9] παρουσιάζονται δύο ισοδύναμα οδοστρώματα από πλευράς αναπτυσσομένων τάσεων και παραμορφώσεων. Γίνεται φανερό ότι η χρήση στρώσεων από σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά επιφέρει σημαντική μείωση στα πάχη των στρώσεων εκείνων που αποτελούνται από μεταφερόμενα θραυστά υλικά (ΠΤΠ Ο150 55%, Ασφαλτόμιγμα 79%). Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι το οδόστρωμα Α έχει μικρότερο πάχος ασφαλτικών στρώσεων κατά 160 mm και ασύνδετο θραυστό αμμοχάλικο Ο155 κατά 250 mm. Τονίζεται ότι οι μειώσεις στα απαιτούμενα πάχη των στρώσεων αφορούν υλικά τα οποία αφενός μεν έχουν μεγάλο κόστος

(ασφαλτόμιγμα, θραυστό αμμοχάλικο)αφετέρου δε συνεπάγονται σημαντικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις λόγω της χρήσης θραυστών υλικών και της απαιτούμενης μεταφοράς τους σε αντίθεση με την χρήση σταθεροποιημένης εδαφικής στρώσης που αφορά επιτόπου εδαφικό υλικό.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εργασία αυτή συμπεραίνεται ότι η χρησιμοποίηση της Ι.Τ. για την σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον από άποψη τεχνική και οικονομική. Φαίνεται ότι η βελτίωση των εδαφικών υλικών εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, το χρησιμοποιούμενο ποσοστό σταθεροποιητή και τον χρόνο συντήρησης. Η μελέτη των υδραυλικών προϊόντων ενυδάτωσης της ΙΤ με υψηλό ποσοστό CaO έδειξε την δημιουργία μεγάλων ποσοστών τομπερμορίτη γεγονός που οδηγεί σε πυκνότερο και στερεότερο ιστό του εδαφικού υλικού. Η προσθήκη τσιμέντου οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών. Η βελτίωση των εδαφικών υλικών καθιστά τις σταθεροποιημένες στρώσεις κατάλληλες για περιπτώσεις οδοστρωμάτων με βαριά κυκλοφορία. Επιπλέον η χρησιμοποίηση των στρώσεων έδρασης με υψηλή φέρουσα ικανότητα επιφέρει σημαντικές μειώσεις στις απαιτούμενες διαστάσεις του πάχους των οδοστρωμάτων.

Βιβλιογραφία

- 1.Usmen M.A.and Bowders J.J.,Jr , "Stabilization Characteristics of Class F Fly Ash " Transportation Research Record 1288, pp59-69
- 2.Zia N. and Fox P.J., "Engineering Properties of Loess-Fly Ash Mixtures for Roadbase Construction", Transportation Research Record 1714, pp 49-56
- 3.Tsonis P., Christoulas S., Koliass S."Soil Improvement with Coal Ash in Road Construction" Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Helsinki 23-26 May 1983, pp 961-964
- 4.Kaniraj S.r. and Havanagi V.g., "Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures" Cement and Concrete Research 29 (1999) pp 673-677
- 5.Dawson A.R, Elliot R.C, Rowe R.c., Williams G.M, "Assessment of suitability of some industrial by-products for use in pavement bases in the United Kingdom" Transportation Research Record 1486, pp 114-123
- 6.Sherwood, P. "Soil Stabilization with Cement and Lime" State of the art review Transport Research Laboratory, 1993
- 7.LCPC-SETRA "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liant hydrauliques" Guide technique, 2000
- 8.LCPC-SETRA "Réalisation des Assises de Chaussées en graves traitées aux Liants Hydrauliques" Directive technique,1983
- 9.Κόλιας, Σ. και Συνεργάτες ,2002 "Στρώσεις έδρασης ή υπόβασης σταθεροποιημένες με ακατέργαστη ιπταμένη τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο", 3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων. Θεσσαλονίκη
10. Koliass, S. etal 2005 Elsevier, "Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement" Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, Pages 153-330 (February 2005)
11. Karangelos D. etal, 2005, "Coal fly ash utilization in Greece" World of Coal Ash , Lexington Kentucky, USA