

Αξιοποίηση στην οδοποιία μείγματος λιγνιτικής ιπτάμενης τέφρας και οργανικού ρυπαντή

Ο.Κ. Καρακάση, Α. Μουτσάτσου, Ν. Γιαννακέας

*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, 15773
Ζωγράφου Αθήνα*

Σ. Κόλλιας

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη, πετρελαιοκηλίδα, οδοποιία, σταθεροποίηση εδάφους

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη δυνατότητα αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας λιγνίτη στην προσρόφιση πετρελαίου και, στη συνέχεια του προκύπτοντος μείγματος ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου στην οδοποιία. Συγκεκριμένα, μελετάται η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε πετρελαιοκηλίδα, τόσο ως έχει, όσο και μετά από κατεργασία με τασιενεργό ουσία, ελαϊκό νάτριο, καθώς και ο ρόλος των συστατικών της στην προσρόφιση. Εξετάζεται η τελική δυνατότητα εφαρμογής των προκύπτοντων μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου στην σταθεροποίηση αργιλώδους εδάφους. Η προσθήκη μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου σε αργιλώδες έδαφος σε ποσοστό 3-20% κ.β. οδηγεί σε βελτίωση των μηχανικών αντοχών του, καθώς και των πλαστικών του ιδιοτήτων, κυρίως στην περίπτωση της ιπτάμενης τέφρας υψηλής περιεκτικότητας σε Ca.

Application of lignite fly ash-organic waste mixture in road construction

Karakasi O.K., Moutsatsou A., Giannakeas N.

*Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineering NTUA, 15773
Athens*

Kollias S.

School of Civil Engineering NTUA

Key words: lignite fly ash, oil spill, road construction, soil stabilisation

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: The present study deals with the possibility of application of lignite fly ash in oil sorption and, furthermore, the application of the resulting fly ash-oil mixture in road construction. In particular, the addition of fly ash, without any treatment or after treatment with a surface active agent, and particularly sodium oleate, to oil spill, the role of its components to the sorption process and the possibility of application of the resulting fly ash-oil mixtures in clay soil stabilisation is investigated. The addition of fly ash-oil mixtures to clay soil in a mass ratio 3-20% results in amelioration of its strength and plastic behaviour, mainly in case of high Ca fly ash.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη αποτελεί το κύριο παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη, στην οποία βασίζεται κατά 59% η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (EURACOAL, 2008). Η ετήσια παραγωγή της ανέρχεται περίπου σε 11 Mt, ενώ αξιοποιείται μόλις το 10% και, μάλιστα, στη βιομηχανία τσιμέντου. Η ιπτάμενη τέφρα τείνει να θεωρείται πλέον ως ενεργειακά αναβαθμισμένο βιομηχανικό παραπροϊόν, παρά ως απόβλητο, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων της, όπως οι ποζολανικές ή και υδραυλικές ιδιότητες, το μικρό ειδικό βάρος, η υδροφοβικότητά της, το μικρό μέγεθος κόκκων, το πορώδες. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για τη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής των ελληνικών ιπταμένων τεφρών, πέραν της βιομηχανίας τσιμέντου.

Συγκεκριμένα, έχει εξετασθεί η εφαρμογή τους στην οδοποιία και, μάλιστα, στην κατασκευή υποβάσεων και βάσεων οδοστρωμάτων, επιχωμάτων, και τη σταθεροποίηση εδαφών (Κόλλιας 1975, Kollias et al. 2005). Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε αργιλώδες έδαφος επιφέρει μείωση του ορίου υδαρότητας και αύξηση του ορίου πλαστικότητας και, συνεπώς, μείωση του δείκτη πλαστικότητας, αύξηση της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης και μείωση του μεγίστου ξηρού φαινομένου βάρους, αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιο (μονοαξονική) θλίψη, αύξηση του δείκτη φερουσής ικανότητας CBR (California Bearing Ratio) (Ιτσκος 2000). Μελέτες έχουν γίνει και για την αξιοποίηση των ελληνικών ιπταμένων τεφρών στη σύνθεση υλικών, όπως ζεολιθών (Kantiranis et al. 2006), γεωπολυμερών (Panias et al. 2007), υάλων και υαλοκεραμικών (Moutsatsou et al. 2001). Επίσης, έχει μελετηθεί η εφαρμογή των ελληνικών ιπταμένων τεφρών στην προσρόφηση οργανικών (Albanis et al. 1998) και ανόργανων ρύπων (Komnitsas et al. 2004) από λύματα.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στη μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας στην προσρόφηση πετρελαίου, τόσο ως έχει, όσο και μετά την κατεργασία της με τασιενεργό ουσία, η οποία αποσκοπεί στη βελτίωση του υδρόφοβου χαρακτήρα της. Ως τασιενεργός ουσία εξετάζεται, το ελαϊκό νάτριο, το οποίο βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην επίπλευση ορυκτών (Li 2004), έχει χαμηλό κόστος και βιοαποικοδομείται πλήρως. Εν συνεχεία, εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής των προκύπτοντων μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα, πριν ή μετά την κατεργασία της με ελαϊκό νάτριο, στη σταθεροποίηση αργιλώδους εδάφους, με απώτερο στόχο την εφαρμογή τους στην οδοποιία.

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Δείγματα ιπτάμενης τέφρας

Εξετάστηκαν δύο τύποι ιπτάμενης τέφρας, ΙΤΑΔ και ΙΤΜ, προερχόμενοι αντιστοίχως από τους ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου και Μεγαλόπολης, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση. Για τον πλήρη χαρακτηρισμό τους έγινε προσδιορισμός pH (ISO 6588), Cl⁻ (EN 196-21), ειδικού βάρους (ASTM C 642-90), κατανομής μεγέθους κόκκων (DIN 4188), ενώ η μελέτη της δομής τους έγινε με ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (XRD, Siemens D-500), θερμοβαρυσμετρική ανάλυση (TGA, Mettler TGA/STDA 851^C) και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM, FEI Quanta 200 SEM) και ο προσδιορισμός του πορώδους και της ειδικής επιφανείας τους με ποροσιμετρία N₂ (NOVA 2200e, 21CFR Part 11 Compliant Version 9.02).

Στον Πίνακα 1 δίδεται η χημική σύσταση των δειγμάτων τέφρας. Και οι δύο τέφρες ανήκουν στην κατηγορία C κατά ASTM C 618 και η μεν ΙΤΑΔ είναι πλούσια σε Ca, η δε ΙΤΜ πλούσια σε Si. Κύριες ορυκτολογικές φάσεις της ΙΤΑΔ, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα XRD (Σχ. 1), είναι ο χαλαζίας (SiO₂), η άσβεστος (CaO), ο ανυδρίτης (CaSO₄), ο ασβεστίτης (CaCO₃), ο γκελενίτης

($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), ο γισμονδίνης ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)), ενώ κύριες φάσεις της ITM ο χαλαζίας, ο ανυδρίτης, ο αλβίτης ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$) και ο λαμπραδορίτης ($(\text{Ca,Na})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$).

Πίνακας 1. Χημική σύσταση δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας

% κ.β.	ITAD	ITM
SiO_2	29.73	51.26
Al_2O_3	13.90	19.39
Fe_2O_3	6.49	8.44
CaO	34.13	11.82
CaO_f	7.68	0.95
MgO	3.56	2.27
SO_3	5.13	2.91
Na_2O	1.12	0.53
K_2O	0.68	1.81
L.O.I.	4.03	1.67

2.2 Κατεργασία ιπτάμενης τέφρας με ελαϊκό νάτριο

Το ελαϊκό νάτριο, SO ($\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$), είναι αντιδραστήριο χημικής καθαρότητας της BDH. Η κατεργασία της ιπτάμενης τέφρας με το SO έλαβε χώρα εντός υδατικού διαλύματος SO, σε κ.β. αναλογία τέφρας/SO 1:0.004 και αναλογία διαλύματος/ιπτάμενης τέφρας 5mL/g, υπό ανάδευση στους 25 °C επί 1h, συνθήκες οι οποίες προέκυψαν ως βέλτιστες μετά από σειρά πειραμάτων.

2.3 Προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε πετρελαιοκηλίδα

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της ιπτάμενης τέφρας, τόσο ως έχει, όσο και μετά την κατεργασία της με SO, έγινε προσομοίωση πετρελαιοκηλίδας πάχους 0.5mm με προσθήκη 2mL πετρελαίου σε 150mL θαλασσίου ύδατος, παρασκευασθέντος κατά ASTM D 1141-90. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι πετρελαίου, με σκοπό την κάλυψη του φάσματος των θαλασσίων μεταφορών: πετρέλαιο θέρμανσης (HO, heating oil), ελαφρό πετρέλαιο κύκλου πυρόλυσης (LCO, light cycle oil) και ιρανικό ελαφρό αργό πετρέλαιο (ILCO, Iranian light crude oil). Στον Πίνακα 2 δίδονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των πετρελαίων. Για την προσρόφηση της πετρελαιοκηλίδας έγινε προσθήκη 1g ιπτάμενης τέφρας, συλλογή του μείγματος πετρελαίου-τέφρας μετά από 4 ημέρες, με σκοπό την επίτευξη συνεκτικότερης ημιστερέας φάσης, και προσδιορισμός του τυχόν καταβυθιζομένου υλικού. Ο προσδιορισμός της προσροφητικής ικανότητας της ιπτάμενης τέφρας ως προς το πετρέλαιο έγινε εν ξηρώ, κατά ASTM F 726-06.

Πίνακας 2. Ιδιότητες πετρελαίου θέρμανσης (HO), ελαφρού πετρελαίου κύκλου πυρόλυσης (LCO) και ιρανικού ελαφρού αργού πετρελαίου (ILCO)

Παράμετρος	HO	LCO	ILCO
πυκνότητα (g/cm^3) (20°C) (ASTM D 1298)	0.8203	0.8160	0.8656
κινηματικό ιξώδες (cSt) (20°C) (ASTM D 445)	3.27	4.70	13.84
περιεκτικότητα σε S (% κ.β.)	0.16	2.05	1.93

2.4 Σταθεροποίηση αργιλώδους εδάφους με μείγματα ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου

Τα χαρακτηριστικά του εξετασθέντος αργιλώδους εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της κατανομής μεγέθους κόκκων έγινε κατά AASHTO T 11-77-I, του ορίου υδαρότητας (LL, liquid limit) κατά AASHTO T 89-76I, του ορίου πλαστικότητας (PL, plastic limit) και του δείκτη πλαστικότητας (PI, plasticity index) κατά AASHTO T 90-70, της υγρασίας (w) κατά AASHTO T 239-76I (ASTM D 3017-72), της βέλτιστης υγρασίας (w_{opt}) και του μεγίστου ξηρού φαινομένου βάρους ($\gamma_{d, max}$) κατά AASHTO T 99-74.

Πίνακας 3. Ιδιότητες αργιλώδους εδάφους

Παράμετρος	Έδαφος
λεπτόκοκκο κλάσμα (< 0.075mm) (%)	77.0
LL (% κ.β.)	32.0
PL (% κ.β.)	22.5
PI (% κ.β.)	9.5
w (% κ.β.)	14.8
w_{opt} (% κ.β.)	16.6
$\gamma_{d, max}$ (kg/m ³)	1849
κατάταξη κατά AASHTO	A-7-6

Για την εφαρμογή των μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου στη σταθεροποίηση του αργιλώδους εδάφους, τα πειράματα προσομοίωσης πετρελαιοκηλίδας διεξήχθησαν σε μεγαλύτερη κλίμακα, με σκοπό την παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων. Έγινε ανάμειξη των μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας-πετρελαίου με το αργιλώδες έδαφος σε ποσοστά 3 και 20% κ.β. και ακολούθησε πάκτωση εντός κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 5cm και ύψους 10cm. Τα μεν δοκίμια σε ποσοστό ανάμειξης 3% κ.β. παρέμειναν σε χώρο κεκορεσμένο υγρασίας (95%) επί 7, 60 και 90 ημέρες, τα δε δοκίμια σε ποσοστό ανάμειξης 20% κ.β. παρέμειναν επί 90 ημέρες. Στη συνέχεια, έγινε προσδιορισμός της αντοχής σε ανεμπόδιο θλίψη, του ορίου υδαρότητας και πλαστικότητας και του δείκτη πλαστικότητας.

3 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Συμπεριφορά ιπτάμενης τέφρας, πριν και μετά την κατεργασία της με ελαϊκό νάτριο, κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα

Η συμπεριφορά της ιπτάμενης τέφρας λιγνίτη κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα είναι ενθαρρυντική. Μετά την πάροδο περίπου 4 ημερών από την προσθήκη της, σχηματίζει ημιστερεά φάση με το πετρέλαιο. Στην περίπτωση των ιξωδεστέρων πετρελαίων, LCO και ILCO, η σχηματιζόμενη ημιστερεά φάση είναι αρκετά συνεκτική, ώστε να επιτρέπει την σχεδόν πλήρη απομάκρυνση του πετρελαίου. Η συγκράτηση, όμως, της ιπτάμενης τέφρας στη διεπιφάνεια πετρελαίου-ύδατος είναι ευαίσθητη σε κάθε κίνησή της, με αποτέλεσμα την καταβύθιση είτε κόκκων ιπτάμενης τέφρας, στην περίπτωση της ΙΤΑΔ, είτε και μείγματος τέφρας-πετρελαίου, στην περίπτωση της ΙΤΜ. Η υψηλότερης περιεκτικότητας σε Ca ΙΤΑΔ εμφανίζει μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα σε σχέση με αυτή της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε Ca ΙΤΜ. Συγκεκριμένα, η προσροφητική ικανότητα της ΙΤΑΔ εν ξηρώ μετά από 24h κυμαίνεται μεταξύ 0.7

για το ILCO έως 0.9g πετρελαίου/g τέφρας για το HO, ενώ της ITM μεταξύ 0.5 και 0.6g πετρελαίου/g τέφρας.

Η σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά των δύο τεφρών κατά την προσθήκη τους σε πετρελαιοκηλίδα δεν θα μπορούσε να αποδοθεί ούτε στο πορώδες τους, αφού δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τεφρών (ειδική επιφάνεια 3.8-4.1m²/g, διάμετρος πόρων 158-165Å, όγκος πόρων 0.016m³/g), ούτε στο ειδικό τους βάρος, αφού η ITM (2.5g/cm³) είναι κατά τι ελαφρότερη της ITAD (2.8g/cm³). Η καλύτερη συμπεριφορά της ITAD κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα θα μπορούσε να αποδοθεί στην υψηλή περιεκτικότητά της σε ελεύθερα άσβεστο CaO_f, η οποία είναι υπεύθυνη για τις υδραυλικές της ιδιότητες, οι οποίες οδηγούν στην διόγκωσή της παρουσία ύδατος, επιτρέποντας πιθανώς την καλύτερη συνάφειά της προς το πετρέλαιο. Στην καλύτερη, όμως, συμπεριφορά της φαίνεται να συνεισφέρει και η υψηλότερη περιεκτικότητά της σε άκαυστο C (L.O.I.), άποψη η οποία ενισχύεται και από το γεγονός, ότι η ITAD εμφανίζει μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα ως προς το πετρέλαιο εν ξηρώ.

Η συμπεριφορά της ιπτάμενης τέφρας κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα καθιστά απαραίτητη τη βελτίωση της ικανότητας επίπλευσής της. Η υδροθερμική της κατεργασία με τασιενεργό ουσία, το ελαϊκό νάτριο (SO), συμβάλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς της.

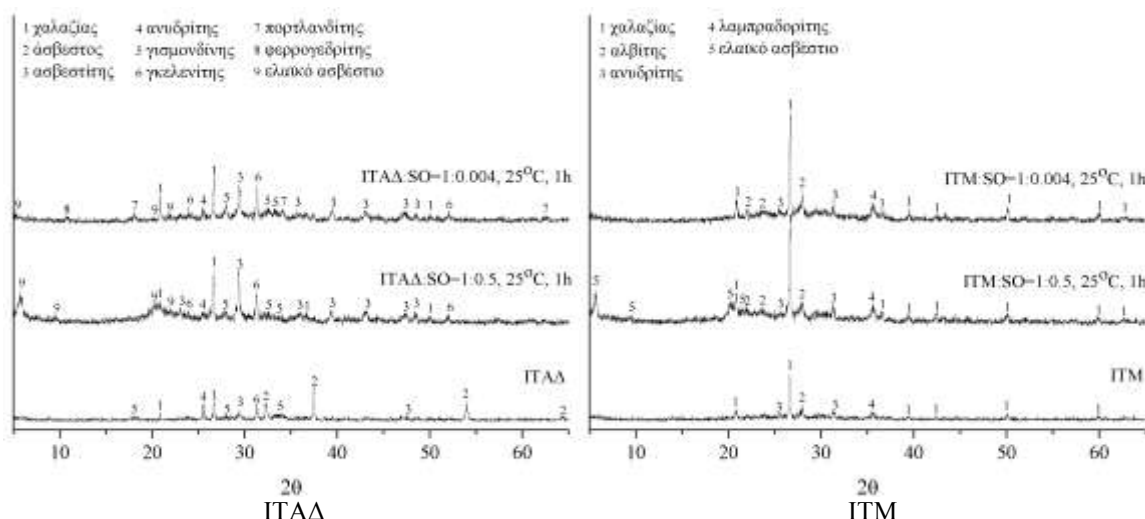
Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της ITAD, οδηγεί στον σχηματισμό πολύ συνεκτικότερης ημιστερεάς φάσης με το πετρέλαιο, η οποία επιτρέπει την πλήρη απομάκρυνσή του, ενώ δεν παρατηρείται καταβύθιση τέφρας. Αν και η ειδική επιφάνεια της τέφρας, μετά την κατεργασία της με SO, διπλασιάζεται (9.0m²/g) και ο όγκος των πόρων της σχεδόν τετραπλασιάζεται (0.057m³/g), δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της προσροφητικής της ικανότητας ως προς το πετρέλαιο, το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί σε μη επαρκή διεύρυνση των πόρων, ώστε να είναι δυνατή η προσρόφηση σε αυτούς των μεγάλου μεγέθους μορίων του πετρελαίου.

Αντιθέτως, η κατεργασία της ITM με SO σε κ.β. αναλογία 1:0.004 δεν οδηγεί σε αισθητή βελτίωση της ικανότητας επίπλευσής της και σχηματισμό συνεκτικής ημιστερεάς φάσης με το πετρέλαιο. Βελτίωση της συμπεριφοράς της κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα επιτυγχάνεται σε πολύ μεγαλύτερη αναλογία: 1:0.5 κ.β.

Καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα της υδροθερμικής κατεργασίας της ιπτάμενης τέφρας με SO φαίνεται να είναι και πάλι η περιεκτικότητά της σε CaO_f. Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα XRD (Σχ. 1), στην περίπτωση της ITAD παρατηρείται μετατροπή της φάσης της ασβέστου (CaO) σε ασβεστίτη (CaCO₃) και ελαϊκό ασβέστιο ((C₁₇H₃₃COO)₂Ca), το οποίο σχηματίζεται ήδη από την αναλογία τέφρας/SO 1:0.004, αλλά σε μεγαλύτερο βαθμό σχηματίζεται σε μεγαλύτερες αναλογίες (1:0.5). Αντιθέτως, στην περίπτωση της ITM, παρατηρείται σχηματισμός ελαϊκού ασβεστίου μόνο σε μεγάλη αναλογία (1:0.5). Στη φάση του ελαϊκού ασβεστίου, το οποίο διαθέτει μεγάλο μήκος οργανικό τμήμα, οπότε και έχει μεγαλύτερη συγγένεια προς το πετρέλαιο, θα μπορούσε να αποδοθεί η βελτίωση της συμπεριφοράς της ιπτάμενης τέφρας κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα.

3.2 Σταθεροποίηση αργιλώδους εδάφους με μείγματα πετρελαίου-ιπτάμενης τέφρας

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η μεταβολή του δείκτη πλαστικότητας, καθώς και η αντοχή σε ανεμπόδιστο θλίψη του αργιλώδους εδάφους, μετά από 7, 60 και 90 ημέρες παραμονής σε χώρο κεκορεσμένο υγρασίας, μετά την προσθήκη μειγμάτων πετρελαίου-τέφρας σε ποσοστό 3% κ.β.



Σχήμα 1. Διαγράμματα XRD ιπταμένων τερφών ΙΤΑΔ και ΙΤΜ, πριν και μετά την κατεργασία τους με SO σε διάφορες αναλογίες

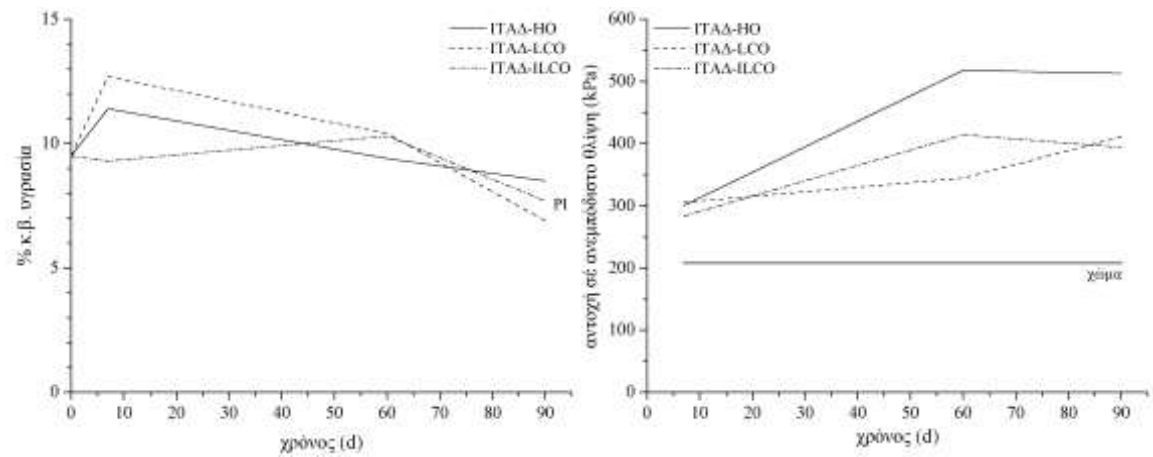
Η μεταβολή των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας και του δείκτη πλαστικότητας είναι αισθητή μόνο στην περίπτωση της ΙΤΑΔ, πριν την κατεργασία της με SO. Αν και αρχικά, μετά από 7 ημέρες, παρατηρείται αύξηση του δείκτη πλαστικότητας, τελικά, μετά από 90 ημέρες, επιτυγχάνεται μείωσή του κατά 10-28%, το οποίο αποτελεί ένδειξη μείωσης της πλαστικότητας του εδάφους, η οποία είναι επιθυμητή για τη σταθεροποίησή του.

Σε όλες τις περιπτώσεις μειγμάτων τέφρας-πετρελαίου και σε όλους τους χρόνους, παρατηρείται αύξηση της αντοχής, σε σχέση με αυτή του εδάφους. Μεγαλύτερες, όμως, αντοχές επιτυγχάνονται μετά από 60 και, κυρίως, μετά από 90 ημέρες, αναμενόμενο για την ιπτάμενη τέφρα, της οποίας η δράση είναι βραδεία. Γενικά, η επιτυγχανόμενη αντοχή είναι 1.6-2.6 φορές μεγαλύτερη της αρχικής αντοχής του εδάφους. Μεγαλύτερη αντοχή, όμως, επιτυγχάνεται στην περίπτωση της ΙΤΑΔ, πριν την κατεργασία της με SO, και μάλιστα στην περίπτωση του πετρελαίου ΗΟ.

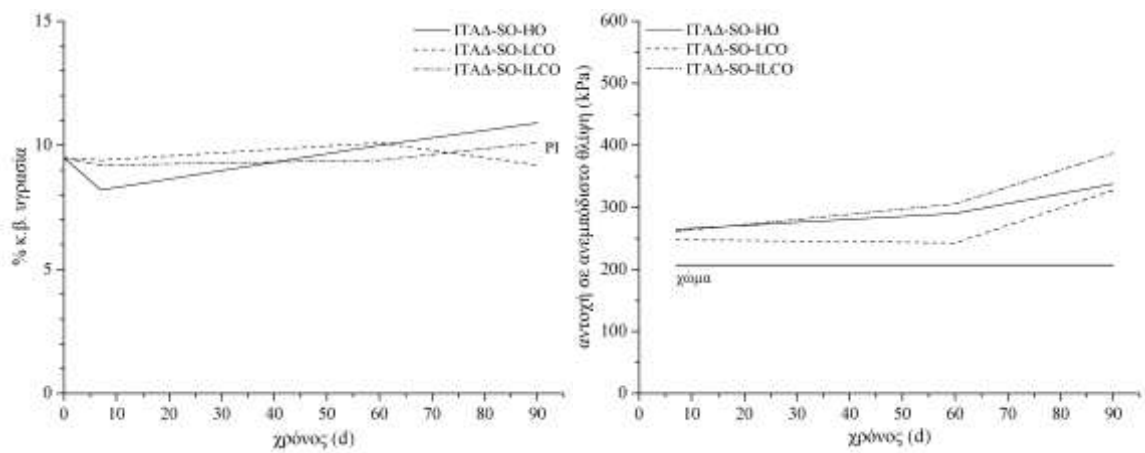
Η μεγαλύτερη βελτίωση του εδάφους στην περίπτωση της ΙΤΑΔ, η οποία αποδεικνύεται αφ' ενός από την μείωση του δείκτη πλαστικότητας, αφ' ετέρου από τη μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής, θα μπορούσε να αποδοθεί στην υψηλότερη περιεκτικότητά της σε CaO_f , η οποία ευθύνεται για την ανάπτυξη αντοχών. Η μεγαλύτερη επιτυγχανόμενη αντοχή στην περίπτωση του ΗΟ θα μπορούσε να αποδοθεί στο χαμηλό του ιζώδες, εξ αιτίας του οποίου η τέφρα επικαλύπτεται σε μικρότερο βαθμό, οπότε διευκολύνεται η δράση της CaO_f . Εν αντιθέσει προς την ΙΤΑΔ, τόσο η ΙΤΜ, της οποίας η περιεκτικότητα σε CaO_f είναι χαμηλή, όσο και η ΙΤΑΔ μετά την κατεργασία της με SO, της οποίας η φάση της CaO έχει σχεδόν πλήρως καταναλωθεί, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα XRD (Σχ. 1), συμβάλλουν σε μικρότερο βαθμό στη σταθεροποίηση του εδάφους.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η μεταβολή του δείκτη πλαστικότητας, καθώς και η επιτυγχανόμενη αντοχή σε ανεμπόδιτο θλίψη του αργιλώδους εδάφους, μετά από 90 ημέρες παραμονής σε χώρο κεκορεσμένο υγρασίας, μετά την προσθήκη μειγμάτων τέφρας-πετρελαίου σε ποσοστό 3 και 20% κ.β.

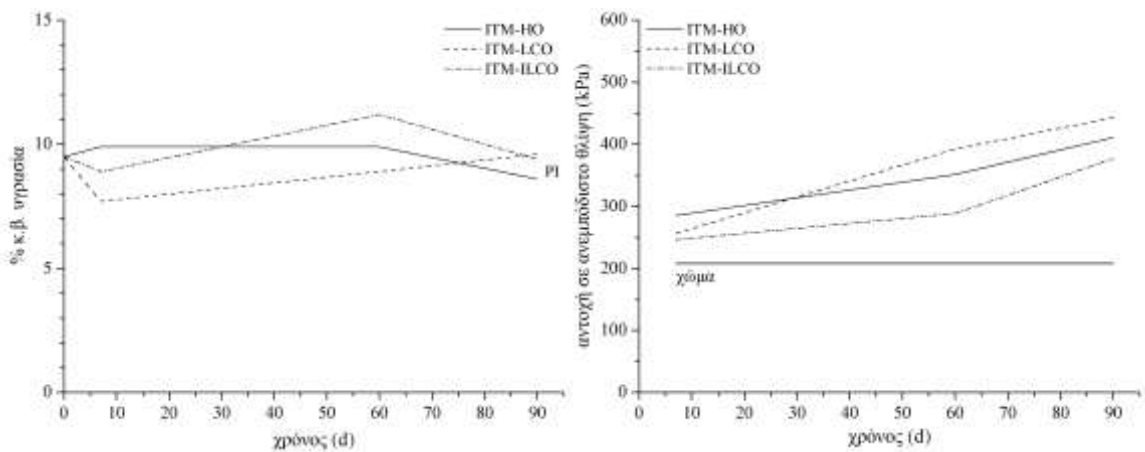
Στην περίπτωση της ΙΤΑΔ, αν και σε ποσοστό προσθήκης 3% κ.β. παρατηρείται μείωση του δείκτη πλαστικότητας, σε ποσοστό 20% κ.β. παρατηρείται αύξησή του. Αντιθέτως, στην περίπτωση της ΙΤΜ, καθώς και της ΙΤΑΔ μετά την κατεργασία της με SO, παρατηρείται μείωση



ITAD

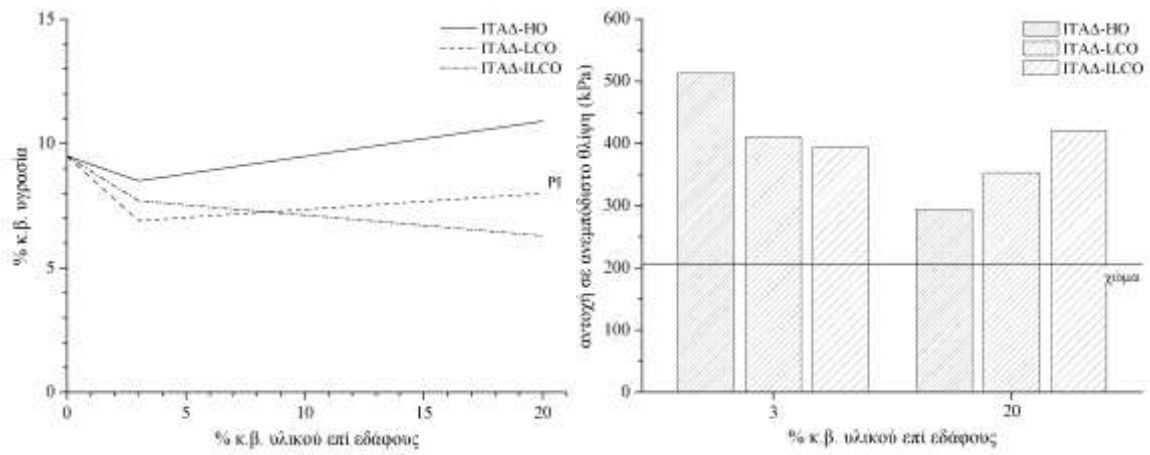


ITAD:SO=1:0.004 κ.β.

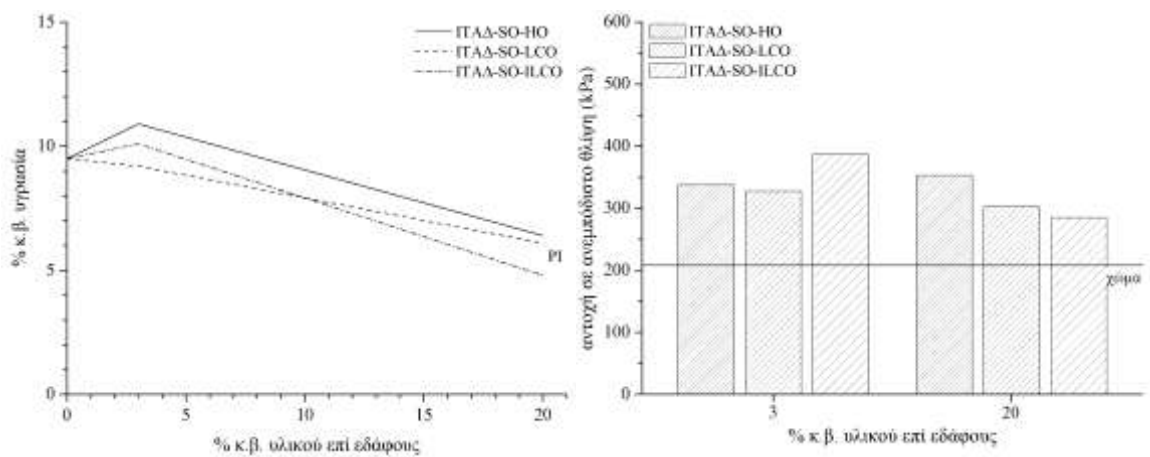


ITM

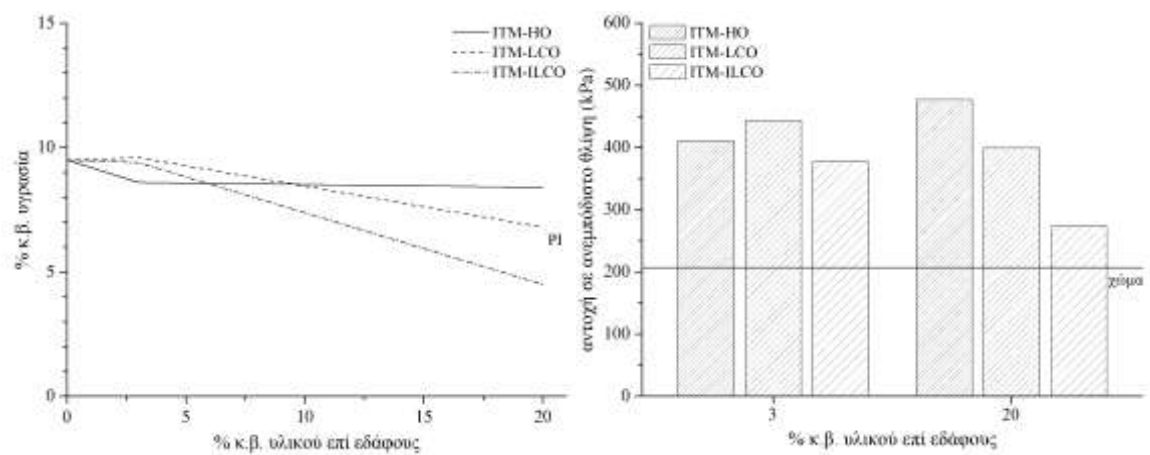
Σχήμα 2. Δείκτης πλαστικότητας (PI) και αντοχή σε ανεμώδιστο θλίψη δοκιμίων αργιλώδους εδάφους σε ποσοστό προσθήκης μειγμάτων πετρελαίου-ιπταμένων τερφών (ITAD, πριν και μετά την κατεργασία με SO, και ITM) 3% κ.β., μετά από 7, 60 και 90 ημέρες παραμονής σε χώρο κεκορεσμένο υγρασίας



ITAD



ITAD:SO=1:0.004 κ.β.



ITM

Σχήμα 3. Δείκτης πλαστικότητας (PI) και αντοχή σε ανεμπόδιστο θλίψη δοκιμών αργιλώδους εδάφους σε ποσοστά προσθήκης μειγμάτων πετρελαίου-ιπταμένων τερφών (ITAD, πριν και μετά την κατεργασία με SO, και ITM) 3 και 20% κ.β., μετά από 90 ημέρες παραμονής σε χώρο κεκορεσμένο υγρασίας

του δείκτη πλαστικότητας σε ποσοστό 20% κ.β., ενώ σε ποσοστό 3% κ.β. παρατηρείται αύξησή του. Γενικά, η προσθήκη ασβέστου σε αργιλώδη εδάφη επιφέρει άλλοτε μείωση του δείκτη πλαστικότητας, κυρίως σε εδάφη μεγάλης πλαστικότητας, και άλλοτε αύξησή του, κυρίως σε εδάφη μέσης ή μικρής πλαστικότητας, και μάλιστα σε υψηλό ποσοστό προσθήκης (Κόλλιας 1975). Επομένως, η συμπεριφορά της ΙΤΑΔ σε ποσοστό προσθήκης 20% κ.β. στο εξετασθέν μέσης πλαστικότητας αργιλώδες έδαφος εξηγείται βάσει της υψηλής της περιεκτικότητας σε CaO_f . Η μείωση του δείκτη πλαστικότητας, στην περίπτωση της ΙΤΜ και της ΙΤΑΔ μετά την κατεργασία της με SO , σε ποσοστό προσθήκης 20% κ.β. θα μπορούσε, επίσης, να αποδοθεί στην CaO_f της οποίας η ποσότητα αυξάνεται τόσο, ώστε να καθίσταται αποτελεσματική η δράση της.

Η αύξηση του ποσοστού προσθήκης μειγμάτων πετρελαίου-τέφρας στο αργιλώδες έδαφος δεν επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση στην αντοχή του, αλλά σχεδόν την αυτή ή μικρότερη αύξηση. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην δράση του πετρελαίου, η αύξηση της συγκέντρωσης του οποίου προκαλεί μείωση της πυκνότητας του εδάφους και, κατά συνέπεια, της φυσικής εσωτερικής αντίστασής του σε τριβή (Κόλλιας 1975).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η συμπεριφορά της ιπτάμενης τέφρας λιγνίτη κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα είναι ενθαρρυντική. Σχηματίζει με το πετρέλαιο ημιστερεά φάση, η οποία επιτρέπει την εύκολη και σχεδόν πλήρη απομάκρυνση του πετρελαίου από την επιφάνεια του ύδατος. Καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότητά της φαίνεται να είναι η περιεκτικότητά της σε CaO_f και άκανστο C. Η πλούσια σε CaO_f και άκανστο C τέφρα συγκρατείται καλύτερα στην επιφάνεια, σχηματίζει συνεκτικότερη ημιστερεά φάση και έχει μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα ως προς το πετρέλαιο.
- Η υδροθερμική κατεργασία της τέφρας με τασιενεργό ουσία, και συγκεκριμένα με ελαϊκό νάτριο, συμβάλλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς της. Οδηγεί σε σχηματισμό συνεκτικότερης ημιστερεάς φάσης, η οποία επιτρέπει την πλήρη απομάκρυνση του πετρελαίου, χωρίς καταβύθιση τέφρας. Παρά ταύτα, δεν επιτυγχάνεται αισθητή αύξηση της προσροφητικής της ικανότητας, εφ' όσον η επιτυγχανόμενη αύξηση του πορώδους δεν επαρκεί.
- Καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας με ελαϊκό νάτριο φαίνεται να είναι η περιεκτικότητα της τέφρας σε CaO_f , η οποία μετατρέπεται μερικώς σε ελαϊκό ασβέστιο, το οποίο αυξάνει τη συνάφειά της προς το πετρέλαιο. Έτσι, για τη βελτίωση της συμπεριφοράς της πλούσιας σε CaO_f τέφρας απαιτείται προσθήκη ελαϊκού νατρίου σε πολύ χαμηλό ποσοστό (0.4% κ.β.), ενώ για την χαμηλής περιεκτικότητας σε CaO_f τέφρα απαιτείται υψηλότερο ποσοστό (50% κ.β.).
- Η εφαρμογή των μειγμάτων τέφρας-πετρελαίου στην σταθεροποίηση εδάφους, με σκοπό την κατασκευή υποβάσεων οδών, είναι ενθαρρυντική, κυρίως στην περίπτωση τέφρας υψηλής περιεκτικότητας σε CaO_f , πριν την κατεργασία της με ελαϊκό νάτριο, η οποία όμως συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της συμπεριφοράς της κατά την προσθήκη της σε πετρελαιοκηλίδα.
- Μείωση της πλαστικότητας αργιλώδους εδάφους επιτυγχάνεται κατά την προσθήκη σε χαμηλό ποσοστό (3% κ.β.) τέφρας πλούσιας σε CaO_f και σε υψηλό ποσοστό (20% κ.β.) τέφρας είτε πλούσιας σε CaO_f , μετά την κατεργασία της με ελαϊκό νάτριο, οπότε έχει μειωθεί η CaO_f , είτε χαμηλής περιεκτικότητας σε CaO_f .

- Αύξηση της αντοχής αργιλώδους εδάφους σε ανεμπόδιστο θλίψη επιτυγχάνεται μετά από 60 ημέρες και, κυρίως, μετά από 90 ημέρες, λόγω της βραδείας δράσης της ιπτάμενης τέφρας. Η επιτυγχανόμενη αντοχή του εδάφους είναι 1.6-2.6 φορές μεγαλύτερη της αρχικής.
- Μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής επιτυγχάνεται κατά την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας υψηλής περιεκτικότητας σε CaO_f και, μάλιστα, σε χαμηλό ποσοστό (3% κ.β.). Η μικρότερη αύξηση της αντοχής σε υψηλότερο ποσοστό προσθήκης (20% κ.β.) θα μπορούσε να αποδοθεί στην αύξηση της συγκεντρώσεως του πετρελαίου.

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η Ό.Κ. Καρακάση ευχαριστεί το Κοινοφελές Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης, του οποίου υπήρξε υπότροφος.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ίτσκος, Σ.Γ. 2000. *Ιπτάμενη Τέφρα. Οι δύο όψεις: βιομηχανικό απόβλητο ή παραπροϊόν*. Πτολεμαΐδα: Εκδόσεις Γ. Τσαβδαρίδης.

Κόλλιας, Σ. 1975. *Σταθεροποιήσεις εδαφών. Σταθεροποιήσεις βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων*. Αθήναι. Το παρόν τεύχος εβασίσθη εις το κείμενον διαλέξεων δοθεισών εις Σεμινάριον ποιότητας υλικών και κατασκευών οδών και αεροδρομίων, το οποίον διοργανώθη υπό του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος.

Albanis, T.A., Danis, T.G. and Kourgia, M.G. 1998. Adsorption-desorption studies of selected chlorophenols and herbicides and metal release in soil mixtures with fly ash. *Environmental Technology*, 19(1):25-34.

EURACOAL, European Association for Coal and Lignite. 2008. euracoal.be/newsite/overview.php

Kantiranis, N., Filippidis, A., Mouhtaros, Th., Paraskevopoulos, K.M., Zorba, T., Squires, C., Charistos, D. 2006. EPI-type zeolite synthesis from Greek sulphocalcic fly ashes promoted by H_2O_2 solutions. *Fuel*, 85: 360-366.

Kollias, S., Kasselouri-Rigopoulou V. and Karahalios, A. 2005. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement & Concrete Composites*, 27:301-313.

Komnitsas, K., Bartzas, G. and Paspaliaris, I. 2004. Clean up of acidic leachates using fly ash barriers: laboratory column studies. *Global Nest: the International Journal*, 6(1):81-89.

Li, C.-C. and Chang, M.-H. 2004. Colloidal stability of CuO nanoparticles in alkanes via oleate modifications. *Material Letters*, 58:3903-3907.

Moutsatsou, A.K., Karamberi, A. and Skotaras, J. 2001. Investigation and composition of glass through thermal treatment of fly ash. In *International Symposium Recycling and Reuse of Glass Cullet*, p. 239-247, Dundee.

Panias, D., Giannopoulou, I.P. and Perraki, T. 2007. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 301:246-254.