

## Μελέτη μιγμάτων ακατέργαστης τέφρας και εδαφικών υλικών

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Α.Π.Θ.

Διπλωματική εργασία σε εξέλιξη

**Σ.Βαντσιώτης, Ε.Καλομοίρη, Κ.Παπαθανασίου**

*Τελειόφοιτοι φοιτητές Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.*

*Λέξεις κλειδιά :* ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), τσιμέντο, υδράσβεστος, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη, δείκτης δραστηριότητας

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη εδαφικών μιγμάτων με ακατέργαστη τέφρα και συγκεκριμένα δύο ποιοτήτων ιπτάμενης τέφρας που προέρχονται από τα Α/Σ Αμυνταίου και Καρδιάς. Σε πρώτο στάδιο έγινε η αξιολόγηση των τεφρών ως συνδετικών κονιών και στη συνέχεια θα μελετηθούν μίγματα με δύο τύπους εδάφους, ένα αμμώδες και ένα αργιλώδες, προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο ποσοστό προσθήκης τέφρας κάθε τύπου και η επιρροή των χαρακτηριστικών των τεφρών στη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του εδάφους. Θα γίνουν μετρήσεις της μέγιστης πυκνότητας Proctor (EN 13286-2), του CBR (ASTM E105-86) και της σταθερότητας όγκου των συμπιεσμένων δοκιμίων. Περαιτέρω θα μετρηθεί η διαβρωσιμότητα των σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών με τέφρα.

## A study on the mixture of fly ash and ground materials

**S.Vantsiotis, E.Kalomoiri, K.Papathanasiou**

*Laboratory of Building Materials, A.U.TH*

*Keywords:* high calcium fly ash, cement, lime, compressive strength, flexural strength, pozzolanicity index

**ABSTRACT:** The scope of this paper is to study soil mixtures with unprocessed fly ash and, in particular, two different quality fly ashes coming from the Amyntaio and Kardias Power Stations. Firstly, valorisation of the fly ashes as binders was carried out and at the next stage, mixtures of the fly ashes with two types of soil, sandy and argillaceous, will be made in order to find the optimum percentage of fly ash addition of each type and the influence of the fly ash properties at the characteristics of each soil type. Proctor and CBR tests will be carried out according to EN 13286-2 and ASTM E105-86, respectively, as well as the volume stability of the produced specimens will be measured. Furthermore, the resistance of the fly ash stabilized soils to corrosion will be also measured,

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα παραπροϊόν που παράγεται από τα λιγνιτικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος της ΔΕΗ. Παρά τις μεγάλες ποσότητες που παράγονται σε

ετησία βάση μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών αξιοποιείται, ενώ το υπόλοιπο εναποτίθεται στα λιγνιτωρυχεία με καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον (Τσίμας & Μουτσάτσου, 2005). Η ποιότητα της ελληνικής τέφρας την καθιστά λόγω της ανομοιογένειας, λεπτότητας, υψηλών τιμών οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και ενίοτε θεικών (SO<sub>3</sub>) λιγότερο αξιοποιήσιμη σε σχέση με τις ευρωπαϊκές ιπτάμενες τέφρες. Για την άρση των προβλημάτων αυτών, με γνώμονα την αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών έχει θεσπιστεί η «Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή» (2006).

Λόγω των θετικών αποτελεσμάτων που στην πράξη απέδειξαν οι ποικίλες έρευνες και εφαρμογές, οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες βρίσκουν πεδίο εφαρμογής σε μαζικές κατασκευές (τοίχοι αντιστήριξης, φράγματα), δύσκαμπτα οδοστρώματα, πίστες αεροδρομίων, διαχωριστικά δρόμων New Jersey, διαμόρφωση και κοιτοστρώσεις γηπέδων, προϊόντα σκυροδέματος (τριγωνικές τάφροι, στραγγιστήρια, κράσπεδα, κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίου, άοπλοι τσιμεντοσωλήνες), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για επισκευές και σταθεροποίηση σηράγγων (Parayianni, 2001).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συνεισφορά της IT στην σταθεροποίηση εδαφικών υλικών στην Οδοποιία (Gokca, 2001). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο υλικό στην κατασκευή υποβάσεων ή βάσεων των οδοστρωμάτων, είτε με την προσθήκη μικρού ποσοστού υδρασβέστου ή τσιμέντου, είτε και αυτούσια ανάλογα με την χημική της σύσταση. Επίσης, λόγω μικρού ειδικού βάρους μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή επιχωμάτων πάνω σε συμπιεστά εδάφη γιατί επιφέρει σημαντική μείωση των φορτιών που μεταβιβάζονται στην επιφάνεια εδράσεως των επιχωμάτων.

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν όσον αφορά τη σταθεροποίηση εδαφικών υλικών με χρήση ιπτάμενης τέφρας. Πιο συγκεκριμένα, οι Μ. Μαρσέλλος, Σ. Χριστούλας, Σ.Κόλιας (2000) στα πλαίσια εργαστηριακών και εργοταξιακών δοκιμών χρησιμοποίησαν δείγματα IT Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης σε συνεργασία με διάφορα εδαφικά υλικά. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη IT μειώνει το δείκτη πλαστικότητας τους PI (μέχρι και μηδενισμού του), αυξάνει το όριο πλαστικότητας τους PL και μπορεί να βελτιώσει την κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών που στερούνται λεπτόκοκκου υλικού. Η ανάμιξη IT με διάφορα υλικά μειώνει την τιμή της μέγιστης ξηρής πυκνότητας και αυξάνει την βέλτιστη υγρασία τους κατά τη δοκιμή συμπίκνωσης. Η χρήση μίγματος IT Μεγαλόπολης και μικρών ποσοστών τσιμέντου ή υδρασβέστου βελτιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών. Η IT Πτολεμαΐδας αναπτύσσει πολύ υψηλές αντοχές σε θλίψη χωρίς καμία επεξεργασία (αυτούσια) (Parayianni et al, 2008).

Σε έρευνα που πραγματοποίησαν οι Κόλιας & Καραχάλιος (2005) χρησιμοποιώντας IT Καρδιάς, με υψηλά ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και πυριτίου (SiO<sub>2</sub>), σε συνεργασία με δείγματα αργιλικών εδαφών μέσης και μεγάλης πλαστικότητας κατέληξαν ότι η αύξηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης έχει ως συνέπεια τη μείωση των τάσεων και παραμορφώσεων στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης των ορίων Atterberg, αύξησης της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό, του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και της τιμής CBR.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η χρησιμοποίηση IT υψηλής περιεκτικότητας σε CaO παρέχει σημαντικές δυνατότητες σταθεροποίησης εδαφικών υλικών και χρησιμοποίησης τους, ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος, ως βελτιωμένων στρώσεων έδρασης, υπόβασης, η και βάσης. Ιδιαίτερα επισημαίνεται η οικονομική ωφέλεια που μπορεί να έχει η χρησιμοποίηση σταθεροποιημένων με IT στρώσεων έδρασης οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων.

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η προσπάθεια ένταξης των IT Αμυνταίου και Καρδιάς στην ισχύουσα «Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή». Πρόκειται να χρησιμοποιηθούν δυο δείγματα εδαφικών υλικών, ένα αργιλικό και ένα αμμώδες, αναμεμιγμένα με τις προαναφερθείσες IT σε περιεχόμενα ποσοστά 7% και 10%. Τα μίγματα αυτά θα υποβληθούν σε δοκιμή CBR με

σκοπό τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας τους όταν συμπυκνωθούν στο εργαστήριο στη βέλτιστη υγρασία. Οι δυο βασικές παράμετροι για την κατασκευή των δοκιμών θα προσδιοριστούν από την πρότυπη δοκιμή συμπίκνωσης – Standard Proctor.

Προκειμένου να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα, βασική προϋπόθεση είναι η αξιολόγηση των ΙΤ ως συνδετικών κονιών και συγκεκριμένα να βρεθεί ο πουζολανικός και υδραυλικός χαρακτήρας του υλικού. Για το λόγω αυτό πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από ελέγχους και δοκιμές. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν είναι:

- Χημική σύσταση
- Λεπτότητα
- Υγρασία
- Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας
- Αντοχή σε κάμψη
- Αντοχή σε θλίψη
- Δείκτης δραστηκότητας

Μέρος των αποτελεσμάτων της ευρύτερης εργαστηριακής έρευνας παρατίθενται παρακάτω.

## ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης αυτής είναι:

### *Ιπτάμενη τέφρα*

Χρησιμοποιήθηκαν δυο δείγματα ακατέργαστης ιπτάμενης τέφρας, η συλλογή των οποίων έγινε από τους Α/Σ Αμυνταίου και Α/Σ Καρδιάς. Τα δείγματα αυτά αναμίχθηκαν καλά ώστε τελικά να προκύψουν δυο ομογενή υλικά που στο εξής θα καλούνται ιπτάμενη τέφρα Ι και ιπτάμενη τέφρα ΙΙ. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δυο υλικών είναι η απουσία υγρασίας (ξηρό δείγμα) καθώς και υψηλή περιεκτικότητα σε άσβεστο. Τέλος τα συγκρατούμενα ποσοστά τέφρας στο κόσκινο των 45μm (R<sub>45</sub>) που προέκυψαν μετά από έλεγχο σύμφωνα με το πρότυπο EN196-6 είναι 50,53% και 37,50%, ενώ τα ποσοστά των θεικών SO<sub>3</sub> είναι < 7% και < 5% αντίστοιχα. Με βάση την Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή η ΙΤ Ι δεν εντάσσεται σε καμία από τις δύο κατηγορίες, σύμφωνα με τον Πίνακα 1, λόγω του υψηλού ποσοστού συγκρατούμενων R<sub>45</sub>, ενώ η ΙΤ ΙΙ χαρακτηρίζεται ως ΕΙΤ1.

Πίνακας 1: Κατηγορίες Ελληνικών Ιπτάμενων Τεφρών

ΙΤ	R <sub>45</sub> %	SO <sub>3</sub> %	CaO %
ΕΙΤ1	≤ 45	≤ 7	-
ΕΙΤ2	≤ 30	≤ 5	≤ 3

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

### *Υλικά*

Χρησιμοποιήθηκε πρότυπη άμμος για τον έλεγχο του δείκτη ποζολανικότητας, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, και τσιμέντο τύπου CEM Ι42,5. Για τον έλεγχο της ποζολανικότητας με υδράσβεστο κατά ASTM C593-95 χρησιμοποιήθηκε υδράσβεστος σε μορφή κόνιας.

## ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

### *Κονιάματα τσιμέντου*

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων έγινε με βάση το πρότυπο EN 196-1 και περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια: α) καθορισμός των αναγκαίων ποσοτήτων των υλικών και ανάμειξη αυτών (νερό 225g, πρότυπη άμμος 1350g, τσιμέντο 450g), β) προσδιορισμός της εξάπλωσης του κονιάματος με την μέθοδο flow table, γ) για την παρασκευή των πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40x40x160mm χρησιμοποιήθηκαν μήτρες 3 διαμερισμάτων, δ) μετά την πάροδο 24 ωρών τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν και διατηρήθηκαν μέχρι την θραύση τους σε θάλαμο συντήρησης όπου οι συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας είναι σταθερές (RH = 91-95%, T = 20-25 °C). Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 3,7 και 28 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την παρασκευή των μειγμάτων.

### *Κονιάματα τσιμέντου – τέφρας*

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι όμοια με την παραπάνω με την μόνη διαφορά ότι αντικαταστάθηκε το 25% του τσιμέντου από την τέφρα. και επαναπροσδιορίστηκε η ποσότητα του νερού γίνεται έτσι ώστε να πετύχουμε ίση εξάπλωση με αυτή των κονιαμάτων του τσιμέντου (15,5-1,65cm). Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 3,7 και 28 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την παρασκευή των μειγμάτων.

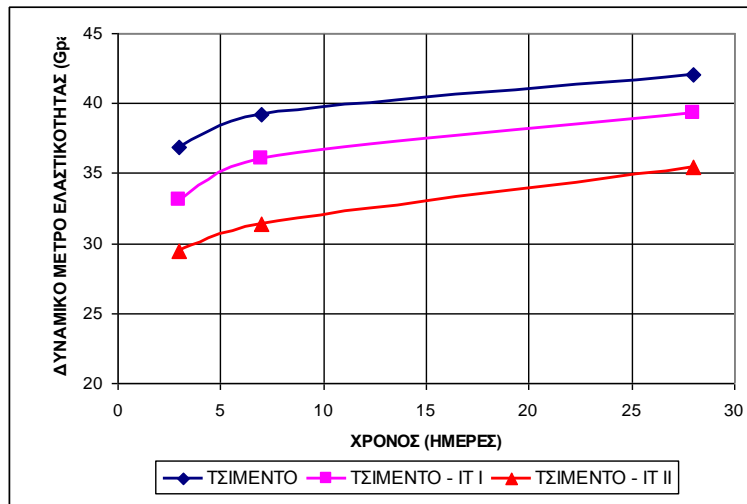
### *Κονιάματα υδράσβεστου – τέφρας*

Η διαδικασία σύνθεσης του κονιάματος έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C593-95 και διαφοροποιείται ως προς την δημιουργία κονιαμάτων τσιμέντου στα εξής σημεία: α) προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας νερού έτσι ώστε να επιτευχθεί εξάπλωση 16,5-17,5cm (άμμος 1350g, υδράσβεστος 164g, τέφρα 328g), β) ανάδευση της ιπτάμενης τέφρας με την υδράσβεστο έτσι ώστε να προκύψει ένα ομοιογενές μείγμα το οποίο αφήνεται για 1min στον αναδευτήρα μαζί με την απαιτούμενη ποσότητα νερού, γ) συντήρηση των δοκιμίων μέχρι της 7<sup>ης</sup> ημέρας ωρίμανσης σε κλίβανο στους 55 °C παρουσία υγρασίας. Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικία 7 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την παρασκευή των μειγμάτων.

## ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ

### *Δοκιμή τσιμέντου – ιπτάμενης τέφρας*

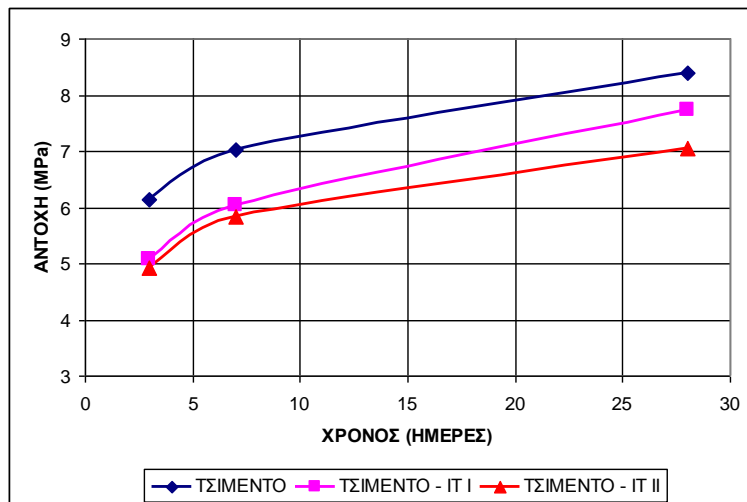
### *Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας*



Σχ. 1: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

### Κάμψη

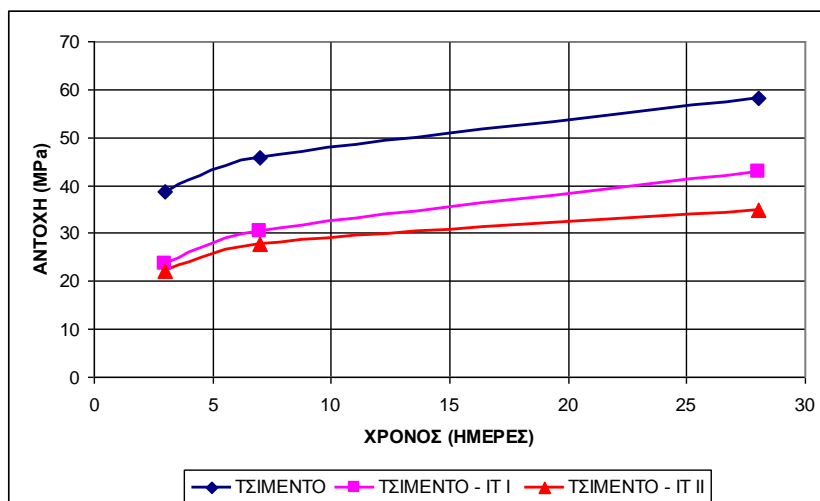
Η δοκιμή σε κάμψη έγινε σε πρισματικά δοκίμια 40x40x160 mm με ποσοστό IT 25% κ.β. ξηρού υλικού για κονιάματα τσιμέντου – τέφρας σε ηλικίες 3, 7, 28 ημερών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Εξετάστηκε επίσης η αντοχή δοκιμών παρασκευασμένα από κονίαμα αποκλειστικά με τσιμέντο τύπου CEM I 42,5.



Σχ. 2: Αντοχή σε κάμψη

### Μονοαξονική θλίψη

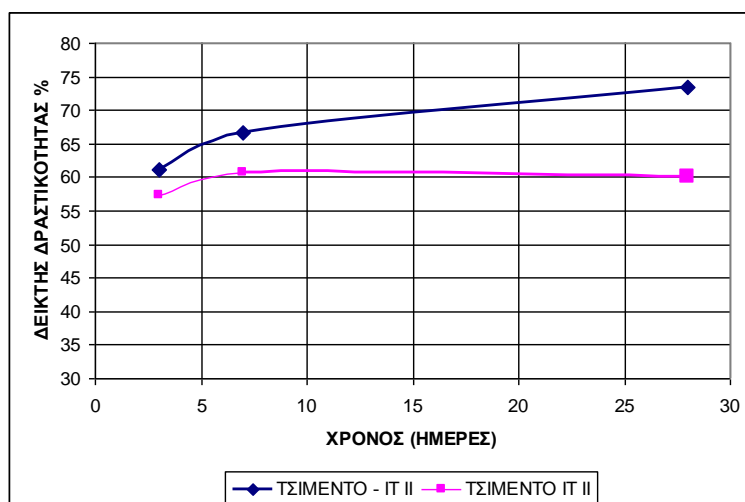
Τα εναπομείναντα πρισματικά δοκίμια από τον έλεγχο της κάμψης με θλιβόμενη επιφάνεια 40x60(mm), υποβλήθηκαν σε έλεγχο αντοχής σε θλίψη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχ. 3: Αντοχή σε θλίψη

#### Δείκτης δραστικότητας της τέφρας

Προκειμένου να προσδιοριστεί η πουζολανικότητα ΙΤ υπολογίστηκε ο Δείκτης Δραστικότητας της ως ποσοστό (%) της θλιπτικής αντοχής τυπικών πρισματικών δοκιμίων κονιάματος παρασκευασμένου με κονία αποτελούμενη κατά 75% από τσιμέντο δοκιμής και κατά 25% από ΙΤ κ.β., προς την θλιπτική αντοχή αντίστοιχων δοκιμίων παρασκευασμένου αποκλειστικά με τσιμέντο δοκιμής, δοκιμασμένων στην ίδια ηλικία.



Σχ. 4: Δείκτης Δραστικότητας

#### Δοκιμή υδράσβεστου – ιπτάμενης τέφρας

Οι έλεγχοι σε θλίψη και κάμψη έγιναν σε δοκίμια ηλικίας 7 ημερών. Η πρώτη σύνθεση θα καλείται ΥΔ-ΙΤ Ι ενώ η δεύτερη ΥΔ-ΙΤ ΙΙ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αντοχή σε κάμψη και θλίψη

Σύνθεση	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
ΥΔ-ΙΤ Ι	2,61	9,86
ΥΔ-ΙΤ ΙΙ	1,18	4,95

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το μέχρι τώρα έλεγχο φαίνεται ότι όσον αφορά τους δείκτες ποζολανικότητας, ο τύπος Ι –που δεν εμπίπτει στην κατηγορία ΕΙΤ1 λόγω υψηλότερου  $R_{45}$ – αναπτύσσει αποδεκτή τιμή δείκτη ποζολανικότητας, ενώ ο τύπος τέφρας ΙΙ είναι χαμηλότερου δείκτη ποζολανικότητας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τσίμας, Σ. & Μουτσάτσου, Α. (2005). Διαχείριση ιπτάμενης τέφρας ΔΕΗ. Ουτοπία ή πραγματικότητα; *Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση*. Επιμέλεια έκδοσης Παπαγιάννη, Ι. & Τσίμας Σ., 24-26 Νοεμβρίου 2005, Θεσσαλονίκη: ΕΒΙΠΑΡ, σελ 431-438.

Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή / Ελληνικές Ιπτάμενες Τέφρες, Αθήνα Ιούνιος 2006

BS EN 196-1: 1995 – Methods of testing cement

ASTM C593-95 – Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime

Σ.Κόλλιας, Α.Καραχάλιος, 2005 Σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών με ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο. 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ε.ΒΙ.ΠΑΡ. Θεσσαλονίκη 24-26 Νοεμβρίου 2005

Ν.Μαρσέλλος, Σ. Χριστούλας, Σ.Κόλλιας, (2000) Χρήση της ιπτάμενης τέφρας στην Οδοποιία. Ημερίδα : Βελτίωση εδάφους με χημικά πρόσθετα. Θεσσαλονίκη 10 Οκτωβρίου 2000

Papayianni, I. (2001). High calcium fly ash applications in concrete construction. *Proceedings of the Seventh CANMET International Conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. 22<sup>nd</sup>-27<sup>th</sup> July 2001, Chennai (Madras), India.

Cokca, E. (2001). Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp 568-573.

Papayianni, I., Anastasiou, E., Papachristoforou, M. (2008). Testing calcareous fly ash for hydraulically bound mixtures and previous Greek experience. *Proceedings of the International Conference EuroCoalAsh 2008*, edited by T. Szczygielski, Warsaw, pp 237-249.