

**ΧΡΗΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΠΥΡΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ
ΒΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΣΕΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΡΟΜΩΝ**

Π. Εσκίογλου¹ Γ. Παπαδημητρίου²

ΤΟΜΕΑΣ ΔΑΣΟΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
Τηλ. 2310998974 2310992725 FAX 2310998979
e-mail pxeskio@for.auth.gr

ΧΡΗΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΒΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΣΕΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΡΟΜΩΝ

Π. Εσκίογλου¹ Γ. Παπαδημητρίου²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αργιλώδη εδάφη χαμηλής φέρουσας ικανότητας της περιοχής Αριδαίας, ερευνήθηκε η δυνατότητα σταθεροποίησής τους με διάφορες ποσότητες τέφρας, τσιμέντου αλλά και σε κοινή ανάμειξη των δύο υλικών με σκοπό να μελετηθεί η μεταβολή των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Όρια Atterberg, Δοκιμή συμπίκνωσης-Proctor, αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, αντοχή CBR, κάμψη και μέτρο ελαστικότητας. Παρότι ο αριθμός των δειγμάτων που εξετάστηκαν είναι μικρός, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, αφού ο δείκτης πλαστικότητας και η μέγιστη ξηρά πυκνότητα μειώθηκαν -σε έδαφος CH- μέχρι 52% και 7% αντίστοιχα. Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη αυξάνεται με το χρόνο και με την προσθήκη τσιμέντου. Η αντίστοιχη αύξηση λόγω της προσθήκης τσιμέντου είναι περίπου 23%. Το κυριότερο συμπέρασμα όμως της έρευνας είναι ότι η χρησιμοποίηση της τέφρας, ως τεχνικό αλλά και ως βιολογικό μέτρο, είναι ένα βήμα για μια οδοποιία που σέβεται το περιβάλλον αφού έτσι προφυλάσσονται τα διαθέσιμα αποθέματα αδρανών για άλλες εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: Σταθεροποίηση εδαφών, ιπτάμενη τέφρα τσιμέντο, κάμψη, CBR

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η οδοστρωσία των δασικών δρόμων έχει ως σκοπό να ενισχύσει την φέρουσα ικανότητά τους ώστε να μπορούν να δεχθούν οποιοδήποτε κυκλοφοριακό φόρτο κάτω από οποιοδήποτε κλιματολογικές συνθήκες. Όταν η ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται με τη σταθεροποίηση του υπεδάφους με διάφορα εναλλακτικά υλικά, τότε έχουμε μειωμένα πάχη οδοστρώματος και επομένως μειωμένο κόστος κοτασκευής αλλά και ταυτόχρονη προστασία του περιβάλλοντος.

Ο όρος εναλλακτικά υλικά περιλαμβάνει υλικά που είτε είναι παραπροϊόντα παραγωγικών διαδικασιών (by-products) όπως σκωρίες, ιπτάμενη τέφρα, παραπροϊόντα εξόρυξης βωξίτη κ.τ.λ., είτε είναι υλικά προς απόρριψη (waste materials) όπως προϊόντα κατεδαφίσεων, τέφρα καύσης απορριμμάτων κ.τ.λ.

¹.Καθηγητής Τομέα Δασοτεχνικών και Υδρονομικών έργων ². Πολιτικός Μηχανικός PhD

Η χρήση των εναλλακτικών υλικών και των παραπροϊόντων απέκτησε μεγαλύτερη σημασία από τη στιγμή που η διαφύλαξη των φυσικών πηγών υλικών, η εξοικονόμηση ενέργειας και η αύξηση της περιβαλλοντικής ευαισθησίας, αυτό δηλαδή που ονομάζεται βιώσιμη ανάπτυξη έγινε παγκόσμιο ζητούμενο.(Τσώχος 2004).

Το εναλλακτικό υλικό που θα αποτελέσει μέσο της έρευνάς μας είναι η Ιπτάμενη τέφρα(I.T.), ένα λεπτά διαμερισμένο υπόλειμμα της καύσης κονιορτοποιημένου άνθρακα στους Θερμικούς Σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Με ετήσια εγχώρια παραγωγή στα 8,5 εκατομμύρια τόνους, ερευνήθηκε η δυνατότητα χρησιμοποίησή της σε έργα Οδοποιίας , στη φάση των χωματουργικών έργων , στην σταθεροποίηση -βελτίωση εδαφών, στην κατασκευή επιχωμάτων και κυρίως στη δημιουργία νέων δομικών υλικών.

Ο Μαρσέλλος κ.α (1986) σταθεροποίησαν εδάφη με τέφρα Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας και βρήκαν ότι βελτιώθηκε η αντοχή τους σε θλίψη , η πλαστικότητα , η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, ενώ αποδείχτηκε ότι η τέφρα μπορεί με επιτυχία να χρησιμοποιηθεί τόσο ως πρόσθετο για την κατασκευή υποβάσεων και βάσεων οδοστρωμάτων, όσο και για την κατασκευή επιχωμάτων σε συμπιεστά εδάφη. Εξαιτίας του χαμηλού ειδικού βάρους της τέφρας, η κατασκευή των επιχωμάτων μπορεί να γίνει και σε εδάφη με χαμηλή φέρουσα ικανότητα, αρκεί η συμπύκνωση της τέφρας να γίνεται κατά στρώσεις.

Ο Ηλιού (2004) κατέληξε επίσης στο συμπέρασμα ότι η I.T. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση στρώσεων οδοστρωσίας, αφού η ανάμειξή της σε ποσοστά 10-15% με θραυστά αδρανή και άσβεστο , έδωσε προϊόν που έχει παρόμοιες ιδιότητες με οδοστρώσεις σταθεροποιημένες με τσιμέντο . Ο Μουρατίδης (2004) διαπίστωσε ότι από άποψη αντοχής δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα για την εφαρμογή της τέφρας σε κατασκευή οδοστρώματος , αφού πειραματιζόμενος απέδειξε ότι τα μίγματα τέφρας-αδρανών φθάνουν σε ποσοστά αντοχής 50-70% των αντίστοιχων μιγμάτων τσιμέντου –αδρανών. Όταν δε αναμιγνύεται η τέφρα με εδάφη υψηλής πλαστικότητας , εκτός του ότι πετυχαίνεται βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και αύξηση της θλιπτικής και διατμητικής αντοχής τους, έχουμε και έλεγχο των φαινομένων διόγκωσης των εδαφών.

Σε δρόμους επαρχιακούς ,χαμηλής κυκλοφορίας, βρέθηκε ότι η τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις για κατασκευή σταθεροποιημένων στρώσεων βάσεων και υποβάσεων ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων (Σκειρ I. 2004) .

Ο Κόλιας κ.α(2005) βρήκε ότι με την προσθήκη τέφρας , και καθώς αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, μειώνεται το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος και ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής.

Σε δασικούς δρόμους, ο Στεργιάδης πειραματίστηκε για πρώτη φορά το 1977 και το 1978 με ιπτάμενη τέφρα που μετέφερε από τα λιγνιτορυχεία της Πτολεμαΐδας για την κατασκευή υποθεμελίωσης και υπόβασης στους δασικούς δρόμους του Πανεπιστημιακού δάσους του Περτουλίου. Η προσπάθεια όμως αυτή δεν ερευνήθηκε από άποψη μηχανικών ιδιοτήτων και η πειραματική επιφάνεια δόθηκε στην κυκλοφορία χωρίς να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα.

Στα εργαστήρια του Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου της Ζυρίχης διερευνήθηκε η δυνατότητα ενίσχυσης υφισταμένων οδοστρωμάτων με σταθεροποιημένες στρώσεις. Από την έρευνα αυτή προέκυψε πως, όταν σταθεροποιηθεί αμμοχαλικώδες έδαφος με ιπτάμενη τέφρα και τσιμέντο, αυτό βελτιώνεται και γίνεται αθεκτικότερο κατά 40%, ενώ η μέση παραμόρφωση του υπό την επίδραση των κυκλοφορούντων φορτίων μειώνεται κατά 35% σε σχέση με την υπολογισθείσα παραμόρφωση απευθείας στο φυσικό έδαφος (Eskioğlu et al 1995).

Οι Eskioğlu και Efthymiou (1996) ερευνώντας τις εναλλακτικές λύσεις σταθεροποίησης εδαφών για την μετακίνηση οχημάτων συγκομιδής, απέδειξαν ότι η σταθεροποίηση εδαφών με μίγμα τέφρας 30% και 8% ασβέστη αποτελεί μία ικανοποιητική λύση, αφού η τιμή της παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης στρώσης μειώνεται 1,7 φορές σε σχέση με την υπολογισθείσα παραμόρφωση απευθείας στο φυσικό έδαφος.

Οι Eskioğlu και Oikonomou (2008), πρόσθεσαν 5% τέφρας σε δασικό δρόμο που διαστρώθηκε με ανακυκλωμένη άσφαλτο –σαν υλικό βάσης- και απέδειξαν με τη δοκό του Benkelman ότι η παραμόρφωση του εδάφους μειώθηκε κατά 5%.

Από την άλλη το τσιμέντο είναι ένα υλικό που χρησιμοποιήθηκε μέχρι τώρα κυρίως για την σταθεροποίηση χονδρόκοκκου εδαφικού υλικού, αυξάνοντας αισθητά τη φέρουσα ικανότητα του. Ιδανική ποσότητα σταθεροποιητού υπολογίστηκε αυτή των 6-8% και πέραν αυτής η επέμβαση καθίσταται αντικοινωνική (Eskioğlu 1991, 2002). Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι το τσιμέντο έχει σημαντικά ευεργετικές επιπτώσεις και στην φέρουσα ικανότητα των λεπτόκοκκων εδαφικών στρώσεων. Συγκεκριμένα, ο Paradimitriou (2005) χρησιμοποιώντας 2,5% τσιμέντο σε αργιλικό υλικό στο οποίο 24 ώρες πριν είχε προηγηθεί ανάμιξη με μικρή ποσότητα ασβέστου (quicklime, 2,5%) κατέληξε ότι η φέρουσα ικανότητα της στρώσης βελτιώθηκε κατά τουλάχιστο 30% σε σχέση με τις στρώσεις που βελτιώθηκαν μόνο με ασβέστη και κατά τουλάχιστο 60% σε σχέση με αυτή του φυσικού υλικού.

Με βάση όλες τις παραπάνω πληροφορίες, στην παρούσα εργασία επιχειρείται να διερευνηθεί εργαστηριακά η δυνατότητα σταθεροποίησης αργιλικών εδαφών χαμηλής φέρουσας ικανότητας με διάφορες ποσότητες τέφρας και τσιμέντου χωριστά, αλλά και με

κοινή προσθήκη μίγματος τέφρας –τσιμέντου , ώστε να καταγραφούν οι όποιες μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων τους . Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την έρευνα αυτή, ώστε να αποτελέσουν την απαρχή της εφαρμογής της σταθεροποίησης απευθείας στο έδαφος για την κατασκευή νέων οικονομικών και ανθεκτικών οδοστρώσεων.

ΥΛΙΚΑ –ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Για την έρευνά μας επιλέχθηκε η δασική περιοχή Πευκωτού –Αριδαίας στην οποία επιλέξαμε θέσεις όπου κυριαρχούσαν λεπτόκοκκα εδάφη . Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής έρευνας είναι κυρίως φλύσχης και τα εδάφη που ερευνήθηκαν και προέρχονται από αυτόν ,είναι ασταθή αργιλικά με χαμηλή φέρουσα ικανότητα. Με τη μέθοδο της τυχαίας δειγματοληψίας , επιλέχθηκαν οι θέσεις εκσκαφής και ελήφθησαν συνολικά 20 εδαφικά δείγματα. Ελήφθησαν εδαφικά δείγματα και προμηθευτήκαμε τέφρα της Πτολεμαΐδας από τον ατμοηλεκτρικό σταθμό της Καρδίας και κοινό τσιμέντο εμπορίου Π35.

Στη συνέχεια τα εδαφικά υλικά μεταφέρθηκαν στα Εργαστήρια της 3^{ης} ΔΕΚΕ. Για κάθε εδαφικό δείγμα πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική εξέταση και υπολογισμός των ορίων Atterberg, ώστε να γνωρίζουμε σε ποια κατηγορία εδαφών κατατάσσονται. Ακολούθως τα εδαφικά δείγματα συμπυκνώθηκαν κατά την τροποποιημένη μέθοδο AASHTO T-180 και προσδιορίστηκε για κάθε εδαφικό δείγμα η βέλτιστη υγρασία W% και η αντίστοιχη ξηρή πυκνότητα γ_d . Πραγματοποιήθηκε σταθεροποίηση των εδαφικών δειγμάτων χωριστά με τέφρα με τσιμέντο και στη συνέχεια με μίγμα τους σε διάφορα ποσοστά. Στα σταθεροποιημένα δείγματα μετρήθηκε η μεταβολή των ορίων πλαστικότητας, της μέγιστης ξηράς πυκνότητας και της βέλτιστης υγρασίας και στη συνέχεια μετρήθηκε η μεταβολή των τιμών και ο υπολογισμός της αντοχής στη δοκιμή της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής ύστερα από συντήρηση των δοκιμίων για 7 ,28 και 90 ημέρες. Τα εδαφικά κυλινδρικά δοκίμια, διαστάσεων 50X100 mm, παρασκευάστηκαν με τη βέλτιστη υγρασία και συμπυκνώθηκαν στατικά σύμφωνα με τη μέθοδο B.S -1924/ 1975,δοκιμή 10.

Η διαδικασία της παρασκευής των δοκιμίων περιλαμβάνει την ξήρανση, τον θρυμματισμό των συσσωματωμάτων, το κοσκίνισμα με το κόσκινο Νο 4, τον καθορισμό των αναγκαίων ποσοτήτων του υλικού, την αναμονή 24-ωρών για την ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας, την ανάμιξη και τη συντήρηση των δοκιμίων σε πλαστική μεμβράνη σε θάλαμο συντήρησης με σταθερές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας.

Επειδή οι σταθεροποιημένες στρώσεις ή στρώσεις έδρασης ενός οδοστρώματος επιπονούνται από τα φορτία των οχημάτων σε κάμψη και η καμπτική αντοχή των υλικών

αυτών είναι σημαντική παράμετρος διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων, αν και τα σταθεροποιημένα δείγματα δεν υποβλήθηκαν σε δοκιμασία κάμψης, κατατίθενται βιβλιογραφικά αποτελέσματα(Κόλιας κ.α.2002).

Τέλος υπολογίστηκε η μεταβολή της τιμής της αντοχής των σταθεροποιημένων εδαφικών δειγμάτων μετρούμενη σε αντίστοιχες ποσότητες του εργαστηριακού CBR.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η κοκκομετρική διαβάθμιση σε συνδυασμό με τις τιμές των ορίων Atterberg των εδαφικών δειγμάτων έδειξε ότι τα εδάφη της έρευνας ανήκουν στα μικρής φέρουσας ικανότητας αργιλώδη εδάφη ,κατηγορίας CH και CL.

Η τέφρα της έρευνάς μας περιέχει υψηλό ποσοστό σε CaO, που παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται σε σταθεροποίηση αργιλικών εδαφών .Από την κοκκομετρική της εξέταση βρέθηκε ότι το 92% του βάρους της, διέρχεται από το κόσκινο Νο 200, πράγμα που καταδεικνύει την έμφαση των υδραυλικών και πουζολανικών της ιδιοτήτων.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα ποσοστά των συστατικών της τέφρας καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά που μετρήθηκαν στο δείγμα της έρευνάς μας .

Πίνακας 1.Χημική σύσταση I.T Καρδίας και σύσταση τέφρας έρευνας

Table 1. Ptolemais fly ash and research chemical percentage

Συστατικά	I.T. Πτολεμαΐδας %	Δείγμα έρευνας %
SiO ₂	13-35	20,3
Al ₂ O ₃	9-20	9,2
Fe ₂ O ₃	3,5-7	5,8
CaO	30-50	48
MgO	1,5-4,5	3,5
SO ₃	4-11	7
K ₂ O	0,5-1,1	0,5
Na ₂ O	0,6-0,8	0,6

Στους Πίνακες 2 και 3 δίνονται οι μεταβολές των ορίων Atterberg και από τη δοκιμή Proctor των τιμών ξηρής πυκνότητας-βέλτιστης υγρασίας ,κατόπιν της σταθεροποίησης των εδαφών CH και CL αντίστοιχα με διάφορα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας, ενώ στους Πίνακες 4 και 5 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη των δύο εδαφών της έρευνας κατόπιν της ξεχωριστής με τέφρα και τσιμέντο σταθεροποίησής τους σε διάφορα ποσοστά του σταθεροποιητή και για διάρκεια συντήρησης τις 7, 28 και 90 ημέρες,

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.Μεταβολή των ορίων Atterberg και των τιμών δοκιμής Proctor σε έδαφος CH, μετά τη σταθεροποίησή του με διάφορες ποσότητες I.T

Table 2.Atterberg limits, optimum moisture content, maximum dry density treated with different percentages of fly ash

Έδαφος CH	WL	IP	I.T. %	Ξηρά πυκνότητα Kg/cm ³	Βέλτιστη υγρασία W%
	62	39	0	1600	21.5
	55	31	5	1550	23.3
	55	20	10	1530	23.6
	52	19	20	1500	25.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Μεταβολή των ορίων Atterberg και των τιμών δοκιμής Proctor σε έδαφος CL, μετά τη σταθεροποίησή του με διάφορες ποσότητες I.T

Table 3.Atterberg limits, optimum moisture content, maximum dry density treated with different percentages of fly ash

Έδαφος CL	WL	IP	I.T. %	Ξηρά πυκνότητα Kg/cm ³	Βέλτιστη υγρασία W%
	35	17	0	1750	15
	33	14	5	1720	16.3
	32	12	10	1670	17.1
	32	12	20	1680	18

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Μεταβολή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ,σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού CH με διάφορες ποσότητες τέφρας και τσιμέντου , 7, 28 και 90ημέρες.

Table 4.Variation of the unconfined compressive strength of CH soil treated with different percentages of fly ash and cement for 7,28 and 90 days

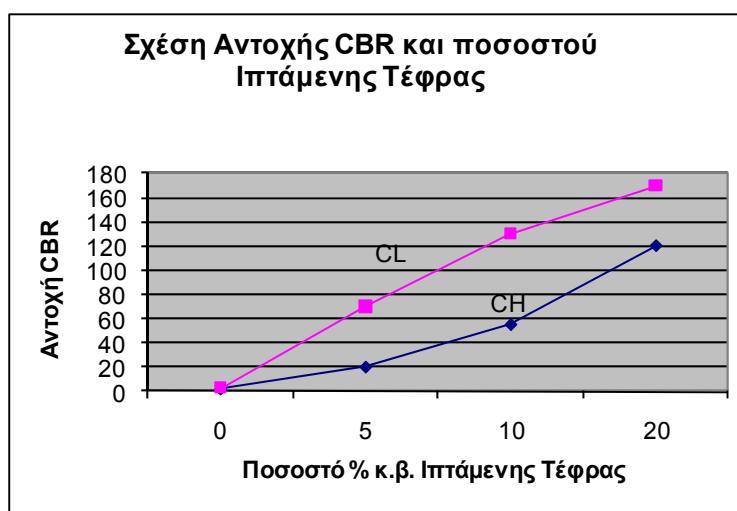
Έδαφος CH	I.T %	7ημ MPa	28ημ. MPa	90ημ MPa	Τσιμέντο %	7ημ MPa	28ημ. MPa	90ημ MPa
	0	0.13	0.2	0.3	0	0.13	0.2	0.3
	5	0.137	0.22	0.31	2	0.14	0.24	0.34
	10	0.147	0.25	0.315	4	0.15	0.28	0.36
	20	0.153	0.28	0.33				

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Μεταβολή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ,σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού CL με διάφορες ποσότητες τέφρας και τσιμέντου , 7, 28 και 90ημέρες.

Table 5.Variation of the unconfined compressive strength of CL soil treated with different percentages of fly ash and cement for 7, 28 and 90 days

Έδαφος CL	I.T %	7ημ MPa	28ημ. MPa	90ημ MPa	Τσιμέντο %	7ημ MPa	28ημ. MPa	90ημ MPa
	0	0.15	0.22	0.33	0	0.15	0.22	0.33
	5	0.17	0.24	0.34	2	0.3	0.44	0.74
	10	0.177	0.27	0.36	4	0.45	0.68	0.86
	20	0.183	0.3	0.39				

Στο σχήμα 1 παριστάνεται η μεταβολή της αντοχής του CBR των σταθεροποιημένων εδαφικών δειγμάτων της έρευνας , υπό την επίδραση διαφορετικών ποσοτήτων ιπτάμενης τέφρας



Σχήμα 1. Μεταβολή της αντοχής (CBR)των εδαφών έρευνας κατόπιν σταθεροποίησής τους με διάφορες ποσότητες ιπτάμενης τέφρας.

Figure 1.Variation of Californian Bearing Ratio of CL and CH soil treated with different percentages of fly ash

Τέλος στους Πίνακες 6 και 7 δίνονται αντίστοιχα η μεταβολή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη(MPa) ,σταθεροποιημένων εδαφών CL και CH με μίγμα διάφορων ποσοτήτων τέφρας και τσιμέντου και τα αποτελέσματα της δοκιμής της αντοχής κάμψης , αντοχής θλίψης και μέτρου ελαστικότητας, των εδαφών(Πηγή Κόλιας 2002) που έχουν σταθεροποιηθεί με ποσοστό τέφρας 10% και τσιμέντου 0 και 4%.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Μεταβολή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη(MPa) ,σταθεροποιημένων εδαφών CL και CH με μίγμα διάφορων ποσοτήτων τέφρας και τσιμέντου.
Table 6.Variation of the unconfined compressive strength of CL and CH soil treated with different percentages of fly ash mixed with cement for 7, 28 and 90 days

	4 ΜΕΡΕΣ			28 ΜΕΡΕΣ			90 ΜΕΡΕΣ		
ΤΣΙΜΕΝΤΟ %	0	2	4	0	2	4	0	2	4
ΕΛΑΦΟΣ CL	I.T 5%								
ANTOXH	0.52	0.76	0.93	0.77	1.32	1.72	1.12	1.90	2.42
	I.T 10%								
ANTOXH	0.55	0.79	0.95	1.10	1.30	1.65	1.87	2.0	2.50
	I.T. 20%								
ANTOXH	0.60	0.80	0.97	1.82	-	-	3.0	3.1	
ΕΛΑΦΟΣ CH	I.T. 5%								
ANTOXH	0.20	0.32	0.48	0.24	0.45	0.66	0.35	0.5	0.82
	I.T. 10%								
ANTOXH	0.45	0.55	0.67	0.58	0.83	0.88	0.72	0.97	1.10
	I.T. 20%								
ANTOXH	0.96			1.27			1.72		

Πίνακας 7.Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης
Table 7. Bending test results(Πηγή Κόλιας κ.α. 2002)

	I.T. (%)	Π 35 (%)	f_b^* (MPa)	f_c^* (MPa)	E_b^* (MPa)
1 Ημέρα	10	0	0.185	0.974	0.142
	10	4	0.234	1.786	0.129
7 Ημέρες	10	0	0.372	2.228	0.204
	10	4	0.462	3.136	0.354
28 Ημέρες	10	0	0.524	2.855	0.381
	10	4	0.648	4.567	0.473

^{*)} f_b :Αντοχή σε κάμψη f_c :Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου E_b :Μέτρο ελαστικότητας

ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια , επιχειρήθηκε να διερευνηθεί εργαστηριακά η δυνατότητα σταθεροποίησης αργιλικών εδαφών χαμηλής φέρουσας ικανότητας με διάφορες ποσότητες τέφρας και τσιμέντου χωριστά , αλλά και με κοινή προσθήκη μίγματος τέφρας – τσιμέντου , ώστε να καταγραφούν οι όποιες μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων τους . Τελικός στόχος της εργασίας ήταν να διερευνηθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την έρευνα αυτή, ώστε να αποτελέσουν την απαρχή της εφαρμογής της σταθεροποίησης απευθείας στο έδαφος για την κατασκευή νέων οικονομικών και ανθεκτικών οδοστρώσεων.

Για την εξαγωγή των όποιων συμπερασμάτων εξετάστηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά : Όρια Atterberg, Δοκιμή συμπύκνωσης-Proctor, αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, αντοχή CBR, κάμψη και μέτρο ελαστικότητας . Παρότι ο αριθμός των δειγμάτων που εξετάστηκαν είναι μικρός, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και όμοια σε γενικές γραμμές με όσα έχουν αποδείξει άλλοι ερευνητές.

Βρέθηκε ότι με τη χρήση τόσο μεμονωμένων όσο και σε μίξη των των σταθεροποιητών με το δασικό έδαφος, έχουμε μία σαφή βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών αυτών. Παρότι ο αριθμός των δειγμάτων που εξετάστηκαν είναι μικρός, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά , αφού ο δείκτης πλαστικότητα και η μέγιστη ξηρά πυκνότητα μειώθηκαν -σε έδαφοςCH- μέχρι 52% και 7% αντίστοιχα. Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη αυξάνεται με το χρόνο και με την προσθήκη τσιμέντου. Η αντίστοιχη αύξηση λόγω της προσθήκης τσιμέντου είναι περίπου 23%. Βιβλιογραφικά βρέθηκε ότι η αντοχή σε κάμψη αυξήθηκε σε σχέση με το χρόνο .Ομοίως συνδυασμός τσιμέντου Π35 μαζί με ιπτάμενη δίνει στο εδαφικό δείγμα σημαντικά μεγάλη αντοχή σε κάμψη (0,648MPa). Η αντίστοιχη αύξηση λόγω της προσθήκης τσιμέντου είναι περίπου 23%. Επιπλέον το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη αυξάνεται με το χρόνο και με την προσθήκη τσιμέντου.

Από την εργασία αυτή συμπεραίνεται ότι η χρησιμοποίηση της I.T. για την σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον από άποψη τεχνική και οικονομική. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά βελτιώνονται σε τέτοιο βαθμό που καθιστούν τις σταθεροποιημένες στρώσεις για περιπτώσεις οδοστρωμάτων με βαριά κυκλοφορία κατάλληλες για στρώση έδρασης με υψηλή φέρουσα ικανότητα γεγονός που μειώνει σημαντικά το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος.

Το κυριότερο συμπέρασμα όμως της έρευνας είναι ότι η χρησιμοποίηση της τέφρας, ως τεχνικό αλλά και ως βιολογικό μέτρο, είναι ένα βήμα για μια οδοποιία που σέβεται το περιβάλλον αφού έτσι προφυλάσσονται τα διαθέσιμα αποθέματα αδρανών για άλλες εργασίες.

The use of fly ash and cement for the improvement of clay subbases in forest roads construction

ABSTRACT

The effects of using fly ash alone or in conjunction with cement in stabilizing fine grained - low bearing capacity -clayey soils (CL,CH) from Aridaia was investigated in the laboratory. Various percentages of fly ash (5, 10 and 20%) and cement (2 and 4%) were used and the samples were cured for 7, 28 and 90 days. The index properties and the compaction characteristics of the treated and untreated materials were established while unconfined compressive strength, CBR as well as bending tests were performed. Although the number of samples was small, the results proved promising since a considerable improvement of the soil index and mechanical properties was evident after mixing with fly ash only, or fly ash and cement, indicating that the chemically treated soils can potentially form high quality subgrade, capping or subbase layers for forest pavement foundations. In detail, the results showed that with increased percentages of fly ash and cement the plastic limit increased while the liquid limit, for the CH soil, decreased by 52%. Moreover, the optimum moisture content increased with the maximum dry density reducing by 7%. The compressive strength, the CBR as well as the bending test values significantly improved after 7, 28 and 90 days of curing. Overall, the use of fly-ash and other waste or recycled materials represents an environmental friendly process that forms the basis for advanced state of the art road constructions from all biological, technical and economical points of view.

key words: Stabilization, Fly ash, cement, bending test, CBR

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εσκίογλου , Π.1991.Οικονομικά και ανθεκτικά οδοστρώματα στους δασικούς δρόμους της χώρας. Διδακτορική διατριβή . Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη

Εσκίογλου, Π.2002.Ενίσχυση δασικών δρόμων με παραπροϊόντα βιομηχανίας.3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη . Νοέμβριος 2002. Σελ.325-335.

Eskioglou, P.,N. Oikonomou. 2008.Protection of environment by the use of fly ash in forest road construction. Global nest journal. Vol. 10. Number 1. Pp. 108-113.March 2008

Ηλιού Ν. 2004 .Ιπτάμενη τέφρα και οδικές κατασκευές. Πρακτικά Συνεδρίου Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Οδοποιία. Θεσσαλονίκη Μάιος 2004 Θεσσαλονίκη σελ.17-30.

Κόλιας Σ.,Α. Καραχάλιος 2002. Στρώσεις έδρασης ή υπόβασης σταθεροποιημένες με τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο. 3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη . Νοέμβριος 2002. Σελ.249-262.

Μαρσέλλος Ν., Χριστούλας Σ., και Σ.Κόλιας 1986 .Χρήση της ιπτάμενης τέφρας στην Οδοποιία, Δελτίο ΚΕΔΕ , Τεύχος 3-4 σελ.113-129

Μουρατίδης Αν. 2004. Σταθεροποίηση οδοστρωμάτων με ιπτάμενη τέφρα..Πρακτικά Συνεδρίου Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Οδοποιία. Θεσσαλονίκη Μάϊος 2004 Θεσσαλονίκη σελ.47-58.

Papadimitriou G. 2005. The stiffness of lime and lime-cement stabilised capping layers. Ph.D. thesis. The University of Birmingham, School of civil engineering. Birmingham. UK.

Σκέιρ Ι.2004 Εργαστηριακές έρευνες για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε σταθεροποιημένες στρώσεις οδοστρωμάτων. Πρακτικά Συνεδρίου Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Οδοποιία. Θεσσαλονίκη Μάϊος 2004 Θεσσαλονίκη σελ.31-46.

Τσώχος Γ. 2004. Προοπτικές χρήσης βιομηχανικών παραπροϊόντων σε κατασκευές Οδοποιίας..Πρακτικά Συνεδρίου Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Οδοποιία. Θεσσαλονίκη Μάϊος 2004 Θεσσαλονίκη σελ.113-117.