

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση διοργανώνεται από τη μη κερδοσκοπική εταιρεία ΕΒΙΠΑΡ (Εταιρεία Έρευνας και Ανάπτυξης Εφαρμογών Βιομηχανικών Παραπροϊόντων – www.enipar.org) στη Θεσσαλονίκη, στις 11-12 Ιουνίου 2015, με συνδιοργανωτές το ΤΕΕ – Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας και την ANKO. Στο Συνέδριο παρουσιάζονται η τρέχουσα έρευνα, οι πετυχημένες εφαρμογές και τα σχετικά κανονιστικά πλαίσια με ένα σύνολο 47 εισηγήσεων από Έλληνες επιστήμονες και ξένους προσκεκλημένους ομιλητές.

Παρά την κρίση που υφίσταται ο δομικός τομέας, παραμένει αμείωτο το ενδιαφέρον για τη χρήση των βιομηχανικών παραπροϊόντων εκεί όπου το χαμηλό κόστος και το περιβαλλοντικό όφελος συμβαδίζουν με τεχνικά οφέλη που προσδίδονται από τη χρήση τους στη δόμηση. Στην προσπάθεια αυτή συμβάλλουν σημαντικά, εκτός από τους παραγωγούς των βιομηχανικών παραπροϊόντων, και οι ελληνικές βιομηχανίες που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή δομικών προϊόντων, καθώς και συλλογικοί φορείς όπως το ΤΕΕ/ΤΔΜ και η ANKO, που αναπτύσσουν πρωτοβουλίες που στοχεύουν στην αξιοπιστία και ευκολία χρήσης των παραπροϊόντων σε διάφορες εφαρμογές.

Το ότι η αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων εξακολουθεί να εμπνέει νέους ερευνητές, οι οποίοι επιλέγουν σχετικά θέματα για την εκπόνηση διδακτορικών διατριβών αποτελεί ελπιδοφόρο μήνυμα για το μέλλον της οικονομίας και αειφορίας των κατασκευών.

Ιωάννα Παπαγιάννη
Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Πρόεδρος ΕΒΙΠΑΡ

Ιούνιος 2015

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- Ι. Παπαγιάννη, Πρόεδρος ΕΒΙΠΑΡ, Καθηγήτρια ΑΠΘ
- Σ. Τσίμας, Αντιπρόεδρος ΕΒΙΠΑΡ, Καθηγητής ΕΜΠ
 - Α. Χασιώτης, ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ
 - Α. Στρατής, ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ
 - Ε. Χανιωτάκης, ΤΙΤΑΝ ΑΕ
- Δ. Μαυροματίδης, Πρόεδρος ΤΕΕ / ΔΜ
- Ν. Κοϊμτσίδης, τ. Πρόεδρος ΤΕΕ / ΔΜ
- Κ. Μιχαηλίδης, Πρόεδρος ΑΝΚΟ
- Ε. Αναστασίου, ΕΒΙΠΑΡ, Λέκτορας ΑΠΘ
 - Β. Πάχτα, ΑΠΘ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- Ι. Παπαγιάννη, Πρόεδρος ΕΒΙΠΑΡ, Καθηγήτρια ΑΠΘ
- Σ. Τσίμας, Αντιπρόεδρος ΕΒΙΠΑΡ, Καθηγητής ΕΜΠ
 - Α. Μουτσάτσου, Καθηγήτρια ΕΜΠ
 - Κ. Σιδέρης, Αν. Καθηγητής ΔΠΘ
 - Ε. Παπαδάκης, Αν. Καθηγητής ΠΠ
 - Ε. Χανιωτάκης, ΤΙΤΑΝ ΑΕ
 - Σ. Τσιβιλής, Καθηγητής ΕΜΠ
- Ε. Αναστασίου, ΕΒΙΠΑΡ, Λέκτορας ΑΠΘ
 - Ε. Μπαδογιάννης, Λέκτορας ΕΜΠ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ

- Ι. Παπαγιάννη
- Ε. Αναστασίου

Αξιοποίηση των αποβλήτων από την παραγωγή ηλεκτροχημικού διοξειδίου μαγγανίου σε σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε θειικά άλατα

Ν. Χουσιδής¹, Ε. Ρακαντά¹, Ι. Ιωάννου², Γ. Μπατής¹

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Ε.Μ.Π

²Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Λέξεις κλειδιά: Διάβρωση σιδηροπλισμού, θλιπτική αντοχή, EMD, ορυκτά πρόσθετα, παραπροϊόντα βιομηχανικής παραγωγής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση αποβλήτου που προέκυψε από την παραγωγική διαδικασία Ηλεκτροχημικού Οξειδίου του Μαγγανίου (EMD) σε περιβάλλον υψηλής συγκεντρώσεως SO_4^{2-} . Το παραπροϊόν, χρησιμοποιήθηκε ως αντικατάστατο του τσιμέντου κατά την παραγωγή του σκυροδέματος σε ποσοστό 10% κ.β ενώ κατασκευάστηκαν και δοκίμια χωρίς πρόσθετο για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Για τη διεξαγωγή των δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων, κατασκευάστηκαν δοκίμια σκυροδέματος διάφορων μορφών και διαστάσεων ενώ για τη διάβρωση του οπλισμού κυλινδρικά δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας. Όλα τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν μερικώς σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β. Τα πειράματα που έλαβαν χώρα αποσκοπούσαν στη μέτρηση της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, της απορροφητικότητας και του πορώδους και στην εκτίμηση της διάβρωσης του οπλισμού με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης. Επιπλέον, εφαρμόστηκε η διεϊσδυση νερού υπό σταθερή πίεση 5 bar για 72 ώρες. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκεκριμένης έρευνας προέκυψε ότι η χρήση του παραπροϊόντος EMDW σε περιβάλλον Na_2SO_4 οδήγησε σε μείωση των μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος και αύξηση της απώλειας μάζας των οπλισμών.

Utilization of Electrochemical Manganese By-products in concrete exposed to sulfates salts

N.Chousidis¹, I. Ioannou², E. Rakanta¹, G. Batis¹

¹School of Chemical Engineering, Σχολή Χημικών Μηχανικών, NTUA

²Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cyprus, Nicosia

Keywords: reinforcement corrosion, compressive strength, EMD, mineral, additives, industrial by-products

ABSTRACT: The present study examined the use of Electrochemical Manganese Dioxide (EMD) by-products in sulphate-rich environment. The additive was used as a replacement of cement (10% w.w) in the production of concrete; reference specimens without additive were also prepared for comparison reasons. For testing the mechanical properties, concrete specimens of varying shapes and dimensions were cast. All specimens were immersed partially in 5% w.w Na_2SO_4 solution. The experimental procedure included compressive and tensile strength measurements, determination of sorptivity and porosity and evaluation of reinforcement corrosion by linear polarization. The results showed that the use of additive in sulphate environment reduces the strength of concrete and increases the mass loss of steel.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Οπλισμένο Σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στην Ελλάδα επειδή μπορεί να μορφοποιηθεί όσο είναι νωπό σε διάφορους τύπους ξυλότυπων, έχει χαμηλό κόστος παραγωγής και αυξημένη θλιπτική/εφελκυστική αντοχή. Για την παρασκευή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες ασβεστολιθικά πετρώματα σε ποσοστό περίπου 75-80% και αργιλικά σε ποσοστό 20-25%, ενώ είναι δυνατή η προσθήκη δευτερευόντων συστατικών με στόχο την τροποποίηση των ιδιοτήτων του.

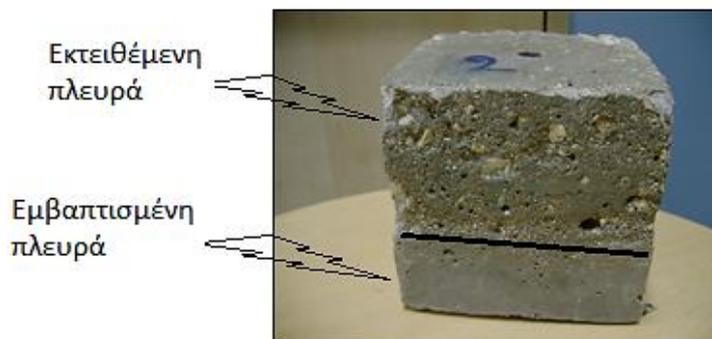
Το διεθνές πρότυπο **EN-197-1** (ΕΛΟΤ, 2000) διακρίνει το τσιμέντο σε πέντε (5) τύπους ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής του κλίνκερ ενώ ο Ελληνικός κανονισμός Σκυροδέματος στις εξής τέσσερις (4) κατηγορίες (Τσίμας, 2001):

- Τσιμέντο τύπου I,
- Τσιμέντο τύπου II με τεχνητή ή φυσική ποζολάνη σε ποσοστό έως 20%,
- Τσιμέντο τύπου III με ποσοστό ποζολάνης 20 - 40% κ.β,
- Τσιμέντο τύπου IV ανθεκτικό στα θειικά άλατα.

Τα θειικά άλατα προσβάλλουν κυρίως το σκυρόδεμα που περιβάλλει τον οπλισμό αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιδρούν άμεσα και στον ίδιο τον οπλισμό μέσω της δημιουργίας οξέων (H_2SO_4). Η διάβρωση των μετάλλων εξαρτάται από τη φύση τους και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, δηλαδή από το ποσοστό κορεσμού/αερισμού και το pH (<6). Επιπρόσθετα, ο κατακερματισμός του σκυροδέματος μπορεί να επιταχυνθεί στις περιπτώσεις που το έδαφος περιέχει θειικά άλατα, υψηλή συγκέντρωση μαγνησίας (Schweitzer, 2009) και οργανικά απόβλητα.

Η αποσάθρωση του σκυροδέματος είναι εντονότερη σε κατασκευές που είναι μερικώς εκτεθειμένες στο διαβρωτικό περιβάλλον των SO_4^{2-} παρά σε πλήρως βυθισμένες επιφάνειες. Στην περίπτωση της μερικής εμφάπτισης δημιουργούνται δύο ζώνες εντός του σκυροδέματος: η μία αφορά το εμφαπτισμένο τμήμα στο διαβρωτικό περιβάλλον και η δεύτερη το εξέχον τμήμα, στην περιοχή αερισμού (**Σχήμα 1**):

- ✚ **1η Ζώνη.** Είναι το τμήμα που βρίσκεται εντός του διαβρωτικού περιβάλλοντος το οποίο είναι εμπλουτισμένο σε θειικά ιόντα. Στο τμήμα αυτό προκύπτει χημική αποσάθρωση του σκυροδέματος, με δημιουργία μεγαλομοριακών ενώσεων (εντρίγκιτης, γύψος), προϊόντα των αντιδράσεων του θεικού άλατος με τις φάσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου.
- ✚ **2η Ζώνη.** Αφορά το ανώτερο τμήμα, εκείνο το οποίο βρίσκεται εκτεθειμένο σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον με χαμηλή συγκέντρωση θεικών ιόντων. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μηχανική δράση, με τριχοειδή άνοδο των θεικών αλάτων, εξάτμιση του διαλύτη (του νερού) και στη συνέχεια διόγκωση και ρωγμάτωση του σκυροδέματος εξαιτίας εφελκυστικών δυνάμεων.



Σχήμα 1. Δημιουργία ζωνών σε δοκίμιο σκυροδέματος μετά από μερική εμφάπτιση σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β

Για την αποφυγή της χημικής διάλυσης του σκυροδέματος γίνεται προσπάθεια να μειωθεί το πορώδες του, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση προσθέτων, χαμηλό λόγο W/C (0.40 - 0.55), τη χρήση κατάλληλου τύπου τσιμέντου ανθεκτικού στα θειικά (χαμηλό ποσοστό C3A), σωστή συμπύκνωση και αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου ($>350 \text{ kg/m}^3$) (Χουσιδής, Ρακαντά και Μπάτης, 2013), (Nawy, 2006). Για την αποφυγή της προσβολής και της διάλυσης του σκυροδέματος επιφανειακά, είναι απαραίτητη η χρήση επικαλύψεων. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Nehdi, Suleiman and Soliman, 2014) εποξειδικές, πυριτικές και ακρυλικές επικαλύψεις αύξησαν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι των θεικών ιόντων.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Υλικά και κατασκευή δοκιμών

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκαν 2 σειρές δοκιμών: στη μία έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου από το πρόσθετο (EMDW) σε ποσοστό 10% κ.β ενώ η άλλη παρέμεινε χωρίς πρόσθετο για λόγους σύγκρισης (δοκίμια αναφοράς). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια σκυροδέματος και οπλισμένης τσιμεντοκονίας τα οποία εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β..

Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων της έρευνας ήταν τα παρακάτω:

➤ **Δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας.** Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με διαστάσεις $H=100 \text{ mm}$ & $\varphi=50 \text{ mm}$. Χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος λατομείου, νερό δικτύου ΕΜΠ εναρμονισμένο με τα πρότυπα **ΕΛΟΤ 345** (ΕΛΟΤ, 1979) & **DIN EN 1008** (DIN 2002) και τσιμέντο *CEM I 42.5N* με ορυκτολογική σύσταση υπολογισμένη βάση των εξισώσεων του *Bogue* που δίνεται στον **Πίνακα 1**. Λόγος $W/C=0.65$. ο χαλύβδινος οπλισμός ήταν διαστάσεων $H=100 \text{ mm}$ & $\varphi=10 \text{ mm}$ τύπου *Tempcore B500C* κατά **ΕΛΟΤ 1421-3** (ΕΛΟΤ, 2004) και τοποθετήθηκε ομοαξονικά στα δοκίμια απέχοντας 15 mm από τη βάση τους. Προτού τοποθετηθούν οι οπλισμοί καθαρίστηκαν με διάλυμα υδροχλωρικού οξέως (500 ml HCl, πυκνότητας $\rho=1.19 \text{ g/ml}$, σε 1000ml απιονισμένο H_2O) με αναστολέα (3.5g εξαμεθυλικής τετραμίνης σε 1000ml απιονισμένο H_2O) διάβρωσης, απιονισμένο νερό και ακετόνη σύμφωνα με το **ISO/DIS 8407.3** (ISO, 2009) και ζυγίστηκαν σε ζυγό με ακρίβεια 0.1 mg.

➤ **Δοκίμια σκυροδέματος χωρίς οπλισμό.** Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκαν ασβεστολιθικά αδρανή Κύπρου, νερό δικτύου Λευκωσίας και τσιμέντο *CEM II 42.5 A-M*. Το νωπό σκυρόδεμα τοποθετήθηκε σε λιπασμένα πλαστικά καλούπια και δονήθηκε σε κατάλληλη τράπεζα συχνότητας $\nu=3000 \text{ Hz}$. Στη συνέχεια έγινε ξεκαλούπωμα στις 24 h και τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή συντήρησης για 7 ημέρες. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) και κυλινδρικά (ύψους $H=200 \text{ mm}$ και διαμέτρου $\varphi=100 \text{ mm}$). Ο λόγος W/C κρατήθηκε σταθερός σε όλες τις κατηγορίες δοκιμών και ίσος με 0.65.

Το αντικατάστατο του τσιμέντου προήλθε από την παραγωγική διαδικασία του Ηλεκτροχημικού Διοξειδίου του Μαγγανίου (EMD) το οποίο αποτελεί την πρώτη ύλη για την παρασκευή ξηρών στοιχείων και συσσωρευτών. Το MnO_2 μπορεί να παρασκευασθεί τόσο ηλεκτρολυτικά όσο και χημικά με την πρώτη μέθοδο να θεωρείται ανώτερη από τη δεύτερη (Panda, K.S., Ghosh and Subbaiah, 2009). Κατά την παραγωγή του EMD πραγματοποιείται έκπλυση με θειικό οξύ και φιλτράρισμα σε δύο (2) στάδια ώστε να απομακρυνθούν τα βαρέα μέταλλα με μορφή θεικών αλάτων.

Το παραπροϊόν που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων (EMDW) αποτελείται κυρίως από θειικά άλατα όπως Γύψο, Αλουμίτη και Γιαροσίτη, και βαρέα

μέταλλα. Η χημική σύσταση του προϊόντος EMD και του παραπροϊόντος (EMDW) δίνεται στον Πίνακα 2.

Το πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε (βλέπε Πίνακα 2) δεν περιέχει SiO₂ με αποτέλεσμα να μην εμφανίζει ποζολανικές ιδιότητες. Πέρα από το γεγονός αυτό όμως, έχει κοκκομετρία μικρότερη από αυτή του τσιμέντου λειτουργώντας ως filler και πληρώνοντας τους πόρους γέλης. Επίσης η χρήση του EMDW ενδείκνυται διότι εξαιτίας της περιεκτικότητας του σε Ca και Fe επηρεάζει τις φάσεις ενυδάτωσης C3A και C4AF, βελτιώνοντας τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Πίνακας 1. Ορυκτολογική σύσταση και φυσικές ιδιότητες τσιμέντων

	Ορυκτολογική σύσταση				Φυσικές ιδιότητες (EN 197-1)		
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ A F	Ειδική επιφάνεια	Αρχικός χρόνος πήξης	Τελικός χρόνος πήξης
CEM I 42.5N	57,	12,	6,6	11,0	400 kg/m ³	130 min	200 min
CEM II A-M	63,	5,8	6,0	8,8	400 kg/m ³	220 min	290 min

Πίνακας 2. Χημική σύσταση (%) του προϊόντος EMD και του παραπροϊόντος EMDW

	MnO	H ₂ O	Fe	Ca	Cu	Pb	K	Na	Mg	SO ₄ ²⁻	Zn+Co+
EMD	93.0	5.0	0.004	0.03	0.000	0.000	0.05	0.25	0.005	1.66	
EMD W	-	-	9.8	15.0	0.082	0.07	0.65	0.23	0.37	Μη υπολογ.	≈3%

2.2. Μέθοδο εκτίμησης της ανθεκτικότητας του Οπλισμένου Σκυροδέματος

Η εκτίμηση της ανθεκτικότητας του Οπλισμένου Σκυροδέματος σε περιβάλλον πλούσιο σε SO₄²⁻ πραγματοποιήθηκε με τις παρακάτω τεχνικές:

- Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη (compressive strength). Η κατασκευή των δοκιμίων και η δοκιμή της αντοχής σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα **BS EN 12390-2** (British Standard Institution, 2009) και **BS EN 12390-3** (British Standard Institution, 2009) αντίστοιχα στη μηχανή *Controls ADVANTEST 9*. Η δοκιμή έγινε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm με ταχύτητα φόρτισης 0.5 MPa/s σε διάφορα χρονικά διαστήματα. Η μέγιστη δυνατότητα φόρτισης της μηχανής ήταν 5000 kN.
- Μετρήσεις αντοχής σε διάρρηξη (tensile splitting test). Η δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό με διάρρηξη πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε θλίψη σύμφωνα με το πρότυπο **EN 12390-6** (British Standard Institution, 2009) και η ταχύτητα φόρτισης ήταν 0.05 MPa/s.
- Μετρήσεις Στατικού Μέτρου Ελαστικότητας (modulus of Elasticity). Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τρεις κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης με μέγιστη τιμή φόρτισης το 40% της μέγιστης αντοχής τους, σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C469-02** (ASTM International, 1999). Στα δοκίμια τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (*strain gauges*) τα οποία κατέγραφαν την παραμόρφωση τους και κατάλληλο λογισμικό δημιουργούσε το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων. Η εφαπτομένη της ευθείας του διαγράμματος αυτού έδινε το μέτρο ελαστικότητας *E*.
- Μετρήσεις τριχοειδούς απορρόφησης και απορροφητικότητας (capillary absorption & sorptivity of concrete). Η μέτρηση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος μέσω των τροχοειδών πόρων πραγματοποιήθηκε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C-1585** (ASTM International, 2013). Η πειραματική

διαδικασία περιελάμβανε πλήρη ξήρανση των δοκιμίων στους 105°C μέχρι σταθερής μάζας, ζύγιση με ακρίβεια 0.1 mg και στη συνέχεια τοποθέτηση των δοκιμίων σε δοχείο με μεθανόλη ώστε να μετράται η απορροφητικότητα του υγρού σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η στάθμη του διαλύτη μέσα στο δοχείο ήταν σταθερή (3 — 5 mm), οι πλευρές του μονωμένες με κατάλληλη ρητίνη ενώ γινόταν και λήψη της θερμοκρασίας του υγρού.

Από το γράφημα $I = f\sqrt{t}$ και εφαρμόζοντας γραμμική γραμμή τάσης προκύπτει η αρχική απορρόφηση που δίνεται από τη μαθηματική σχέση $I = Si \times \sqrt{t} + a$ για χρονικό διάστημα μέχρι 6 ώρες και ακολουθεί η δευτερογενής απορρόφηση από την 1η ημέρα εμβάπτισης μέχρι τις 8 ημέρες,

- Μετρήσεις Γραμμικής πόλωσης (Linear Polarization Resistance - LPR). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε διάταξη 3 ηλεκτροδίων (καλομέλανα, οπλισμός και ράβδος γραφίτη) σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM G59-97** (ASTM International, 2009) χρησιμοποιώντας Ποτενσιοστάτη/Γαλβανοστάτη μοντέλο 263A από την εταιρία *EG&G Princeton Applied Research*. Η σάρωση πραγματοποιήθηκε ± 15 mV γύρω από το Δυναμικό ισορροπίας και το βήμα σάρωσης ήταν 0.1 mV/s.

Η θεωρητική απώλεια μάζας των οπλισμών υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης

Faraday
$$m(g) = \frac{M \times I \times t}{Z \times F}$$
 όπου, m η μάζα που καταναλώνεται (g), I το ηλεκτρικό ρεύμα (A), t ο χρόνος (s), z ο αριθμός ανταλλασσόμενων e^- (για τον Fe $z=2$) και M το ατομικό βάρος μετάλλου (για τον Fe 56 g),

- Μετρήσεις ανοικτού πορώδους (capillary porosity). Για τον υπολογισμό του ανοικτού πορώδους, κυβικά δοκίμια σκυροδέματος ξηράθηκαν πλήρως, αφαιρέθηκε ο περιεχόμενος αέρας με εφαρμογή χαμηλής πίεσης και έγινε κορεσμός για 24 ώρες. Το πορώδες και ο συνολικός όγκος των πόρων προέκυψε από τη σχέση: $p = (Ms - Md) / (Ms - Mh)$ όπου, Ms η κορεσμένη μάζα (g), Md η ξηρή μάζα και Mh η μάζα του εμβαπτισμένου κορεσμένου δοκιμίου.
- Δοκιμή διείσδυσης νερού υπό πίεση (depth of penetration of water under pressure). Η δοκιμή της διείσδυσης νερού υπό πίεση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο **BS EN 12390-8**. Το κυβικό δοκίμιο ακμής 150 mm, στερεώθηκε σε κατάλληλο τρίποδο όπου έγινε εισαγωγή νερού από την κάτω επιφάνεια υπό σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες. Στη συνέχεια το δοκίμιο θραύτηκε παράλληλα στην επιφάνεια από την οποία εισήλθε το νερό και μετρήθηκε το βάθος διείσδυσης.

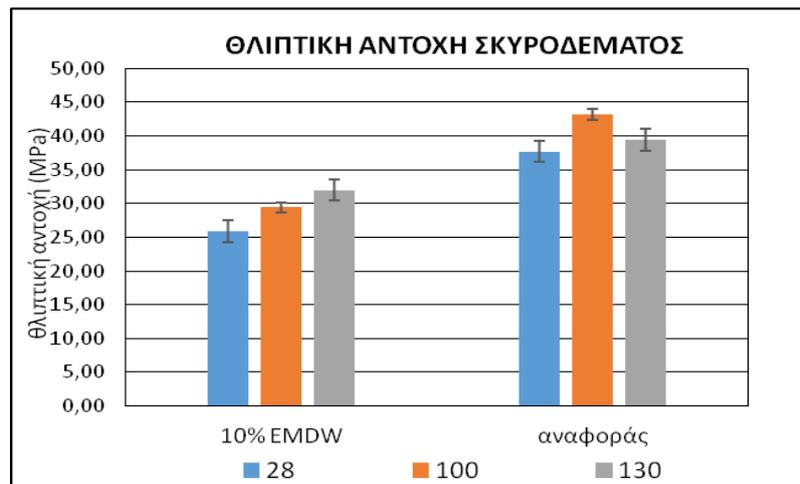
2.3. Πειραματικά αποτελέσματα

2.3.1. Μετρήσεις αντοχής σε θλίψη

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σε περιβάλλον θεϊκών ιόντων παρασκευάστηκαν δύο σειρές δοκιμίων (αναφοράς, 10% EMDW). Συνολικά κατασκευάστηκαν εννέα (9) κυβικά δοκίμια για κάθε μίγμα τα οποία μετά από συντήρηση επτά ημερών τοποθετήθηκαν στο διαβρωτικό περιβάλλον (μερική εμβάπτιση σε Na₂SO₄ 5% κ.β.). Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε στις 28, 100 και 130 ημέρες.

Το **Σχήμα 2** παρουσιάζει σε διάγραμμα τα αποτελέσματα των μέσων όρων των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής για τις δύο (2) υπό εξέταση κατηγορίες δοκιμίων έπειτα από μερική εμβάπτιση σε Na₂SO₄ 5% κ.β. Από το σχήμα φαίνεται ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με το πρόσθετο είναι μειωμένη σε όλους τους χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

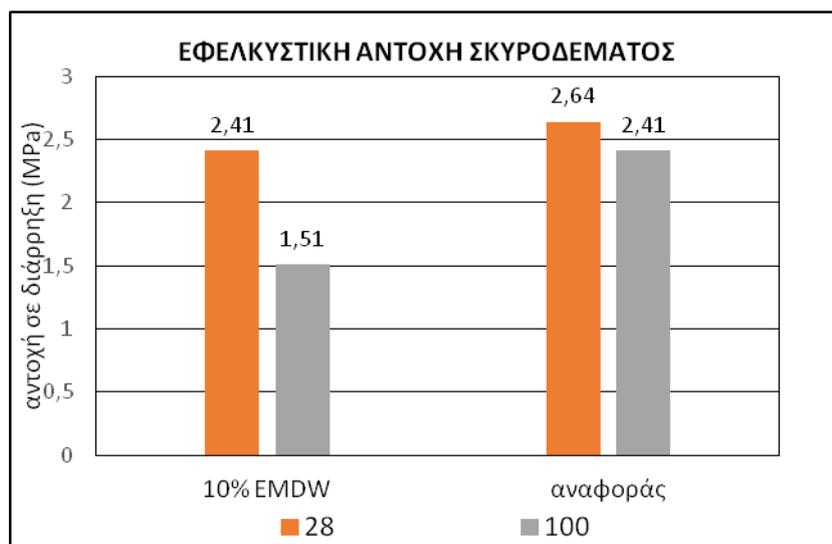
Η χρήση του συγκεκριμένου πρόσθετου αυξάνει το πορώδες και την διαπερατότητα (βλ. ενότητα 2.3.3, 2.3.4) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος. Η ύπαρξη θεικών αλάτων στη σύσταση του EMDW αυξάνει τη συγκέντρωση των θεικών ιόντων στο διάλυμα των πόρων με αποτέλεσμα τη δημιουργία εντριγκίτη και γύψου τα οποία ρηγματώνουν το σκυρόδεμα. Επιπλέον, η θλιπτική αντοχή στο μίγμα αναφοράς ελαττώνεται από τις 100 στις 130 ημέρες. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πορώδους κατά 14% περίπου μεταξύ αυτών των χρόνων. Το σκυρόδεμα με το πρόσθετο αντιθέτως αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σε κάθε χρόνο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με τις μετρήσεις του ανοικτού πορώδους (βλ ενότητα 2.3.3).



Σχήμα 2. Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σε δοκίμια μερικώς εμβαπτισμένα σε Na₂SO₄ 5% κ.β

2.3.2. Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής με διάρρηξη

Η αντοχή των δοκιμίων σε διάρρηξη σε περιβάλλον θεικών ιόντων μετρήθηκε στις 28 και 100 ημέρες έκθεσης σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Κύπρου, κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm. Η αντικατάσταση του τσιμέντου από το EMDW έγινε σε ποσοστό 10% κ.β και η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στις 28 και στις 100 ημέρες. Πριν την έναρξη του πειράματος τα δοκίμια έβγαιναν από το διαβρωτικό περιβάλλον και παρέμεναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες ώστε να απομακρυνθεί η επιφανειακή υγρασία. Τα υλικά κατασκευής ήταν CEM II 42.5N, ασβεστολιθικά αδρανή και λόγο νερού: τσιμέντου 0.65.

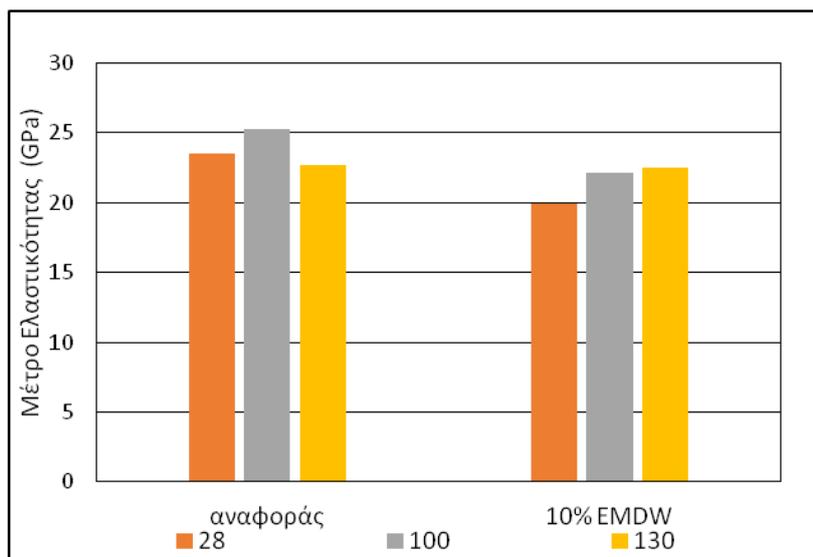


Σχήμα 3. Αντοχή με διάρρηξη σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Στο **Σχήμα 3** δίνεται το γράφημα της αντοχής σε εφελκυσμό με διάρρηξη (splitting test), σε περιβάλλον θεικών ιόντων. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια με το πρόσθετο εμφανίζουν χαμηλότερες αντοχές από τα αναφοράς στις 28 και 100 ημέρες εμβάπτισης. Τα δοκίμια με το πρόσθετο εμφανίζουν 37% μείωση ενώ τα αναφοράς 9% περίπου μεταξύ των 28 & 100 ημερών. Η προσθήκη επιπλέον ποσότητας θεικών αλάτων που εμπεριέχονται στο πρόσθετο αυξάνουν το χρόνο πήξης και σκλήρυνσης από την αντίδραση των ιόντων SO₄²⁻ και C3A αυξάνοντας τη θερμότητα ενυδάτωσης με αποτέλεσμα τη ρωγμάτωση και τη μείωση των μηχανικών αντοχών. Επιπρόσθετα, ο εντριγκίτης προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι δυνατό να αυξήσει την αντοχή του σκυροδέματος σε αρχικούς χρόνους.

2.3.3 Μετρήσεις Μέτρου Ελαστικότητας

Η εκτίμηση του στατικού μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος ύψους 200 mm και διαμέτρου 100 mm. Για τη δημιουργία της ευθείας $\sigma=f(\epsilon)$ τα δοκίμια φορτίζονταν στο 40% της μέγιστης θλιπτικής αντοχής τους για τρεις επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4**.



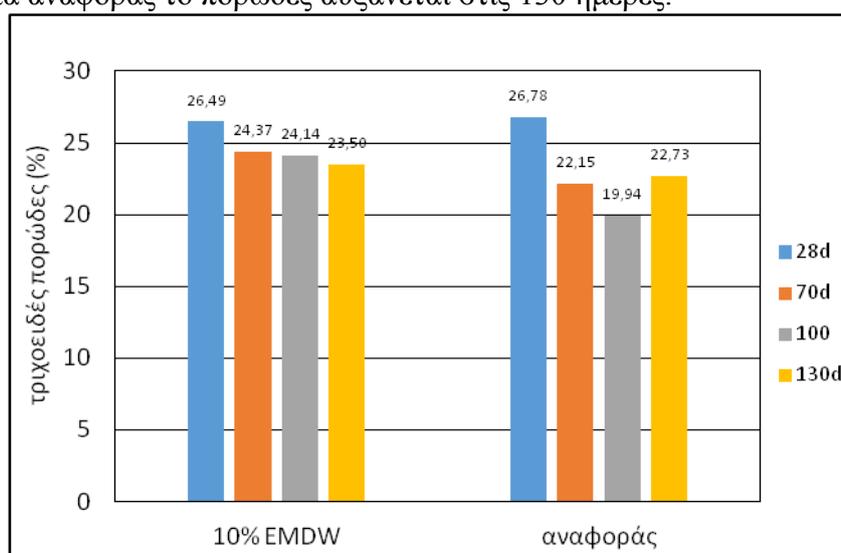
Σχήμα 4. Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας σκυροδέματος με μερική εμβάπτιση σε Na_2SO_4 5% κ.β

2.3.3. Μετρήσεις ανοικτού πορώδους

Το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος εκτιμήθηκε με τη μέθοδο της απαέρωσης σε κυβικά δοκίμια όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 28, 70, 100 και 130 ημέρες στον ίδιο κύβο για κάθε κατηγορία σκυροδέματος.

Το **Σχήμα 5** παρουσιάζει ραβδόγραμμα των αποτελεσμάτων για το ανοικτό πορώδες για τις δύο σειρές δοκιμών. Σχετικά με το ποσοστό του πορώδους σε περιβάλλον θεικών ιόντων μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- Η προσθήκη EMDW δίνει μεγαλύτερες τιμές πορώδους (στις 70 & 100 ημέρες) από τα δοκίμια αναφοράς αλλά η διαφορά τους εξομαλύνεται στις 130 ημέρες,
- Το πορώδες του σκυροδέματος με το πρόσθετο μετά τις 28 ημέρες δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή,
- Τα δοκίμια με 10% EMDW εμφανίζουν συνεχώς μείωση του πορώδους ενώ στα δοκίμια αναφοράς το πορώδες αυξάνεται στις 130 ημέρες.



Σχήμα 5. Ανοικτό πορώδες σκυροδέματος σε δοκίμια μερικώς εμβαπτισμένα σε Na_2SO_4

Από τις μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής και του πορώδους προκύπτει, παρά τις εξαιρετικά χαμηλές αντοχές του σκυροδέματος με το πρόσθετο, ότι το πορώδες δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των δύο μιγμάτων στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε Na₂SO₄ 5% κ.β.. Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι το πρόσθετο λειτουργεί ως πληρωτικό (filler) στους πόρους του σκυροδέματος χωρίς να αντιδρά με το τσιμέντο ώστε να αυξηθούν οι αντοχές. Επομένως, το πορώδες δεν δείχνει αυξημένο συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς, παρόλο που οι αντοχές είναι χαμηλότερες.

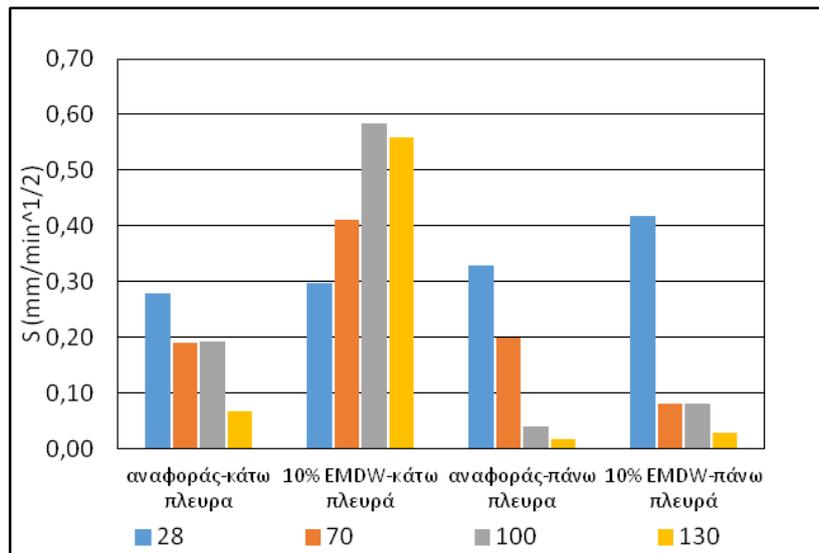
2.3.4. Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας

Η απορροφητικότητα του σκυροδέματος σε μεθανόλη έγινε σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C-1585**. Η επιλογή του συγκεκριμένου διαλύτη έναντι του νερού έγινε διότι σε περίπτωση υδατικού διαλύτη υπήρχε περίπτωση αυτός να συμμετάσχει στην ενυδάτωση των φάσεων του τσιμέντου με αποτέλεσμα να προκύψουν εσφαλμένα αποτελέσματα.

Η μέτρηση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε στις δύο απέναντι πλευρές των δοκιμίων, στην εμβαπτισμένη (**κάτω πλευρά**) και στην εκτιθέμενη (**πάνω πλευρά**) εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου δράσης των θεικών αλάτων (βλ. Σχήμα 1). Στην άνω πλευρά υπάρχει μηχανική δράση, κορεσμός Na₂SO₄ στο διάλυμα των πόρων με αποτέλεσμα τη διόγκωση και τη ρωγμάτωση, ενώ παρατηρούνται και εξωτερικά εξανθήματα που διαλύουν την τσιμεντόπαστα. Στην εμβαπτισμένη (κάτω) πλευρά υπάρχει χημική δράση με δημιουργία μεγαλομοριακών ενώσεων (εντρίγκιτης, γύψος) με συνέπεια τη δημιουργία ρωγμών.

Στο **Σχήμα 6** δίνεται διάγραμμα των αποτελεσμάτων της απορροφητικότητας σε μεθανόλη συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε Na₂SO₄ 5% κ.β. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι οι τιμές απορροφητικότητας του μίγματος με το πρόσθετο στην εμβαπτισμένη πλευρά είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς σε όλους τους χρόνους των μετρήσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι η συσσώρευση βελονοειδών κρυστάλλων εντρίγκιτη και οι επακόλουθες ρωγμές στο εμβαπτισμένο τμήμα της σειράς 10% EMDW αυξάνει συνεχώς την απορροφητικότητα μέχρι τις 100 ημέρες.

Όσον αφορά την απορροφητικότητα (S) στις εκτεθειμένες πλευρές των δοκιμίων αυτή φαίνεται να ελαττώνεται και στις δύο κατηγορίες εξαιτίας της μείωσης του πορώδους από την κρυστάλλωση του Na₂SO₄ στους πόρους του σκυροδέματος. Η αυξημένη απορροφητικότητα στις 70 ημέρες των δοκιμίων αναφοράς σε σχέση με τη σειρά EMDW στην άνω πλευρά πιθανόν να οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση, διότι έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του πορώδους (βλ. **Σχήμα 5**).



Σχήμα 6. Απορροφητικότητα S ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$) σε δοκίμια σκυροδέματος
Με μερική εμβάπτιση σε Na_2SO_4 5% κ.β

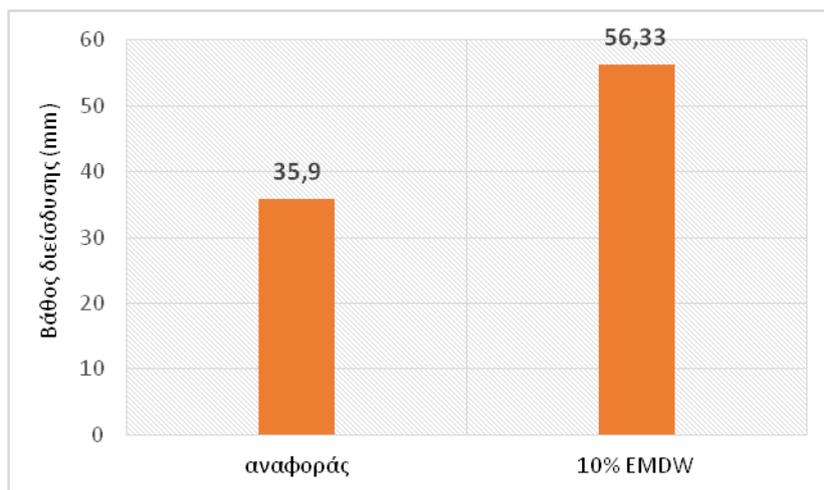
2.3.5. Δοκιμή διείσδυσης νερού υπό πίεση

Η διείσδυση νερού υπό πίεση 5 bar εφαρμόστηκε σε κύβο διαστάσεων $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 7**. Κατά τη διαδικασία του πειράματος δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη διατήρηση σταθερής πίεσης (5 bars) καθώς επίσης και στην ύπαρξη πλευρικής απώλειας νερού. Η δοκιμή διήρκεσε 72 ώρες και το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν απιονισμένο. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε μετά από συντήρηση στις 28 ημέρες και ο ρυθμός παροχής του νερού στις δύο κατηγορίες ήταν $4 \text{ ml}/\text{min}$ για το αναφοράς και $3 \text{ ml}/\text{min}$ για το 10% EMDW.



Σχήμα 7. Πειραματική διάταξη της δοκιμής διείσδυσης νερού υπό σταθερή πίεση 5 bar.

Το **Σχήμα 8** παρουσιάζει σε γράφημα το βάθος διείσδυσης του νερού για τις δύο κατηγορίες δοκιμών στις 28 ημέρες. Το βάθος διείσδυσης στην κατηγορία με 10% EMDW εμφανίζεται αυξημένο κατά 57% συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη διαπερατότητα του συγκεκριμένου δοκιμίου.

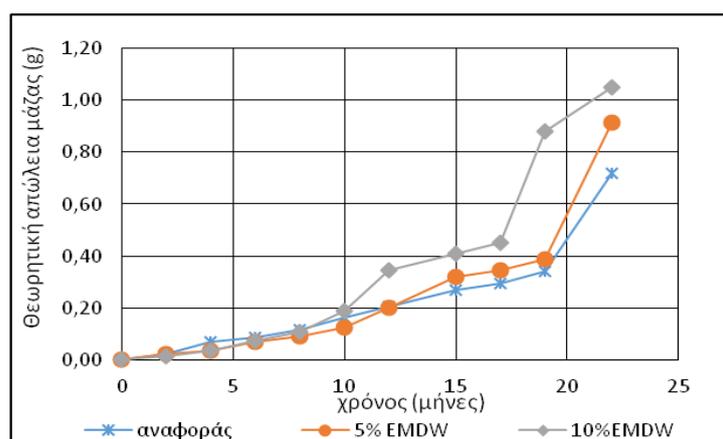


Σχήμα 8. Βάθος διείσδυσης νερού σε mm υπό σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες

2.3.6. Μετρήσεις Γραμμικής πόλωσης

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας ρεύματος και του ρυθμού διάβρωσης πραγματοποιήθηκε σε οπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης (*Linear Polarization Resistance*). Με εφαρμογή της εξίσωσης *Faraday* προέκυψε η θεωρητική (ηλεκτροχημική) απώλεια μάζας των οπλισμών που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 9**. Το διαβρωτικό περιβάλλον ήταν μερική εμβάπτιση σε Na_2SO_4 5% κ.β. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε διάταξη 3 ηλεκτροδίων (καλομέλανας, οπλισμός και ράβδος γραφίτη). Το εύρος σάρωσης γύρω από το Δυναμικό Ισορροπίας ήταν 15mV και το βήμα σάρωσης ήταν 0.1 mV/s.

Η αντικατάσταση του τσιμέντου από το πρόσθετο έγινε σε ποσοστό 10% κ.β και για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο *CEM I42.5N*, ασβεστολιθικά αδρανή λατομείου και νερό δικτύου ΕΜΠ. Ο λόγος W/C ήταν 0.65 ενώ χρησιμοποιήθηκε χαλύβδινος οπλισμός μήκους 100 mm και διαμέτρου $\varnothing 10$ mm ο οποίος απείχε από τη βάση των δοκιμών 15 mm.



Σχήμα 9. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε g συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β.

Από το **Σχήμα 9** προκύπτει ότι η θεωρητική απώλεια μάζας των χαλύβων που ήταν εγκιβωτισμένοι σε τσιμεντοκονίες που περιείχαν 10% EMDW είναι μεγαλύτερη σε όλους τους χρόνους των μετρήσεων έπειτα από 12 μήνες εμβάπτισης στο διάλυμα θεικού νατρίου, ενώ σε μικρότερους χρόνους δεν μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση του

προσθέτου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στη σειρά 5% EMDW δείχνουν ελαφρώς αυξημένες τιμές μετά από 15 μήνες σε σχέση με το μίγμα χωρίς πρόσθετο, αλλά χρειάζεται επιπλέον έρευνα για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας μπορούν να εξαχθούν τα πιο κάτω συμπεράσματα:

- ✓ Η προσθήκη EMDW ελαττώνει τις πρώιμες και τελικές μηχανικές αντοχές (θλιπτική και εφελκυστική) συγκριτικά με το κανονικό OPC. Η μείωση αυτή όμως είναι αποδεκτή δεδομένου ότι σχεδιάστηκε σκυρόδεμα τύπου C 20/25,
- ✓ Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με το πρόσθετο αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα Na₂SO₄ ενώ του δοκιμίου αναφοράς ελαττώνεται έπειτα από εμβάπτιση 100 ημερών,
- ✓ Το στατικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος με EMDW είναι ελαττωμένο συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς και βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής,
- ✓ Το παραπροϊόν EMDW ελαττώνει το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος λόγω της δημιουργίας θεικών αλάτων στους πόρους,
- ✓ Το βάθος διείσδυσης του νερού είναι μεγαλύτερο στο σκυρόδεμα με 10% EMDW. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αυξημένη διαπερατότητα που έχουν τα σύνθετα σκυροδέματα στις 28 ημέρες,
- ✓ Η αυξημένη απορροφητικότητα στην εμβαπτισμένη ζώνη συγκριτικά με τη ζώνη αερισμού οφείλεται στη ρωγμάτωση που προκαλούν οι βελονοειδείς κρύσταλλοι εντριγκίτη,
- ✓ Όσον αφορά τη ζώνη αερισμού, η προσθήκη του EMDW μειώνει την απορροφητικότητα συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς,
- ✓ Το εμβαπτισμένο τμήμα στο σκυρόδεμα με το πρόσθετο παρουσιάζει αύξηση στην απορροφητικότητα σε μεθανόλη σε όλους τους χρόνους των μετρήσεων,
- ✓ Η απώλεια μάζας των οπλισμών εντός τσιμεντοκονίας με 10% EMDW είναι αυξημένη σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Για την προσθήκη 5% δεν προκύπτουν ασφαλή συμπεράσματα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ASTM C469-02, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. 1999, ASTM International: Philadelphia.

ASTM G59, *Standard Test method for conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements vol 03.02*. 2009, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C-1585, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. 2013, ASTM International: West Conshohocken, PA.

BS EN 12390-2, *Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests*. 2009, British Standard Institution.

British Standard Institution BS EN 12390-3, *Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens*,. 2009: London, UK.

BS EN 12390-6, *Testing hardened concrete. Tensile splitting strength of test specimens*. 2009: UK, London.

DIN EN-1008, *Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*. 2002: German version EN 1008.

- ISO/DIS 8407.3, *Corrosion of metals and alloys-Removal of corrosion products from corrosion test specimens*. 2009.
- Nawy E.W. (2006), *Concrete Construction Engineering Handbook, 2nd edition*, USA, New Jersey: CRC Press.
- Nehdi, M.L., A.R. Suleiman, and A.M. Soliman, (2014), *Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack*. Cement and Concrete Research, **64**(0): p. 42-53.
- Panda J. P., K.S., M. K. Ghosh and T. Subbaiah, *Electrolytic Manganese Dioxide (EMD) from Manganese Cake- A Byproduct of Nodule Process*. Proceedings of The Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium, 2009: p. 149.
- Schweitzer P.A., *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. 2009: CRC Press
- ΕΛΟΤ 345, *Το Ύδωρ αναμίξεως και συντηρήσεως σκυροδέματος*. 1979.
- ΕΛΟΤ EN 197-1 (2000), *Τσιμέντο-Μέρος 1:Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα*
- ΕΛΟΤ 1421-3, *Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι Χάλυβες - Μέρος 3: ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ B500C 2004*.
- ΤΣΙΜΑΣ Σ., *Δομικά υλικά*. 2001, ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- ΧΟΥΣΙΔΗΣ Ν., ΡΑΚΑΝΤΑ Ε. και ΜΠΑΤΗΣ Γ. (2013), *Χρησιμοποίηση ορυκτών πρόσθετων στο σκυρόδεμα από παραπροϊόντα της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτροχημικού MnO₂*, 9ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, ΕΜΠ: Αθήνα.

Μελέτη Αξιοποίησης Σπιλίτη ως Εναλλακτικό Υλικό στην Κατασκευή Στρώματος Χαμηλής Διαπερατότητας σε ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ

Δ. Βελισσαρίου, Λ. Μαρίτσα, Ν.Σ. Κατσιώτης, Μ. Κατσιώτη

Εργαστήριο Ανόργανης & Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Π.Ε. Τσακίριδης, Α. Ξενίδης

Εργαστήριο Μεταλλουργίας, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Χ. Τσιάβος

Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε., Νέο Ηράκλειο 14121

Λέξεις κλειδιά: Σπιλίτης, Χαρακτηρισμός, Στεγανωτική Στρώση, ΧΥΤΑ, Υδροπερατότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης σπιλίτη, ένα εξορυκτικό παραπροϊόν της Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ, ως εναλλακτικό εδαφικό υλικό χαμηλής διαπερατότητας στην κατασκευή στεγανής ορυκτής μόνωσης σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Ο χαρακτηρισμός του σπιλίτη πραγματοποιήθηκε μέσω χημικής ανάλυσης, ορυκτολογικής ανάλυσης (XRD), διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA) και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), με στόχο τον προσδιορισμό των περιεχόμενων αργλικών συστατικών. Ο έλεγχος της καταλληλότητας ή μη του σπιλίτη ως υλικό κατασκευής στεγανωτικού στρώματος σε ΧΥΤΑ, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή ΕΛΟΤ 1501-08-05-03-01:2009, προσδιορίζοντας το όριο υδαρότητας, τον δείκτη πλαστικότητας, την κοκκομετρική κατανομή, το ποσοστό της περιεχόμενης οργανικής ουσίας και τον συντελεστή υδροπερατότητας.

Evaluation of Spilitis as an Alternative Material for the Construction of Compacted Landfill Liners

D. Velissariou, L. Maritsa, N.S. Katsiotis, M. Katsioti

Laboratory of Analytical and Inorganic Chemistry, School of Chemical Engineering, NTUA

P.E. Tsakiridis, A. Xenidis

Laboratory of Metallurgy, School of Mining and Metallurgical Engineering, NTUA

H. Tsiavos

Edafomichaniki SA, Neo Herakleio 14121

Keywords: Spilitis, Characterization, Liner, Landfill, Hydraulic Conductivity

ABSTRACT: In the present research work the possibility of spilitis valorization, a mining by-product during the exploitation of nickeliferous laterites from the Nickel LARCO Company, as an alternative material for the construction of compacted landfill liners was examined. The characterization of spilitis was taken place by chemical analysis, mineralogical analysis by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric and differential thermal analysis (TG-DTA), whereas its microstructure was examined by scanning electron microscopy

(SEM). The evaluation of spilitis for its use as liner materials in landfills was carried out according to the Hellenic Technical Standard ELOT 1501-08-05-03-01:2009, by determining the liquid limit (WL), the plasticity index (PI), the particle size distribution, the organic matter content, the Proctor compaction and the hydraulic conductivity.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απόθεση των στερεών απορριμμάτων στο έδαφος και στο υδάτινο περιβάλλον συμπίπτει με τις απαρχές του πολιτισμού. Παρ' όλο που οι κίνδυνοι της πρακτικής αυτής για το περιβάλλον και την υγεία των έμβιων όντων ήταν γνωστοί εδώ και πολλά χρόνια, μόλις τη δεκαετία του 80 άρχισε η ευαισθητοποίηση του κοινού στην Ελλάδα. Στο παρελθόν, η απόθεση των αστικών στερεών απορριμμάτων ελάμβανε χώρα σε μη στεγανοποιημένους χώρους (χωματερές), ή σε χώρους με απλό φυσικό στρώμα αργίλου. Οι θέσεις των χωματερών περιελάμβαναν φυσικές κοιλάτητες σε σημεία σχετικά απομακρυσμένα από αστικές περιοχές, ή εγκαταλελειμμένα ορυχεία/λατομεία. Τεχνικά μέτρα σφράγισης του πυθμένα των χωματερών δε λαμβάνονταν και η προστασία του υπεδάφους βασιζόταν αποκλειστικά στους μηχανισμούς φυσικής υποβάθμισης του ρυπαντικού φορτίου κατά τη διήθηση των ρύπων διαμέσου του εδάφους. Για μικρούς χώρους διάθεσης, η ποσότητα των διηθημάτων ήταν μικρή και συνήθως δεν δημιουργούσε σοβαρό πρόβλημα. Με την αύξηση του μεγέθους τους αλλά και του φάσματος των υλικών προς ταφή το ρυπαντικό δυναμικό των διηθημάτων αυξήθηκε και έγινε αναγκαία η εισαγωγή διατάξεων περιβαλλοντικής προστασίας (Βουδούρης, 2006; Καββαδάς, 2007; Λοϊζίδου, 2009).

Σήμερα, η απόθεση των απορριμμάτων στους ΧΥΤΑ λαμβάνει χώρα σε κυψέλες πάχους μέχρι 5 μέτρων περίπου. Οι κυψέλες καλύπτονται με γαιώδη υλικά στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ τόσο κατά τις ενδιάμεσες φάσεις πλήρωσης του χώρου (καθημερινή κάλυψη) όσο και μετά την τελική του πλήρωση (τελική κάλυψη) για τον περιορισμό των αναθυμιάσεων, του κινδύνου αυτανάφλεξης των απορριμμάτων, της διασποράς των απορριμμάτων και της κατείσδυσης των υδάτων των βροχοπτώσεων. Στον πυθμένα των σύγχρονων αποδεκτών στερεών αποβλήτων, αλλά και στα περιμετρικά πρηνή κατασκευάζεται χαμηλής διαπερατότητας σφραγιστική στρώση (liner) για την αποφυγή της ρύπανσης του υπεδάφους, σε συνδυασμό με ένα σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης των ρυπογόνων υγρών στραγγισμάτων των απορριμμάτων και του παραγόμενου βιοαερίου (Δημόπουλος, 2001). Η στεγανοποίηση μπορεί να είναι φυσική (γαιώδη υλικά), τεχνητή (σύνθετες μεμβράνες) ή συνδυασμός φυσικής και τεχνητής μόνωσης (Καραγιαννίδης κ.α., 2006). Συνήθως προτιμάται η τελευταία, καθώς δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η φυσική στεγανοποίηση γίνεται με αργιλικά υλικά, (άργιλο, μπεντονίτη, ζεόλιθο κ.α.). Ο όρος “αργιλικά ορυκτά” ιστορικά αναφέρεται σε ορυκτά με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 2 μm. Στην πραγματικότητα, το μέγεθος των αργιλικών ορυκτών μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο και να φτάνει και μερικές δεκάδες μικρόμετρα. Τα κυριότερα αργιλικά ορυκτά είναι ο ιλλίτης (illite), ο χλωρίτης, ο καολινίτης (kaolinite) και ο μοντμοριλλονίτης (montmorillonite). Όταν συμπυκνωθούν με κατάλληλη υγρασία αποκτούν μικρή διαπερατότητα και έτσι μπορούν να λειτουργήσουν ως στεγανωτική μεμβράνη σε ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία (ΕΛΟΤ, 2009), ο συντελεστής υδροπερατότητας της συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης θα πρέπει γενικώς να είναι μικρότερος από 10^{-9} m/s, ενώ θα πρέπει να αποκλείονται τα εδάφη στα οποία μετά τη συμπίεση ο συντελεστής υδροπερατότητας είναι της τάξεως των 10^{-6} m/s. Οι απαιτήσεις κατά τη χρήση συμπυκνωμένων αργιλικών υλικών ως στεγανωτικών μεμβρανών στον πυθμένα και στα πρηνή των σύγχρονων αποδεκτών στερεών αποβλήτων ώστε να επιτευχθεί ο παραπάνω περιορισμός παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Απαιτούμενες ιδιότητες υλικών υπόβασης

Παράμετροι – Ιδιότητες	Αποδεκτή τιμή
Όριο υδαρότητας (LL)	LL < 40%, (25% - 30%)
Δείκτης πλαστικότητας (PI)	10% < PI < 25%
Ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού (κόκκοι < 2 μm)	> 20% κατά μάζα
Μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκου υλικού	32 mm
Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα	< 40% επί του ολικού όγκου
Περιεκτικότητα οργανικών υλικών	< 5%

Στην περίπτωση που τα διαθέσιμα αργιλικά υλικά δεν ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις αναμειγνύονται με κατάλληλη ποσότητα μπεντονίτη, η οποία προσδιορίζεται εργαστηριακά. Προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλή διαπερατότητα, η προσθήκη μπεντονίτη κυμαίνεται συνήθως σε ποσοστό 2-3% κατά βάρος.

Ο σπιλίτης, ο οποίος είναι ένα αδρανές πέτρωμα προϊόν μετασχηματισμού του βασάλτη, αποτελεί εξορυκτικό παραπροϊόν της Μεταλλευτικής και Μεταλλουργικής Εταιρείας ΛΑΡΚΟ και παράγεται κατά τη φάση της εξόρυξης νικελιούχου μεταλλεύματος. Κατά την εξορυκτική διαδικασία του λατερίτη, συνεξορύσσονται ως αδρανή υλικά ασβεστόλιθος και σπιλίτης. Οι σπιλίτες αποτελούν μια ομάδα πετρωμάτων ανάλογη των βασαλτών στον τρόπο εμφάνισης και στα στοιχεία δομής, καθώς έχουν το βασάλτη (εκρηξιγενές πέτρωμα) ως πρωτόλιθο. Κατατάσσονται δηλαδή στα μεταμορφωσιγενή πετρώματα και είναι αποτέλεσμα μετατροπής του βασάλτη, μέσω ωκεάνιας ή/και υδροθερμικής μεταμόρφωσης. Η διαφορά τους από τους βασάλτες έγκειται στο ότι οι σπιλίτες αποτελούνται από ορυκτολογικές φάσεις πρασινοσχιστολιθικής όψης, όπως είναι ο αλβίτης και ο χλωρίτης (Vallance, 1974; Gupta, 1998). Ο σπιλίτης, λόγω της σκληρότητάς του, αποτελεί ένα πολύ καλό αδρανές κατάλληλο για χρήση σε αντιολισθηρούς τάπητες. Επιπροσθέτως παρουσιάζει χαμηλό πορώδες, γεγονός το οποίο οδηγεί σε λιγότερη κατανάλωση ασφάλτου στο τελικό ασφαλτόμιγμα, ενώ λόγω του χαμηλότερου ειδικού του βάρους καθίσταται ελκυστικότερος έναντι των σκωριών χαλβουργίας, καθώς απαιτείται μικρότερο κόστος μεταφοράς. Κατά την επεξεργασία του σπιλίτη παράγονται τρεις διαφορετικές κοκκομετρίες (Μαρίνος, 1998). Το χαλίκι (12-16 mm) και η ψηφίδα (5-12 mm) παρουσιάζουν εξαιρετικές αντιολισθηρές ιδιότητες και χρησιμοποιούνται ως αντιολισθηρά αδρανή σε οδοστρώσεις.

Το κοκκομετρικό κλάσμα “0-5mm” (άμμος) του σπιλίτη χρησιμοποιείται σε επιχώσεις αγωγών, λόγω της ικανότητάς του να υποβοηθά την δημιουργία παθητικής στρώσης που εμποδίζει ή μετριάσει τη διάβρωση. Από περιβαλλοντικές μελέτες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, ο σπιλίτης πληροί τις προϋποθέσεις για τη χρήση του σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, ενώ και λόγω της ορυκτολογικής του σύστασης περιέχει σημαντικό ποσοστό αργιλικών ορυκτών. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η πιθανότητα αξιοποίησης του σπιλίτη ως στεγανωτικό στρώμα χαμηλής διαπερατότητας σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Ο έλεγχος της καταλληλότητας πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμών, όπως ορίζεται από την ελληνική νομοθεσία και στη συνέχεια τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν με τα επιτρεπόμενα όρια.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για τον προσδιορισμό της σύστασης του σπιλίτη πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου φθορισμού ακτίνων X (Spectro - Xeros), ενώ κάποια από τα περιεχόμενα ιχνοστοιχεία προσδιορίστηκαν μετά από διαλυτοποίηση με μίγμα οξέων και μέτρηση με φασματοφωτομετρία ατομικών μαζών με επαγωγικά συνεζυγμένο πλάσμα (ICP-MS X Series II, Thermo Scientific). Η ορυκτολογική

του σύστασης προσδιορίστηκε με την χρήση Περιθλασίμετρου Ακτίνων-X, Bruker D8-Focus σε εύρος γωνιών 2θ από 5° ως 70° , με βήμα $0.02^\circ/\text{sec}$. Χρησιμοποιήθηκε λυχνία με άνοδο χαλκού (Cu), ακτινοβολίας $\text{CuK}\alpha$ μήκους κύματος 1.5406 \AA , ενώ η τάση του πεδίου ήταν 40 KV και το ρεύμα νήματος 40mA. Ο ημιποσοτικός προσδιορισμός των φάσεων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό TOPAS (Bruker-AXS), το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο Rietveld. Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης συσχετίστηκαν με τα αντίστοιχα της διαφορικής θερμικής ανάλυσης (Mettler Toledo 851), η οποία πραγματοποιήθηκε σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα N_2 , σε θερμοκρασίες 25-1000 $^\circ\text{C}$ με ρυθμό αύξησης $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ και ταυτόχρονη καταγραφή της απώλειας μάζας / ενθαλπίας του δείγματος σε συνάρτηση με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μελέτη της μικροδομής του δείγματος σπλίτη πραγματοποιήθηκε μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο τύπου Jeol 6380LV, σε στιλπνές τομές, ενώ η στοιχειακή του ανάλυση με στοιχειακό αναλυτή (Oxford-INCA X-Sight EDS), προσαρμοσμένο στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Για την παρασκευή της στιλπνής τομής, αρχικά το δείγμα εγκυβωτίστηκε σε εποξική ρητίνη με στόχο την σταθεροποίηση του. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε κοπή του εγκυβωτισμένου δείγματος με την βοήθεια μικροτόμου, ενώ ακολούθησε λείανση και στίλβωση σε οριζόντιο υδρόψυκτο, μονοαξονικά περιστρεφόμενο τροχό, με το δείγμα να εφάπτεται σ' αυτόν.

Το δείγμα που έχει χαρακτηριστεί ως άμμος (0-5mm) υποβλήθηκε σε ξηρή κοκκομετρική ανάλυση χωρίς να υποστεί θρυμματισμό των συσσωματωμάτων του και προσδιορίστηκε η κοκκομετρική του σύσταση στα κλάσματα με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο των 500 μm . Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής κατανομής για μέγεθος κόκκων μικρότερο των 500 μm πραγματοποιήθηκε μέσω περίθλασης ακτίνας laser, χρησιμοποιώντας συσκευή CILAS (Model 1064). Η μέτρηση βασίζεται στην φυσική αρχή της περίθλασης / σκέδασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τον προσδιορισμό της σωματιδιακής κατανομής. Η δοκιμή προσδιορισμού των ορίων Atterberg πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή πρότυπη μέθοδο EN 17892-12:2004. Τα όρια Atterberg ενός εδαφικού υλικού περιγράφουν την μετάπτωσή του από την υγρή στην πλαστική και στη συνέχεια στην ημιστερεή και στη στερεή κατάσταση, μέσω σταδιακής μείωσης του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας. Δείχνουν ουσιαστικά την συμπεριφορά ενός εδάφους ανάλογα με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και καταδεικνύουν αν κάποιο έδαφος είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υγρασίας. Ο προσδιορισμός της σχέσης υγρασίας-πυκνότητας πραγματοποιήθηκε μέσω της πρότυπης μεθόδου Proctor (EN 13286-2). Η μέθοδος Proctor είναι η κυριότερη εργαστηριακή μέθοδος μελέτης της συμπύκνωσης εδαφών. Σκοπός της μεθόδου είναι να προσδιορισθεί η βέλτιστη υγρασία (w_{opt}) που πρέπει να έχει ένα εδαφικό υλικό προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη ξηρή πυκνότητα. Η συμπύκνωση του εδαφικού δείγματος λαμβάνει χώρα σε μεταλλικό δοχείο ορισμένου όγκου, με πτώση σφύρας συγκεκριμένου βάρους από ορισμένο ύψος. Η ενέργεια συμπύκνωσης υπολογίζεται μέσω της συνολικής ενέργειας πτώσης της σφύρας ανά μονάδα όγκου του εδαφικού δείγματος.

Η εργαστηριακή μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια διαπερατόμετρου σταθερού φορτίου. Κατά τη δοκιμή αυτή οι ελεύθερες στάθμες σε δύο δεξαμενές με υψομετρική διαφορά ΔH παραμένουν σταθερές και μετράται η σταθερή παροχή διήθησης (Q). Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, η παροχή του νερού που θα περνάει μέσα από ένα πορώδες μέσο, θα είναι ανάλογη με τον συντελεστή υδατοπερατότητας, την διατομή αναφοράς (A), την πτώση του υδραυλικού φορτίου (Δh) και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους ροής (L). Τέλος ο προσδιορισμός του περιεχόμενου ποσοστού οργανικής ουσίας πραγματοποιήθηκε με βάση το διεθνές πρότυπο ASTM D2974. Η οργανική ύλη που περιέχουν τα εδάφη αποτελεί προϊόν αποσύνθεσης φυτικών και ζωικών οργανισμών. Η μορφολογία της δε, η οποία επηρεάζει σημαντικά τη δομή των εδαφών, εξαρτάται από την προέλευσή της, το βαθμό αλλά και τις συνθήκες αποσύνθεσης της (αερόβιες ή αναερόβιες).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι όταν το προς εξέταση υλικό δεν ικανοποιούσε τις απαιτήσεις του προτύπου αναμειγνύονταν με κατάλληλη ποσότητα μπεντονίτη και η δοκιμή επαναλαμβάνονταν.

3 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η χημική ανάλυση του σπιλίτη παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Η περιεκτικότητα των κύριων στοιχείων παρουσιάζεται σε οξείδια (% κ.β.), ενώ η αντίστοιχη των ιχνοστοιχείων σε mg/kg υλικού. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι πρόκειται για πυριτικό υλικό, με έντονη παρουσία αργιλίου, ενώ άλλα βασικά οξείδια όπως CaO (10.68), MgO (9.22) και Fe₂O₃ (9.57) βρίσκονται σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Από την ανάλυση των ιχνοστοιχείων προέκυψε ότι οι συγκεντρώσεις των περιεχόμενων βαρέων μετάλλων είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα και είναι μικρότερες των αντίστοιχων οριακών τιμών, οι οποίες έχουν θεσπιστεί ως αποδεκτές για το χαρακτηρισμό εδαφών. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πρότυπης δοκιμής ενός σταδίου για προσδιορισμό της εκχυλισιμότητας.

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση σπιλίτη

<i>Οξείδια</i>	<i>Κύρια Στοιχεία</i>
	<i>(%κ.β.)</i>
SiO ₂	38.40
Al ₂ O ₃	13.68
Fe ₂ O ₃	9.57
CaO	10.68
MgO	9.22
K ₂ O	1.88
Na ₂ O	2.58
TiO ₂	1.66
LOI	1.25

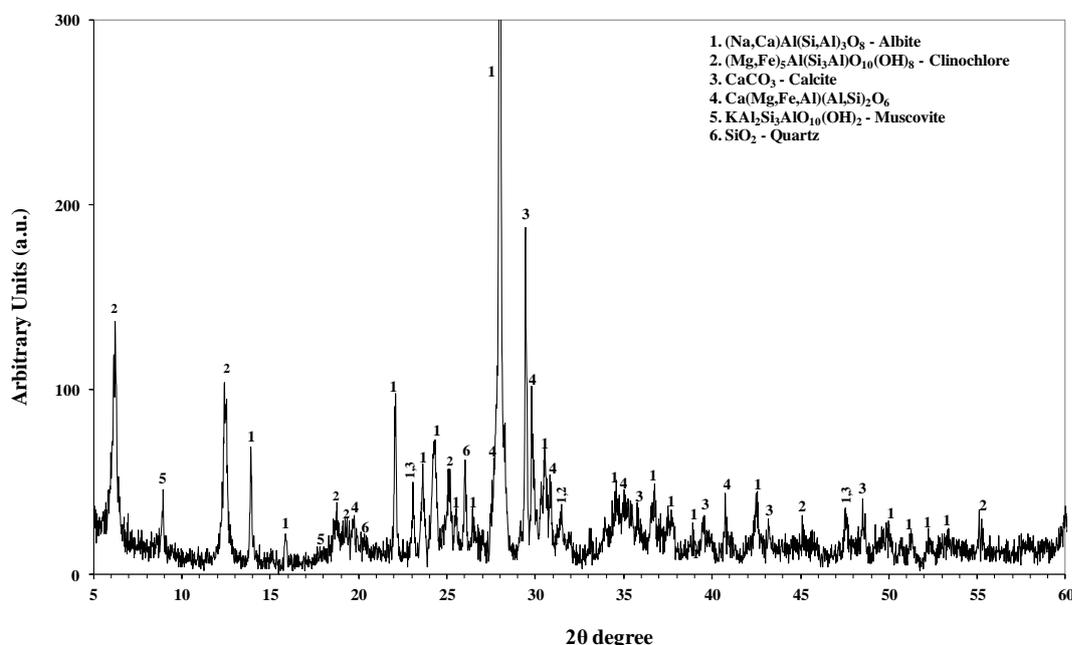
<i>Στοιχεία</i>	<i>Ιχνοστοιχεία</i>
	<i>(mg/kg)</i>
As	<2
Cd	0.14
Co	30
Cr	160
Cu	76
Mn	980
Ni	100
Pb	<4
Zn	84

του σπιλίτη (EN 12457, 2002), το οποίο έχει αναπτυχθεί και εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εκχυλισιμότητας κοκκωδών απορριμμάτων και ιλύων, προέκυψε ότι οι συγκεντρώσεις όλων των στοιχείων στο διάλυμα έκπλυσης είναι μικρότερες των αντίστοιχων οριακών τιμών, όπως αυτές έχουν θεσπιστεί στην απόφαση 2003/33/EK.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης μέσω περίθλαση ακτίνων Χ, παρουσιάζονται στο ακτινοδιάγραμμα του Σχήματος 1. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των κύριων ορυκτολογικών φάσεων πραγματοποιήθηκε μέσω ανάλυσης με την τεχνική Rietveld και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Η χημική σύσταση η οποία υπολογίστηκε με βάση τα ποσοστά των ορυκτολογικών φάσεων από την ανάλυση Rietveld ήταν σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του Πίνακα 2. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης ανιχνεύτηκαν έξι κύριες φάσεις, εκ των οποίων μόνο ο χλωρίτης ανήκει στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών. Ο

χλωρίτης αν και αργιλικό συστατικό, κατατάσσεται στην κατηγορία των αδρομερών ορυκτών, σε σχέση για παράδειγμα με το σμεκτίτη (μοντμοριλλονίτη), ο οποίος είναι περισσότερο λεπτόκοκκος. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι τα αργιλικά ορυκτά της ομάδας του σμεκτίτη, του ιλλίτη και του χλωρίτη, σε γενικές γραμμές, θεωρείται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά για την κατασκευή περιοριστικών φραγμάτων (Hermanns Stengele and Plötze, 2000). Ο αλβίτης αποτελεί την σημαντικότερη ορυκτολογική φάση με ποσοστό της τάξης του 45%κ.β. Η έντονη παρουσία αλβίτη και χλωρίτη είναι χαρακτηριστικό των πετρωμάτων της πρασινοσχιστολιθικής φάσης, τα οποία προέρχονται κυρίως από τα βασικά πυριγενή όπως οι βασάλτες. Τα αμέσως επόμενα σε ποσοστό ανιχνευόμενα ορυκτά είναι ο ασβεστίτης και ο μοσχοβίτης, ενώ ανιχνεύτηκαν σε χαμηλότερα ποσοστά αυγίτης και χαλαζίας. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα αργιλικά ορυκτά και οι μαρμαρυγίες, υλικά τα οποία θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην μείωση της υδροπερατότητας, αποτελούν το 26%κ.β του υλικού.

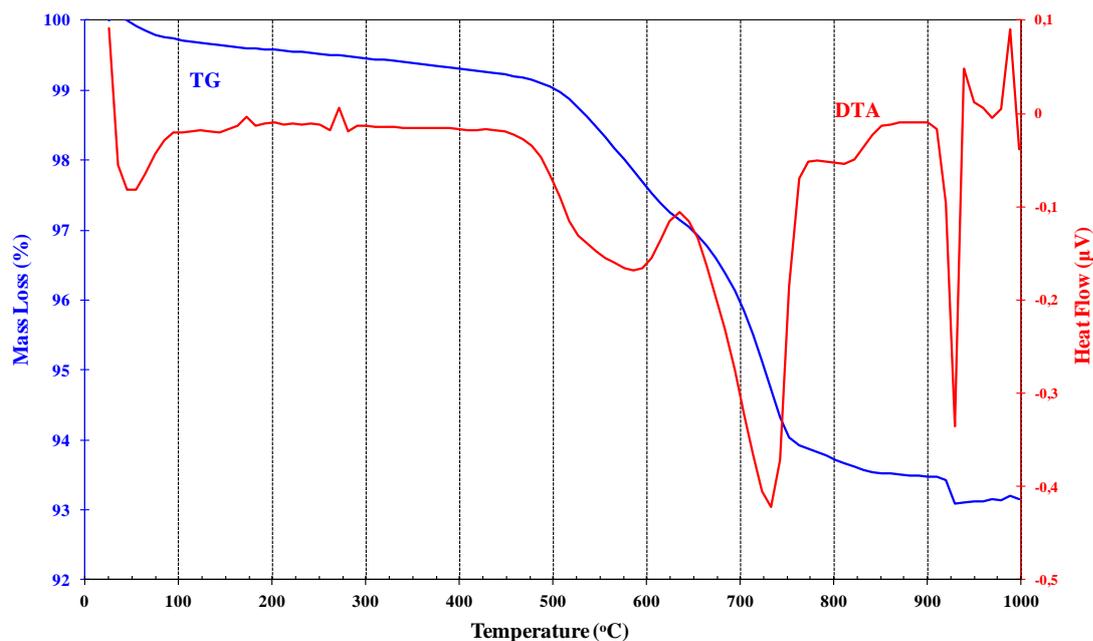
Τα αποτελέσματα της θερμοβαρυτομετρικής και της διαφορικής θερμικής ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Η καμπύλη TG-DTA του δείγματος σπλίτη παρουσιάζει πέντε διακριτές περιοχές. Η πρώτη κορυφή στους 100 °C παρουσιάζει μικρή απώλεια βάρους (0.4% κ.β.) και οφείλεται στην απομάκρυνση της υγρασίας.



Σχήμα 1. Ορυκτολογική ανάλυση XRD σπλίτη

Πίνακας 3: Ημιποσοτική ανάλυση ορυκτολογικών φάσεων

Παράμετροι – Ιδιότητες	(% κ.β)
<i>Albite</i> - $(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$	43.3
<i>Calcite</i> - $CaCO_3$	18.4
<i>Muscovite</i> - $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	14.2
<i>Clinocllore</i> - $(Mg,Fe)_2Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	12.0
<i>Augite</i> - $Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si)_2O_6$	8.8
<i>Quartz</i> - SiO_2 -	3.2

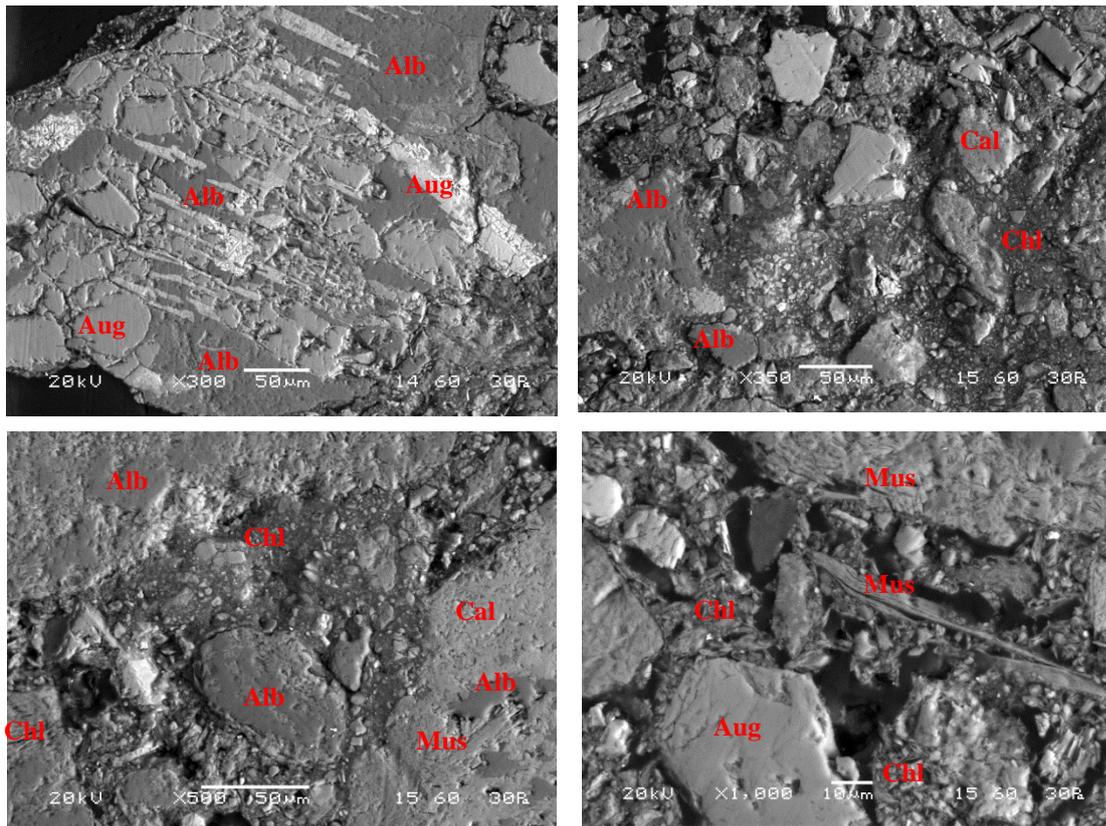


Σχήμα 2. Αποτελέσματα TG-DTA δείγματος σπιλίτη

Η δεύτερη κύρια κορυφή ανιχνεύεται στην περιοχή των 585 °C, με απώλεια βάρους της τάξης του 2.2 %κ.β., και αποδίδεται κυρίως στην αφυδροξυλίωση του χλωρίτη. Στην θερμοκρασιακή περιοχή των 730 °C λαμβάνει χώρα η θερμική διάσπαση του ασβεστίτη, λόγω της οποίας παρατηρείται απώλεια βάρους της τάξης του 3.5 %κ.β. Τα ενδόθερμα peaks στις υψηλότερες θερμοκρασίες οφείλονται στην διάσπαση του χλωρίτη και του μοσχοβίτη, ενώ από τους 930 °C αρχίζει η υαλοποίηση του υλικού, αλλά και η δημιουργία κρυσταλλικών φάσεων (εξώθερμο peak στους 980 °C) (Περράκη & Οικονομόπουλος, 2008)

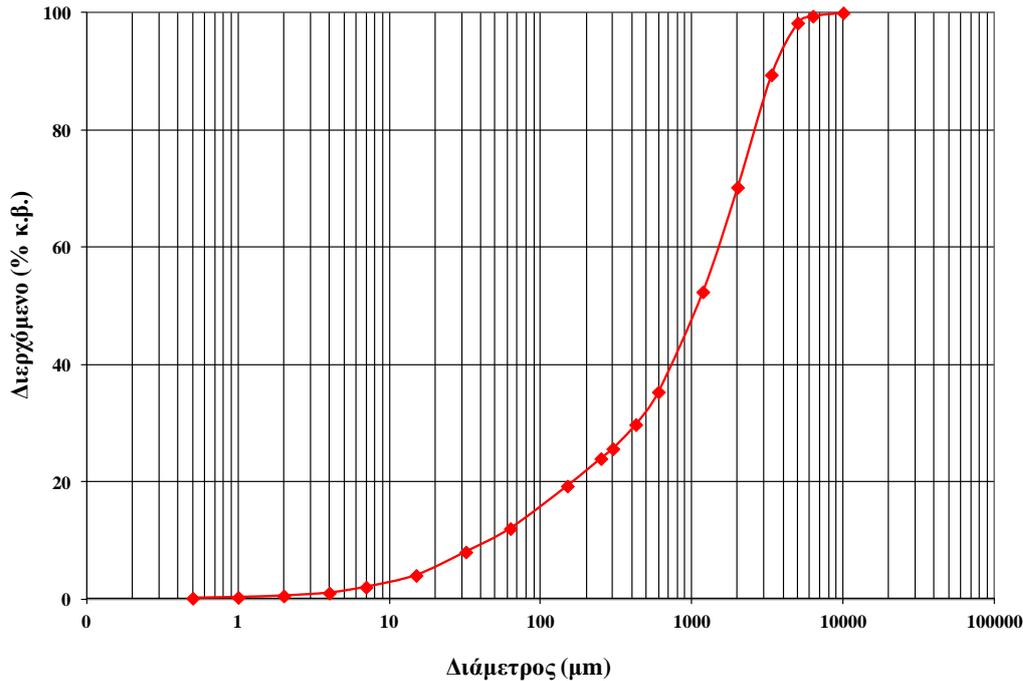
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την ανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης σε στιλπνές τομές. Στις μικρογραφίες της Εικόνας 1 παρουσιάζεται η μικροδομή των ανιχνευόμενων φάσεων του σπιλίτη σε διαφορετικές μεγεθύνσεις. Η φάση του αλβίτη κυριαρχεί στο μεγαλύτερο μέρος του δείγματος και αναπτύσσεται με την μορφή μεγάλων ιδιόμορφους πρισματικών κρυστάλλων. Οι πυρόξενοι και οι ασβεστίτες εμφανίζονται στη μήτρα ή σαν εγκλείσματα στον αλβίτη. Οι αναλύσεις από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο επιβεβαίωσαν επίσης την παρουσία μοσχοβίτη. Ο μοσχοβίτης ξεχωρίζει από τον ιλλίτη από το γεγονός ότι περιέχει μικρότερο ποσοστό σε Si, Mg και H₂O και περισσότερο K. Εντοπίζεται με την μορφή συσσωματωμάτων από μικρά φυλλάκια.

Οι σημειακές χημικές αναλύσεις έδειξαν την παρουσία σιδηρούχου χλωρίτη γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της περιθλασιμετρίας ακτίνων X. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι χλωρίτης απαντάται κυρίως σε λεπτή διασπορά, χωρίς να σχηματίζει ευμεγέθη συσσωματώματα.



Εικόνα 1. Μικρογραφίες Ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης δείγματος σπιλίτη.

Η κοκκομετρική κατανομή, δηλαδή ο προσδιορισμός της σχετικής συμμετοχής κάθε κλάσματος στο δείγμα αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους και στην κατανομή αυτή στηρίζεται συνήθως η ταξινόμηση των εδαφικών υλικών. Στο Σχήμα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κοκκομετρική κατανομή του δείγματος σπιλίτη όπως παράγεται, χωρίς περαιτέρω λειοτρίβηση, το οποίο έχει χαρακτηριστεί ως άμμος (0-5mm). Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι δεν ικανοποιείται η απαίτηση που αφορά το ποσοστό του περιεχόμενου λεπτόκοκκου υλικού (διάμετρος κόκκων <math>< 2 \mu\text{m}</math>), σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη περιεκτικότητα θα πρέπει να είναι της τάξης του 20% κ.β. Επίσης σύμφωνα με την αντίστοιχη προδιαγραφή δεν ικανοποιείται η απαίτηση της περιεκτικότητας σε χονδρόκοκκο υλικό (>63μm), το οποίο θα πρέπει να είναι μικρότερο από 40% κ.β.



Σχήμα 3. Κοκκομετρική κατανομή δείγματος “άμμου” σπιλίτη

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής των ορίων Atterberg και του περιεχόμενου ποσοστού οργανικών στο αρχικό δείγμα σπιλίτη, όπως επίσης και στα αντίστοιχα μετά την προσθήκη 2% κ.β και 2.5%κ.β. μπεντονίτη.

Πίνακας 4: Μεταβολή των ορίων Atterberg –Περιεχόμενα Οργανικά

Τύπος Εδάφους	Όριο Υδαρότητας WL (%)	Δείκτης Πλαστικότητας PI (%)	Οργανικά Συστατικά (% κ.β.)
Σπιλίτης	17.53	-	0.51
Σπιλ+2%κ.β Μπεντ.	33.13	15.39	0.50
Σπιλ+2.5%κ.β Μπεντ.	45.80	28.60	0.48

Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η τιμή του ορίου υδαρότητας ικανοποιεί την ελληνική προδιαγραφή, σύμφωνα με την οποία θα πρέπει το όριο υδαρότητας (WL) να παρουσιάζει τιμές μικρότερες του 40%. Παρ’ όλα αυτά, η συμπεριφορά του μίγματος σπιλίτη-μπεντονίτη είναι σαφώς καλύτερη, καθώς σύμφωνα με την προδιαγραφή επιδιώκονται τιμές μεταξύ 25% και 30%. Στην περίπτωση της προσθήκης 2.5% μπεντονίτη το όριο υδαρότητας ήταν κατά 15% περίπου αυξημένο σε σχέση με το όριο του προτύπου. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι με την προσθήκη 2%κ.β. μπεντονίτη, το όριο υδαρότητας του μίγματος αυξήθηκε κατά 90%, ενώ στην περίπτωση της προσθήκης 2.5%κ.β. σχεδόν τριπλασιάστηκε. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη προσροφητική ικανότητα μορίων νερού από τον μπεντονίτη. Μέχρι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας του να φτάσει το όριο υδαρότητας, ο μπεντονίτης προσροφά μόρια νερού και διογκώνεται διατηρώντας την πλαστική του κατάσταση. Μετά το όριο υδαρότητας, μεταβαίνει στην υδαρή κατάσταση. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τον προσδιορισμό του δείκτη πλαστικότητας. Κατά την διάρκεια της δοκιμής, το δείγμα σπιλίτη θρυμματίστηκε και δεν ήταν δυνατό να κυλινδρωθεί σε ράβδο. Επομένως χαρακτηρίστηκε ως μη πλαστικό υλικό με δείκτη πλαστικότητας PI = 0% και συνεπώς δεν πληροί την ελληνική προδιαγραφή, η οποία απαιτεί δείκτη πλαστικότητας μεταξύ 10% και 25%. Ο σπιλίτης, μέχρι η περιεχόμενη υγρασία του να φτάσει την τιμή 17.53% (όριο υδαρότητας) βρίσκεται στην ημιστερεά κατάσταση, ενώ μετά την τιμή αυτή

μεταβαίνει κατευθείαν στην ρευστή κατάσταση. Αντίθετα, η υψηλή πλαστικότητα του μπεντονίτη συνέβαλε στην αύξηση του δείκτη πλαστικότητας του σπιλίτη από 0% σε 15.39% και 28.60% αντίστοιχα. Όσον αφορά το οργανικά συστατικά, το περιεχόμενο ποσοστό τους βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα και ικανοποιεί την απαίτηση της προδιαγραφή που έχει θεσπιστεί για τα αργιλικά υλικά (<5%κ.β.) Οι βέλτιστες τιμές της περιεχόμενης υγρασίας, η αντίστοιχη ξηρή πυκνότητα και ο συντελεστής υδροπερατότητας ή υδραυλικής αγωγιμότητας, στο αρχικό δείγμα σπιλίτη, όπως επίσης και στα αντίστοιχα μετά από προσθήκη 2%κ.β και 2.5%κ.β. μπεντονίτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Όσον αφορά τα αποτελέσματα της δοκιμής Proctor, γίνεται αντιληπτό ότι και στις τρεις περιπτώσεις οι τιμές είναι παραπλήσιες. Επισημαίνεται ότι η ξηρή πυκνότητα στην περίπτωση των μιγμάτων είναι σχετικά μικρότερη, γεγονός το οποίο αποδίδεται στο μικρότερο ειδικό βάρος του μπεντονίτη.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα Δοκιμών Proctor – Συντελεστή Υδροπερατότητας

Τύπος Εδάφους	Ξηρή Πυκνότητα Kg/cm ³	Βέλτιστη Υγρασία (%κ.β.)	Συντελεστής Υδρο- περατότητας k (m/s)
Σπιλίτης	2.22	10	3.65*10 ⁻⁶
Σπιλ.+2%κ.β Μπεντ.	2.17	9.0	7.94*10 ⁻⁸
Σπιλ.+2.5%κ.β Μπεντ.	2.11	9.8	2.614*10 ⁻⁸

Ο βαθμός της υδροπερατότητας εκφράζεται αριθμητικά μέσω του συντελεστή υδροπερατότητας, ο οποίος συνήθως αναφέρεται ως υδραυλική αγωγιμότητα και συμβολίζεται με k. Η υδροπερατότητα (ή υδατοπερατότητα) είναι η ιδιότητα που δείχνει την ικανότητα ενός εδάφους να επιτρέπει στο νερό να κυκλοφορήσει δια μέσου αυτού, όταν οι πόροι και τα κενά αυτού συγκοινωνούν. Η υδροπερατότητα δεν είναι η ίδια σε όλους τους τύπους εδαφών αλλά αποτελεί συνάρτηση της κοκκομετρικής κατανομής, του μεγέθους και του ποσοστού των πόρων, της συνεκτικότητας, της σύνθεσης και της πυκνότητας του εδάφους, καθώς και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους, όπως για παράδειγμα, το ποσοστό περιεχόμενου οργανικού άνθρακα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το δείγμα σπιλίτη που έχει χαρακτηριστεί ως άμμος (0-5mm) κατατάσσεται στα υδροπερατά εδαφικά υλικά ($10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s), γεγονός το οποίο θα πρέπει να αποδοθεί όχι μόνο στην απουσία σμεκτιτικών φάσεων, αλλά και στην κοκκομετρία του σπιλίτη, η οποία είναι σχετικά μεγαλύτερη της αντίστοιχης των αδιαπέραστων αργίλων. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στα αδρόκοκκα εδαφικά υλικά, ο συντελεστής υδροπερατότητας σχετίζεται άμεσα με την κοκκομετρική διαβάθμιση, σε αντίθεση με τα λεπτόκοκκα αργιλικά όπου σημαντικό ρόλο παίζει η διόγκωση κατά την ενυδάτωση. Κατά συνέπεια, ο σπιλίτης δεν καλύπτει τις προδιαγραφές της εθνικής ελληνικής νομοθεσίας που ορίζουν ως όριο για το συντελεστή υδροπερατότητας το 10^{-9} m/s. Αντίθετα, στα μίγματα σπιλίτη – μπεντονίτη παρατηρείται αισθητή μείωση του συντελεστή υδροπερατότητας, η οποία προσδιορίστηκε σε δύο τάξεις μεγέθους. Η βελτίωση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ικανότητα διόγκωσης του μπεντονίτη λόγω προσρόφησης νερού, με συνέπεια την μείωση του πορώδους του μίγματος και επομένως την μείωση της υδροπερατότητάς του. Παρ' όλα αυτά, και σε αυτές τις περιπτώσεις ο συντελεστής υδροπερατότητας ήταν οριακά μικρότερος σε σχέση με την ελάχιστη τιμή που ορίζεται από το πρότυπο. Η περαιτέρω αύξηση του μπεντονίτη κατά μισή με μια μονάδα αναμένεται να οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του συντελεστή υδροπερατότητας, καθιστώντας έτσι συμβατό το αντίστοιχο μίγμα στην κατασκευή στρώματος χαμηλής διαπερατότητας σε ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σπιλίτης, ένα εξορυκτικό παραπροϊόν κατά την φάση της εξόρυξης νικελιούχου μεταλλεύματος, της Μεταλλευτικής και Μεταλλουργικής Εταιρείας ΛΑΡΚΟ, χαρακτηρίζεται

από υψηλό ποσοστό πυριτίου και υψηλή περιεκτικότητα σε άστριους. Από τις κύριες ανιχνευόμενες φάσεις, μόνο ο χλωρίτης ανήκει στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, ο οποίος αν και αργιλικό συστατικό, κατατάσσεται στην κατηγορία των αδρομερών ορυκτών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ο σπλίτης κατατάσσεται στα υδροπερατά εδαφικά υλικά ($10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s), γεγονός το οποίο θα πρέπει να αποδοθεί όχι μόνο στην απουσία σμεκτιτικών φάσεων, αλλά και στην κοκκομετρία του αρχικού υλικού, βάση της οποίας προέκυψε ότι μόνο το 1% κ.β. του περιεχόμενου λεπτόκοκκου υλικού έχει μέγεθος κόκκων μικρότερο από <2 μm. Η προσθήκη μπεντονίτη κατά 2%κ.β. και 2.5% κ.β. βελτίωσε αισθητά την συμπεριφορά του τελικού μίγματος, καθώς οδήγησε σε αισθητή μείωση του συντελεστή υδροπερατότητας, η οποία προσδιορίστηκε σε δύο τάξεις μεγέθους, γεγονός το οποίο αποδόθηκε στην ικανότητα διόγκωσης τους μπεντονίτη και στην μείωση του τελικού πορώδους. Η τιμή του συντελεστή υδροπερατότητας του μίγματος σπλίτη – μπεντονίτη υπολογίστηκε σε 2.61×10^{-8} m/s και διαφέρει μόνο μία τάξη μεγέθους από το αντίστοιχο ελάχιστο όριο του προτύπου (10^{-9} m/s). Η περαιτέρω αύξηση του μπεντονίτη κατά μισή με μία μονάδα, σε συνδυασμό με την βελτίωση της κοκκομετρικής κατανομής του σπλίτη, αναμένεται να οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του συντελεστή υδροπερατότητας, καθιστώντας έτσι συμβατό το αντίστοιχο μίγμα στην κατασκευή στρώματος χαμηλής διαπερατότητας σε ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βουδούρης, Κ. (2006). *Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΑΠΘ
- Δημόπουλος, Γ. (2001). *Χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) και περιβάλλον*. Πρακτικά ημερίδας «Υδρογεωλογία και Περιβάλλον». Αθήνα: ΕΕΥ. 75-128.
- ΕΛΟΤ, 2009. *Υπόστρωμα Στεγανοποίησης Λιμνοδεξαμενών και ΧΥΤΑ από Αργιλικά Υλικά*. Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή 1501-08-05-03-01, Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.
- Καββαδάς, Μ. (2007). *Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ
- Καραγιαννίδης, Α., Ξηρογιαννοπούλου, Α., Αδηλενίδου, Π. (2006). *Διαχείριση Απορριμμάτων και Αστικό Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος
- Λοϊζίδου (2009). *Στερεά Απόβλητα*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ
- Μαρίνος, Π. Γ. (1998). *Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Οδηγία 2003/33/ΕΚ (2002). *Απόφαση του Συμβουλίου της 19ης Δεκεμβρίου 2002 για τον καθορισμό κριτηρίων και διαδικασιών αποδοχής των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής σύμφωνα με το άρθρο 16 και το παράρτημα II της οδηγίας 1999/31/ΕΚ*. Βρυξέλλες: Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων
- Περράκη, Θ., Οικονομόπουλος, Ι., (2008): *Ανάπτυξη νέων κρυσταλλικών φάσεων κατά την παρασκευή κεραμικών από αργίλους της περιοχής “Αχλάδα” του Ν. Φλωρίνης*. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών, Αθήνα, pp 1121
- ASTM D2974 (2000). *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. ASTM International
- EN 12457 (2002). *Characterization of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges*. Brussels: European Committee for Standardization
- EN 13286-2 (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures. Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content. Proctor compaction*. Brussels: European Committee for Standardization
- EN 17892-12 (2004). *Geotechnical investigation and testing -- Laboratory testing of soil -- Part 12: Determination of Atterberg limits*. Brussels: European Committee for Standardization.

- Gupta, A.K. (1998). *Igneous Rocks*. Allied Publishers Ltd. New Delhi: Allied Publishers Limited.
- Hermanns Stengele, R., Plötze, M., (2000). *Suitability of minerals for controlled landfill and containment*. EMU Notes in mineralogy, Vol. 2, Chapter 8, 291-331
- Vallance, T. G. (1974). Spilites and Spilitic Rocks. *International Union of Geological Sciences*, Vol. 4, pp 59-68.

Διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής δομικών στοιχείων από λατομική παιπάλη και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από απόβλητα εκσκαφών-κατεδαφίσεων-κατασκευών

Μ. Γαλετάκης¹, Α. Βασιλείου¹, Χ. Πιπερίδη¹, Α. Σουλτανά¹, Κ. Κομνίτσας¹, Ε. Στειακάκης¹, Μ. Γκίνος²

¹Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100 Χανιά

²ΤΕΧΝΟΜΠΙΕΤΟΝ ΑΕ, Κοζάνη

Λέξεις κλειδιά: λατομική παιπάλη, ανακυκλωμένα αδρανή, δομικά στοιχεία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα η δυνατότητα παραγωγής δομικών στοιχείων τύπου «τεχνητού λίθου» χρησιμοποιώντας λεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα (παιπάλη) και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από απόβλητα εκσκαφών-κατεδαφίσεων-κατασκευών (ΑΕΚΚ), τσιμέντο διαφόρων τύπων και ειδικά πρόσθετα σκυροδέματος. Ως διαδικασίες παραγωγής επιλέχθηκαν η ανάμιξη των υλικών και η χύτευση σε μήτρες, λόγω της απλότητας και της μικρής απαίτησης σε ενέργεια και πρόσθετο εξοπλισμό που έχουν οι διαδικασίες αυτές. Για τον χαρακτηρισμό της παιπάλης και των ανακυκλωμένων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν έγινε κοκκομετρική, ορυκτολογική και χημική ανάλυση, ενώ προσδιορίστηκαν ο δείκτης μορφής, η πυκνότητα και η υδατοαπορρόφηση των κόκκων, η τιμή της δοκιμής μπλε του Μεθυλενίου και η τιμή της δοκιμής micro Deval. Η αρχική μελέτη της σύνθεσης των μιγμάτων παιπάλης-αδρανών-τσιμέντου-πρόσμικτων βασίστηκε στο μοντέλο στοίβαξης κόκκων κατά Andreassen-Andersen, και ακολούθησε εκτενής πειραματικός σχεδιασμός πολλαπλών σταδίων. Διερευνήθηκε η χρήση συνήθων τύπου τσιμέντων όπως CEM II 42.5 και CEM I 52.5R αλλά και ειδικού τύπου με υψηλή τιμή Blaine (μικροτσιμέντο), ενώ ως ειδικό πρόσθετο χρησιμοποιήθηκε υπερλεπτομερής πυριτία (silicafume). Η απαιτούμενη ποσότητα νερού καθορίστηκε με βάση τη δοκιμή του κώνου εξάπλωσης του ναπού σκυροδέματος. Μετά την παραγωγή και την ωρίμανση των δοκιμίων, έγινε έλεγχος (κατά EN) της αντοχής των σκληρυμένων δοκιμίων σε κάμψη και μονοαξονική θλίψη, μέτρηση του ειδικού βάρους και της υδατοαπορρόφησής τους, προσδιορισμός της ανθεκτικότητάς τους σε κύκλους ψύξης-απόψυξης και σε θερμικό πλήγμα. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε ότι όλες οι συνθέσεις πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις για απλά φέροντα δομικά στοιχεία τύπου «συνθετικού λίθου», ενώ αρκετές από αυτές πληρούν τις προδιαγραφές και πιο απαιτητικών κατηγοριών κατάταξης φέροντων δομικών στοιχείων.

Investigation of the possibility to produce building elements from quarry dust and recycled aggregates derived from excavation, construction and demolition waste materials

M. Galetakis¹, A. Vasileiou¹, C. Piperidi¹, A. Soultana¹, K. Komnitsas¹, E. Stiakakis¹, M. Ginos²

¹ School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100, Chania

² Technompeton Company SA, Kozani

Keywords: quarry dust, recycled aggregates, building elements

ABSTRACT: This paper investigates in laboratory scale the possibility to produce building elements such as "artificial stone" using fine quarry by-products (dust) and recycled aggregates derived from excavation, construction and demolition waste materials, various types of cement and concrete additives. Mixing of the materials and casting into molds, were chosen as production procedures due to their simplicity, low energy consumption and additional equipment requirements. Granulometric size distribution, mineral and chemical analysis, shape index, density, grain water absorption, Methylene blue value and micro Deval test value were determined, in order to characterize the quarry by-products and the recycled aggregates used. Mixture composition was based on the Andreassen-Andersen packing model, followed by an extensive multi-stage experimental design. The use of ordinary cement such as CEM II 42.5 and CEM I 52.5R and a special type of high Blaine value (microcement) was investigated, while ultrafine silica (silica fume) was used as a special additive. The required amount of water was determined according to fresh mortar cone test. After the production and curing processes, specimens were tested (according to EN) for their strength in bending and uniaxial compression, while specific gravity, water absorption and resistance to freeze-thaw cycles and thermal shock were also measured. Results indicated that all compositions meet the minimum requirements for simple load-bearing structural elements such as "artificial stone", while some of them meet the requirements of the most demanding classification categories for load-bearing structural elements.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως η λατομική παιπάλη, αλλά και τα οικοδομικά απορρίμματα αποτελούν ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα για τον κλάδο των κατασκευών με σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις.

Η συσσώρευση των υπερλεπτομερών παραπροϊόντων (<65μm), γνωστό και με το όνομα παιπάλη, που προέρχονται από την παραγωγή αδρανών υλικών είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της λατομικής βιομηχανίας, αφού αυτά μπορεί να αντιπροσωπεύουν έως και το 10-15% της συνολικής παραγωγής των αδρανών υλικών. Η απομάκρυνση σημαντικού μέρους του λεπτόκοκκου αυτού υλικού από τα αδρανή που προορίζονται για σκυρόδεμα, ασφαλτομίγματα και έτοιμα κονιάματα είναι επιβεβλημένη από τους σχετικούς κανονισμούς και τις προδιαγραφές ποιότητας που καθορίζουν το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό παιπάλης ανάλογα με τη χρήση των αδρανών υλικών. Έχουν προταθεί πολλοί διαφορετικοί τρόποι για την αξιοποίηση της, όμως σε ένα μεγάλο ποσοστό παραμένει αναξιοποίητη, καθώς η απορρόφησή της από βιομηχανικούς τομείς δεν είναι πάντα εφικτή, ενώ η απόθεσή της μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα λόγω εκπομπών αερόφερτων σωματιδιακών ρύπων (Galetakis and Leventakis 2009; Galetakis et al., 2012).

Τα οικοδομικά απορρίμματα αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων στις βιομηχανικές χώρες, το οποίο αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Παράγονται κατά τη δόμηση νέων κατασκευών και κατά την ανακαίνιση και κατεδάφιση των υπαρχουσών κατασκευών. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο ετήσιος όγκος των αποβλήτων που παράγονται από τις κατασκευαστικές δραστηριότητες ανέρχεται σε 500 εκατομμύρια τόνους που αντιστοιχούν σε 1.1 τόνο ανά κάτοικο ανά έτος. Περιέχουν κυρίως (60-80%) ορυκτά απόβλητα (σκυρόδεμα, υλικά τοιχοποιίας, κεραμικά πλακίδια κ.α.), άσφαλτο, ξύλο, μέταλλα, γυψοσανίδες, και άλλα υλικά σε μικρότερες ποσότητες. Η ανακύκλωση και αξιοποίηση των απορριμμάτων αυτών στην δόμηση, θα μπορούσε να συνεισφέρει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών και στην ελαχιστοποίηση των υλικών που αποτίθενται στο περιβάλλον (Galetakis κ.ά., 2014).

2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1 Χαρακτηρισμός παιπάλης

Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από συγκρότημα παραγωγής ετοιμών κονιαμάτων και συγκεκριμένα από το σύστημα ξήρανσης (παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα) και αποκονίωσης (παιπάλη μαρμάρου φίλτρου) της μαρμαρόσκονης που αποτελεί το βασικό αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται σε έτοιμα κονιάματα. Το υπερλεπτομερές κλάσμα της μαρμαρόσκονης (παιπάλη) απομακρύνεται με τη χρήση ρεύματος αέρα και μέσω συστήματος σακκόφιλτρων συλλέγεται και συγκεντρώνεται σε σιλό. Η απομάκρυνση της παιπάλης από τη μαρμαρόσκονη επιβάλλεται από τις προδιαγραφές κοκκομετρίας των αδρανών υλικών των ετοιμών κονιαμάτων. Η ποσότητα της παιπάλης που απομακρύνεται αποτελεί σημαντικό ποσοστό της χρησιμοποιούμενης μαρμαρόσκονης (~25%). Η παιπάλη που προέρχεται από τα φίλτρα αποκονίωσης αποτελεί το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα που έχει απομακρυνθεί από την παιπάλη της μαρμαρόσκονης με μηχανικές διαδικασίες. Από τα σιλό αποθήκευσης της παιπάλης πάρθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα και προσδιορίστηκε η κοκκομετρία, η ειδική επιφάνεια και η ορυκτολογική-χημική της σύσταση. Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με σύστημα κοκκομετρικής ανάλυσης ακτίνων laser (Malvern

Instruments, Mastersizer-S), η ειδική επιφάνεια με την μέθοδο Blaine και η ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασίμετρο ακτίνων-X (Siemens D500).

2.2 Χαρακτηρισμός αδρανών

Τα ανακυκλωμένα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από διαφορετικά σημεία απόθεσης οικοδομικών αποβλήτων των νομών της Κρήτης και της ευρύτερης περιοχής του νομού Κοζάνης. Για τη δειγματοληψία και την προετοιμασία των δειγμάτων ακολουθήθηκε το πρότυπο EN 932-1. Η ποσότητα των υλικών που λήφθηκε από κάθε θέση δειγματοληψίας ήταν περίπου 40-50kg. Αρχικά έγινε επιτόπια θραύση του υλικού και στη συνέχεια περαιτέρω θραύση του στο εργαστήριο σε σιαγωνωτό σπαστήρα στα -32mm. Από κάθε αρχικό δείγμα λήφθηκε τελική ποσότητα 20 kg προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τις εργαστηριακές δοκιμές. Η προέλευση του υλικού που συλλέχθηκε ήταν:

- ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, προϊόντα τσιμέντου (κυβόλιθοι και πλακίδια) και υπολείμματα έτοιμου σκυροδέματος,
- τούβλα και κονιάματα από κατεδάφιση τοιχοποιιών,
- κεραμικά πλακάκια, κεραμίδια, λεκάνες, κλπ, από την κατεδάφιση κτιρίων.

Αντιπροσωπευτικά δείγματα των παραπάνω υλικών, τόσο για το κλάσμα -32 +0.063mm όσο και για το κλάσμα -63μm, υποβλήθηκαν σε εργαστηριακούς ελέγχους που περιελάμβαναν:

- Ορυκτολογική και χημική ανάλυση των αποβλήτων που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των κύριων συστατικών καθώς και την παρουσία βλαπτικών ουσιών. Η ορυκτολογική ανάλυση των υλικών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση περιθλασίμετρου ακτίνων-X και η χημική με φασματομέτρο φθορισμού ακτίνων X (τύπου Bruker AXS-S2 Range). Οι επιβλαβείς ουσίες προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο TCLP (διαδικασία έκπλυσης τοξικών ουσιών).
- Κοκκομετρική ανάλυση με συμβατική κοσκίνηση για το χονδρότερο κλάσμα, σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 και με περίθλαση ακτίνων laser και με τη μέθοδο του υδρομέτρου για το λεπτότερο. Τα κλάσματα που προσδιορίστηκαν με την κοσκίνηση ήταν: -32 + 16 mm, -16 + 8 mm, -8 + 4 mm, -4 + 2 mm, -2 + 1 mm, -1 + 0.5 mm, -0.5 + 0,25 mm, -0.25 + 0.125 mm, -0.125 + 0.063 mm. Η κοκκομετρία του λεπτομερούς υλικού -63μm προσδιορίστηκε με την περίθλαση laser (Malvern Instruments, Mastersizer-S) και τη μέθοδο του υδρομέτρου (Bouyoucos, 1962).
- Μορφολογία κόκκων με υπολογισμό του δείκτη σχήματος και δείκτη πλακοειδούς για τα κλάσματα -16 +8 mm, -8 +4 mm και -4 +2 mm, σύμφωνα με τα πρότυπα EN 933-4 και EN 933-3. Η μορφολογία των κόκκων του κλάσματος -2 +1 mm μετρήθηκε με τεχνικές ανάλυσης εικόνας (Wojnar et al., 2000).
- Προσδιορισμό της τιμής του μπλε του μεθυλενίου και της αντοχής σε απότριψη σύμφωνα με τη δοκιμή micro Deval σύμφωνα με τα EN 933-9 και EN 1097-1 αντίστοιχα. Η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου εφαρμόστηκε στα κλάσματα -16 +8 mm και -8 + 4 mm, ενώ η micro Deval στο -14 + 10 mm.
- Η υδατοαπορρόφηση και η πυκνότητα των αδρομερών κλασμάτων -16 + 8 mm και -8 +4 mm σύμφωνα με το πρότυπο EN 1097-6. Η πυκνότητα των κόκκων του κλάσματος -4 +0.063 mm μετρήθηκε με τη μέθοδο του πυκνόμετρου.

2.3 Παρασκευή και εργαστηριακός έλεγχος δοκιμίων

Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ως αδρανή υλικά η παιπάλη ξήρανσης, η παιπάλη αποκονίωσης (φίλτρου) και τα ανακυκλωμένα αδρανή από τα προϊόντα των

κατεδαφίσεων, ως συνδετικές κονίες τσιμέντο τύπου CEM I 52.5R, CEM II 42.5N και μικροτσιμέντο (CEM I 52.5R - SR 3 LA, Ultrafine 12) καθώς και βελτιωτικά πρόσθετα σκυροδέματος. Το μικροτσιμέντο είναι ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο του οποίου το 95% των κόκκων του έχει μέγεθος μικρότερο από 12 μm . Τα ειδικά βελτιωτικά πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν για να βελτιώσουν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των νωπών μιγμάτων αλλά και τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των τελικών σκληρυμένων δοκιμίων ήταν:

- Υπερευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης που προσδίδει πλαστικότητα και αυξημένη ρευστότητα στο μίγμα χωρίς να απαιτείται προσθήκη επιπλέον νερού, διατηρώντας ή και αυξάνοντας την μηχανική αντοχή του τελικού σκληρυμένου υλικού. Η αναλογία στην οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.008 σε σχέση με τα συνολικά στερεά.

- Πυριτική παιπάλη (microsilica ή silica fume). Η πυριτική παιπάλη είναι υπέρλεπτη σκόνη διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) που αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια ή μικροσφαιρίδια με μέση διάμετρο περίπου 0.15 μm με μια πολύ υψηλή ειδική επιφάνεια (15-25 m^2/g). Περιέχει τουλάχιστον 85% w/w μη κρυσταλλικό SiO_2 ενώ η περιεκτικότητα σε αλκάλια είναι <1%. Συμβάλλει και αυτή στη μείωση του απαιτούμενου νερού, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του τελικού σκληρυμένου υλικού και τη μείωση της υδατοποροφητικότητάς του. Η δοσολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.05 % του βάρους του συνδετικού υλικού (τσιμέντου).

Η παρασκευή των μιγμάτων έγινε στον εργαστηριακό αναμκτήρα (MATEST mortar mixer E094) ενώ η ποσότητα του απαιτούμενου νερού καθορίστηκε από την επιτυγχανόμενη διάμετρο του μικροκόνου εξάπλωσης (Γαλετάκης κ.ά, 2012). Στη συνέχεια το μίγμα (με τον επιθυμητό κώνο εξάπλωσης), χυτεύθηκε σε τρίδυμες μεταλλικές πρισματικές μήτρες διαστάσεων 40x40x160 mm^3 με ταυτόχρονη δόνηση με τη βοήθεια της συσκευής δόνησης (MATEST Jolting apparatus E130), σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Την επόμενη μέρα τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τις μήτρες και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ωρίμανσης (MATEST curing chamber E139).

Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος σε θερμοκρασία $20\pm 1^\circ\text{C}$ και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες. Έπειτα, παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 1 ημέρα, προ της διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών.

Ο εργαστηριακός έλεγχος των σκληρυμένων πρισματικών δοκιμίων περιελάμβανε:

- Μέτρηση της αντοχής σε κάμψη (Fs) και μονοαξονική θλίψη (Cs) σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Για κάθε σύνθεση μετρήθηκαν 3 δοκίμια για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της Fs και 6 δοκίμια για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της Cs.

- Μέτρηση της πυκνότητας και της υδαταπορρόφησης σύμφωνα με το πρότυπο EN 99.

- Δοκιμές για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητάς τους σε σειρά κύκλων ψύξης-απόψυξης σύμφωνα με το EN 12371 και στη γήρανση με θερμικό πλήγμα σύμφωνα με το EN 14066.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων παιπάλης

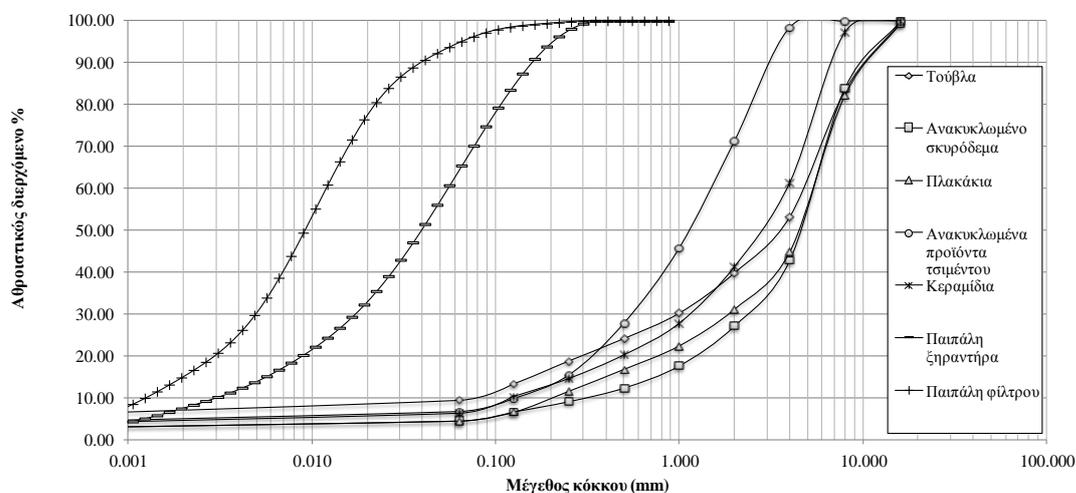
Η κοκκομετρική ανάλυση του απομακρυνόμενου λεπτομερούς κλάσματος της μαρμαρόσκονης από το σύστημα ξήρανσης-αποκονίωσης (παιπάλη ξηραντήρα) είναι αδρομερέστερο από εκείνο της συμβατικά οριζόμενης παιπάλης, εφόσον σημαντικό ποσοστό του (~30%) υπερβαίνει τα 63 μm (Σχήμα 1). Η ειδική επιφάνεια κατά Blaine των δειγμάτων της παιπάλης ξήρανσης που εξετάστηκε κυμάνθηκε από 1500 έως 1580 cm^2/g , με μέση τιμή 1540 cm^2/g , τυπική απόκλιση 30 cm^2/g και σχετική τυπική απόκλιση 1.92%. Το υλικό που συλλέγεται από το σύστημα των φίλτρων αποκονίωσης (παιπάλη φίλτρου) είναι αρκετά λεπτομερέστερο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, ενώ και η ειδική επιφάνεια του κατά Blaine είναι σημαντικά μεγαλύτερη (6130 cm^2/g). Η σχετική διακύμανση της ειδικής επιφάνειας

κατά Blaine τόσο της παιπάλης ξήρανσης όσο και της παιπάλης φίλτρου είναι μικρή, γεγονός που δείχνει ότι η παιπάλη είναι ομοιογενής όσον αφορά την κοκκομετρική της σύνθεση, αφού η ειδική επιφάνεια κατά Blaine εξαρτάται άμεσα από την κοκκομετρία του υλικού.

Η ορυκτολογική ανάλυση με βάση το ακτινοδιάγραμμα περιθλασης ακτίνων-X έδειξε ότι το βασικό ορυκτολογικό συστατικό της παιπάλης είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3) σε ποσοστό 97%, ενώ σε μικρή ποσότητα (3%) εμφανίζεται δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

3.2 Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων ανακυκλωμένων αδρανών

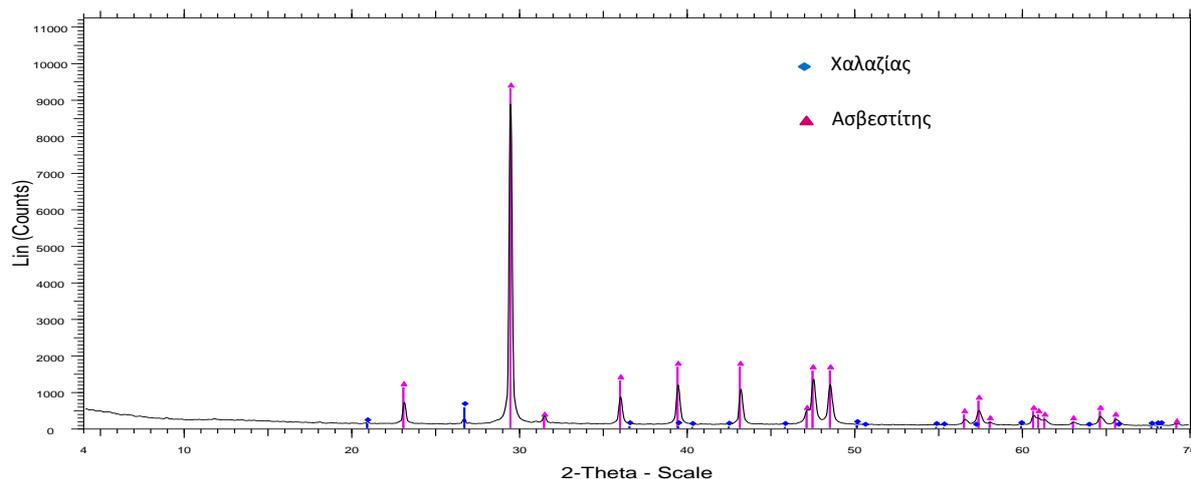
Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των ανακυκλωμένων αδρανών που εξετάστηκαν φαίνονται στο Σχήμα 1. Είναι προφανές ότι το κλάσμα που παράγεται από το σκυρόδεμα είναι αδρότερο από εκείνο που παράγεται από κεραμίδια, υλικά τοιχοποιίας (τούβλα/κονιάματα) και τα προϊόντα τσιμέντου. Το κλάσμα $-63\mu\text{m}$ για τα τούβλα/κονιάματα είναι μεγαλύτερο από 10%.



Σχήμα 1: Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών και παιπάλης.

Τα αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης, με βάση την περιθλασιμετρία ακτίνων-X, έδειξαν ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή από σκυρόδεμα αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη με μικρές ποσότητες χαλαζία και ίχνη περίκλαστου (Σχήμα 2). Τα κύρια συστατικά των αδρανών που προέρχονται από υλικά τοιχοποιίας (τούβλα και θραύσματα κονιάματος) είναι ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, ο αιματίτης, ο διοψίδιος και ο αλβίτης ενώ ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, η γύψος και το ορθόκλαστο αποτελούν τα κυριότερα ορυκτολογικά συστατικά των αδρανών που προέρχονται στα πλακάκια. Η χημική ανάλυση (κύρια στοιχεία) των ανακυκλωμένων αδρανών δίνεται στον Πίνακα 1. Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης επιβεβαιώνουν εκείνα της ορυκτολογικής. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκχύλισης TCLP παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι τιμές που μετρήθηκαν δεν ξεπερνούν τα μέγιστα επιτρεπτά όρια.

Το εύρος διακύμανσης και οι μέσες τιμές των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων που εξετάστηκαν (πυκνότητα, αντοχή απότριψης micro Deval, υδατοαπορρόφηση, μπλε του μεθυλενίου, ειδική επιφάνεια Blaine, δείκτης σχήματος και δείκτης πλακοειδούς) δίνονται στον Πίνακα 3. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι αντίστοιχες απαιτήσεις των προτύπων EN ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται τα αδρανή.



Σχήμα 2: Τυπικό διάγραμμα ορυκτολογικής ανάλυσης του δείγματος σκυροδέματος από περιθλασιμετρία ακτίνων-X.

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών.

	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	LOI*
Σκυρόδεμα	0.57	4.21	1.26	65.42	0.01	0.75	1.49	5.81	0.73	0.82	0.03	21.59
Τούβλα	1.03	4.75	2.80	8.79	0.05	6.00	14.95	57.79	0.23	-	0.85	1.89
Πλακάκια	-	4.46	1.37	8.78	0.06	5.39	9.80	70.54	-	-	0.77	0.23

* Απώλεια πύρωσης στους 1050°C

Πίνακας 2: Αποτελέσματα δοκιμής TCLP (mg/L) για τα ανακυκλωμένα αδρανή.

	Mn	Cu	Cr _{ολ}	Zn	Ni	Pb	Fe	Cd	SO ₄	PO ₄
Σκυρόδεμα	0.14	0.04	0.2	0.14	0.31	0	0.28	0.38	3	0.8
Τούβλα	1.47	0.09	0.23	0.31	0.55	0.1	0.05	0.68	3	1
Πλακάκια	1.4	0.03	0.18	0.12	0.34	0.2	0.1	0.32	3	1.3
Μέγιστα Επιτρεπτά Όρια	-	-	5.0	-	-	5.0	-	1.0	-	-

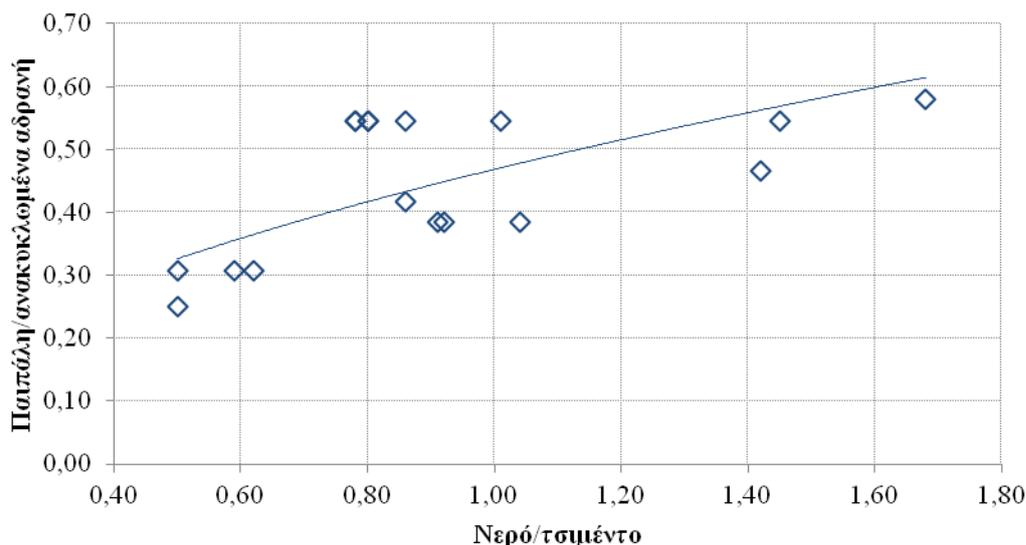
Πίνακας 3: Μέσες τιμές και εύρος τιμών των ανακυκλωμένων αδρανών για τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες.

Τύπος υλικού	Πυκνότητα (g/cm ³)	Δοκιμή micro Deval	Υδατοαπορρόφηση %	Μπλε του μεθυλενίου (g/Kg)	Blaine (cm ² /g)	Δείκτης σχήματος %	Δείκτης πλακοειδούς %
Σκυρόδεμα	2.54 (2.48-2.66)	42.8	3.88 (2.18-5.59)	10 (8.3-11.7)	3428 (2445-4411)	9.66 (6-15)	10.45 (9.18-11.71)
Τούβλα	2.7 (2.60-2.80)	-	19.45 (16.24-22.66)	11.7 (6.7-16.7)	3698 (3568-3827)	38.5 (20-78)	9.32 (9-9.64)
Πλακάκια	2.6 (2.54-2.66)	-	13.52 (9.37-17.67)	10.85 (6.7-15)	2463 (1769-3156)	31.66 (26-37)	6.17 (6.11-6.34)
EN προδιαγραφές		<40 για αδρανή σκυροδέματος	6-7 για ανακυκλωμένα αδρανή, 2-3 για αδρανή σκυροδέματος	<10 για αδρανή σε ασφαλτομίγματα		<55	<50

3.3 Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων των δοκιμίων που παρήχθησαν από τα μίγματα ανακυκλωμένων αδρανών-παιπάλης-τσιμέντου

Οι αναλογίες των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν καθώς και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων των σκληρυμένων δοκιμίων μετά την ωρίμανση δίνονται στον Πίνακα 4.

Ο σχεδιασμός των συνθέσεων του Πίνακα 4 έγινε με χρήση του λογισμικού EMMA (Elkem Material Mixture Analyzer) και λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς σχετικούς με το κόστος των απαιτούμενων συνδετικών κονιών (τσιμέντο διαφόρων τύπων) και ειδικών πρόσθετων (υπερευστοποιητής, silica fume) καθώς και με την εκτιμώμενη διαθεσιμότητα των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών. Ο λόγος παιπάλης προς ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 0.25 έως 0.55 και ο λόγος τσιμέντο προς αδρανή από 0.1 έως 0.15. Αν και χρησιμοποιήθηκε υπερευστοποιητής κατά την παρασκευή των μιγμάτων, ο λόγος νερό προς τσιμέντο που απαιτήθηκε για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ρευστότητας στο μίγμα κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα από 0.50 έως 1.68. Οι μεγάλες τιμές του λόγου νερό προς τσιμέντο οφείλονται στο υψηλό ποσοστό της περιεχόμενης παιπάλης στα μίγματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3, που δείχνει την μεταβολή του λόγου νερό προς τσιμέντο σε σχέση με τον λόγο παιπάλη προς ανακυκλωμένα αδρανή.



Σχήμα 3. Μεταβολή του λόγου νερό/τσιμέντο σε σχέση με την περιεχόμενη παιπάλη.

Οι τιμές για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την υδατοαπορρόφηση των σκληρυμένων δοκιμίων στις 28 ημέρες κυμαίνονται από 11.49-80.20 MPa και από 3.57-14.60% αντίστοιχα. Με βάση τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN196/01 και EN13755 που ορίζουν τις απαιτήσεις όσον αφορά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες για εμφανή φέροντα δομικά στοιχεία τύπου τεχνητού δομικού λίθου, οι περισσότερες συνθέσεις πληρούν τις απαιτήσεις για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ($C_s > 12\text{MPa}$) και την υδατοαπορρόφηση ($< 10\%$). Σύμφωνα με το πρότυπο BS 3921:1965, που αναφέρεται σε πολλαπλές κατηγορίες δομικών λίθων (Πίνακας 5), όλες οι συνθέσεις πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις του προτύπου για την κατηγορία I, όλες εκτός μιας για την κατηγορία 2, ενώ η πλειονότητα κυμαίνεται μεταξύ των κατηγοριών 5 και 7. Μια σύνθεση (C8) πληροί τις προδιαγραφές της απαιτητικής κατηγορίας 10. Η κατανομή των δοκιμίων των συνθέσεων, με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, στις διάφορες κατηγορίες φερόντων δομικών του προτύπου BS 3921:1965 παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.

Πίνακας 4: Συνθέσεις δοκιμών και αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.

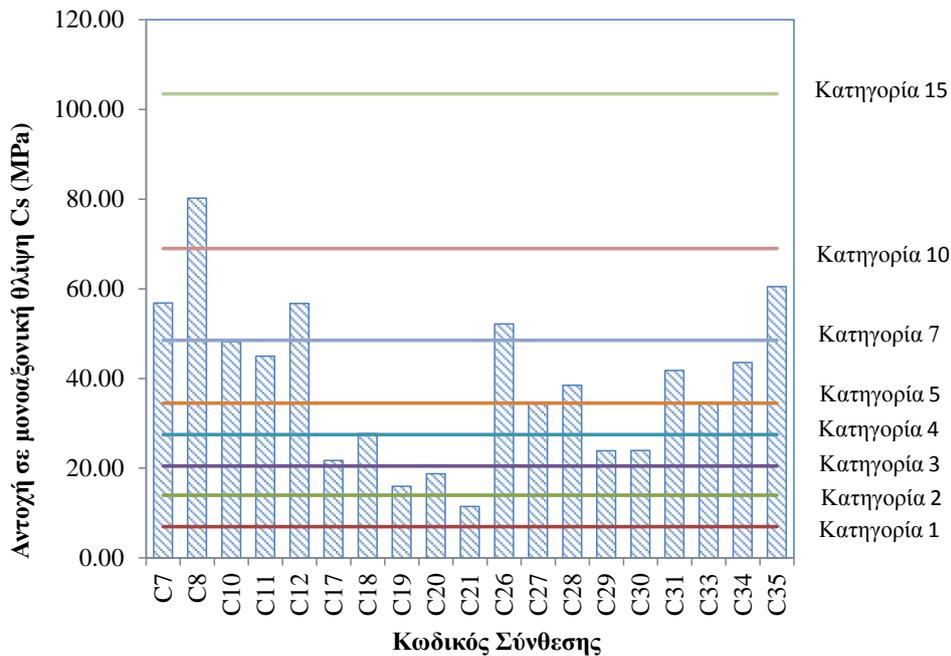
Κωδικός σύνθεσης	ΣΥΝΘΕΣΗ							ΛΟΓΟΙ				ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	
	Παιπάλη		Αδρανή		Τσιμέντο			Νερό/ Τσιμέντο	Τσιμέντο/ Παιπάλη	Τσιμέντο/ Σύνολο αδρανών	Παιπάλη/ Αδρανή	Ποκνότητα d (g/cm ³)	Υδαταπορ ρόφηση %	Μέση τιμή F _s	Μέση τιμή C _s
	Είδος	Ποσοστό %	Είδος	Ποσοστό %	Κωδικός	Ποσοστό %	Συνολικό ποσοστό %								
C7	QC 11	20	QC 22	55	CEM I	15	15	1.01	0.50	0.18	0.55	2.08	6.02	4.82	56.82
	QC 24	10													
C8	QC 11	10	QC 21	65	CEM I	15	15	0.50	0.75	0.18	0.31	2.34	3.57	7.50	80.20
	QC 24	10													
C10	QC 11	20	QC 20	55	CEM I	15	15	0.78	0.50	0.18	0.55	2.20	7.75	4.74	48.24
	QC 24	10													
C11	QC 11	20	QC 19	60	CEM I	15	15	0.86	0.60	0.18	0.42	2.15	7.23	5.16	45.01
	QC 24	5													
C12	QC 11	10	QC 21	65	CEM I	15	15	0.62	0.75	0.18	0.31	2.30	4.95	6.00	56.74
	QC 24	10													
C17	QC 11	20	QC 22	60	CEM II	10	12	1.42	0.43	0.14	0.47	1.97	11.11	4.95	21.71
	QC 24	8			MC	2									
C18	QC 11	15	QC 21	65	CEM II	8	10	0.92	0.40	0.11	0.38	2.22	6.13	6.27	27.72
	QC 24	10			MC	2									
C19	QC 11	15	QC 21	65	CEM II	10	10	1.04	0.40	0.11	0.38	2.20	6.48	6.06	16.00
	QC 24	10													
C20	QC 11	23	QC 22	57	CEM II	10	10	1.68	0.30	0.11	0.58	1.98	11.63	4.83	18.78
	QC 24	10													
C21	QC 11	8	QC 20	72	CEM II	10	10	0.50	0.56	0.11	0.25	2.04	14.60	2.57	11.49
	QC 24	10													
C26	QC 11	10	QC 6	55	CEM I	15	15	0.80	0.50	0.18	0.55	2.16	7.75	8.38	52.16
	QC 9	20													
C27	QC 11	20	QC 22	60	CEM II	10	10	1.45	0.33	0.11	0.55	1.92	10.67	8.01	34.48
	QC 24	10													
C28	QC 11	10	QC 21	65	CEM II	10	10	0.91	0.40	0.11	0.38	2.24	6.45	10.04	38.47
	QC 24	15													
C29			QC 20	30	CEM II	10	10	1.36		0.11		2.07	10.60	6.24	23.92
			QC 6	10											
			QC 19	50											
C30			QC 20	30	CEM II	10	10	1.38		0.11		2.07	11.18	6.47	23.94
			QC 6	5											
			QC 22	5											
			QC 19	50											
C31	QC 11	20	QC 29	55	CEM I	15	15	0.86	0.50	0.18	0.55	2.08	7.26	6.84	41.79
	QC 24	10													
C33	QC 11	20	QC 30	55	CEM I	15	15	0.78	0.50	0.18	0.55	2.06	8.30	4.73	34.73
	QC 24	10													
C34	QC 11	10	QC 28	55	CEM I	15	15	0.80	0.50	0.18	0.55	2.06	6.12	6.01	43.54
	QC 9	20													
C35	QC 11	10	QC 21	65	CEM I	15	15	0.59	0.75	0.18	0.31	2.25	5.05	6.17	60.52
	QC 24	10													

Επεξήγηση συμβόλων

QC 6: Ανακυκλωμένα πλακάκια-1	QC 21: Ανακυκλωμένα τσιμεντοειδή	QC 30: Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα-2
QC 9: Παιπάλη ασβεστολίθου	QC 22: Ανακυκλωμένα κεραμίδια-1	CEM I: Λευκό τσιμέντο τύπου 52,5R
QC 11: Παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα	QC 24: Παιπάλη μαρμάρου φλ.τρου	CEM II: Τσιμέντο κοινό τύπου 42,5
QC 19: Ανακυκλωμένα σοβάς, τσιμέντο, τούβλα	QC 28: Ανακυκλωμένα πλακάκια-2	MC: Μικροτσιμέντο
QC 20: Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα-1	QC 29: Ανακυκλωμένα κεραμίδια-2	

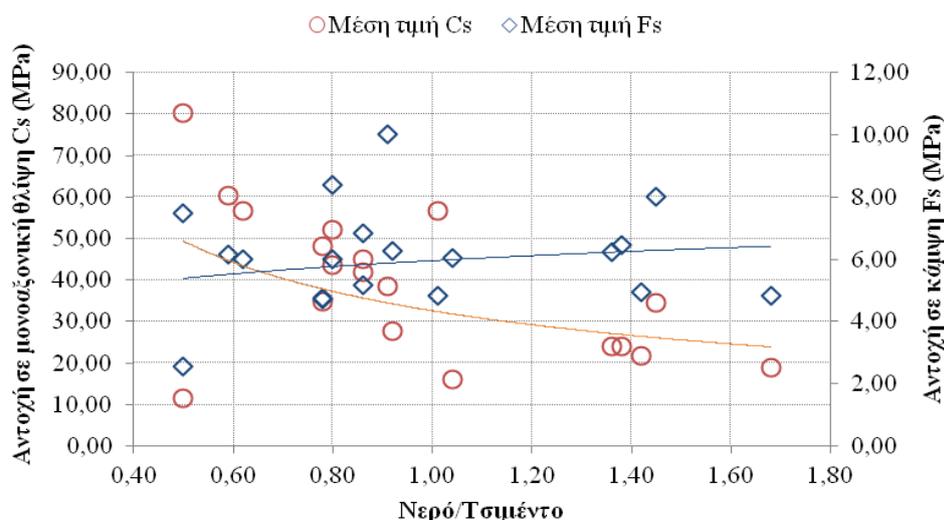
Πίνακας 5. Ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής σε μονοαξονική θλίψη φέροντων δομικών στοιχείων και κατηγορίες κατάταξης τους (BS 3921:1965).

Κατηγορίες φέροντων δομικών στοιχείων	1	2	3	4	5	7	10	15
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	7.0	14.0	20.5	27.5	34.5	48.5	69.0	103.5

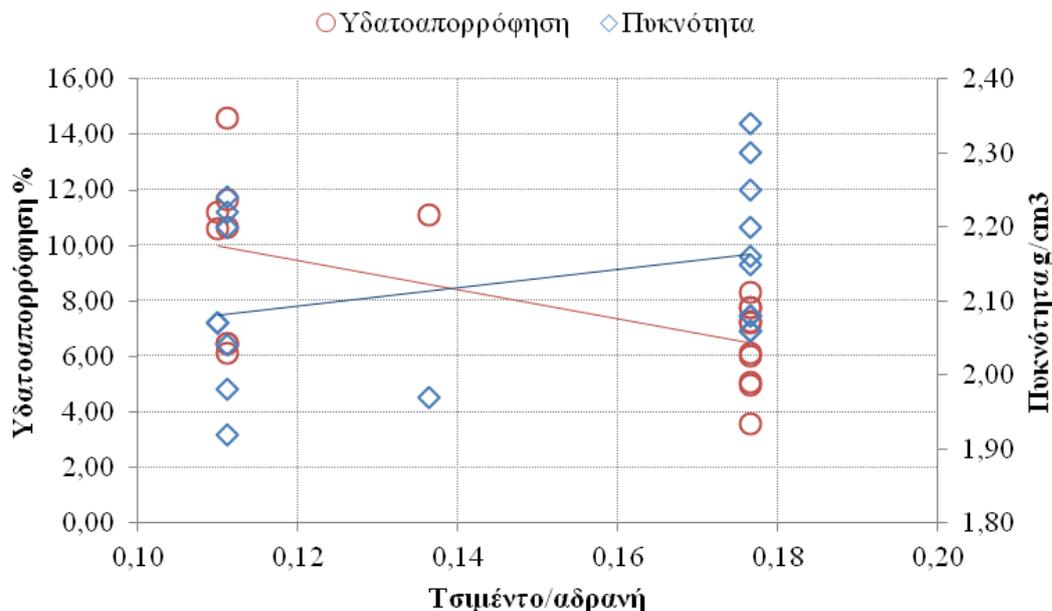


Σχήμα 4: Σύγκριση των τιμών της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των συνθέσεων με εκείνες των κατηγοριών του προτύπου BS 3921:1965 για φέροντα δομικά στοιχεία.

Η συσχέτιση των τιμών της αντοχής σε κάμψη και θλίψη, της υδατοαπορρόφησης και της πυκνότητας με τις παραμέτρους των συνθέσεων έδειξε ότι ο λόγος νερό προς τσιμέντο κατά κύριο λόγο και σε μικρότερο βαθμό ο λόγος τσιμέντο προς αδρανή επηρεάζουν τις επιτυγχανόμενες τιμές. Η μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της Cs και σε μικρότερο βαθμό και της Fs. Η αύξηση του λόγου τσιμέντο προς αδρανή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, οδηγεί σε αύξηση της Cs, ενώ η επίδραση στην Fs είναι αμελητέα. Όσον αφορά στην υδατοαπορρόφηση και στην πυκνότητα, αύξηση του λόγου νερού προς τσιμέντο οδηγεί σε σημαντική αύξηση της υδατοαπορρόφησης και μείωση της πυκνότητας. Η αύξηση του λόγου τσιμέντο προς αδρανή οδηγεί αντίθετα σε μείωση της υδατοαπορρόφησης και αύξηση της πυκνότητας (Σχήματα 7-8).



Σχήμα 5: Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη σε σχέση με τον λόγο νερού-τσιμέντου.



Σχήμα 8: Μεταβολή της υδατοαπορρόφησης και της πυκνότητας σε σχέση με τον λόγο τσιμέντου-αδρανών.

Σε επιλεγμένες συνθέσεις (C31, C33, C34, C35) έγιναν δοκιμές για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητάς τους σε σειρά κύκλων ψύξης-απόψυξης σύμφωνα με το EN 12371 (28 κύκλοι) και στη καταπόνηση με θερμικό πλήγμα σύμφωνα με το EN 14066. Ο αριθμός των κύκλων επιλέχθηκε με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας. Ως δείκτες μεταβολής των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν η ταχύτητα διάδοσης του ήχου (μέτρηση σύμφωνα με το πρότυπο EN 14579) και η απώλεια μάζας. Οι μετρήσεις πριν και μετά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης έδειξαν μια μικρή μείωση της ταχύτητας που κυμάνθηκε από 0.01-1.3% ενώ η απώλεια μάζας των δοκιμίων ήταν 0.28-1.83%. Η υποβολή των δοκιμίων σε θερμικό πλήγμα έδειξε μικρή μείωση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου που κυμάνθηκε από 3.3-5.6% και απώλεια μάζας από 1.92-2.6%.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής δομικών στοιχείων από παιπάλη και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από απόβλητα εκσκαφών-κατεδαφίσεων-κατασκευών έδειξε ότι όσον αφορά στις φυσικομηχανικές ιδιότητες για εμφανή φέροντα δομικά στοιχεία τύπου τεχνητού δομικού λίθου, η πλειοψηφία των συνθέσεων που εξετάστηκαν πληρούν τις απαιτήσεις για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (>12MPa) και την υδατοαπορρόφιση (<10%). Όλες οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν πληρούν τις γενικές απαιτήσεις για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για φέροντα δομικά στοιχεία κατηγορίας 1, 2 και 3 ενώ κάποιες από αυτές πληρούν τις προδιαγραφές πιο απαιτητικών κατηγοριών.

Από τη συσχέτιση των παραμέτρων σχεδιασμού των μιγμάτων με τις επιτυγχάνόμενες τιμές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων φάνηκε ότι καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο λόγος νερό προς τσιμέντο και λιγότερο κρίσιμο ο λόγος τσιμέντο προς αδρανή.

Η συμπεριφορά των συνθέσεων που υποβλήθηκαν σε δοκιμές τεχνητής γήρανσης (κύκλοι ψύξης-απόψυξης και θερμικό πλήγμα) κρίθηκε ικανοποιητική με βάση τη μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου και της απώλειας μάζας που μετρήθηκε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bouyoucos, G.J. (1962) Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54:464-465.
- Galetakis M., Alevizos G. and Leventakis K. (2012). Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements - An experimental approach. *Construction and Building Materials*, 26:122–130.
- Galetakis M., Komnitsas K., Leventakis K., Vasiliou A., Piperidi C., Zaharaki D., Stavroulakis N. and Ginos M. (2014). Assessment of Construction and Demolition Wastes as raw material for the building industry, 4th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania, Crete, Greece (2-5 September, 2014).
- Galetakis M., Leventakis K. (2009). Characterisation of quarry fines for construction recycling uses. In: Agioutantis Z, Komnitsas K, editors. *Proc of 3rd Int symposium on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology*: 131-137.
- Wojnar L. & Kurzydłowski K.J. et al. (2000). *Practical Guide to Image Analysis*, ASM International, pp 157-160, ISBN 0-87170-688-1.
- Γαλετάκης Μ., Αλεβίζος Γ., Πιπερίδη Χ., Στειακάκης Ε. (2012). Αξιοποίηση υπερλεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων για παραγωγή ειδικών δομικών υλικών, 4^ο Διεθνές Συνέδριο ΕΕΔΣΑ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, (Δεκέμβριος 2012).

Εργαστηριακή διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής διακοσμητικών πλακιδίων με εξώθηση μιγμάτων λατομικής παιπάλης-τσιμέντου

Μ. Γαλετάκης^{1*}, Κ. Λεβεντάκης¹, Α. Βασιλείου¹, Δ. Ζαχαράκη¹, Γ. Αλεβίζος¹, Ν. Σταυρουλάκης²

¹Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100 Χανιά

²ΦΙΝΟΜΠΕΤΟΝ ΑΕ, Χανιά

Λέξεις κλειδιά: λατομική παιπάλη, εξώθηση, δομικά στοιχεία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα η δυνατότητα παραγωγής ειδικών δομικών στοιχείων (διακοσμητικά πλακίδια) από λατομική παιπάλη ασβεστολιθικής σύστασης με τη διαδικασία της εξώθησης. Δημιουργήθηκαν εξωθήσιμα μίγματα παιπάλης-τσιμέντου-νερού με προσθήκη κυτταρίνης και χημικών πρόσθετων σκυροδέματος και παρήχθησαν κυλινδρικά δοκίμια σε εργαστηριακό εμβολοφόρο εξωθητή. Για την βελτιστοποίηση των συνθέσεων των εξωθήσιμων μιγμάτων έγινε χρήση μαθηματικών μοντέλων στοίβαξης κόκκων, ενώ ως συνδυαστικά χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι τσιμέντου: CEM I 52.5R και μικροτσιμέντο.

Ο πειραματικός σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις, την διερευνητική, την κύρια και την τελική (βελτιστοποίηση). Τα αποτελέσματα του εργαστηριακού προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων ελέγχου (αντοχή σε κάμψη, υδατοαπορρόφηση, πυκνότητα) των σκληρυμένων δοκιμίων των βελτιστοποιημένων συνθέσεων, έδειξαν πως ικανοποιούν τις σχετικές απαιτήσεις για διακοσμητικά δομικά στοιχεία, καθιστώντας έτσι την τεχνολογία της εξώθησης ως μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα μέθοδο παραγωγής δομικών οικολογικών στοιχείων από λεπτομερή λατομικά/μεταλλευτικά παραπροϊόντα-απορρίμματα.

Laboratory investigation of the potential use of quarry dust for the production of cement-based decorative

M. Galetakis¹, K. Leventakis¹, A. Vasileiou¹, D. Zaharaki¹, G. Alevizos¹, N. Stavroulakis²

¹ School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100, Chania

² Finobeton Company SA, Chania

Keywords: quarry dust, extrusion, building elements

ABSTRACT: In this study the production of high added-value building elements (decorative tiles), consisting mainly of limestone quarry dust, by extrusion, was investigated. Extrudable mixtures consisting of quarry dust, cement, water and special additives, such as cellulose and concrete admixtures were prepared and extruded by means of a laboratory piston extruder, to form cylindrical specimen. Optimization of mixture grains' packing was based on appropriate mathematical models while the use of two cement varieties (CEM I 52.5R and microcement) were investigated.

Experimental design was carried out in three stages: initial, main and final. The critical quality parameters (module of rupture, water absorption, density) of the cured hardened samples of the optimal mixtures were determined by suitable laboratory tests. Results indicated that produced specimens satisfy quality requirements for decorative tiles, rendering

extrusion as a highly promising method for the production of ecological building elements, through the recycling of fine quarry or mine by-products.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συσσώρευση των λεπτομερών παραπροϊόντων που προέρχονται από την παραγωγή αδρανών υλικών εμφανίζεται σήμερα σαν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών. Τα προϊόντα αυτά, που σε μεγάλο ποσοστό παραμένουν ανεκμετάλλευτα, θα μπορούσαν να είναι σημαντική πηγή πρώτης ύλης για τον κατασκευαστικό τομέα. Η αξιοποίηση του λεπτομερούς αυτού υλικού είτε ως έχει υπό τη μορφή πληρωτικού, είτε μετά από επεξεργασία του για την παρασκευή νέων προϊόντων, θα μπορούσε να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των αποθεμάτων βιομηχανικών πετρωμάτων και κατά συνέπεια των λατομείων. Επιπλέον, απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων λεπτομερών θα έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη λόγω μειωμένων εξόδων για απόθεση ή απόρριψη και πρόσθετων εσόδων από την πώληση των νέων προϊόντων. Μια τέτοια προσέγγιση κρίνεται επιβεβλημένη λαμβάνοντας υπόψη και την ισχύουσα εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία, οι οποίες επιβάλλουν την αποτελεσματική διαχείριση των μεταλλευτικών-λατομικών απορριμμάτων και παραπροϊόντων.

Τα τελευταία χρόνια, πλήθος μεθόδων για την αξιοποίηση μεγάλων ποσοτήτων λατομικών λεπτομερών (γνωστών και ως «λατομική παιπάλη»), έχουν προταθεί διεθνώς. Οι χρήσεις αυτές αναφέρονται κυρίως σε γεωργικές εφαρμογές (π.χ. ενασβέστωση εδαφών), βιομηχανικές (εξουδετέρωση όξινων βιομηχανικών αποβλήτων), ως πληρωτικό υλικό (βιομηχανία χάρτου, χρωστικών, πλαστικών) κ.α. Βασικά εμπόδια στην αξιοποίηση της λατομικής παιπάλης για τις ανωτέρω προτεινόμενες λύσεις αποτελούν η μεγάλη γεωγραφική διασπορά των σημείων παραγωγής παιπάλης (λατομεία), η απόσταση τους από άλλες βιομηχανίες αλλά και τα μεταβαλλόμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης παιπάλης που αδυνατεί να καλύψει τις απαιτήσεις ποιότητας για τις προτεινόμενες χρήσεις, ή το υψηλό κόστος που απαιτείται για περαιτέρω επεξεργασία της παιπάλης προκειμένου να καταστεί κατάλληλη. Στην χώρα μας τα εμπόδια αυτά είναι σημαντικά αφού τόσο τα λατομεία όσο και οι επιχειρήσεις παραγωγής και εμπορίας σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος είναι στη μεγάλη τους πλειοψηφία μικρομεσαίες με περιορισμένους πόρους. Κατά συνέπεια η ανάπτυξη μιας σχετικά απλής και σχετικά χαμηλού κόστους διαδικασίας με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις, που θα αξιοποιεί τη λατομική παιπάλη για παραγωγή δομικών στοιχείων, θα έβρισκε άμεση εφαρμογή.

Λαμβάνοντας υπόψη τη λεπτομερή φύση της λατομικής παιπάλης και τους περιορισμούς που θέτουν συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής δομικών υλικών βασισμένων στο τσιμέντο (ανάμιξη-χύτευση σε μήτρες, διαμόρφωση με συμπίεση-δόνηση) αποφασίστηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα παραγωγής δομικών στοιχείων τύπου διακοσμητικού πλακιδίου με την διαδικασία της εξώθησης. Το κύριο συστατικό των εξωθήσιμων μιγμάτων αποτέλεσε η λατομική παιπάλη (ασβεστολιθικής σύστασης) με συνδετικό υλικό τσιμέντο διαφόρων τύπων και ειδικά πρόσθετα. Η τεχνολογία αυτή εμφανίζεται ως τεχνικά και οικονομικά ελκυστική, αφού έχει μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια, άμεση δυνατότητα εφαρμογής της στο χώρο μιας λατομικής εταιρείας ή εταιρείας παραγωγής και εμπορίας ετοιμού σκυροδέματος/ασφαλτομίγματος, ενώ επιπρόσθετα έχει τη δυνατότητα άμεσης διάθεσης των παραγόμενων δομικών στοιχείων στον κατασκευαστικό κλάδο.

2 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η διαδικασία της εξώθησης ανήκει στη κατηγορία της πλαστικής διαμόρφωσης σχήματος και χρησιμοποιείται στη μορφοποίηση σωμάτων με σταθερή διατομή. Η εξώθηση χρησιμοποιείται για πολλά χρόνια με επιτυχία κυρίως στην κεραμική βιομηχανία για την

παραγωγή τούβλων, κεραμιδιών, σωλήνων κ.α. Για την παραγωγή αντικειμένων από πλαστικές μάζες με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται δυο βασικές τεχνικές, η “συνεχής εξώθηση” με κοχλιοφόρο εξωθητή και η “διαλείποντος έργου” με εμβολοφόρο εξωθητή. Η πρώτη τεχνική είναι η πιο κοινή και χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή κεραμικών στοιχείων με σταθερή διατομή και μήκος που καθορίζεται από την κοπή του εξωθημένου υλικού κάθετα προς την κατεύθυνση της εξώθησης (Ruppel, 1991; Benbow, 1993; Bender and Böger, 2007).

Για την παραγωγή των εξωθήσιμων μαζών μιγμάτων τσιμέντου, το τσιμέντο αναμιγνύεται εν ξηρώ με τα αδρανή υλικά και τα ειδικά πρόσμικτα και στη συνέχεια προστίθεται η κατάλληλη ποσότητα νερού για την δημιουργία της πλαστικής μάζας. Εναλλακτικά τα πρόσμικτα είναι δυνατόν να διαλυθούν στην προζυγισμένη ποσότητα νερού και στην συνέχεια να προστεθούν στο ξηρό μίγμα τσιμέντου-αδρανών. Η ανάμιξη επιτυγχάνεται με χρήση ειδικών αναμικτήρων που επιβάλλουν ισχυρές διατμητικές τάσεις και ταυτόχρονα απαερώνουν με χρήση αντλίας κενού τα αναμιγνυόμενα υλικά. Η προκύπτουσα πλαστική μάζα συμπιέζεται και ωθείται να διέλθει από μήτρα κατάλληλου σχήματος για την διαμόρφωση προϊόντων απλής ή σύνθετης διατομής. Η επιβολή ισχυρών διατμητικών και θλιπτικών τάσεων κατά τη διαδικασία της ανάμιξης και εξώθησης καθώς και απαέρωση έχουν σαν αποτέλεσμα να βελτιώνονται σημαντικά οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού (σκληρυμένου) προϊόντος, ενώ παράλληλα η μέθοδος διακρίνεται για την υψηλή παραγωγικότητα της (Γαλετάκης κ.α. 2009).

Η ανάπτυξη και βελτίωσης τεχνικών εξώθησης τσιμεντομιγμάτων για την παραγωγή δομικών στοιχείων αποτελεί αντικείμενο που συγκεντρώνει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον τόσο από την βιομηχανία όσο και από ερευνητικούς φορείς. Λόγω του μεγάλου οικονομικού ενδιαφέροντος των τεχνολογιών αυτών, τα αποτελέσματα των περισσότερων αυτών εργασιών είναι κατοχυρωμένα και προστατεύονται από διπλώματα ευρεσιτεχνίας.

Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας Ηνωμένων Πολιτειών με αριθμό US27041168 (2006) και US8936675B (2015) αναφέρονται σε εξωθούμενα προκατασκευασμένα προϊόντα τσιμέντου και στην διαδικασία και στον εξοπλισμό παραγωγής τους. Η διαδικασία περιλαμβάνει παραγωγή δομικών υλικών με εξώθηση, κάνοντας χρήση ειδικού τύπου παράγωγου κυτταρίνης. Σε άλλο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Πολυτεχνείου του Μιλάνου με αριθμό CH.06.037.A (2007), περιγράφεται μέθοδος παραγωγής προϊόντων τσιμέντου με διαδικασίες εξώθησης. Τα προτεινόμενα προϊόντα που αποτελούνται από τσιμέντο, άργιλο και πρόσθετα (μεταξύ των οποίων και κυτταρίνη), θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά τούβλα με προφανή οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Επίσης στο ιαπωνικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με αριθμό JP3652446 (2005) γίνεται χρήση υδατικής διασποράς υδροξυ-αλκαλι-κυτταρίνης και μοντμοριλονίτη σε δεδομένες δοσολογίες για την παραγωγή εξωθήσιμων μιγμάτων (www.freepatentsonline.com). Στις παραπάνω αναφερόμενες ευρεσιτεχνίες χρησιμοποιούνται: ως βασικά αδρανή υλικά κυρίως πυριτική άμμος με κοκκομετρία σημαντικά μεγαλύτερη της λατομικής παιπάλης, ως συνδετική κονία τσιμέντα τύπου CEM I και CEM II, ενώ ως βασικό πρόσθετο για απόκτηση πλαστικότητας χρησιμοποιείται η κυτταρίνη.

Οι Γαλετάκης κ.ά. (2009) εξέτασαν τη δυνατότητα παραγωγής εξωθήσιμων μιγμάτων ασβεστολιθικής παιπάλης και τσιμέντου τύπου CEM II 32.5. Χρησιμοποίησαν πρόσθετα σκυροδέματος (υπερρευστοποιητές και πλαστικοποιητές) αντί κυτταρίνης και μέτρησαν την επιτυγχάνομενη πλαστικότητα με τη δοκιμή Pfeffer-Korn (τυπική δοκιμή πλαστικότητας για κεραμικές μάζες. Συσχέτισαν την τιμή Pfeffer-Korn με το βάθος διείσδυσης πρότυπου κώνου της δοκιμής Vicat και πρότειναν ένα νομόγραμμα για τον καθορισμό της απαιτούμενης ποσότητας νερού για την επίτευξη της πλαστικότητας που εξασφαλίζει την εξωθησιμότητα του μίγματος. Τα παραχθέντα δοκίμια έδωσαν τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη τριών σημείων που κυμάνθηκαν από 17.79-41.56MPa και από 3.67-7.47MPa

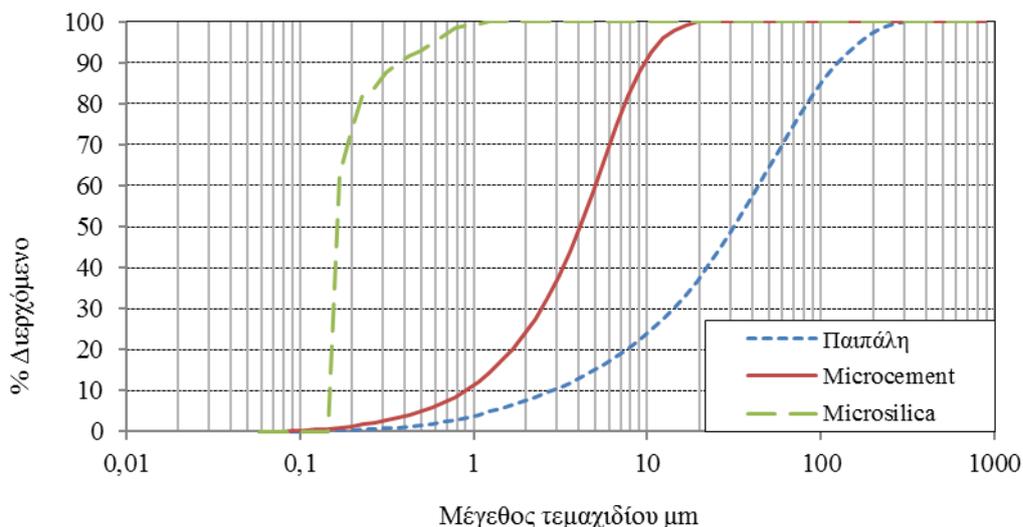
αντίστοιχα, ενώ η υδατοαπορρόφηση κυμάνθηκε από 4.47-12.85%. Στην εργασία αυτή δεν διερευνήθηκε η χρήση άλλων τύπων τσιμέντου, ούτε η επίδραση κυτταρινούχων πρόσθετων και πυριτικής παιπάλης (microsilica). Επίσης ο καθορισμός των συνθέσεων έγινε εμπειρικά και δεν βασίστηκε σε θεωρητικά μοντέλα βελτιστοποίησης της πυκνότητας στοιβαξης των κόκκων των στερεών συστατικών των μιγμάτων. Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι κρίσιμοι αυτοί παράγοντες με στόχο την ανάπτυξη μεθοδολογίας για παραγωγή εξωθήσιμων μιγμάτων παιπάλης-τσιμέντου, κατάλληλων για παραγωγή δομικών στοιχείων.

3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Παιπάλη, τσιμέντο, ειδικά πρόσθετα

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι παιπάλης (QC9, QC10, QC11, QC24) που προέρχονται από εργοστάσιο παραγωγής ετοιμών κονιαμάτων (από το σύστημα ξήρανσης και αποκονίωσης της λατομικής άμμου και της μαρμαρόσκονης που αποτελούν τα βασικά αδρανή υλικά των ετοιμών κονιαμάτων) καθώς και από μονάδα παραγωγής ασφαλτομιγμάτων. Συγκεκριμένα η παιπάλη με τον κωδικό QC9 προέρχεται από τον ξηραντήρα του κλάδου παραγωγής λατομικής άμμου, η παιπάλη με τον κωδικό δείγματος QC10 από το φίλτρο καυσαερίων θέρμανσης του κλάδου παραγωγής ασφαλτομίγματος, η παιπάλη με το κωδικό δείγματος QC11 από τον ξηραντήρα του κλάδου παραγωγής μαρμαρόσκονης, ενώ τέλος η παιπάλη με τον κωδικό δείγματος QC24 προέρχεται από την δευτερογενή αποκονίωση της μαρμαρόσκονης σε γραμμή μονάδα ετοιμών κονιαμάτων και συλλέγεται σε σακκόφιλτρα.

Το υπερλεπτομερές κλάσμα της άμμου και της μαρμαρόσκονης (γνωστό και ως “παιπάλη”) απομακρύνεται με τη χρήση ρεύματος αέρα και μέσω συστήματος σακκόφιλτρων συλλέγεται και συγκεντρώνεται σε σιλό. Οι διαφορετικές συνθήκες και τρόποι λειτουργίας των μηχανισμών ξήρανσης και αποκονίωσης καθώς και τα διαφορετικά αδρανή (λατομική άμμος και μαρμαρόσκονη) οδηγούν σε συλλογή διαφορετικών τύπων παιπάλης (οι διαφορές εστιάζονται κυρίως στην κοκκομετρία και λιγότερο στη χημική ή ορυκτολογική σύσταση). Η απομάκρυνση της παιπάλης από τα αδρανή επιβάλλεται από τις προδιαγραφές κοκκομετρίας των ετοιμών κονιαμάτων και η απομακρυνόμενη ποσότητα ανέρχεται στο 25% περίπου της χρησιμοποιούμενης άμμου και μαρμαρόσκονης. Από τα σιλό αποθήκευσης της παιπάλης λήφθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα και προσδιορίστηκε η κοκκομετρία, η ειδική επιφάνεια, η ορυκτολογική και χημική της σύσταση. Τυπική κοκκομετρική καμπύλη παιπάλης (QC10), του μικροτσιμέντου και της πυριτικής παιπάλης (microsilica) φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική κατανομή παιπάλης (QC10), μικροτσιμέντου (microcement) και πυριτικής παιπάλης (undensified microsilica).

Ως συνδετικές κονίες χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο τύπου CEM I 52.5R και μικροτσιμέντο τύπου CEM I 52.5R-SR3 LA-Ultrafine 12, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και βελτιωτικά πρόσθετα κονιαμάτων και σκυροδέματος. Το μικροτσιμέντο είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο, καθώς το 95% των κόκκων του έχει μέγεθος μικρότερο από 12μm.

Τα πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: κυτταρίνη, υπερρυστοποιητής, επιβραδυντής και πυριτική παιπάλη. Κατά την διάρκεια της διερευνητικής φάσης της πειραματικής διαδικασίας, δοκιμάστηκαν πρόσμικτα διαφόρων τύπων και σε διαφορετικές δοσολογίες με στόχο την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Η κυτταρίνη που τελικά επελέγη ήταν ονομαστικού ιξώδους 40000cp, τύπου US. Ο τύπος αυτός έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα αφού παρείχε άμεση ενυδάτωση στο τσιμέντο, εξαλείφοντας έτσι το πρόβλημα των εσωτερικών τάσεων κατά την χρονική διάρκεια της ωρίμανσης. Ο ρυστοποιητής/πλαστικοποιητής ήταν μελαμινικής βάσης και η βέλτιστη δοσολογία του καθορίστηκε στο 2% επί του προστιθέμενου τσιμέντου. Ο επιβραδυντής που επελέγη ήταν το κιτρικό οξύ σε δοσολογία 0.5% επί του προστιθέμενου τσιμέντου.

Τέλος χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πυριτικής παιπάλης, η συσσωματωμένη (Densified) και η αποσυσσωματωμένη (Undensified). Η πυριτική παιπάλη περιέχει τουλάχιστον 85% w/w άμορφο SiO₂ και αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με μέση διάμετρο περίπου 0.15μm και ειδική επιφάνεια 15-25 m²/g. Συμβάλλει και αυτή στη μείωση του απαιτούμενου νερού, στην αύξηση της αντοχής του τελικού σκληρυμένου υλικού και στη μείωση της υδατοποροφητικότητάς του, τόσο με την κοκκομετρία όσο και με τις ποζολανικές της ιδιότητες.

3.2 Σχεδιασμός μιγμάτων

Η μελέτη της σύνθεσης των μιγμάτων παιπάλης-τσιμέντου-πρόσμικτων βασίστηκε στο θεωρητικό μοντέλο στοιβαξης κόκκων κατά Andreassen. Το μοντέλο αυτό θεωρείται κατάλληλο για τον σχεδιασμό συνθέσεων στις οποίες συμμετέχουν πολύ λεπτόκοκκα υλικά όπως η παιπάλη και τα υπερλεπτομερή πυριτικά πρόσθετα (microsilica). Σύμφωνα με το μοντέλο η ιδανική κοκκομετρική καμπύλη δίνεται από την εξίσωση 1.

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (1)$$

Όπου:

$P(d)$ = Ποσοστό τεμαχιδίων με διάμετρο μικρότερη από d (% διερχόμενο)

d = Διάμετρος τεμαχιδίου

d_{\max} = Μέγιστη διάμετρος τεμαχιδίου συμμετέχει στο μίγμα

d_{\min} = Ελάχιστη διάμετρος τεμαχιδίου συμμετέχει στο μίγμα

q = παράμετρος μορφής της κατανομής

Για τον καθορισμό των συνθέσεων με βάση το μοντέλο Andreassen λαμβάνεται υπόψη η σχέση που έχει η πυκνότητα στοίβαξης, δηλαδή ο τρόπος διάστρωσης των κόκκων των αδρανών υλικών στο μίγμα, με τη μηχανική αντοχή του και τη ρεολογία του. Όταν το κυρίαρχο κριτήριο σχεδιασμού είναι η ρεολογική ικανότητα του τελικού μίγματος, τότε απαιτείται η κοκκομετρική του διαβάθμιση να οδηγεί σε αραιότερη πυκνότητα στοίβαξης των κόκκων στο νωπό μίγμα. Αντίθετα, όταν η κοκκομετρική κατανομή οδηγεί στη μείωση των κενών στο νωπό μίγμα, τότε επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση των μηχανικών αντοχών του σκληρυμένου τελικού προϊόντος. Η μέγιστη πυκνότητα στοίβαξης επιτυγχάνεται για τιμή της παραμέτρου $q=0.37$. Μικρότερες τιμές του q οδηγούν σε μίγματα με αραιότερη πυκνότητα στοίβαξης που έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες αλλά βελτιωμένη ρεολογική συμπεριφορά (Οικονόμου, 1993, Kwan and Fung, 2009).

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό των συνθέσεων των εξωθήσιμων μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EMMA της εταιρείας ELKEM, το οποίο στηρίζεται στο μοντέλο Andreassen. Η χρησιμοποίηση τεσσάρων διαφορετικών τύπων παιπάλης καθώς και η χρησιμοποίηση δυο τύπων τσιμέντου και δυο τύπων πυριτικής παιπάλης, παρέχει τους απαραίτητους βαθμούς ελευθερίας για την βελτιστοποίηση της κοκκομετρικής σύνθεσης του προκύπτοντος μίγματος.

Η υλοποίηση των πειραμάτων έγινε σε τρεις φάσεις: τη διερευνητική, την κύρια (εκτενής) φάση και την τελική (επιλογή βέλτιστων συνθέσεων). Ως παράμετροι σχεδιασμού επελέγησαν οι λόγοι νερό/τσιμέντο και τσιμέντο/αδρανή καθώς και η παράμετρος q , που αποτελεί το συντελεστή μορφής της κοκκομετρικής καμπύλης του μίγματος σύμφωνα με το μοντέλο Andreassen. Ως μεταβλητές απόκρισης που επηρεάζονται από τις μεταβολές των παραπάνω παραγόντων, επελέγησαν η αντοχή σε κάμψη, η υδατοαπορρόφηση και η πυκνότητα. Τέλος επιλέχθηκε σαν πρότυπη εργασιμότητα-πλαστικότητα των παρασκευαζόμενων δειγμάτων, η τιμή της δοκιμής Pffefer-Korn ίση με 2, ως διεθνώς αποδεκτή τιμή αναφοράς για την βιομηχανική εξώθηση κεραμικών μαζών, που ισοδυναμεί με διείδυση του πρότυπου κώνου κατά 10.2mm (Γαλετάκης κ.α., 2009).

Κατά την διερευνητική φάση, προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες δοσολογίες των προσμίκτων (κυτταρίνη, επιβραδυντής, υπερρευστοποιητής, πυριτική παιπάλη), ο βέλτιστος τύπος προσμίκτων για την εν λόγω χρήση, καθώς και η προστιθέμενη ποσότητα νερού για την επίτευξη πρότυπης πλαστικότητας. Κατά την κύρια φάση πραγματοποιήθηκε εκτενές πρόγραμμα πειραμάτων με στόχο την παραγωγή δοκιμίων για τον εργαστηριακό έλεγχο των παραμέτρων ελέγχου για όλες τις συνθέσεις που προέκυψαν από την κοκκομετρική βελτιστοποίηση και για τις διάφορες τιμές της παραμέτρου q . Στην τελική φάση (φάση βελτιστοποίησης) επανελήφθη η εξώθηση των πλέον υποσχόμενων συνθέσεων της κύριας φάσης ενώ έγινε προσπάθεια μείωσης του λόγου νερού/τσιμέντου και διερευνήθηκε η δυνατότητα περαιτέρω μείωσης της υδατοαπορρόφησης με εμβαπτισμό των σκληρυμένων δοκιμίων σε εναιωρήματα υπερλεπτομερούς πυριτικού πληρωτικού (Silate) με χρήση υδατικού και οργανικού διαλύτη.

3.3 Παρασκευή δοκιμών και εργαστηριακοί έλεγχοι

Οι εξωθήσιμες μάζες παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακό αναμικτήρα. Οι πρώτες ύλες (παιπάλη, τσιμέντο, microsilica, κυτταρίνη, υπερρευστοποιητής, επιβραδυντής) προζυγίστηκαν, ομογενοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν στον αναμικτήρα και στη συνέχεια προστέθηκε η κατάλληλη ποσότητα νερού για την δημιουργία της πλαστικής μάζας. Για τον έλεγχο της εξωθησιμότητας και την ποσοτικοποίηση της εργασιμότητας/πλαστικότητας επελέγη η δοκιμή κεραμικών μαζών Pfeffer-Korn και συγκεκριμένα η τιμή της ίση με δύο. Η πρότυπη αυτή τιμή εργασιμότητας καθόριζε και την ποσότητα προστιθέμενου νερού για την επίτευξή της.

Η πλαστική μάζα που προέκυψε εξωθήθηκε με τη χρήση εμβολοφόρου εξωθητή και διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 1.0 cm και μήκους 10cm (DIN51030). Τα δοκίμια παρέμειναν 24 ώρες στο περιβάλλον του εργαστηρίου για να σταθεροποιηθούν και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ωρίμανσης, σε θερμοκρασία $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες. Ο έλεγχος των σκληρυμένων δοκιμών περιελάμβανε τον προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων σύμφωνα με το DIN51030, καθώς και τη μέτρηση της πυκνότητας και της υδατοαπορρόφησης (EN 99).

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Με βάση την περιγραφείσα μεθοδολογία σταδιακού πειραματικού σχεδιασμού και αξιολόγησης (αρχική, εκτενής, τελική) παρασκευάστηκε και ελέγχθηκε εργαστηριακά ένας μεγάλος συνθέσεων. Οι συνθέσεις που κρίθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες και περιελήφθησαν στο τελικό στάδιο δίνονται στον πίνακα 1, ενώ στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων.

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 1, φαίνεται ότι για την επίτευξη της απαιτούμενης πλαστικότητας των μιγμάτων ώστε να καταστούν εξωθήσιμα απαιτούνται υψηλοί λόγοι νερό/τσιμέντο (N/T από 0.94 έως 1.85) και με μεγάλο εύρος διακύμανσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη ειδική επιφάνεια των κόκκων της παιπάλης η διαβροχή των οποίων απαιτεί σημαντική ποσότητα νερού. Αντίθετα οι λόγοι νερό/συνολικά στερεά (N/Σ) παρουσιάζουν πολύ μικρότερη μεταβολή και κυμαίνονται από 0.17 έως 0.20 με αντιπροσωπευτική τιμή το 0.18.

Η παρατηρούμενη μεταβολή του λόγου τιμή T/Σ μπορεί να αποδοθεί στις διαφορές της κοκκομετρίας και της πυκνότητας στοίβαξης των μιγμάτων (παράμετρος q) που εξετάστηκαν. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2α αύξηση της παραμέτρου q από 0.20 σε 0.30, οδηγεί σε μείωση του λόγου N/T από 0.20 σε 0.17. Ταυτόχρονα, η αύξηση του q οδήγησε σε μείωση της υδατοαπορρόφησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2β. Αντίθετα η επίδραση της παραμέτρου q στην αντοχή σε κάμψη και στην πυκνότητα, για το εύρος μεταβολής που μελετήθηκε, είναι αμελητέα (Σχήμα 2β). Η επίδραση των λόγων νερό/τσιμέντο, τσιμέντο/παιπάλη και microsilica/τσιμέντο στην αντοχή σε κάμψη, στην υδατοαπορρόφηση και στην πυκνότητα, για την περιοχή τιμών που διερευνήθηκαν, ήταν μικρή. Όσον αφορά την επίδραση δυο διαφορετικών τύπων πυριτικής παιπάλης (D και U) στις ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμών, η εξέταση της μικροδομής τους με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έδειξε ότι: η συσσωματωμένη (τύπος D) πυριτική παιπάλη λειτουργεί και ως σχετικά αδρομερές αδρανές σε αντίθεση με την αποσυσσωματωμένη (τύπος U) που λειτουργεί ως υπερλεπτομερές πληρωτικό υλικό.

Οι τιμές της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων των σκληρυμένων δοκιμών στις 28 ημέρες (Πίνακας 2) χαρακτηρίζονται ως υψηλές, ενώ η υδατοαπορρόφηση είναι μικρότερη του 10% σε όλες τις συνθέσεις. Οι επιτευχθείσες τιμές τόσο της αντοχής σε κάμψη όσο και της υδατοαπορρόφησης είναι σημαντικά βελτιωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες προηγούμενων

ερευνητικών προσπαθειών (Γαλετάκης, 2009). Με βάση τις τιμές αυτές οι συνθέσεις πληρούν τις αντίστοιχες απαιτήσεις του EN 87/1991 για πλακίδια κατηγορίας BIIb (διακοσμητικά πλακίδια εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου χωρίς εφύλαγμα).

Για τη περαιτέρω μείωση της υδατοπερατότητας έγινε εμφάνιση των σκληρυμένων δοκιμίων τριών αντιπροσωπευτικών συνθέσεων σε οργανικά διαλύματα σιλανίου. Η υδατοαπορρόφηση μειώθηκε σημαντικά (<2%) και στις τρεις συνθέσεις μετά από παραμονή μιας εβδομάδας στο διάλυμα σιλανίου. Με βάση τις νέες μειωμένες τιμές της υδατοαπορρόφησης τα δοκίμια πληρούν τις απαιτήσεις της πιο απαιτητικής κατηγορίας BI, σύμφωνα με το πρότυπο EN 87/1991.

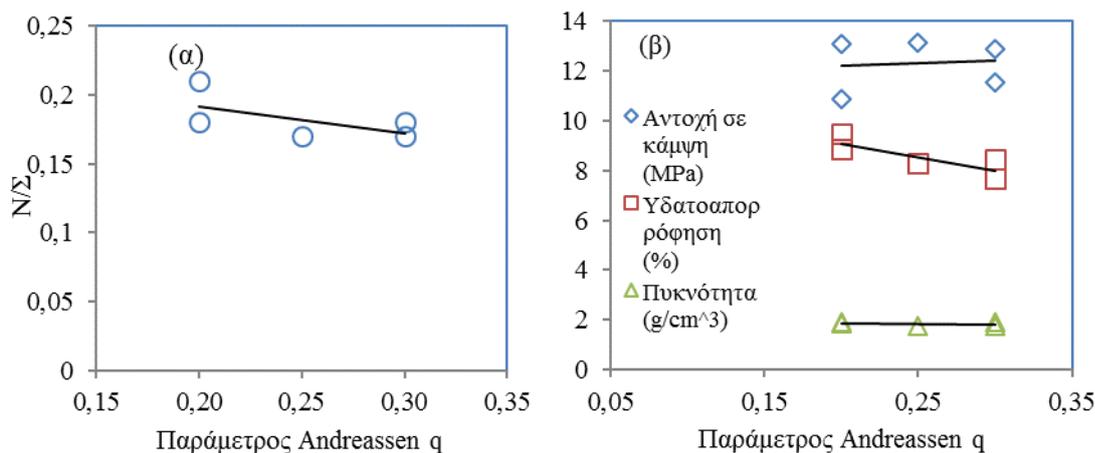
Πίνακας 1. Αναλογίες πρώτων υλών των συνθέσεων της τελικής φάσης

Κωδικός σύνθεσης	Ποσοστό (%) ανά είδος παιπάλη στο σύνολο των στερεών της σύνθεσης				Τσιμέντο		Microsilica		Νερό	
	QC9	QC10	QC11	QC24	Είδος	T/Π	Τύπος	M/T	N/T	N/Σ
X1	9.86	14.24	-	60.69	CEM I	0.14	D	0.28	1.75	0.20
X2	32.74	14.84	13.04	19.04	UF12	0.24	D	0.07	0.94	0.18
X3	32.92	-	-	44.10	CEM I	0.23	U	0.13	0.99	0.18
X4	29.67	7.33	7.33	40.30	CEM I	0.18	U	0.11	1.12	0.17
X5	5.82	-	-	31.96	UF12	0.10	U	0.31	1.85	0.17

QC9: Παιπάλη ξηραντήρα λατομικής άμμου	U: Undensified microsilica
QC10: Παιπάλη αποκονίωσης ασφαλτομίγματος	D: Densified microsilica
QC11: Παιπάλη ξηραντήρα μαρμαρόσκονης	T/Π: Λόγος Τσιμέντο/Παιπάλη
QC24: Παιπάλη αποκονίωσης μαρμαρόσκονης	M/T: Λόγος Microsilica/Τσιμέντο
CEM I: Τσιμέντο τύπου CEM I 52.5R	N/T: Λόγος Νερό/Τσιμέντο
UF12: Μικροτσιμέντο Ultrafine 12	N/Σ: Λόγος Νερό/Συνολικά Στερεά

Πίνακας 2. Αποτελέσματα εργαστηριακών ελέγχων

Σύνθεση	Τιμή παραμέτρου q	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Υδατοαπορρόφηση (%)	Πυκνότητα (g/cm ³)
X1	0.20	13.06	9.46	1.89
X2	0.30	12.89	8.47	1.91
X3	0.20	10.88	8.84	1.84
X4	0.30	11.54	7.66	1.78
X5	0.25	13.16	8.32	1.76



Σχήμα 2. (α) Μεταβολή του λόγου νερό/συνολικά στερεά (N/Σ) σε σχέση με την παράμετρο q της κατανομής Andreassen (β) Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη, της υδατοαπορρόφησης και της πυκνότητας σε σχέση με την παράμετρο q .

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η εργαστηριακή διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων για την παραγωγή ειδικών, οικολογικών δομικών στοιχείων, με την τεχνολογία της εξώθησης, έδειξε ότι:

- Η παραγωγή εξωθήσιμων μιγμάτων με χρήση κυτταρίνης και ειδικών πρόσθετων βελτιώνει σημαντικά τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων δοκιμίων.
- Ο σχεδιασμός της σύνθεσης με τη χρήση του μοντέλου Andreassen κρίνεται ως ιδιαίτερα αποτελεσματικός, αφού η πυκνότητα στοίβαξης των κόκκων φάνηκε να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην επίτευξη της απαιτούμενης πλαστικότητας του μίγματος όσο στις φυσικές-μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμίων.
- Τα παρασκευασθέντα δοκίμια πληρούν τις απαιτήσεις μη εφυσωμένων (non glazed) πλακιδίων εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου, κατηγορίας BIIb, σύμφωνα με το πρότυπο EN 87/1991. Στην περίπτωση περαιτέρω κατεργασίας των παρασκευαζομένων δοκιμίων με εμβάπτισή τους σε διάλυμα σιλανίου για μείωση της υδατοαπορρόφησης τους, τα δοκίμια κατατάσσονται στην κατηγορία Group BI σύμφωνα με το ανωτέρω πρότυπο.

Προκειμένου να γίνει μια πληρέστερη διερεύνηση των προτεινόμενων συνθέσεων αλλά και της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε για τον σχεδιασμό και την παραγωγή τους, θα πρέπει να παρασκευαστούν πρωτότυπα σε εμπορικές διαστάσεις και να υποβληθούν σε επιπλέον εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα (EN 87/1991). Οι απαιτούμενες δοκιμές θα πρέπει να περιλαμβάνουν τη μέτρηση της αντοχής σε επιφανειακή απότριψη, τη δοκιμή γραμμικής θερμικής διαστολής, τη δοκιμή θερμικού πλήγματος και παγοπληξίας καθώς και τη δοκιμή αντοχής σε προσβολή από χημικούς παράγοντες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bender, W. and H.H. Böger (2007) A Short History of the Extruder in Ceramics in Extrusion in Ceramics, Händle F. (Ed.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.468.

Galetakis M., Leventakis K. (2009) Utilization of fine quarry by-products for the production of building elements, by extrusion - an experimental approach, Proc. of 3rd AMIREG International

Conference: Assessing the Footprint of Resource Utilization and Hazardous Waste Management, Athens, Greece, 258-264.

Ruppel I. (1991) Extrusion in Engineered materials Handbook Vol. 4: Ceramics and Glasses, ASM International, Ed. By H. F. Lapman and N. P. Wheaton

Benbow J. and Bridgewater J. (1993) Types of extruders, Paste flow and extrusion, Oxford Series on Advanced Manufacturing, 10, 5-24.

Kwan and Fung (2009) Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar. Department of Civil Engineering, University Hong Kong, China, 349-356.

Οικονόμου Χ. Μ. (1993) Τεχνολογία του Σκυροδέματος, 2η Έκδοση, Εκδόσεις ART of TEXT, Θεσσαλονίκη, σελ. 218.

www.freepatentsonline.org

Παρασκευή Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων Υψηλής Επιτελεστικότητας με χρήση σκωρίας κάδου ως λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης

Κ.Κ. Σίδερης, Χ. Τάσος, Α. Χατζόπουλος

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Λέξεις κλειδιά: αυτοσυμπυκνόμενο σκυρόδεμα, σκωρία κάδου, ανθεκτικότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σκωρία κάδου είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα. Σε αυτή την εργασία η σκωρία κάδου χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης για την παραγωγή μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος διαφορετικών κατηγοριών αντοχής. Ενσωματώθηκε διαφορετική ποσότητα της σκωρίας κάδου, που κυμαίνεται από 45 έως 92,5 kg/m³. Στα παραγόμενα σκυροδέματα ελέγχθηκαν, σε νωπή κατάσταση, η ικανότητα πλήρωσης, η ικανότητα διέλευσης μεταξύ των οπλισμών και η αντίσταση στον διαχωρισμό των αδρανών και, στην σκληρυμένη κατάσταση, η αντοχή σε θλίψη, η ενανθράκωση και η αντίσταση στη διείδυση χλωριόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σκωρία κάδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης για την παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με ενισχυμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας καταλήγοντας, με αυτό τον τρόπο, σε μειωμένου κόστους, φιλικά προς το περιβάλλον, ανθεκτικά μείγματα σκυροδέματος.

Production of durable self-compacting concrete using ladle furnace slag (LFS) as filler material.

K.K. Sideris, Ch. Tassos, A. Chatzopoulos

Laboratory of Building Materials, Democritus University of Thrace

Keywords: selfcompacting concrete, ladle furnace slag, durability

ABSTRACT: Ladle furnace slag (LFS) is a by-product of the steel making process. In this paper ladle furnace slag was used as filler material for the production of self-compacting concrete mixtures of different strength classes. Different contents of ladle furnace slag filler, ranging from 45 to 90 kg/m³ were incorporated. The produced concretes were tested in the fresh state for fluidity, passing ability and resistance to segregation and in the hardened state for compressive strength, carbonation and chloride penetration resistance. The test results showed that ladle furnace slag can be used as filler for producing self-compacting concretes with enhanced durability characteristics resulting this way to lower cost environmentally friendly durable concrete mixtures.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ), είναι ένας ειδικός τύπος σκυροδέματος που έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την ποιότητα των δομικών στοιχείων καθώς και την ποιότητα των διαδικασιών κατασκευής. Οι βασικές ιδιότητες του ΑΣΣ είναι η δυνατότητα πλήρωσης, η αντοχή έναντι διαχωρισμούτων αδρανών υλικών και η ικανότητα διέλευσης μεταξύ των οπλισμών. Η ρεολογία του τσιμεντοπολλτού είναι ο κρίσιμος παράγοντας για να πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις. Η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη δοσολογία των λεπτών υλικών. Όλα τα υλικά που διέρχεται από το κόσκινο με διάμετρο 0,125 χιλιοστά θεωρούνται λεπτά υλικά. Σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (EFNARC, 2005), η ποσότητα των λεπτών υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος θα πρέπει να είναι της τάξης των 380-600 Kg.

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό πλήρωσης είναι η σκόνη ασβεστόλιθου. Στην Ελλάδα, η έρευνα έχει δείξει ότι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα έχουν την προοπτική να χρησιμοποιηθούν σε μείγματα ΑΣΣ ως αντικατάσταση του τσιμέντου ή του ασβεστολιθικού φίλλερ ή και των δύο (Georgiadis et al, 2007 - Sideris, 2009 - Anagnostopoulos et. al, 2009). Η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού φίλλερ στην Ελλάδα είναι μάλλον ζωτικής σημασίας, δεδομένου ότι η παραγωγή αυτού του υλικού είναι περιορισμένη μόνο σε δύο λατομεία σε εθνικό επίπεδο και το υψηλό κόστος το καθιστά μη ελκυστικό για τους μηχανικούς και τους εργολάβους.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στη χρήση της σκωρίας κάδου (ΣΚ), ένα παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα, ως μέσο για την αύξηση της συνολικής περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα στο ΑΣΣ. Η ΣΚ είναι ένα λεπτόκοκκο υλικό που δείχνει πουζολανικές και ασθενείς υδραυλικές ιδιότητες (Setjin et al, 2009).

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Επτά διαφορετικά μείγματα αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος παρήχθησαν. Τα μείγματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C25/30, C30/37 και C35/45, σύμφωνα με το Πρότυπο EN206-1 (Comite Européenne de Normalisation 2000). Όλα τα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το ίδιο τσιμέντο, τύπου CEM II A-M / 42.5N σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1. Τα ΑΣΣ παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε νωπή κατάσταση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EFNARC (2005). Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από θρυμματισμένο γρανίτη με μέγιστο μέγεθος 16mm. Τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστή ασβεστολιθική άμμος. Το ασβεστολιθικό φίλλερ χρησιμοποιήθηκε ως επιπρόσθετο λεπτόκοκκο υλικό για την παραγωγή μειγμάτων ΑΣΣ αναφοράς των κατηγοριών αντοχής C25/30 και C30/37 (ΑΣΣ 25/30-ΑΦ και ΑΣΣ 30/37-ΑΦ αντίστοιχα). Η σκωρία κάδου χρησιμοποιήθηκε ως ένα εναλλακτικό υλικό αντικατάστασης των αδρανών υλικών σε τέσσερα ΑΣΣ μείγματα σε ποσοστά 15% και 25% κατά βάρος του τσιμέντου. Υψηλού εύρους, μείωσης νερού, καρβοξυλικού αιθέρα, πολυμερές πρόσμικτο προστέθηκε σε διαφορετικές δοσολογίες, προκειμένου να επιτευχθεί αυτοσυμπύκνωση στην περίπτωση των ΑΣΣ. Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για όλα τα σκυροδέματα στον Πίνακα 1. Τα αυτοσυμπυκνόμενα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν σύμφωνα με τον EFNARC (2005).

Πίνακας 1: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών

Μελέτη Σύνθεσης	ΑΣΣ 25- 30 ΑΦ	ΑΣΣ 25- 30 ΣΚ 15%	ΑΣΣ 25- 30 ΣΚ 25%	ΑΣΣ 30- 37 ΑΦ	ΑΣΣ 30- 37 ΣΚ 15%	ΑΣΣ 30- 37 ΣΚ 25%	ΑΣΣ 35/45
kg/m ³	ΑΣΣ 1	ΑΣΣ 2	ΑΣΣ 3	ΑΣΣ 4	ΑΣΣ 5	ΑΣΣ 6	ΑΣΣ 7
Τσιμέντο Π 42,5	300	300	300	370	370	370	430
Γαρμπίλι	800	800	800	800	800	800	800
Ασβεστολιθική άμμος	910,5	975,5	949,2	901,4	891,5	851,6	933,0
Ασβεστολιθικό Φίλλερ	120	0	0	50	0	0	0
Σκωρία Κάδου	0	45	75	0	55,5	92,5	0
Νερό	180	180	180	170,2	170,2	170,2	180,6
Υπερ/της	6,70	4,04	4,71	6,39	7,02	9,36	9,46
Επιβραδυντής	0,45	0,45	0,45	0,56	0,56	0,56	0,65
N/T	0,60	0,60	0,60	0,46	0,46	0,46	0,42
Εξάπλωση (mm)	780	695	735	710	715	740	715
V-Funnel (sec)	6,4	7,5	7,1	7,9	10,4	9,1	8,4
L-Box (H ₁ /H ₂)	1,00	0,90	0,94	0,84	0,89	0,89	0,85

Πίνακας 2: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με μείωση του τσιμέντου

Μελέτη Σύνθεσης	ΑΣΣ 25-30 ΣΚ1 15%	ΑΣΣ 25- 30 ΣΚ1 25%	ΑΣΣ 30- 37 ΣΚ1 15%	ΑΣΣ 30- 37 ΣΚ2 25%	ΑΣΣ 30- 37 ΣΚ2 15%	ΑΣΣ 30- 37 ΣΚ2 25%
kg/m ³	ΑΣΣ 8	ΑΣΣ 9	ΑΣΣ 10	ΑΣΣ 11	ΑΣΣ 12	ΑΣΣ 13
Τσιμέντο Π 42,5	270	270	333	333	320	320
Γαρμπίλι	800	800	800	800	800	800
Ασβεστολιθική άμμος	1053,4	1030,4	938,8	902,9	969,1	934,6
Σκωρία Κάδου	40,5	67,5	49,95	83,25	48	80
Νερό	162	162	166,5	166,5	160	160
Υπερ/της	3,55	4,20	6,25	6,71	6,93	7,22
Επιβραδυντής	0,41	0,41	0,50	0,50	0,48	0,48
N/Τα	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50
Εξάπλωση (mm)	700	735	720	715	735	735
V-Funnel (sec)	10,8	7,7	11,5	10	11,5	14,8
L-Box (H ₁ /H ₂)	0,89	0,89	0,87	0,94	0,84	0,94

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν κύβοι ακμής 150 και 100 χιλιοστών, κύλινδροι 60x100mm και 100x200mm καθώς και πρίσματα διαστάσεων 40X40X160 mm. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντήρησης (T=20°C, RH>98%). Οι κύβοι των 150 χιλιοστών χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής σε διαφορετικές ηλικίες. Η αντίσταση σε ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm. Αυτοί οι μικροί κύλινδροι αρχικά συντηρήθηκαν επί 3 ημέρες στον προαναφερόμενο θάλαμο συντήρησης. Από αυτή την ηλικία και μετά τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (σχετική υγρασία=50-60% και θερμοκρασία=20±2°C). Στην ηλικία των 28 ημερών

μεταφέρθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης ($T=20^{\circ}\text{C}$, σχετική υγρασία=55% , $\text{CO}_2=1\%$). Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτόν τον θάλαμο για 60 ημέρες. Μια δεύτερη σειρά των δοκιμίων εκτέθηκε μετά την ηλικία των 3 ημερών σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος όπου παρέμειναν εκτεθειμένα για 18 μήνες.

Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων των σκυροδεμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm που σχηματίζονται από τους κυλίνδρους 100x200mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν όπως παραπάνω μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ακολούθως εκτιμήθηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_c σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο NT Build 492 (Σχήμα 1).

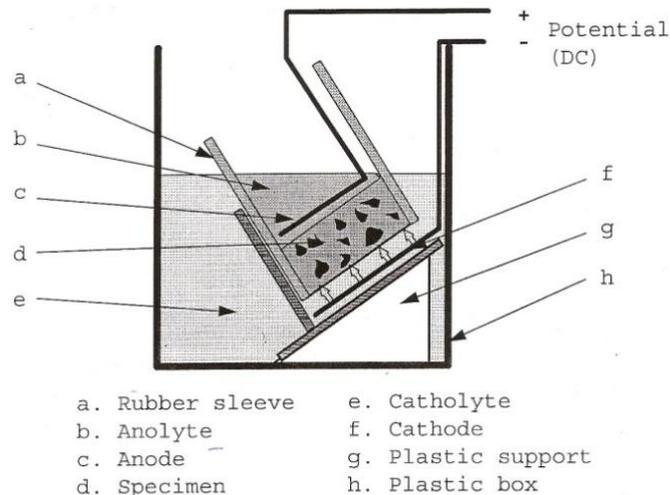


Fig. 1. One arrangement of the migration set-up.

Σχήμα 1: Συσκευή δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_c . (NT Build 492, 1999).

Η αντίσταση σε περιβάλλοντα θεικών αλάτων εκτιμήθηκε μετρώντας τη μεταβολή μήκους των πρισματικών δοκιμίων. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στον προαναφερόμενο θάλαμο συντήρησης. Στη συνέχεια τρία δοκίμια από κάθε μείγμα εμβαπτύστηκαν σε διάλυμα περιεκτικότητας 5% Na_2SO_4 ενώ άλλα τρία δοκίμια εμβαπτύστηκαν σε θαλασσινό νερό. Μετρήσεις μεταβολής μήκους λαμβάνονταν ανά τρεις ημέρες μέχρι συμπλήρωση 90 ημερών παραμονής στο διάλυμα.

Η αντίσταση έναντι ψύξης-απόψυξης εκτιμήθηκε σε δοκίμια 100X100X50 mm που αποκόπηκαν από τους κύβους ακμής 100 mm. Ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 12390-9 CF. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε 24ωρους κύκλους ψύξης-απόψυξης σε διάλυμα 3% NaCl. Μετά τη διενέργεια 15 κύκλων μετρήθηκε η απώλεια βάρους των δοκιμίων.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28 και 90 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και 4.

Πίνακας 3: Αντοχή σε θλίψη των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών (MPa)

(MPa)	ΑΣΣ 1	ΑΣΣ 2	ΑΣΣ 3	ΑΣΣ 4	ΑΣΣ 5	ΑΣΣ 6	ΑΣΣ 7
fc ₂	26,8	23,6	25,7	33,0	33,3	34,9	39,3
fc ₇	32,7	29,0	37,7	44,3	44,3	46,1	45,1
fc ₂₈	44,6	44,8	46,9	54,1	55,8	57,5	60,0
fc ₉₀	46,0	46,2	49,4	55,6	57,8	61,8	63,1

Πίνακας 4: Αντοχή σε θλίψη των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παράχθηκαν με μείωση τσιμεντού (MPa)

(MPa)	ΑΣΣ 8	ΑΣΣ 9	ΑΣΣ 10	ΑΣΣ 11	ΑΣΣ 12	ΑΣΣ 13
fc ₂	24,0	24,7	33,2	34,1	37,1	34,6
fc ₇	30,1	33,1	42,9	46,1	47,0	46,4
fc ₂₈	41,6	41,7	52,4	54,0	49,3	51,2
fc ₉₀	43,3	43,8	53,8	56,9	52,9	53,3

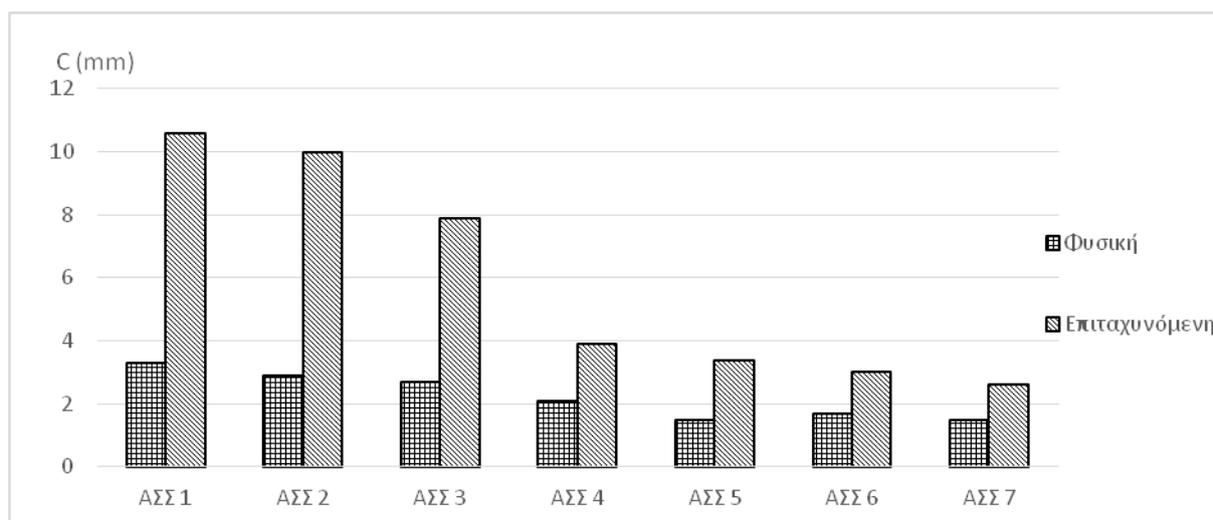
Η αντοχή σε θλίψη όλων των μειγμάτων ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν με προσθήκη ΣΚ ήταν αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη του μείγματος ΑΣΣ αναφοράς της ίδιας κατηγορίας. Τα ΑΣΣ κατηγορίας C25/30 που παρήχθησαν με 25% ΣΚ εμφάνισαν μια αύξηση της αντοχής σε θλίψη στις 28 ημέρες κατά 2,3 MPa (5,1% της αντοχής που μετρήθηκε στο ΑΣΣ αναφοράς που έχει παραχθεί με ασβεστόλιθο φίλλερ). Η διαφορά αντοχής αυξήθηκε ελαφρώς, έως 3,4 MPa (7,4%), στην ηλικία των 90 ημερών. Οι Setien et al ανέφεραν επίσης ότι η σκωρία κάδου περιέχει τσιμεντοειδείς υδραυλικές ιδιότητες (Setjin et al, 2009). Οι Anastasiou et al κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ΣΚ έχει θετική επίδραση στην ανάπτυξη της αντοχής όσον αφορά την αντοχή σε θλίψη στις 28 και 120 ημέρες (Anastasiou et al 2014). Οι ερευνητές παρήγαγαν αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα με προσθήκη σκωρίας κάδου μεταξύ 60 και 120 Kg/m³. Στην παρούσα έρευνα η σκωρία κάδου προστέθηκε σε μικρότερες δοσολογίες στα ΑΣΣ μείγματα C25/30, και ως εκ τούτου η αύξηση της αντοχής ήταν μικρότερη. Η ποσοστιαία αύξηση της αντοχής ήταν υψηλότερη (6,3% και 11,15% στις ηλικίες των 28 και 90 ημερών αντίστοιχα) στο μείγμα ΑΣΣ6 όπου η δοσολογία της σκωρίας κάδου αυξήθηκε στα 92,5 Kg/m³. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση η θλιπτική αντοχή άρχισε να αυξάνεται ήδη από την ηλικία των 2 ημερών, ενώ η τιμή που μετρήθηκε στην ηλικία των 28 ημερών ήταν πολύ κοντά με εκείνη του μείγματος ΑΣΣ 35/45, επιτρέποντας, με αυτό τον τρόπο, σε αυτό το μείγμα να ταξινομηθεί ως σκυροδέμα C35/45.

3.2 Βάθος Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε με ψεκασμό των φρεσκοθραυσμένων επιφανειών των δοκιμίων, με δείκτη φαινολοφθαλείνης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630 (EN14630, 2006). Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 5 και 6 και παρίσταται γραφικώς στα Σχήματα 2 και 3.

Πίνακας 5: Βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών

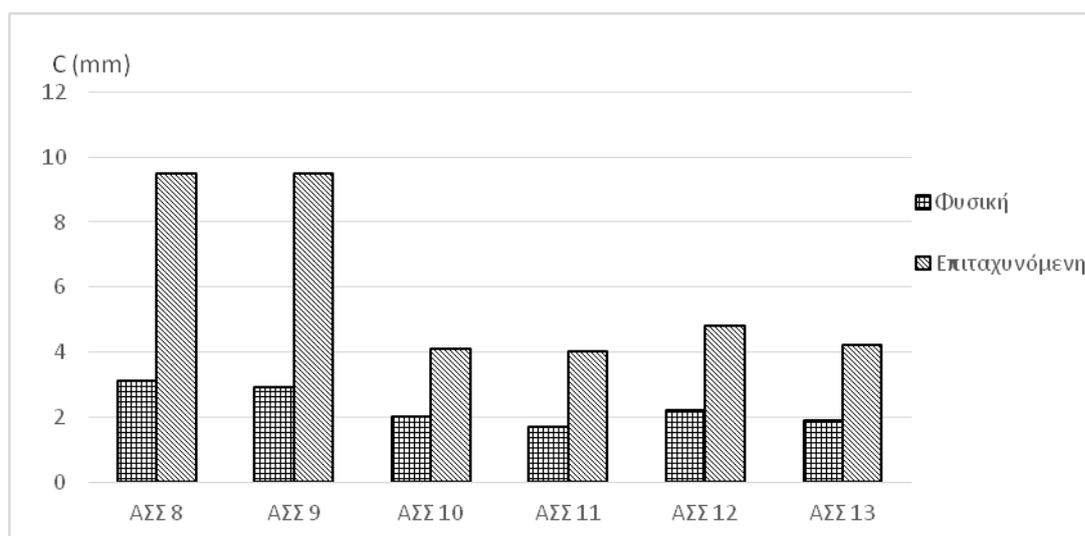
Ενανθράκωση(mm)	ΑΣΣ 1	ΑΣΣ 2	ΑΣΣ 3	ΑΣΣ 4	ΑΣΣ 5	ΑΣΣ 6	ΑΣΣ 7
Φυσική	3,3	2,9	2,7	2,1	1,5	1,7	1,5
Επιταχυνόμενη	10,6	10	7,9	3,9	3,4	3	2,6



Σχήμα 2: Βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπκνούμενων σκυροδεμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών.

Πίνακας 6: Βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπκνούμενων σκυροδεμάτων που παράχθηκαν με μείωση τσιμέντου.

Ενανθράκωση (mm)	ΑΣΣ 8	ΑΣΣ 9	ΑΣΣ 10	ΑΣΣ 11	ΑΣΣ 12	ΑΣΣ 13
Φυσική	3,1	2,9	2	1,7	2,2	1,9
Επιταχυνόμενη	9,5	9,5	4,1	4	4,8	4,2



Σχήμα 3: Βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπκνούμενων σκυροδεμάτων που παράχθηκαν με μείωση τσιμέντου.

Η προσθήκη σκωρίας κάδου αύξησε την αντίσταση σε ενανθράκωση όλων των ΑΣΣ μειγμάτων που παρασκευάστηκαν, δεδομένου ότι τα βάθη ενανθράκωσης των δοκιμίων που εκτέθηκαν μειώθηκαν τόσο στη φυσική όσο και στην επιταχυνόμενη μέθοδο [σχ. 2]. Υπενθυμίζεται (RILEM TC205, 2007), ότι η αντίσταση έναντι ενανθράκωσης στα αυτοσυμπκνούμενα σκυροδέματα εξαρτάται αυστηρά από τον τύπο και τη δοσολογία του υλικού που χρησιμοποιείται ως υλικό πλήρωσης. Οι Parayianni and Anastasiou ανέφεραν ότι τα μείγματα που παράγονται με σκωρία κάδου ως συνδετικό υλικό και σκωρία ηλεκτροκαμίνου ως αδρανή υλικά είναι μη υδατοπερατά, με βελτιωμένη μικροδομή και χαμηλό πορώδες (Parayianni & Anastasiou, 2010). Αυτά τα συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν σε αυτή την έρευνα, καθώς η προσθήκη της ΣΚ μείωσε το βάθος ενανθράκωσης των ΑΣΣ

κατά 18% (C25/30 σκυροδέματα) και 28% (C30/37 σκυροδέματα) σε σύγκριση με τα ΑΣ μείγματα αναφοράς που παρήχθησαν με ασβεστολιθικό φίλλερ. Είναι, επίσης, σημαντικό να σημειωθεί ότι, όταν η ΣΚ χρησιμοποιήθηκε σε υψηλή δοσολογία -25% του βάρους του τσιμέντου- το βάθος ενανθράκωσης των φυσικώς εκτιθέμενων δοκιμίων, μετά από 18 μήνες, μειώθηκε τόσο χαμηλά όσο και η τιμή που μετρήθηκε για τα ΑΣΣ μεγαλύτερης αντοχής. Η έρευνα είναι ακόμη σε εξέλιξη, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της ΣΚ για το συντελεστή ενανθράκωσης του ΑΣΣ και, τέλος, για τη διάρκεια ζωής των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος που παράγονται με σκυροδέματα που περιέχουν ΣΚ.

3.3 Συντελεστής διεύθυνσης χλωριόντων

Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_c που μετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στους Πίνακες 7 και 8.

Πίνακας 7: Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_c ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών

	ΑΣΣ 1	ΑΣΣ 2	ΑΣΣ 3	ΑΣΣ 4	ΑΣΣ 5	ΑΣΣ 6	ΑΣΣ 7
D_c ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	19,5	15,5	15,1	8,7	7	5,9	6

Πίνακας 8: Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_c ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με μείωση τσιμέντου

	ΑΣΣ 8	ΑΣΣ 9	ΑΣΣ 10	ΑΣΣ 11	ΑΣΣ 12	ΑΣΣ 13
D_c ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	20,1	19,7	9,3	9,5	11,8	10,8

Η αντίσταση στη διάβρωση που προκαλείται από χλωριόντα, επίσης, βελτιώθηκε όταν τα ΑΣΣ μείγματα παρήχθησαν με ΣΚ αντί του ασβεστολιθικού φίλλερ. Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_c στα παραγόμενα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα περιορίστηκε για όσα περιείχαν ΣΚ (Πίνακας 4). Είναι και πάλι αξιοσημείωτο ότι το μείγμα ΑΣΣ 30/37 ΣΚ25% παρουσιάζει D_c τιμή, ίση με αυτήν που μετρήθηκε στα δοκίμια του ΑΣΣ 35/45. Οι Parayianni and Anastasiou, ομοίως ανέφεραν, ότι η διάβρωση που προκαλείται από τα χλωριόντα βελτιώθηκε στα σκυροδέματα που παρήχθησαν με ΣΚ (Parayianni & Anastasiou, 2010).

3.4 Ψύξη-Απόψυξη

Η απώλεια βάρους των δοκιμίων μετά από 15 ημερήσιους κύκλους ψύξης-απόψυξης για όλα τα μείγματα παρουσιάζονται στους πίνακες 9 και 10.

Πίνακας 9: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών

	ΑΣΣ 1	ΑΣΣ 2	ΑΣΣ 3	ΑΣΣ 4	ΑΣΣ 5	ΑΣΣ 6	ΑΣΣ 7
% Απώλεια βάρους	51,9	39,4	38,1	3,8	3,2	2,3	2,5

Πίνακας 10: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με μείωση τσιμέντου

	ΑΣΣ 8	ΑΣΣ 9	ΑΣΣ 10	ΑΣΣ 11	ΑΣΣ 12	ΑΣΣ 13
% Απώλεια βάρους	56,5	55,3	10,1	9,5	4,1	4,1

Η προσθήκη της σκωρίας κάδου ως αντικατάσταση των αδρανών βελτίωσε τη συμπεριφορά των μειγμάτων έναντι κύκλων ψύξης- απόψυξης. Η απώλεια μάζας βελτιώθηκε σε ποσοστό 26,5% για τα μείγματα κατηγορίας αντοχής C25/30 και έως 28% για τα μείγματα κατηγορίας αντοχής C30/37. Είναι μάλιστα και πάλι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το μείγμα ΑΣΣ6 παρουσίασε απώλεια μάζας ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή που μετρήθηκε στα δοκίμια του μείγματος ΑΣΣ 35/45. Η βελτίωση αυτή αποδίδεται στη μείωση του υδατοπερατού πορώδους των μειγμάτων που παρήχθησαν με χρήση ΣΚ.

Αντίθετα στην περίπτωση που η ΣΚ χρησιμοποιείται ως αντικατάσταση του τσιμέντου η συμπεριφορά των μειγμάτων έναντι ψύξης απόψυξης γίνεται δυσμενέστερη. Τόσο στη χαμηλή –C25/30- όσο και στην υψηλή –C30/37- κατηγορία αντοχής η απώλεια μάζας αυξάνεται σε ποσοστό έως 8% όταν η σκωρία κάδου αντικαθιστά το τσιμέντο σε ποσοστό 10% ενώ αυξάνεται σε ποσοστό 165% στα μείγματα ΑΣΣ10 και ΑΣΣ 11 όπου η σκωρία κάδου αντικαθιστά το τσιμέντο σε ποσοστό 15%.

3.5 Μεταβολή μήκους

Η μεταβολή μήκους όλων των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων μετά από 90 ημέρες παρουσιάζονται στους πίνακες 11 και 12.

Πίνακας 11: Τελική διαστολή των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με αντικατάσταση αδρανών

($\mu\text{m}/\text{m}$)	ΑΣΣ 1	ΑΣΣ 2	ΑΣΣ 3	ΑΣΣ 4	ΑΣΣ 5	ΑΣΣ 6	ΑΣΣ 7
Θάλασσα	112,5	259,4	365,6	118,7	95,8	91,7	102,1
Θεικά	204,2	197,9	496,9	133,3	108,3	96,9	77,1

Πίνακας 12: Τελική διαστολή των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν με μείωση τσιμέντου

($\mu\text{m}/\text{m}$)	ΑΣΣ 8	ΑΣΣ 9	ΑΣΣ 10	ΑΣΣ 11	ΑΣΣ 12	ΑΣΣ 13
Θάλασσα	212,5	306,2	115,6	78,1	100,0	96,9
Θεικά	262,5	525,0	133,3	91,7	118,8	52,1

Η επίδραση της σκωρίας στη συμπεριφορά των μειγμάτων έναντι θαλασσινού νερού και διαλύματος θεικών αλάτων ήταν διαφορετική για τα μείγματα χαμηλής και υψηλής κατηγορίας αντοχής. Συγκεκριμένα η διαστολή των ΑΣΣ κατηγορίας αντοχής C30/37 βελτιώθηκε σε κάθε περίπτωση ενώ αντίθετα αυτή των μειγμάτων C25/30 επιδεινώθηκε όταν η ΣΚ χρησιμοποιήθηκε ως αντικατάσταση είτε του τσιμέντου είτε των αδρανών.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σκωρία κάδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης για την παραγωγή αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος. Η προσθήκη της βελτίωσε τα νωπά χαρακτηριστικά στα μείγματα ΑΣΣ με συνέπεια τη μείωση του ποσού υπερρευστοποιητή στα μείγματα ΑΣΣ κατηγορίας αντοχής C25/30.

Η αντοχή σε θλίψη των ΑΣΣ C25/30 μειγμάτων ήταν ελαφρώς αυξημένη στις μεγαλύτερες ηλικίες όταν χρησιμοποιήθηκε σκωρία κάδου. Η επίδραση στην αύξηση της αντοχής ήταν πιο σημαντική στα ΑΣΣ C30/37 μείγματα στα οποία προστέθηκαν υψηλότερες δόσεις της σκωρίας κάδου. Σε αυτή την περίπτωση, στα μείγματα προέκυψε υψηλότερη αντοχή σε θλίψη, απ' ότι στο ΑΣΣ αναφοράς, ακόμα και από την ηλικία των 2 ημερών, ενώ η αντοχή

των 28 ημερών του ΑΣΣ μείγματος που παράγεται με 25% σκωρία κάδου καθιστά δυνατή την κατάταξή του σε ανώτερη κατηγορία αντοχής.

Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας των ΑΣΣ με ΣΚ βελτιώθηκαν ιδιαίτερα σε μείγματα που παράγονται με υψηλότερο ποσό ΣΚ και χαμηλό λόγο Ν/Τ. Τόσο η αντίσταση στην ενανθράκωση όσο και η αντίσταση σε χλωριόντα αυξήθηκαν. Η αύξηση αυτή ήταν πιο ουσιαστική στο ΑΣΣ C30/37 μείγμα που παράγεται με 25% ΣΚ, όπου και οι δύο δείκτες ανθεκτικότητας βρέθηκαν να είναι ίσοι με τις τιμές που μετρήθηκαν στο ΑΣΣ 35/45 μείγμα.

Περαιτέρω έρευνα είναι σε εξέλιξη, προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της ΣΚ στην ανθεκτικότητα του ΑΣΣ καθώς και η μακροπρόθεσμη απόδοση και σταθερότητα των παραγόμενων μειγμάτων. Τα αποτελέσματα θα καταδείξουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ΣΚ για την παραγωγή υψηλής απόδοσης, ανθεκτικού και φιλικού προς το περιβάλλον αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί μέρος του ερευνητικού προγράμματος 11_ΣΥΝ_5_344, που υλοποιείται στο πλαίσιο του έργου «Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα» (ΕΠΙΛΑΝ II) και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης και Εθνικούς Πόρους.

Το τσιμέντο και τα χημικά πρόσμεικτα που χρησιμοποιήθηκαν αποτέλεσαν χορηγία της Τσιμεντοβιομηχανίας TITAN και της εταιρίας Sika Hellas AE. Στις εταιρίες αυτές εκφράζονται ευχαριστίες για τη στήριξή τους στο ερευνητικό έργο του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του ΔΠΘ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostopoulos N, Sideris K.K, Georgiadis A. (2009). Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures. *Materials and Structures*, Vol. 42, No.10, pp 1393-1405.
- Anastasiou E.K, Papayianni I, Papachristoforou M., (2014). Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement, *Materials & Design*, Vol. 59, pp 454-460.
- Comite Européenne de Normalisation (2000). *Concrete - Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity*, EN 206-1.
- EFNARC (2005) European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. *downloadable from www.efnarc.org*
- EN 14630 Comité Européenne de Normalisation (2006). Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.
- Georgiadis A.S, Anagnostopoulos N.S and Sideris K.K (2007). Mechanical Characteristics of Self-Compacting Concretes produced with different filler materials. *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete*, (G. De Schutter and V. Boel Eds), 3-5 September 2007, Ghent, Belgium, pp. 611-618.
- NT Built 492 (1999). Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady Migration Experiments, NTBuild.
- Papayianni I., Anastasiou E. (2010). Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products”, *Construction & Building Materials*, Vol. 24, No. 8, pp 1412-1417.
- RILEM TC205 (2007). Durability of self-compacting concrete, State of the Art Report,

RILEM Publications S.A.R.L., Report 38, ISBN978-2-35158-048-6.

Setjin J, Hernandez D, Gonzalez JJ. (2009) Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Constr Build Mater*; Vol. 23, No5, pp 1788–94.

Sideris K.K. (2009). Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα στην ελληνική πραγματικότητα: Παρούσα κατάσταση και προοπτικές εξέλιξης. *Πρακτικά 16ου ελληνική Συνέδριο Σκυροδέματος*, 21-23 Οκτωβρίου 2009, Πάφος, Κύπρος.

Παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων με επαναχρησιμοποίηση λούμης προς αντικατάσταση ασβεστολιθικού filler

Κ.Κ. Σίδερης¹, Ι. Πασαλίδης¹, Χ. Λεπτοκαρίδης², Ε. Χανιωτάκης²

¹Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

²Εταιρία Παραγωγής Τσιμέντου TITAN Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, λούμη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η λούμη είναι το παραπροϊόν που συσσωρεύεται στον πυθμένα των δεξαμενών καθίζησης του νερού έκπλυσης των οχημάτων μεταφοράς νωπού σκυροδέματος, όταν το νερό συλλέγεται για ανακύκλωση. Στην παρούσα εργασία η λούμη χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό λεπτόκοκκο υλικό για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα διαφορετικών κατηγοριών και ελήφθησαν μετρήσεις θλιπτικής αντοχής και ανθεκτικότητας- μετρήσεις ενανθράκωσης, υδατοπερατού πορώδους, ανθεκτικότητας έναντι θεικών αλάτων και συστολής ξήρανσης- σε διάφορες ηλικίες. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η λούμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ποιοτικού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Τα μείγματα στα οποία προστίθεται εμφανίζουν ελαφρώς βελτιωμένη θλιπτική αντοχή στην ηλικία των 28 ημερών ενώ δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μεταβολή στις ιδιότητες ανθεκτικότητας, με εξαίρεση την αντίσταση των μειγμάτων έναντι θεικών αλάτων η οποία μειώθηκε.

Production of self compacted concrete replacing limestone filler with suspended concrete sludge

Κ.Κ. Sideris¹, Ι. Pasalidis¹, C. Leptokaridis², E. Haniotakis²

¹Laboratory of Building Materials, Democritus University of Thrace

²TITAN S.A. Cement industry

Keywords: by-product utilization, self compacted concrete, concrete sludge

ABSTRACT: Concrete sludge is a by-product formatted on the bottom of the settling tank, whenever there is one for recycling of water that comes from washing concrete mixing trucks. In this thesis concrete sludge is used as an alternative fine aggregate for the production of self compacted concrete. Different mixtures of self compacted concrete were produced and measured in compressive strength and durability - carbonation depth, percentage porosity, sulphate resistance and shrinkage - on multiple ages. According to our results concrete sludge may be used in the production of quality self compacted concrete. The mixtures in which it was added have a slight better performance in compressive strength while in durability noticeable variations were not observed, with the exception of sulfate resistance where it performed worse than our reference mixture.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ), είναι ένας ειδικός τύπος σκυροδέματος που έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την ποιότητα των δομικών στοιχείων καθώς και την ποιότητα των διαδικασιών κατασκευής. Οι βασικές ιδιότητες του ΑΣΣ είναι η δυνατότητα πλήρωσης, η αντοχή έναντι διαχωρισμούτων αδρανών υλικών και η ικανότητα διέλευσης μεταξύ των οπλισμών. Η ρεολογία του τσιμεντοπολτού είναι ο κρίσιμος παράγοντας για να πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις. Η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη δοσολογία των λεπτών υλικών. Όλα τα υλικά που διέρχονται από το κόσκινο με διάμετρο 0.125 χιλιοστά θεωρούνται λεπτά υλικά. Σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (EFNARC, 2005), η ποσότητα των λεπτών υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος θα πρέπει να είναι της τάξης των 380-600 Kg.

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό πλήρωσης είναι η σκόνη ασβεστόλιθου. Στην Ελλάδα, η έρευνα έχει δείξει ότι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα έχουν την προοπτική να χρησιμοποιηθούν σε μείγματα ΑΣΣ ως αντικατάσταση του τσιμέντου ή του ασβεστολιθικού filler ή και των δύο (Georgiadis et al, 2007 - Sideris, 2009 - Anagnostopoulos et. al, 2009). Η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού filler στην Ελλάδα είναι μάλλον ζωτικής σημασίας, δεδομένου ότι η παραγωγή αυτού του υλικού είναι περιορισμένη μόνο σε δύο λατομεία σε εθνικό επίπεδο και το υψηλό κόστος το καθιστά μη ελκυστικό για τους μηχανικούς και τους εργολάβους.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση ξηρής λούμης προς αντικατάσταση του ασβεστολιθικού filler. Η λούμη αποτελεί παραπροϊόν των μονάδων έτοιμου σκυροδέματος με την έκπλυση του επιστρεφόμενου σκυροδέματος από τα οχήματα μεταφοράς με περιστρεφόμενο κάδο (μπετονιέρες). Η λάσπη που συσσωρεύεται στον πυθμένα των δεξαμενών καθίζησης του νερού έκπλυσης ονομάζεται λούμη. Η λάσπη αυτή αποτελείται κυρίως από μη ενυδατωμένο και ενυδατωμένο τσιμέντο αλλά και εξαιρετικά λεπτά αδρανή κλάσματα, τα οποία σε ξηρή μορφή είναι ιδιαίτερος λεπτόκοκκα και κατατάσσονται εντός των ορίων της παιπάλης (<75μm). Εξαιτίας του γεγονότος ότι στην ελληνική παραγωγή σκυροδέματος χρησιμοποιούνται αδρανή ασβεστολιθικής φύσεως, η παιπάλη που συνιστά την λούμη αναμένεται να είναι και αυτή ασβεστολιθικής προέλευσης.

Η λούμη όπως συλλέγεται από τη δεξαμενή καθίζησης, είναι σε μορφή λάσπης με μεγάλο ποσοστό υγρασίας και συσσωματώματα. Για να χρησιμοποιηθεί στα επόμενα στάδια των πειραμάτων η λούμη υπέστη την εξής προεργασία:

- Ξήρανση στους 100°C μέχρι να απομακρυνθεί η υγρασία της.
- Αποσυσσωμάτωση με ανακίνηση και όχι με άλεση ώστε να μη επηρεαστεί η κοκκομετρική κατανομή της.
- Κοσκίνηση με το κόσκινο 0.125mm(125μm) ώστε να ελεγχτεί η λεπτότητα του υλικού.

Μελετάται η πιθανότητα αποδοτικής ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης της λούμης καθώς έχουμε :

- Εξοικονόμηση φυσικών πόρων με τη μείωση εξόρυξης ασβεστόλιθου,
- βελτίωση στα λειτουργικά κόστη με τη μείωση του κόστους άλεσης ασβεστόλιθου για τη παραγωγή filler,
- μείωση αποθέσεων στο περιβάλλον.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Έξι διαφορετικά μείγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος παρήχθησαν. Ακολουθήθηκε η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Γεωργιάδη Άγγελο και Αναγνωστόπουλο Νίκο. Τα μείγματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C32/40 και C35/45, σύμφωνα με το Πρότυπο

EN206-1. Όλα τα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το ίδιο τσιμέντο, τύπου CEM II/A-M (P - LL) 42.5N σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1. Τα ΑΣΣ παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε νωπή κατάσταση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EFNARC (2005). Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από θρυμματισμένο γρανίτη με μέγιστο μέγεθος 16mm. Τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστή ασβεστολιθική άμμος. Το ασβεστολιθικό filler χρησιμοποιήθηκε ως επιπρόσθετο λεπτόκοκκο υλικό για την παραγωγή μειγμάτων ΑΣΣ αναφοράς (LF(1),LF(2)). Η ξηρή λούμη χρησιμοποιήθηκε ως εναλλακτικό υλικό αντικατάστασης του ασβεστολιθικού filler σε τέσσερα ΑΣΣ μείγματα σε ποσοστά 50% και 100% . Υψηλού εύρους, μείωσης νερού, καρβοξυλικού αιθέρα, πολυμερές πρόσμικτο προστέθηκε σε διαφορετικές δοσολογίες, προκειμένου να επιτευχθεί αυτοσυμπύκνωση. Επιβραδυντικό πρόμεικτο προστέθηκε σε όλα τα μείγματα σε σταθερή ποσότητα. Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για όλα τα σκυροδέματα στον Πίνακα 1. Τα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν σύμφωνα με τον EFNARC (2005).

Πίνακας 1: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων που παράχθηκαν.

Kg/m ³	LF (1)	DS (1) 100%	DS (1) 50%	LF (2)	DS (2) 100%	DS (2) 50%
CEM II 42.5	330	330	330	300	300	300
Άμμος	967	979.3	967	948	960	948
Γαρμπίλι	800	800	800	800	800	800
Filler	122.4	-	61.2	120	-	60
Λούμη	-	110.2	61.2	-	108	60
Υπερρευστοποιητής	10	15	12	8	16	12
Επιβραδυντής	0.59	0.59	0.59	0.40	0.40	0.40
Νερό	168.3	168.3	168.3	164.8	164.8	164.8
w(W/C)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Εξάπλωση (mm)	76	74	71	69	72	71
V Funnel (sec)	7.8	7.2	7.1	13	11.1	9.4
L Box (H ₁ /H ₂)	0.95	0.94	0.89	0.95	0.94	0.89

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν:

- κύβοι ακμής 150 και 100 χιλιοστών,
- κύλινδροι 60x100mm και
- πρισματικά δοκίμια 40x40x160mm.

Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντήρησης (T=20°C, RH>98%). Οι κύβοι των 150 χιλιοστών χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής στις ηλικίες των 2,7 και 28 ημερών. Για την μέτρηση της τεχνητής ενανθράκωσης χρησιμοποιήθηκαν 5 κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm τα οποία αρχικά συντηρήθηκαν στο θάλαμο συντήρησης για 7 ημέρες σε συνθήκες 20±°C και υγρασία μεγαλύτερη από 98%. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στον θάλαμο ελεγχόμενης εκπομπής CO₂ μέχρι την ηλικία των 90 ημερών οπότε και αφαιρέθηκαν.

Για τη μέτρηση του υδατοπερατού πορώδους χρησιμοποιήθηκαν 2 κύβοι ακμής 100mm ανά μείγμα. Τα δύο δοκίμια τοποθετούνται στο πυραντήριο σε σταθερή θερμοκρασία 100°C για 7 ημέρες. Στη συνέχεια τα δοκίμια αφαιρούνται από το πυραντήριο και ζυγίζονται ώστε να βρεθεί το ξηρό βάρος (W_{ξηρ}). Τοποθετούνται για 7 μέρες μέσα σε δοχείο με νερό έτσι ώστε να καλύπτονται όλες οι επιφάνειες του δοκιμίου. Μετά αφαιρούνται από το δοχείο, ζυγίζονται, ξανατοποθετούνται σ' αυτό για άλλες 2 μέρες και ξανα-ζυγίζονται για να ελεγχθεί αν έχει σταθεροποιηθεί το βάρος δηλαδή το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο (W_{κορ}). Κατόπιν τοποθετούνται για άλλες 10 μέρες στο φούρνο και στη συνέχεια αφαιρούνται και ζυγίζονται ώστε να επαληθευτεί η αρχική μέτρηση του ξηρού βάρους. Ο υπολογισμός

προκύπτει από την αφαίρεση του ξηρού βάρους (W_{ξηρ}) από το κορεσμένο (W_{κορ}). Διαιρώντας αυτή τη διαφορά με το ξηρό βάρος (W_{ξηρ}), προκύπτει το ποσοστό νερού που καλύπτει τους πόρους του σκυροδέματος του κάθε δοκιμίου. Το ποσοστό αυτό, ισοδυναμεί με το ποσοστό ανοικτού πορώδους.

Για την μέτρηση της αντίστασης σε θειικά άλατα χρησιμοποιήθηκαν 6 πρισματικά δοκίμια 40x40x160mm για κάθε μείγμα σκυροδέματος. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 7 μέρες στον θάλαμο συντήρησης με συνθήκες 20±1 °C και υγρασία μεγαλύτερη από 98%. Στη συνέχεια τα 3 από αυτά τοποθετήθηκαν σε καθαρό νερό βρύσης σε θερμοκρασία 20±1 °C και τα υπόλοιπα σε διάλυμα περιεκτικότητας 5% Na₂SO₄. Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτό το περιβάλλον μέχρι την ηλικία των 90 ημερών. Μετά από αυτή την ηλικία μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή του κάθε μείγματος (6 τιμές ανά μείγμα).

Για τη μέτρηση της συστολής ξήρανσης παρασκευάστηκαν 6 δοκίμια διαστάσεων 40x40x160 mm για κάθε μείγμα σκυροδέματος, τα οποία συντηρήθηκαν για 3 μέρες στον θάλαμο συντήρησης με θερμοκρασία 20±1 °C και υγρασία μεγαλύτερη από 98%. Στη συνέχεια τα 3 από αυτά τοποθετήθηκαν σε καθαρό νερό βρύσης σε θερμοκρασία 20±1 °C και τα υπόλοιπα σε θάλαμο με θερμοκρασία 20 °C και 45% υγρασία. Στη συνέχεια, μετρήθηκε η συστολή των δοκιμίων. Μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε μέρα κατά τις πρώτες 15 ημέρες και στη συνέχεια ανά 7 ημέρες μέχρι να σταθεροποιηθεί η συστολή τους (ακόμα 2 μήνες περίπου).

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7 και 28 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αντοχή σε θλίψη των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων (MPa).

(MPa)	SCC LF (1)	SCC SD (1) 100%	SCC SD (1) 50%	SCC LF (2)	SCC SD (2) 100%	SCC SD (2) 50%
f _{c2}	29.8	32.4	26.9	29.3	31.6	26.9
f _{c7}	38.4	39.1	38.2	37.8	38.2	36.4
f _{c28}	53.3	47.6	50.7	50.1	49.8	51.5
f _{ck}	49.8	44.3	48.3	44.4	47.4	46.8

Στην πρώτη σειρά μειγμάτων όπου έχουμε υψηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο παρατηρούμε ότι στην ηλικία των 28 ημερών το μείγμα αναφοράς μας ανέπτυξε μεγαλύτερες αντοχές από τα μείγματα που περιείχαν ξηρή λούμη. Η πτώση στην θλιπτική αντοχή φτάνει στο 11% (για το SD (1) 100%) σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Στην δεύτερη σειρά δοκιμίων η εικόνα αντιστρέφεται με τα δείγματα που περιείχαν ξηρή λούμη να αναπτύσσουν μεγαλύτερες αντοχές από το μείγμα αναφοράς LF (2). Κάτι που παρατηρείται και στις δύο σειρές μειγμάτων, είναι ότι τα μείγματα που περιέχουν 100% ξηρή λούμη (κυρίως αυτά που περιέχουν μόνο λούμη) αναπτύσσουν μεγαλύτερες πρώιμες αντοχές (2 και 7 ημερών).

Τα αποτελέσματά της εργασίας συμφωνούν με τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι Sandrolini. F and Franzoni. E.(2001), Chatveera. B et al.(2006,2009), Ekolu .S. O. and Dawneerangen. A.(2010), Τσαγγάρης Γ.(2012) και Ζερβάκη Μ.(2014) αναφέρουν μικρή μείωση της θλιπτικής αντοχής των μειγμάτων που περιείχαν λούμη (όχι μεγαλύτερη του 10%), σε σχέση με τα μείγματα αναφοράς, στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ οι Sandrolini. F and Franzoni. E.(2001)

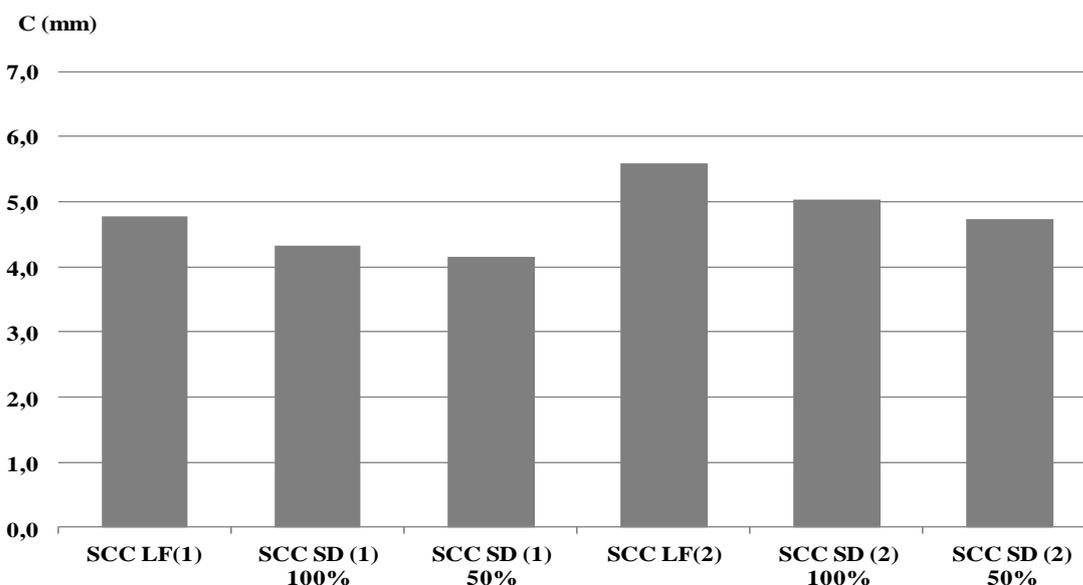
αναφέρουν ότι τα μείγματα που περιείχαν λούμη παρουσίασαν καλύτερες πρώιμες αντοχές. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω εργασίες αναφέρονται σε συμβατικό σκυρόδεμα και η χρήση λούμης έγινε μέσω της αντικατάστασης του νερού σκυροδέτησης, με νερό έκπλυσης.

3.2 Βάθος ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε με ψεκάσμό των φρεσκοθραυσμένων επιφανειών των δοκιμίων, με δείκτη φαινολοφθαλείνης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3 και παρίσταται γραφικώς στο Σχήμα 1.

Πίνακας 3: Βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

Ονομασία	SCC LF (1)	SCC SD (1) 100%	SCC SD (1) 50%	SCC LF (2)	SCC SD (2) 100%	SCC SD (2) 50%
Ενανθράκωση(mm)	4.8	4.3	4.1	5.6	5.0	4.7



Σχήμα 2: Βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

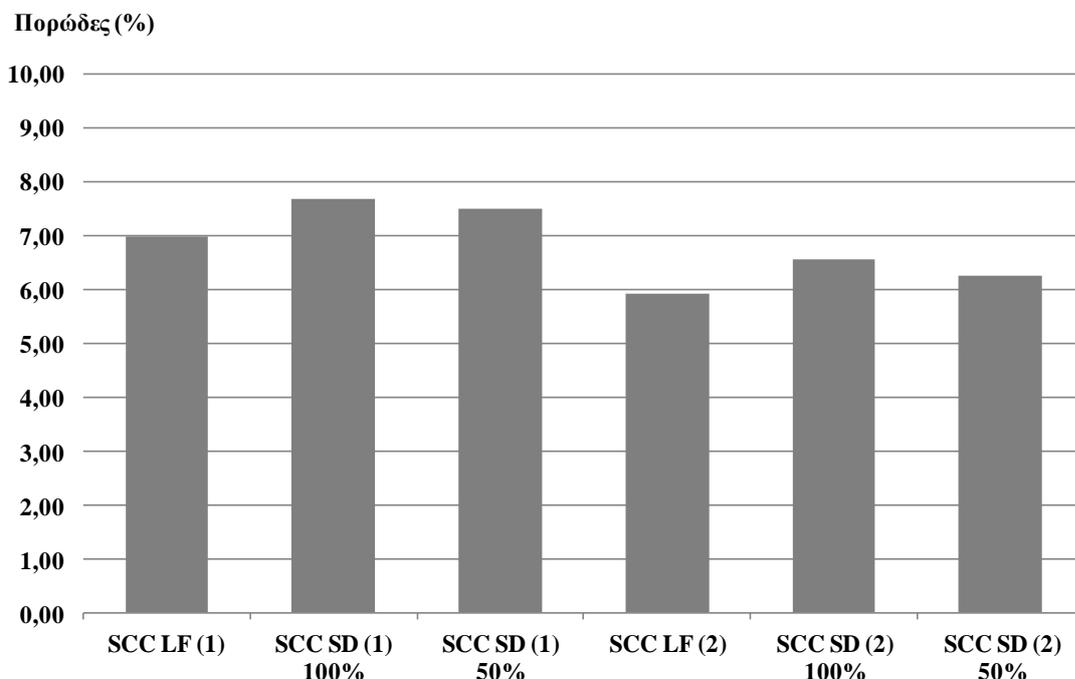
Από τα μείγματα που παρασκευάστηκαν φαίνεται η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού filler με ξηρή λούμη να μην επηρεάζει αρνητικά στο σκυρόδεμα έναντι ενανθράκωσης και μάλιστα δρα ελάχιστα θετικά σε σχέση με τα μείγματα αναφοράς. Επιπρόσθετα τα μείγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο έχουν γενικά καλύτερη συμπεριφορά έναντι ενανθράκωσης.

3.3 Υδατοπερατό πορώδες

Το ποσοστό του υδατοπερατού πορώδους όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4 και παρίσταται γραφικώς στο Σχήμα 2.

Πίνακας 4: Ποσοστό υδατοπερατού πορώδους των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

Όνομασία	SCC LF (1)	SCC SD (1) 100%	SCC SD (1) 50%	SCC LF (2)	SCC SD (2) 100%	SCC SD (2) 50%
Υδατοπερατό πορώδες (%)	6.96	7.66	7.48	5.90	6.55	6.25



Σχήμα 3: Ποσοστό υδατοπερατού πορώδους των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

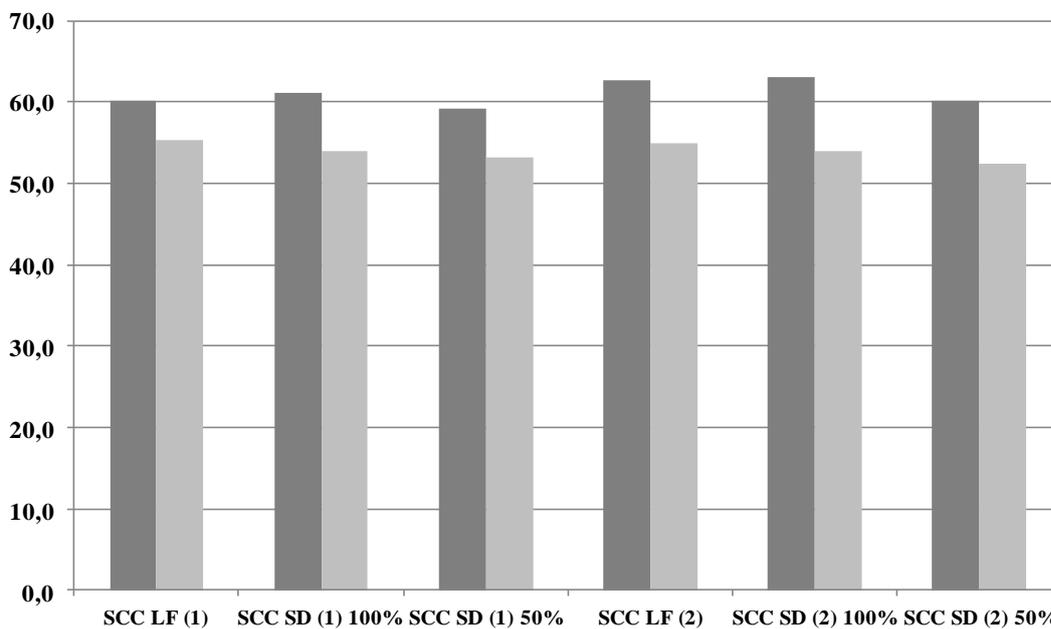
Με βάση τα στοιχεία, αντικαθιστώντας το ασβεστολιθικό filler με ξηρή λούμη, που κατά βάση αποτελείται από ενυδατωμένο τσιμέντο και λεπτόκοκκα αδρανή, το ποσοστό του πορώδους αυξάνεται, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Αντίστοιχα αποτελέσματα αναφέρουν και οι Sandrolini, F and Franzoni (2000).

3.4 Αντίσταση σε θειικά άλατα

Η μελέτη της ιδιότητας αυτής πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση της θλιπτικής αντοχής τριών δοκιμίων 4x4x16 cm (μέσος όρος 6 τιμών), στην ηλικία των 90 ημερών, που εμποτίστηκαν σε καθαρό νερό βρύσης, με τη θλιπτική αντοχή 3 ίδιων δοκιμίων που εμποτίστηκαν σε διάλυμα θειικού νατρίου (Na₂SO₄). Στον Πίνακα 5 και στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των μειγμάτων και η ποσοστιαία πτώση της αντοχής λόγω προσβολής από θειικά άλατα.

Πίνακας 5: Θλιπτικές αντοχές των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων ποσοστιαία πτώση της αντοχής λόγω προσβολής από θειικά άλατα.

	SCC LF (1)		SCC SD (1) 100%		SCC SD (1) 50%		SCC LF (2)		SCC SD (2) 100%		SCC SD (2) 50%	
	N	Θ	N	Θ	N	Θ	N	Θ	N	Θ	N	Θ
Θλιπτική αντοχή (MPa)	60.2	55.3	61.1	54.0	59.3	53.1	62.8	54.9	63.1	54.1	60.3	52.4
Διαφορά (%)	8.1		11.8		10		12.6		14.3		13.1	

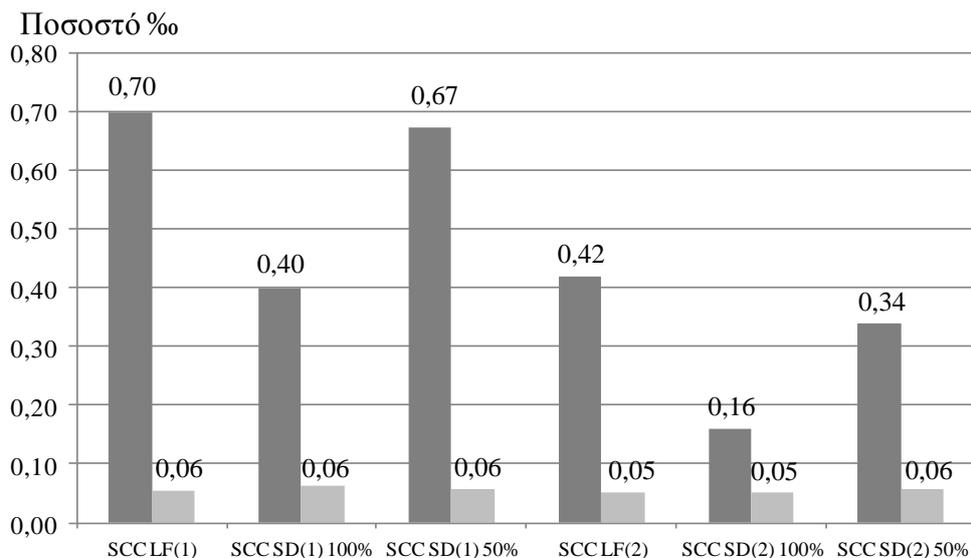


Σχήμα 4: Θλιπτικές αντοχές των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων ποσοστιαία πτώση της αντοχής λόγω προσβολής από θειικά άλατα.

Με βάση τα δεδομένα από τα μείγματα που παρασκευάστηκαν παρατηρούμε ότι τα μείγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο είχαν μικρότερη ποσοστιαία πτώση της θλιπτικής τους αντοχής. Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε ότι η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού filler με ξηρή λούμη έχει αρνητική επιρροή στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι θεικών αλάτων, συμπέρασμα που συμφωνεί με τους Chatveera, B, Lertwattanakul, P (2006,2009).

3.5 Συστολή ξήρανσης

Με την χρήση ενός επιμηκυσιομέτρου λήφθηκαν τιμές του μήκους τους διάφορες χρονικές στιγμές. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται το τελικό ποσοστό συρρίκνωσης του μήκους τους σε σχέση με το αρχικό.



Σχήμα 5: Τελικό ποσοστό συρρίκνωσης του μήκους των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων στο θάλαμο και στο νερό.

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε αρχικά ότι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο έχει ως αποτέλεσμα το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης να είναι εντονότερο. Επίσης φαίνεται η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού filler με ξηρή λούμη να δρα θετικά στο φαινόμενο, καθώς μεγαλύτερη περιεκτικότητα λούμης στο μείγμα σκυροδέματος οδηγεί σε μικρότερο ποσοστό συρρίκνωσης σε συνθήκες περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα η επιρροή της λούμης στο ποσοστό συρρίκνωσης μέσα στο νερό είναι αμελητέα καθώς η συστολή ξήρανσης σε αυτές τις συνθήκες είναι σχεδόν μηδενική.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα μείγματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε ξηρή λούμη προς αντικατάσταση ασβεστολιθικού filler, ως πληρωτικού λεπτόκοκκου υλικού, για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος εμφάνισαν τις εξής ιδιότητες :

- Μικρότερη εργασιμότητα για τον ίδιο λόγο W/C.
- Παρόμοια θλιπτική αντοχή στην ηλικία των 28 ημερών και καλύτερες πρώιμες αντοχές στις ηλικίες των 2,7 ημερών.
- Παρόμοια συμπεριφορά στην απορρόφηση νερού μέσω των τριχοειδών πόρων.
- Ελαφρώς αυξημένο ποσοστό πορώδους.
- Καλύτερη συμπεριφορά έναντι συστολής ξήρανσης.
- Καλύτερη συμπεριφορά έναντι ενανθράκωσης.
- Μεγαλύτερη απώλεια θλιπτικής αντοχής λόγω προσβολής θεικών αλάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής φαίνεται ότι η τσιμεντολάσπη (λούμη) που προέρχεται από τις δεξαμενές ανακύκλωσης των εργοστασίων παραγωγής σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λεπτόκοκκο υλικό για την παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων χωρίς να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη θλιπτική αντοχή τους ή στα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητάς που παρουσιάζουν τα μείγματα αυτά. Περαιτέρω έρευνα απαιτείται προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης της λούμης και σε μεγαλύτερες ποσότητες σε μείγματα συμβατικού σκυροδέματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το τσιμέντο, η άμμος και η ξηρή λούμη που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν προσφορά του ομίλου TITAN ΑΕ τον οποία ευχαριστούμε για την υποστήριξη της ερευνητικής δραστηριότητας του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του ΔΠΘ. Ευχαριστίες εκφράζονται και στην εταιρία χημικών προσμείκτων Sika Hellas ΑΕ για την προσφορά των χημικών προσμείκτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- EN - 14630. (2006). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.*
- EN 197-1.(2000). *Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.*
- European Guidelines for Self-Compacting Concrete.* (2005).
- Ekolu .S. O., Dawneerangen. A.(October 2010).*Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for reuse in concrete.* JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERING. Paper 714.
- Chatveera. B, Lertwattanakul. P & Makul.(2006). *N 2006.Effect of sludge water from ready-mix concrete plant on properties and durability of concrete..* Cement and Concrete Composites, 28: 441–450.
- Chatveera. B, Lertwattanakul. P. (2009). *Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture.* Journal of Environmental Management.
- Sandrolini. F , Franzoni. E.(2001). *Waste wash water recycling in ready-mix concrete plants.*Cement and Concrete Research, 31: 485–489.
- Γεωργιάδης Α., Σίδερης Κ.Κ., Αναγνωστόπουλος Ν. (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2006). *Ανάπτυξη νέας βελτιωμένης μεθοδολογίας σχεδιασμού μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.* Τεχνικό Περιοδικό 'Σκυρόδεμα'. Τεύχος 4°. ΣΕΒΕΣ
- Γεωργιάδης Α., Σίδερης Κ.Κ., Αναγνωστόπουλος Ν. (25-27 Οκτωβρίου 2006) *Ανάπτυξη νέας βελτιωμένης μεθοδολογίας σχεδιασμού μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.* Αλεξανδρούπολη. 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος.
- Ζερβάκη Μ. (2014).*Διερεύνηση Παραμέτρων Αξιοποίησης Παραπροϊόντων Εγκαταστάσεων Παραγωγής Έτοιμου Σκυροδέματος.* Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π. Τμήμα Χημικών Μηχανικών.
- Ι.Ο.Κ. (Ιούνιος 2005). *Προσωρινές εθνικές τεχνικές προδιαγραφές αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.*
- Σίδερης Κ.Κ. (2004). *Ειδικά θέματα τεχνολογίας-ανθεκτικότητας σκυροδέματος.* Ξάνθη
- Τσαγγάρης Γ.(2012).*Διερεύνηση Αξιοποίησης Στερεού Υπολείμματος του Νερού Έκπλυσης Οχημάτων Μεταφοράς Έτοιμου Σκυροδέματος.* Μεταπτυχιακή Διατριβή Ε.Μ.Π. Τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Χρήση αδρανών σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (ΣΗΚ) στην παραγωγή συνήθων σκυροδεμάτων

Κ.Κ. Σίδερης, Α. Χατζόπουλος, Χ. Τάσσος

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Λέξεις κλειδιά: Σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου, ανθεκτικότητα, αειφορία κατασκευών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν της βιομηχανίας παρασκευής χάλυβα από παλιοσίδηρο (Scrap). Στην παρούσα εργασία λεπτόκοκκα αδρανή (άμμος σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου) χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή σκυροδεμάτων C20/25 και C25/30. Παρασκευάστηκαν μείγματα σκυροδέματος στα οποία η άμμος σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου αντικατέστησε τη συμβατική ασβεστολιθική άμμο σε ποσοστά 10%, 20%, 30% και 50% κατά βάρος. Στα παρασκευασθέντα μείγματα μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή σε διάφορες ηλικίες καθώς και ιδιότητες ανθεκτικότητας – ενανθράκωση, αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, αντίσταση σε κύκλους ψύξης-απόψυξης-. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας η αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμου από άμμο ΣΗΚ προκαλεί μία μικρή αύξηση στη θλιπτική αντοχή των μειγμάτων στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ προκαλεί σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων ανθεκτικότητάς τους η οποία σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνά το 30%.

Χρήση αδρανών σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (ΣΗΚ) στην παραγωγή συνήθων σκυροδεμάτων

K.K. Sideris, A. Chatzopoulos, Ch. Tassos

Laboratory of Building Materials, Democritus University of Thrace

Keywords: Electric arc furnace slag (EAFS), durability, sustainability.

ABSTRACT: Electric arc furnace slag (EAF) is a by-product of the steel making industry. In this research EAF fine aggregates (0-5mm) were used for the production of C20/25 and C25/30 concrete mixtures. EAF slag aggregates replaced ordinary limestone crushed sand at percentages of 10%, 20%, 30% and 50% by volume. The hardened properties measured were the compressive strength at different ages as well as their resistance against carbonation, freeze thaw attack and chloride ingress. The preliminary results of this study revealed the fact that fine EAF slag may be replace part of the total volume of limestone sand without compromising the strength or the durability of the so produced concretes. On the contrary durability of EAF slag concretes was increased up to 30% as compared with reference limestone concretes.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή χάλυβα πραγματοποιείται σε κλιβάνους βασικού οξυγόνου (BOF) καθώς και σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου (EAF). Στους τελευταίους παράγεται περισσότερο από το 40% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα καθώς λόγω του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας τους όλο και περισσότερες βιομηχανίες χάλυβα υιοθετούν τη χρήση τους. Παράλληλα, λόγω της δυνατότητας παραγωγής χάλυβα από ανακύκλωση παλιοσιδήρου (Scrap), η χρήση των EAF συνεισφέρει στην αειφορία των κατασκευών. Η σκωρία που παράγεται από τους ηλεκτρικούς κλιβάνους (ΣΗΚ) αποτελεί το κύριο βιομηχανικό παραπροϊόν της παραγωγής χάλυβα και η παραγόμενη ποσότητα στην Ευρώπη υπολογίζεται σε περίπου 20 εκατομμύρια τόνους ετησίως (Pelegriño et al, 2013).

Η δυνατότητα χρήσης της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου στο σκυρόδεμα έχει αποτελέσει το αντικείμενο πολλών ερευνών. Οι Pelegriño et al (Pelegriño et al. 2013) παρασκεύασαν σκυροδέματα στα οποία η ΣΗΚ χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές (άμμος αλλά και χονδρόκοκκο αδρανές). Οι ερευνητές κατέληξαν ότι η αντικατάσταση συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών από χονδρόκοκκα αδρανή ΣΗΚ είναι δυνατή χωρίς να προκαλείται μείωση στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αντίθετα παρατήρησαν ότι στην περίπτωση αποκλειστικής χρήσης άμμου από ΣΗΚ προκαλείται μείωση της αντοχής των 28 ημερών σε ποσοστό τουλάχιστον 7%. Για το σκοπό αυτό προτείνουν την αντικατάσταση της συμβατικής άμμου από άμμο ΣΗΚ σε μικρότερα ποσοστά.

Οι Polanco et al (2011) μελέτησαν τις ιδιότητες σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με χρήση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών ΣΗΚ. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι τόσο οι μηχανικές ιδιότητες όσο και οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν ικανοποιητικές για τα σκυροδέματα με αδρανή ΣΗΚ.

Οι Pelegriño and Clado (2009) κατέληξαν ότι λεπτόκοκκα (2-4 mm) αδρανή ΣΗΚ μπορούν να αντικαταστήσουν συμβατικά αδρανή σε κλάσματα χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις στις μακροχρόνιες ιδιότητες του σκυροδέματος με την προϋπόθεση ότι η ΣΗΚ θα έχει προηγουμένως εκτεθεί στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα προκειμένου να σταθεροποιηθεί.

Οι Manso et al (2004) παρασκεύασαν έξι σκυροδέματα που παρήχθησαν με χρήση αδρανών ΣΗΚ ως χονδρόκοκκα αδρανή και/ή ως λεπτόκοκκα. Η ΣΗΚ είχε προηγουμένως υποστεί έκθεση στην ατμόσφαιρα για αρκετές εβδομάδες. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με χρήση αδρανών ΣΗΚ ανέπτυξαν παρόμοια θλιπτική αντοχή με τα συμβατικά μείγματα και ελαφρώς κατώτερα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας.

Οι Maslehuddin et al (2003) αντίθετα κατέληξαν ότι η ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων που παρήχθησαν αποκλειστικά με αδρανή ΣΗΚ υπήρξε ανώτερη αυτής των σκυροδεμάτων που παρήχθησαν με θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή. Επειδή όμως το ειδικό βάρος των πρώτων υπήρξε αυξημένο προτείνουν την αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών από αδρανή ΣΗΚ σε ποσοστό 50% τόσο για την άμμο όσο και για τα χονδρόκοκκα αδρανή.

Στο ίδιο συμπέρασμα αναφορικά με την αύξηση της ανθεκτικότητας των μειγμάτων που παρήχθησαν με ολοκληρωτική αντικατάσταση των αδρανών από αδρανή ΣΗΚ κατέληξαν και οι Arriba et al (2014). ΟΙ συγκεκριμένοι ερευνητές όμως σημείωσαν ότι η αντίσταση των εμιγμάτων έναντι διείσδυσης χλωριόντων ακθώς και η πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού των σκυροδεμάτων που απρήχθησαν με αδρανή ΣΗΚ ήταν αυξημένη σε σχέση με το συμβατικό μείγμα.

Η ΣΗΚ έχει χρησιμοποιηθεί στον ελλαδικό χώρο με επιτυχία για την παρασκευή ειδικών σκυροδεμάτων (Αναστασίου 2009, Παπαχριστοφόρου 2013). Τα μείγματα αυτά παρουσίασαν πολύ καλά χαρακτηριστικά. Η χρήση της ΣΗΚ ως αδρανή στο σκυρόδεμα είναι ασφαλής προς το περιβάλλον : οι Papayianni and Anastrasiou (Papayianni and Anastasiou 2003, Papayianni and Anastasiou 2011) κατέληξαν ότι η ποσότητα βαρέων μετάλλων που εκλύεται

από σκυροδέματα που παρασκευάζονται με αδρανή ΣΗΚ είναι χαμηλότερη από τις ποσότητες που προδιαγράφονται την οδηγία 80/778/EEC (European Parliament and Council of the European Union, 1980).

Στην παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα παρασκευής συμβατικών σκυροδεμάτων C20/25 και C25/30 με μερική αντικατάσταση της συμβατικής ασβεστολιθικής άμμου από άμμο σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Δέκα διαφορετικά μείγματα συμβατικού σκυροδέματος παρήχθησαν. Τα μείγματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C20/25 και C25/30, σύμφωνα με το Πρότυπο EN206-1 (Comite Européenne de Normalisation 2000). Όλα τα μείγματα C20/25 παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το ίδιο τσιμέντο, τύπου CEM II A-M / 32.5N ενώ όλα τα μείγματα C25/30 παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τσιμέντα τύπου CEM II A-M / 32.5N και CEM II A-M/42.5N. Τα μείγματα παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε νωπή κατάσταση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της EFNARC (2005). Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από θρυμματισμένο γρανίτη με μέγιστο μέγεθος 32mm. Τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστή ασβεστολιθική άμμος. Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου χρησιμοποιήθηκε ως ένα εναλλακτικό υλικό αντικατάστασης των αδρανών υλικών σε τέσσερα μείγματα για κάθε κατηγορία αντοχής σε ποσοστά 10%, 20%, 30% και 50% κατ' όγκο της άμμου. Υψηλού εύρους, μείωσης νερού, καρβοξυλικού αιθέρα, πολυμερές πρόσμικτο προστέθηκε σε διαφορετικές δοσολογίες, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα.

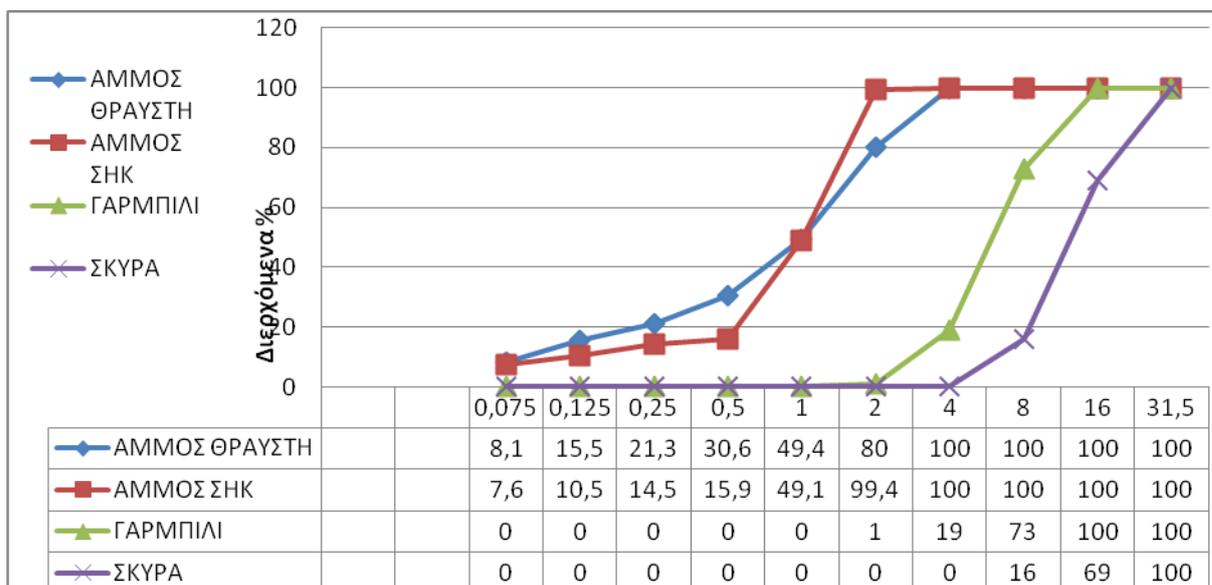
Η χημική ανάλυση των τσιμέντων και της ΣΗΚ που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση των τσιμέντων

	CEM II 32,5N	CEM II 42,5N	ΣΗΚ
SiO ₂	28	23,85	10,89
Al ₂ O ₃	9	5,22	7,71
Fe ₂ O ₃	5,5	4,13	29,19
CaO	48	58,2	33,52
MgO	2,2	3,2	4,03
SO ₃	3,2	3,3	-
K ₂ O	1,5	0,68	0,03
Na ₂ O	0,5	0,32	0,1
TiO ₂	-	0,24	0,43
P ₂ O ₅	-	0,06	-
SrO	-	0,03	-
Cr ₂ O ₃	-	0,02	0,34
ZnO	-	0,01	-
MnO	-	-	4,77
ειδικό βάρος	3,15	3,10	3,35

Χρησιμοποιήθηκε γαρμπίλι (2-16 mm) και σκύρα (8-32 mm) τα οποία προήλθαν από θραύση φυσικού πετρώματος σε σπαστήρα. Σε ορισμένα μείγματα η ασβεστολιθική άμμος αντικαταστάθηκε από άμμο σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (0-4mm).

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις της ασβεστολιθικής άμμου, της άμμου ΣΗΚ, του γαρμπιλιού καθώς και των χαλικιών παρουσιάζονται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών

Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για όλα τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν στους Πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25

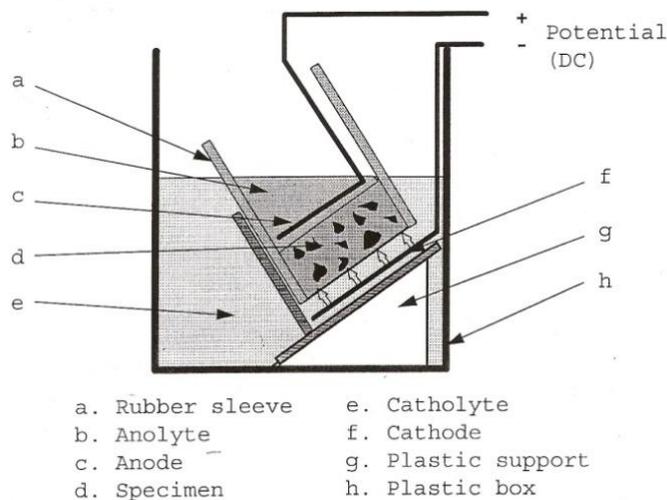
Μελέτη Σύνθεσης	C 20/25	C 20/25 10%	C 20/25 20%	C 20/25 30%	C 20/25 50%
kg/m ³	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
Τσιμέντο Π 32,5	300	300	300	300	300
Τσιμέντο Π 42,5	0	0	0	0	0
Γαρμπίλι	270	270	270	270	270
Σκύρα	630	630	630	630	630
Ασβεστολιθική άμμος	950	855	760	665	475
Άμμος ΣΗΚ	0,0	113,9	227,7	341,6	569,3
Νερό	165	165	165	165	165
Υπερ/της	1,75	1,42	1,58	2,00	1,58
N/T	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Κάθιση (mm)	20	17,5	18	17,5	17,5
Αέρας (%)	2,70	2,60	2,80	2,80	2,60

Πίνακας 3: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

Μελέτη Σύνθεσης	C 25/30	C 25/30 10%	C 25/30 20%	C 25/30 30%	C 25/30 50%
kg/m ³	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
Τσιμέντο ΙΙ 32,5	300	300	300	300	300
Τσιμέντο ΙΙ 42,5	50	50	50	50	50
Γαρμπίλι	270	270	270	270	270
Σκύρα	630	630	630	630	630
Ασβεστολιθική άμμος	900	810	720	630	450
Άμμος ΣΗΚ	0,0	107,9	215,7	323,6	539,3
Νερό	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,42	1,08	1,83	1,92	2,00
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	20	19	19,5	17,5	18
Αέρας (%)	2,50	2,30	3,00	2,40	2,40

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν κύβοι ακμής 150mm, κύβοι ακμής 100mm και κύλινδροι 60x100mm και 100x200mm. Όλα τα δείγματα συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντήρησης (T=20°C, RH>98%). Οι κύβοι των 150mm χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής σε διαφορετικές ηλικίες. Οι κύβοι των 100mm χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή της ψύξης-απόψυξης. Αφού κόπηκαν στη μέση, τοποθετήθηκαν σε διάλυμα 3% NaCl και υποβλήθηκαν σε 15 εικοσιτετράωρους κύκλους ψύξης-απόψυξης (-14°C και +20°C). Η αντίσταση σε ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm. Αυτοί οι μικροί κύλινδροι αρχικά συντηρήθηκαν επί 3 ημέρες στο προαναφερόμενο θάλαμο συντήρησης. Από αυτή την ηλικία και μετά τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (σχετική υγρασία=50-60% και θερμοκρασία=20±2°C). Στην ηλικία των 28 ημερών μεταφέρθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (T=20°C, σχετική υγρασία=55%, CO₂=1%). Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτόν τον θάλαμο για 60 ημέρες.

Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων των σκυροδεμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm που σχηματίζονται από τους κύλινδρους 100x200mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν όπως παραπάνω μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ακολούθως εκτιμήθηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων De σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο NT Build 492 (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Συσκευή δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων De. (NT Build 492, 1999).

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28 και 90 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους Πίνακες 4 και 5.

Πίνακας 4: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25 (MPa)

(MPa)	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
fc ₂	25,0	23,9	23,5	23,5	23,2
fc ₇	26,8	25,8	25,9	28,6	30,4
fc ₂₈	34,8	34,7	34,6	37,5	35,3
fc ₉₀	43,0	42,3	42,2	44,6	43,9

Πίνακας 5: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 (MPa)

(MPa)	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
fc ₂	25,2	21,0	22,7	22,8	22,8
fc ₇	30,1	31,0	29,9	30,9	32,5
fc ₂₈	39,1	40,2	41,0	45,0	43,9
fc ₉₀	44,6	45,5	46,4	51,3	50,5

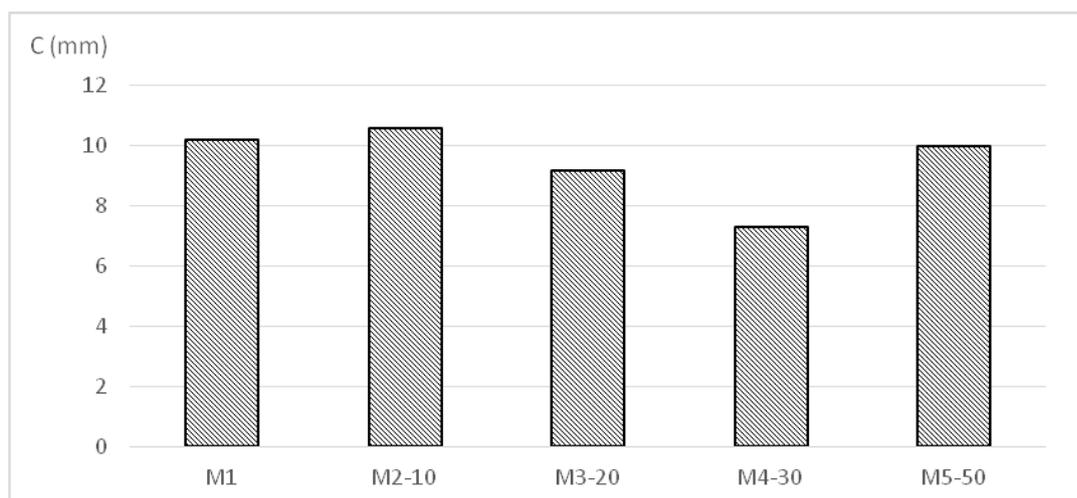
Από τις τιμές των ανωτέρω πινάκων φαίνεται ότι η χρήση της ΣΗΚ ως λεπτόκοκκο αδρανές προκαλεί μείωση στη θλιπτική αντοχή των 2 ημερών, ανεξαρτήτως του ποσοστού που αυτή θα αντικαταστήσει την ασβεστολιθική άμμο. Η κατάσταση όμως φαίνεται να αλλάζει σε μεθύτερες ηλικίες. Έτσι στην ηλικία των 28 ημερών τα μείγματα στα οποία η ΣΗΚ έχει χρησιμοποιηθεί ως μερική αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμου σε ποσοστό 20 και 50% στα σκυροδέματα C20/25 (M4-30 και M5-50) και 10 έως 50 % στα σκυροδέματα C25/30 (M7 έως M10) παρουσιάζουν υψηλότερες των σκυροδεμάτων αναφοράς αντοχές σε ποσοστά 15% (M9-30). Μάλιστα φαίνεται ότι και στις δύο κατηγορίες αντοχών η μέγιστη αντοχή παρουσιάζεται στα μείγματα όπου η ΣΗΚ αντικαθιστά την ασβεστολιθική άμμο σε ποσοστό 30%. Η αυξημένη σε σχέση με το μείγμα αναφοράς θλιπτική αντοχή συνεχίζεται και στην ηλικία των 90 ημερών για όλα τα μείγματα C25/30 που παρασκευάστηκαν με χρήση άμμου σκωρίας.

3.2 Βάθος Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε με ψεκάσμό των φρεσκοθραυσμένων επιφανειών των δοκιμίων, με δείκτη φαινολοφθαλεΐνης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 6 και 7 και παρίσταται γραφικώς στα Σχήματα 3 και 4.

Πίνακας 6: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25

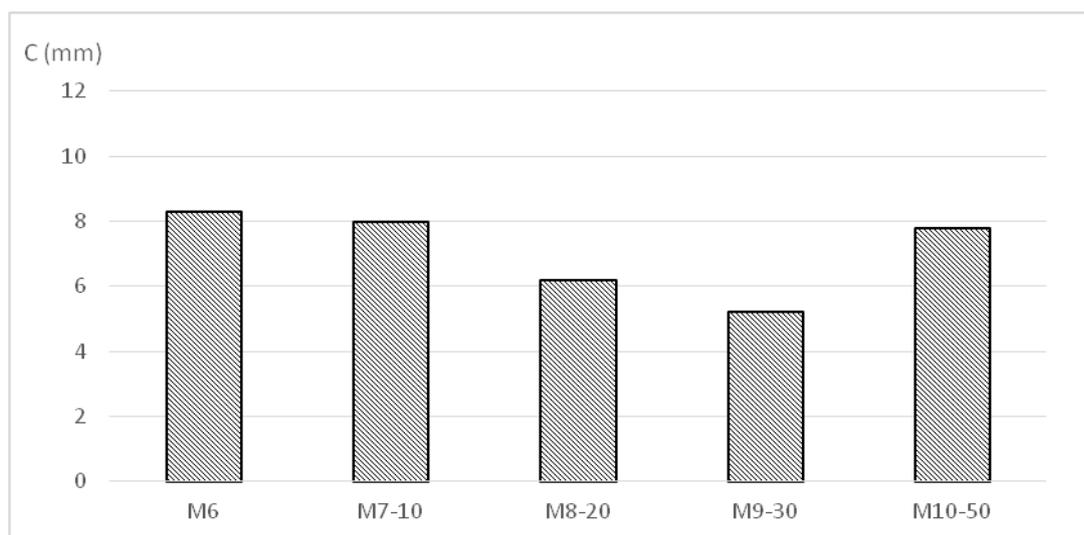
Ενανθράκωση (mm)	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
Επιταχυνόμενη	10,2	10,6	9,2	7,3	10



Σχήμα 3: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25

Πίνακας 7: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

Ενανθράκωση (mm)	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
Επιταχυνόμενη	8,3	8	6,2	5,2	7,8



Σχήμα 4: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

Στα Σχήματα αυτά αποτυπώνεται η θετική επίδραση που προσδίδει η αντικατάσταση ασβεστολιθικής άμμου από ΣΗΚ στα μείγματα. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παραμένει σταθερό (M2-10, M5-50, M7-10, M10-50) ή μειώνεται σε ποσοστό έως 37%. (M9-30). Και στις δύο κατηγορίες αντοχής η μεγαλύτερη μείωση επέρχεται για ποσοστό αντικατάστασης 30%

3.3 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων.

Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_e που μετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στους Πίνακες 8 και 9.

Πίνακας 8: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25

	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	16	14,3	15,8	13,4	14,1

Πίνακας 9: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	14,3	11,3	10,9	11,9	12,9

Ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μειώνεται σε όλα τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με χρήση αδρανών ΣΗΚ. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη στα μείγματα κατηγορίας αντοχής C25/30. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι στα μείγματα M4-30 και M5-50 ο συντελεστής De μετρήθηκε χαμηλότερος από την τιμή του σκυροδέματος M6 το οποίο ανήκει στη μεγαλύτερη κατηγορία αντοχής.

3.4 Ψύξη-Απόψυξη

Η απώλεια βάρους των δοκιμών μετά από 15 ημερήσιους κύκλους ψύξης-απόψυξης για όλα τα μείγματα παρουσιάζονται στους πίνακες 10 και 11.

Πίνακας 10: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25

	M1	M2-10	M3-20	M4-30	M5-50
% Απώλεια βάρους	35,3	37,8	36,3	29,9	35,9

Πίνακας 11: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

	M6	M7-10	M8-20	M9-30	M10-50
% Απώλεια βάρους	28,0	24,7	22,4	20,0	21,8

Η χρήση άμμου ΣΗΚ δεν επηρέασε ουσιαστικά την αντίσταση σε ψύξη-απόψυξη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C20/25. Μόνο το μείγμα M4 στο οποίο η ΣΗΚ χρησιμοποιήθηκε σε αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμου σε ποσοστό 30%, παρουσίασε μειωμένη απώλεια αντοχής κατά 15% σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Αντίθετα, στα μείγματα της κατηγορίας C25/30 η αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμου από ΣΗΚ επέφερε αύξηση στην αντοχή έναντι κύκλων ψύξης-απόψυξης για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης. Μάλιστα η μείωση της απώλειας βάρους έφθασε στο αξιοσημείωτο ποσοστό του 28.5% για το μείγμα M9-30, στο οποίο το ποσοστό αντικατάστασης ανήλθε στο 30% (Σχήμα 5).



M6

M9-30

Σχήμα 5: Απώλεια μάζας δοκιμίων M6 (αριστερά) και M9-30 (δεξιά) μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μερική αντικατάσταση ασβεστολιθικής άμμου από ανακυκλωμένα αδρανή σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου είχε σαν αποτέλεσμα την παρασκευή σκυροδεμάτων με ελαφρώς αυξημένες αντοχές στην ηλικία των 28 και 90 ημερών.

Τα μείγματα με άμμο ΣΗΚ ανέπτυξαν τουλάχιστον την ίδια συμπεριφορά με τα μείγματα αναφοράς όσον αφορά τους δείκτες ανθεκτικότητας που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα. Συγκεκριμένα, τόσο η αντίσταση έναντι ενανθράκωσης όσο και η αντίσταση έναντι διείδυσης χλωριόντων αλλά και η αντοχή σε ψύξη-απόψυξη παρουσιάστηκε εμφανώς βελτιωμένη στα μείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή.

Το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης των ασβεστολιθικών αδρανών από άμμο ΣΗΚ φαίνεται ότι είναι το 30%. Τα μείγματα που προκύπτουν παρουσιάζουν αυξημένη θλιπτική αντοχή αλλά και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας έως και 30% σε σχέση με τα μείγματα αναφοράς.

Περαιτέρω έρευνα είναι σε εξέλιξη προκειμένου να διερευνηθεί η μακρόχρονη συμπεριφορά των μειγμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή και να αποτιμηθούν με ακρίβεια τα πλεονεκτήματα –περιβαλλοντικά και οικονομικά– της χρήσης αδρανών ΣΗΚ ως μερική αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το τσιμέντο και τα χημικά πρόσμεικτα που χρησιμοποιήθηκαν αποτέλεσαν χορηγία της Τσιμεντοβιομηχανίας TITAN και της εταιρίας Sika Hellas AE. Στις εταιρίες αυτές εκφράζονται ευχαριστίες για τη στήριξή τους στο ερευνητικό έργο του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του ΔΠΘ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναστασίου Ε: “Αξιοποίηση σκωριών χαλυβουργίας και ιπτάμενων λιγνιτικών τεφρών στην παραγωγή ειδικών σκυροδεμάτων”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 2009.
- Παπαχριστοφόρου Μιχαήλ: «Μελέτη σκυροδεματων με σκωριοαδρανή για θωράκιση έναντι έκθεσης σε ακτινοβολία και υψηλές θερμοκρασίες», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 2013.
- Arribas I., Vegas I., San-Jose J.T., Manso J.M., “Durability studies on steelmaking concretes”, *Materials and Design*, 63 (2014), pp. 168-176.
- Manso, J. M.; González, J. J.; and Polanco, J. A., “Electric Arc Furnace in Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 16, No. 6, Nov.-Dec. 2004, pp. 639-645.
- Maslehuddin, M.; Sharif, A. M.; Shameem, M.; Ibrahim, M.; and Barry, M. S., “Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes,” *Construction and Building Materials*, V. 17, No. 2, Mar. 2003, pp. 105-112.
- Papayianni I, Anastasiou E, Concrete incorporating high calcium fly ash and EAF slag aggregates, *Magazine of Concrete Research* 63 (8), 2011, pp 597-604.
- Papayianni I, Anastasiou E, Concrete incorporating high volumes of industrial by-products, in R.K. Dhir, M.D. Newlands & K.A. Paine (eds.), *Role of Concrete in Sustainable Development, Proceedings of the International Conference on Celebrating Concrete: People and Practice*, 3-4 September 2003, Dundee, Scotland, pp 595-604.
- Pellegrino C, Cavagnis P, Faleschini F., Brunelli K.: Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate, *Cement & Concrete Composites* 37 (2013) pp. 232–240.
- Pellegrino, C., and Gaddo, V., “Mechanical and Durability Characteristics of Concrete Containing EAF Slag as Aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, V. 31, No. 9, Oct. 2009, pp. 663-671.
- Polanco J., Juan M. Manso, Jesús Setién, and Javier J. González. Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag, *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 2, March-April 2011, pp. 196-203.

Χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών σε έργα υποδομής. Εφαρμογή σε καινοτόμες γέφυρες

Α. Παλαιοχωρινού¹, Σ. Αργυρούδης¹, Σ. Μητούλης², Κ. Πιτιλάκης¹

¹ Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

² Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, UK

Λέξεις κλειδιά: ανακυκλωμένα ελαστικά, μίγματα ελαστικών – άμμου, συμπιεστά ενθέματα, μονολιθικές γέφυρες, ακροβάθρο, μεταβατικό επίχωμα, βελτίωση, βιώσιμη διαχείριση έργων υποδομής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης ελαστικών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού. Τα επιδιωκόμενα οφέλη τέτοιων εφαρμογών είναι διττά: η ανακούφιση του περιβάλλοντος από τη συσσώρευση μεταχειρισμένων ελαστικών και η αξιοποίηση ευεργετικών ιδιοτήτων στην απόδοση των κατασκευών με παράλληλη μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης. Στην παρούσα εργασία συνοψίζονται καταρχήν οι βασικές ιδιότητες των ελαστικών και οι εφαρμογές τους σε τεχνικά έργα. Στη συνέχεια εξετάζεται η ευεργετική χρήση μίγματος κοκκωδών εδαφών και ανακυκλωμένων ελαστικών στη σεισμική απόκριση συστήματος μονολιθικού ακροβάθρου – μεταβατικού επιχώματος και προτείνονται καινοτόμες λύσεις για τη βελτίωση των απαιτήσεων λειτουργικότητας και αντισεισμικότητας των μονολιθικών γεφυρών. Οι προτεινόμενες λύσεις αξιοποιούν την αυξημένη ελαστικότητα και απόσβεση των ελαστικών μέσω της εφαρμογής α) μιγμάτων ελαστικών – άμμου ως υλικού επίχωσης και β) συμπιεστών ενθεμάτων ελαστικού μεταξύ ακροβάθρου και επιχώματος πρόσβασης. Οι καταναγκασμοί που εισάγονται στο φορέα ανωδομής προέρχονται από τη δυναμική αλληλεπίδραση καταστρώματος – ακροβάθρου – μεταβατικού επιχώματος και εδάφους θεμελίωσης υπό τις θερμοκρασιακές μεταβολές του καταστρώματος της γέφυρας και τη σεισμική δράση. Η απόκριση του συζευγμένου συστήματος ακροβάθρου - επιχώματος εξετάζεται και αξιολογείται μέσω αριθμητικών προσομοιωμάτων και αναλύσεων. Τα οφέλη των προτεινόμενων κατασκευαστικών λύσεων αξιολογούνται συγκρίνοντας την απόκριση του συστήματος με τη χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών έναντι συμβατικών τεχνικών και υλικών. Εξετάζονται ως παράμετροι το ποσοστό του ελαστικού στο μίγμα, το μήκος εφαρμογής των μιγμάτων στο επίχωμα και το πάχος του συμπιεστού ενθέματος. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η χρήση των ελαστικών υλικών έχει γενικώς ευνοϊκή επιρροή στις αναπτυσσόμενες ωθήσεις, παραμένουσες μετακινήσεις του επιχώματος και παραμορφώσεις του ακροβάθρου. Επομένως, με δεδομένες τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων ελαστικών, κρίνεται ιδιαίτερως ενδιαφέρουσα η χρήση τους για τη βελτίωση, σε στατικά και σεισμικά φορτία, της συμπεριφοράς του συστήματος ακροβάθρου – επιχώματος πρόσβασης, καθώς και άλλων έργων υποδομής, όπως επιχωμάτων αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρόμων, λιμενικών έργων, μεγάλων αγωγών κτλ. Επιτυγχάνεται έτσι αφενός η επέκταση του χρόνου ζωής τους με εξοικονόμηση δαπανών συντήρησης και αφετέρου η διατήρηση των φυσικών πόρων.

Enhancement of infrastructure response using recycled tyres – Application in novel bridges

A. Palaiochorinou¹, S. Argyroudis¹, S. Mitoulis², K. Ptilakis¹

¹ *Laboratory of Soil Mechanics, Foundations and Geotechnical Earthquake Engineering, Aristotle University of Thessaloniki*

² *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, UK*

Keywords: recycled tyres; rubber – sand mixtures; compressible inclusions; integral bridges; abutment; embankment; soil improvement; infrastructure sustainability

ABSTRACT: Over the past years various industrial techniques for tyre recycling as well as applications of recycled tyres in civil engineering works have been developed. The prospected benefits are twofold: on the one hand environmental protection is achieved, since considerable quantities of waste tyres are stockpiled in landfills or abandoned in the nature and on the other hand the exploitation of tyre beneficial properties on the performance of structures, towards resilient, maintenance-free, lower cost and green infrastructures. In this framework, the primary properties of recycled tyres and their civil engineering applications are summarised at first. Furthermore, the beneficial utilisation of granular soil - reused tyres mixtures on the seismic response of an integral abutment is investigated. In order to address the in-service as well as the seismic demand of integral bridges novel structural solutions with the use of recycled tyres are proposed. The proposed solutions take advantage of the high compressibility and damping ratio of the tyres by applying a) rubber – sand mixtures as backfilling material in the approach embankment of integral abutments and b) compressible inclusions of reused tyres between the abutment and the approach backfill. The deck - abutment – backfill and foundation soil dynamic interaction due to daily and annual temperature variations of the bridge deck as well as ground seismic excitation induces constraints to the integral bridge deck. The coupled abutment – backfill system response is evaluated through numerical modelling and dynamic analyses. The benefits achieved by the application of the proposed solutions with the use of recycled tyres are assessed in comparison to the corresponding abutment – backfill response for conventional materials and state of practice. The variability of the parameters examined were the rubber content in the rubber – sand mixtures, the length of the improved backfill and the compressible inclusion thickness. A beneficial trend on the abutment - backfill soil system response is observed in terms of soil pressures, permanent settlements of the backfill and deflections of the abutment. Consequently, the use of recycled tyres for the improvement of integral abutment – backfill response, under static and dynamic loads, represents a promising solution. The given recycled tyres properties can be also beneficial for the long-term performance of other infrastructures, such as highway and railway embankments, waterfront structures, pipelines etc. Therefore, their life span is expected to be extended, whilst natural resources are conserved and maintenance costs are reduced.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανακύκλωση ελαστικών

Την τελευταία πενήνταετία η αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής και μεταποίησης απορροφά μεγάλο μέρος των φυσικών πόρων και ταυτόχρονα αποδίδει μεγάλο όγκο στερεών, υγρών και αέριων αποβλήτων. Στην Ευρώπη παράγονται κάθε χρόνο 3.4 εκατομμύρια τόνοι μεταχειρισμένων ελαστικών, ενώ στη Μ. Βρετανία μόνον απορρίπτονται ετησίως περίπου 46 εκατομμύρια ελαστικών (www.etrma.org). Εντός Ε.Ε. έχει απαγορευθεί η απόθεση ελαστικών σε χώρους υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.Τ.Α.) (Κοινοτική Οδηγία 1999/31). Η ίδια πολιτική ακολουθείται και από μεμονωμένες Πολιτείες των Η.Π.Α. (USEPA, 2006). Εκτιμάται ότι στις Η.Π.Α παρήχθησαν περισσότεροι από 3800 χιλιάδες τόνοι ελαστικών το 2013 (www.rma.org). Παρόλο που σημειώνεται σταδιακά αυξανόμενη χρήση των ανακυκλωμένων ελαστικών σε ποικίλες εφαρμογές, όπως σε τεχνικά έργα, ασφαλικά μίγματα, επιστρώσεις επιφανειών, παραγωγή νέων ελαστικών, γεωργία, κ.ά., απορρίπτονται παράλληλα σημαντικές ποσότητες σε χωματερές, Χ.Υ.Τ.Α ή ανεξέλεγκτα στο φυσικό περιβάλλον. Έτσι, ενισχύεται η παραγωγή τοξικών αερίων δεδομένου ότι τα ελαστικά είναι εύφλεκτα, καθώς και η μόλυνση του εδάφους εφόσον τα ελαστικά δεν είναι βιοδιασπώμενα. Για αυτό συνιστούν εν δυνάμει απειλή για το περιβάλλον, τη δημόσια υγεία και την ασφάλεια της κοινωνίας. Επομένως, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη εύρεσης οικονομικά βιώσιμων τρόπων διατήρησης των φυσικών πόρων και επωφελούς, για τον άνθρωπο, τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον, αξιοποίησης των παραγόμενων αποβλήτων. Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η προσπάθεια επαναχρησιμοποίησης ελαστικών μετά το πέρας του ωφέλιμου χρόνου ζωής σε τεχνικά έργα υποδομής. Το προκύπτον όφελος αφορά τόσο στην οικονομία υλικών και συνακόλουθα στη μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής όσο και στην ευεργετική δράση ορισμένων ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων υλικών στην απόδοση των κατασκευών.

1.2 Καινοτόμες γέφυρες

Ταυτόχρονα, το ενδιαφέρον και η έρευνα προσανατολίζονται σε «πράσινα» έργα υποδομής με μειωμένες δαπάνες συντήρησης, αποκατάστασης και αυξημένο χρόνο ζωής. Μεταξύ αυτών είναι και τα συνεχή συστήματα γεφυρών με μονολιθικά ή ημιμονολιθικά συνδεδεμένα βάρθρα (ακρόβαθρα και μεσόβαθρα). Τα συστήματα συνεχών γεφυρών είναι κατασκευές γεφυρών χωρίς αρμούς στις οποίες ο φορέας καταστρώματος είναι μονολιθικά συνδεδεμένος με το σύνολο ακροβάθρων και μεσοβάθρων (Integral Abutment Bridges, IABs). Πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών γεφυρών με εφέδρανα και αρμούς λόγω απουσίας των αναλώσιμων μελών, επομένως λόγω μειωμένου κόστους συντήρησης. Επιπλέον, υπερτερούν λόγω υπερστατικότητας και ικανότητας ανακατανομής της έντασης· ιδιότητες καίριες για τις αντισεισμικές κατασκευές, εφόσον απαιτείται να μπορούν να χρησιμοποιούνται χωρίς διακοπή, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά από σεισμό. Ωστόσο, η πλήρωση απαιτήσεων λειτουργικότητας εξαιτίας των επιβαλλόμενων καταναγκασμών, προερχόμενοι από τις διαφορικές καθιζήσεις, την προέκταση, τη συστολή ξήρανσης, τον ερπυσμό και τις θερμοκρασιακές μεταβολές, στα ακραία μεσόβαθρα, ακρόβαθρα και τα μεταβατικά επιχώματα, αποτελεί ακόμη μελετητική και κατασκευαστική πρόκληση (Mitoulis & Tegos, 2011). Πρόσθετη παράμετρος η οποία επηρεάζει τη συμπεριφορά και απόκρισή τους είναι η δυναμική αλληλεπίδραση φορέα καταστρώματος – ακροβάθρου – μεταβατικού επιχώματος

και εδάφους θεμελίωσης στη φάση λειτουργίας καθώς και κατά την εξέλιξη ενός σεισμικού γεγονότος.

Προκειμένου το πρόβλημα της δυναμικής αλληλεπίδρασης να είναι πλήρως ελεγχόμενο προτείνεται η χρήση μιγμάτων ανακυκλωμένων ελαστικών – κοκκωδών εδαφών ως υλικού επίχωσης και συμπιεστών ενθεμάτων ελαστικού μεταξύ ακροβάθρου και επιχώματος πρόσβασης. Κατ' αυτό τον τρόπο αξιοποιούνται οι ευεργετικές ιδιότητες των ελαστικών στην απόκριση των μονολιθικών ακροβάθρων, συμβάλλοντας στην βελτίωση της συμπεριφοράς των συνεχών γεφυρών, στη βιωσιμότητά τους καθώς και στην άμβλυνση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Για την αξιοποίηση και επαναχρησιμοποίηση μεταχειρισμένων ελαστικών ακολουθούνται διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως ο τεμαχισμός και η κοκκοποίηση. Πρωταρχικά, ο τεμαχισμός συμβάλλει στην ελάττωση του υφιστάμενου αποθέματος ελαστικών, κυρίως προερχόμενο από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Ταυτόχρονα αποτελεί και στάδιο της προεργασίας για την ανακύκλωση ή καύση τους (www.etra-eu.org). Τα κοκκοποιημένα ελαστικά (tyre shreds) προέρχονται από μεταχειρισμένα απορριμμένα ελαστικά τα οποία έχουν τεμαχιστεί σε μέγεθος 50 - 300 mm. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται λάστιχα, συνηθέστερα με στρώσεις από ατσάλι και σπανιότερα από γυαλί (Humphrey, 2003) (Εικόνα 1). Για την παραγωγή τους ακολουθείται η εξής γραμμή: κοπή, σχηματοποίηση, αφαίρεση των ατσάλινων στρώσεων, επιτόπου διαλογή των ελαστικών τεμαχίων προς χρήση σε τεχνικά έργα. Δεδομένου ότι ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι φορητός, η εν λόγω διεργασία μπορεί να λαμβάνει χώρα και επιτόπου στο χώρο απόθεσης των ελαστικών.



Εικόνα 1. Κοκκοποιημένα ελαστικά (tyre shreds).

2.1 Ιδιότητες ανακυκλωμένων ελαστικών

Βασικές ιδιότητες των κοκκοποιημένων ελαστικών οι οποίες τα καθιστούν ελκυστικά σε εφαρμογές τεχνικών έργων είναι οι παρακάτω (Humphrey, 2003):

- χαμηλό ειδικό βάρος ($650 - 1000 \text{ kg/m}^3$),
- μεγάλη διαπερατότητα ($> 10^{-2} \text{ m/sec}$),
- συμβολή στη μείωση των ωθήσεων γαιών σε γεωκατασκευές,
- θερμική μόνωση (8 φορές καλύτερη από το κοινό αμμοχάλικο),
- ανθεκτικότητα.

Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανικές ιδιότητες που ενδιαφέρουν, διότι απαντούν σε προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση συμβατικών υλικών στις κατασκευές και γεωκατασκευές είναι οι εξής (Humphrey, 2003, Edeskär, 2006):

- ομοιόμορφη κοκκομετρία,
- χαμηλή ξηρή πυκνότητα, ρ_s ,
- υψηλό πορώδες, n και δείκτης πόρων, e ,
- υψηλή συμπίεστικότητα,
- χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (μέτρο του Young), E , σε σχέση με συμβατικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά,
- υψηλό μέτρο ανθεκτικότητας, M_r .

2.2 Εφαρμογές - Χρήσεις ανακυκλωμένων ελαστικών σε τεχνικά έργα

Τα κοκκοποιημένα ελαστικά ως «δομικό υλικό» έχουν μελετηθεί διεθνώς (Humphrey & Manion, 1992, Heimdahl & Drescher, 1999, Westerberg & Mácsik, 2001, Yang et al., 2002, Edeskär & Westerberg, 2003, Anastasiadis et al., 2009, Anastasiadis et al., 2012, Anastasiadis et al., 2012, Senetakis et al., 2011, Senetakis et al., 2012). Όσον αφορά σε έργα Πολιτικού Μηχανικού έχει αποδειχθεί, από τις παραπάνω μελέτες και εφαρμογές, ότι είναι κατάλληλα σε γεωκατασκευές ως επιχώματα και τεχνητά πρανή λόγω χαμηλού ιδίου βάρους, σε έργα οδοποιίας ως υλικό στρώσεων αποστράγγισης, σε εφαρμογές σεισμικής μόνωσης, στη γεφυροποιία ως υλικό μεταβατικών επιχωμάτων (Εικόνες 2-5).

A. Έργα οδοποιίας και σιδηροδρόμων



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2. Εφαρμογές ανακυκλωμένων ελαστικών σε έργα οδοποιίας (α) εν είδει ασφαλτοταπήτων, (β) ως επίστρωση πλίνθων πεζοδρομίων από τσιμέντο (PERSUADE Project, 2010), (γ) ως στρώση απόσβεσης των δονήσεων λόγω διέλευσης συρμών (πηγή: <http://www.calrecycle.ca.gov>).

Β. Οδικά επιχώματα



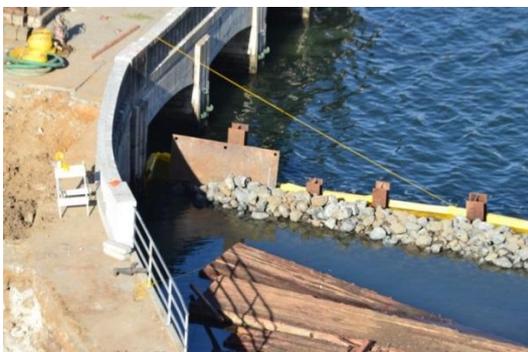
(α)



(β)

Εικόνα 3. Χρήση κοκκοποιημένων ελαστικών σε οδικά επιχώματα: (α) ανάμιξη μη συνεκτικού εδαφικού υλικού με θραύσματα ελαστικών και διάστρωση, (β) διάστρωση των κοκκοποιημένων ελαστικών κατά τη φάση κατασκευής οδικού επιχώματος και σχηματική απεικόνιση της επιφάνειας που καταλαμβάνουν σε τυπική εγκάρσια τομή (πηγές: <https://engineering.purdue.edu>, <http://www.industrialresourcescouncil.org>, <http://www.mto.gov.on.ca>).

Γ. Έργα αντιστήριξης (κρηπιδότοιχοι, τοίχοι, ακρόβαθρα γεφυρών)



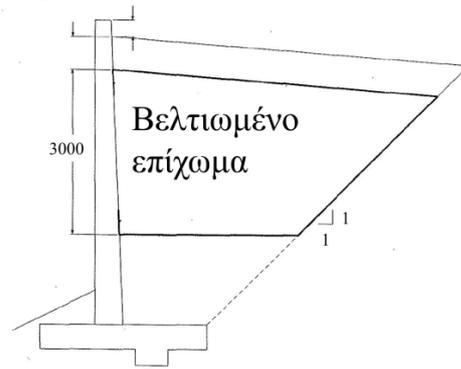
(α)



(β)

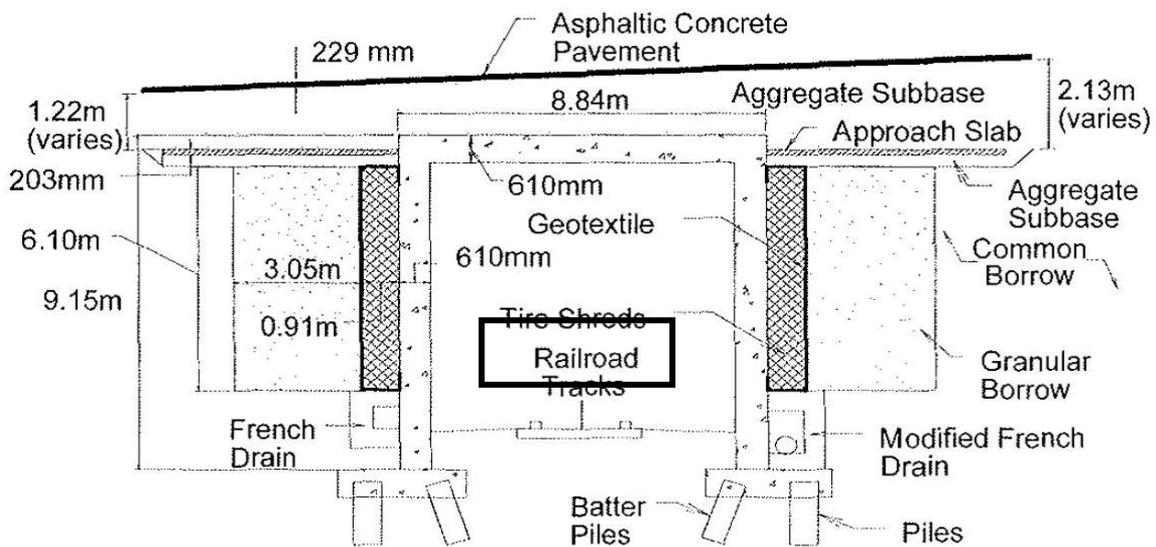


(γ)



(δ)

Εικόνα 4. Εφαρμογές κοκκοποιημένων ελαστικών σε τεχνικά έργα αντιστήριξης: (α) σε κρηπιδότοιχους, (β), (γ) σε τοίχους αντιστήριξης, (δ) τυπική καθ' ύψος τομή τοίχου αντιστήριξης με εμφανή τη θέση τοποθέτησης του βελτιωμένου επιχώματος με τεμαχισμένα ελαστικά (πηγές: <http://1.bp.blogspot.com>, <http://www.rhea.us>, Humphrey, 2003).



Εικόνα 5. Εφαρμογή κοκκοποιημένων ελαστικών σε μίγμα εδαφικού υλικού μεταβατικού επιχώματος ακροβάθρων γεφυρών – τυπική τομή κατά την εγκάρσια διεύθυνση γέφυρας (Humphrey, 2003).

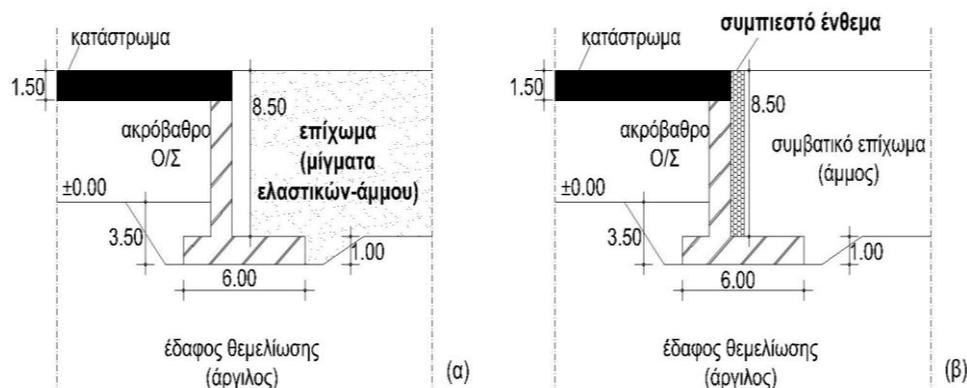
Οι παραπάνω μηχανικές ιδιότητες των κοκκοποιημένων ελαστικών έχουν οδηγήσει στη χρησιμοποίησή τους και υπό μορφή μιγμάτων (Tyre Derived Aggregates, TDA) με συμβατικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά, όπως άμμους ή και αμμοχάλικα, καθώς και υπό μορφή συμπιεστών ενθεμάτων.

Τα μίγματα ελαστικών και μη συνεκτικών εδαφών συνίστανται από θραύσματα κοκκοποιημένου ελαστικού σε διάφορα ποσοστά περιεκτικότητας κατά βάρος ή κατ' όγκον. Η χρήση κοκκοποιημένων ελαστικών σε μίγματα εδαφικών υλικών τροποποιεί και εισάγει ιδιότητες, ως επί το πλείστον ενεργοποιώντας την ιδιότητα της ελαστικής υστέρησης που παρουσιάζει το αμιγές ελαστικό υλικό, οι οποίες έχουν άμεσο ενδιαφέρον για τις αντισεισμικές κατασκευές. Η επιρροή του ποσοστού ελαστικού του μίγματος στα δυναμικά χαρακτηριστικά και το δυναμικό ρευστοποίησης του υλικού έχει παρουσιαστεί μεταξύ άλλων από τους Senetakis et al. (2012), Anastasiadis et al. (2012), Anastasiadis et al. (2009), Senetakis et al. (2011), Πιστόλας και συν. (2012).

Τα συμπιεστά ενθέματα (Compressible Inclusions, CIs) συνίστανται από κόκκους ανακυκλωμένου ελαστικού και μορφώνουν χωριστή στρώση υλικού / ένθεμα. Το πάχος του, το μέτρο ελαστικότητας και ο δείκτης Poisson καθορίζονται κατά περίπτωση σχεδιασμού. Τοποθετούνται ως μονωτικό συμπιεστό στρώμα μεταξύ δομικών στοιχείων προς «απομόνωση». Πρόσφατα διεξήχθη έρευνα για τη χρήση συμπιεστών ενθεμάτων από ανακυκλωμένα ελαστικά σε μονολιθικά ακρόβαθρα συνεχών φορέων γεφυρών, ως προς την επιρροή σε συνθήκες λειτουργίας των τελευταίων (Mitoulis et al., 2014).

3 ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΛΥΣΗ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κατασκευαστική διαμόρφωση των προτεινόμενων λύσεων με ανακυκλωμένα ελαστικά στο παράδειγμα εφαρμογής που μελετήθηκε. Αυτό αφορά στο συζευγμένο σύστημα «ακρόβαθρο – μεταβατικό επίχωμα», στη θέση ακρόβαθρου μονολιθικά συνδεδεμένου σε συνεχή φορέα γέφυρας έξι ανοιγμάτων. Το υπό μελέτη ακρόβαθρο είναι επιφανειακά θεμελιωμένο σε μεμονωμένο πέδιλο. Πίσω από το ακρόβαθρο εκτείνεται το μεταβατικό επίχωμα, στην περιοχή πρόσβασης της γέφυρας, ενώ μπροστά από αυτό θεωρούνται συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Το ύψος του ακρόβαθρου είναι ίσο με 8.5 m και το πλάτος του ίσο με 13 m. Το πέδιλο θεμελίωσης έχει πλάτος ίσο με 6 m, ενώ η στάθμη θεμελίωσης λαμβάνεται 3.5 m από την ελεύθερη επιφάνεια. Το ακρόβαθρο κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C20/25, μέτρου ελαστικότητας $E = 30 \text{ GPa}$ (EN 1992-1-1:2004), ειδικού βάρους $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ και λόγου Poisson $\nu = 0.3$. Το έδαφος θεμελίωσης θεωρείται τυπικό αργιλικό, κατηγορίας C κατά EC8 (EN 1998-1:2004), ενώ το υλικό επίχωσης, πριν τη βελτίωση, θεωρείται τυπικό μη συνεκτικό έδαφος (100% άμμος). Η αναμενόμενη μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους και επιχώματος υπό δυναμική φόρτιση λαμβάνεται υπόψη μέσω του ελαστοπλαστικού νόμου συμπεριφοράς Mohr – Coulomb. Για την αριθμητική προσομοίωση και επίλυση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS (2008). Διενεργήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για στατικά (ίδιο βάρος και δυνάμεις τριβής) και σεισμικά φορτία (Παλαιοχωρινού, 2014). Στη δεύτερη περίπτωση φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικές σεισμικές καταγραφές από την Ελλάδα και το εξωτερικό, αφού κλιμακώθηκαν σε ενιαία κορυφαία εδαφική επιτάχυνση ($\text{PGA}=0.3\text{g}$).



Σχήμα 1. Κατασκευαστική διαμόρφωση προτεινόμενων λύσεων με χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών (α) μίγματα ελαστικών – άμμου ως υλικού επίχωσης, (β) συμπιεστά ενθέματα μεταξύ ακρόβαθρου και επιχώματος.

Εκτός από το συμβατικό υλικό επίχωσης, εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις μιγμάτων χονδρόκοκκου μη συνεκτικού αμμώδους εδαφικού υλικού και ελαστικού (Σχήμα 1α):

- μίγμα σύστασης 90% άμμος – 10% ελαστικό («Επίχωμα 2»: συμβολίζεται ως «E2») και
- μίγμα σύστασης 70% άμμος – 30% ελαστικό («Επίχωμα 3»: συμβολίζεται ως «E3»).

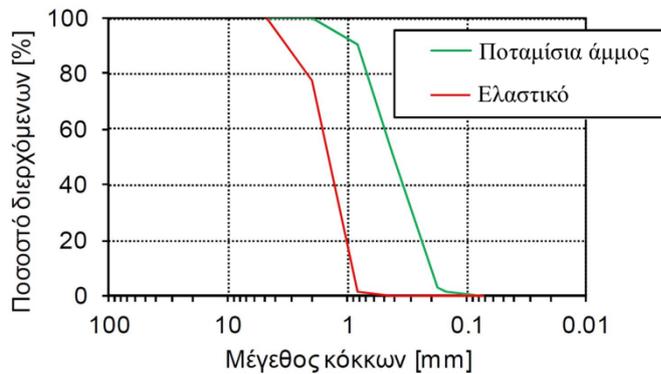
Η συμβατική λύση αναφέρεται σε τυπικό επίχωμα από 100% αμμώδες εδαφικό υλικό και συμβολίζεται ως «E1».

Οι παράμετροι αντοχής και δυναμικές ιδιότητες των παραπάνω μιγμάτων ελήφθησαν από πρόσφατο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ. από τους Πιστόλα και συν. (2012). Τα πρωτογενή υλικά των μιγμάτων περιλαμβάνουν φυσική ποταμίσια άμμο με δείκτη $D_{50} = 0.4$ και $C_u = 2.40$ και ομοιόμορφο κοκκοποιημένο ελαστικό με δείκτη $D_{50} = 1.55$ και $C_u = 1.78$. Το τελευταίο προήλθε από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες των πρωτογενών υλικών και στο Σχήμα 2 οι κοκκομετρικές τους καμπύλες.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες πρωτογενών υλικών άμμου και κοκκοποιημένων ελαστικών (Πιστόλας και συν. 2012).

	Πρωτογενές υλικό	D_{max} (mm)	D_{50} (mm) ^a	C_u ^b	C_c ^c	γ_s (gr/cm ³) ^d
Άμμος	Ποταμίσις άμμος	2.00	0.40	2.40	0.89	2.67
Ελαστικό	Κόκκοι ελαστικών	2.00	1.78	1.78	0.96	1.10

^a Μέση διάμετρος κόκκων, ^b Συντελεστής ομοιομορφίας, ^c Συντελεστής κοιλότητας, ^d Ειδικό βάρος στερεών κόκκων



Σχήμα 2. Κοκκομετρικές καμπύλες πρωτογενών υλικών (Πιστόλας και συν. (2012)).

Στον Πίνακα 2 δίνονται οι παράμετροι αντοχής και οι δυναμικές ιδιότητες των τριών επιχωμάτων που εξετάστηκαν (E1, E2 και E3). Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μη γραμμικές καμπύλες ($G-\gamma-D$).

Πίνακας 2α. Παράμετροι αντοχής συμβατικού επιχώματος (E1) και επιχωμάτων με μίγματα ελαστικού-άμμου (E2, E3).

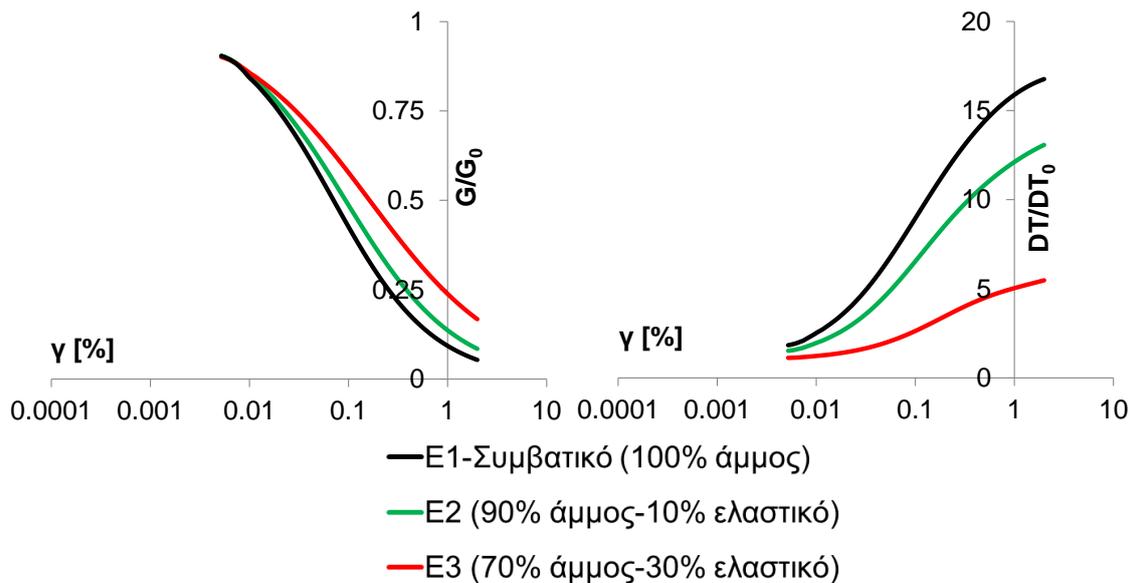
	Πάχος στρώσης h (m)	V_s (m/s)	c (kPa)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	ψ (°)	ν
E1	8.5	269	0.01	18.5	42	10.9	0.43
E2	8.5	218	30	17.5	34	4.3	0.36
E3	8.5	155	37	15.5	25.6	2.8	0.39

V_s : ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων, c : συνοχή, γ : ξηρό ειδικό βάρος, ϕ : γωνία τριβής, ψ : γωνία διαστολής, ν : λόγος Poisson

Πίνακας 2β. Δυναμικές ιδιότητες συμβατικού επιχώματος (E1) και επιχωμάτων με μίγματα ελαστικού-άμμου (E2, E3).

	G_{max} (kPa)	DT_0 (%)	E (kPa)	G_{dyn} (kPa)	E_{dyn} (kPa)	$DT(=\zeta)$ (%)
E1	1.36E+05	1.1	3.90E+05	1.02E+05	2.92E+05	12
E2	8.45E+04	1.7	2.30E+05	5.92E+04	1.61E+05	5
E3	3.81E+04	2.8	1.06E+05	2.48E+04	6.89E+04	7

G_{max} : μέγιστο μέτρο διάτμησης, DT_0 : αρχικό ποσοστό απόσβεσης E : μέγιστο μέτρο ελαστικότητας (μέτρο Young), G_{dyn} : δυναμικό μέτρο διάτμησης, E_{dyn} : δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, $DT(=\zeta)$: ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης



Σχήμα 3. Καμπύλες G-γ-D συμβατικού επιχώματος (E1) και επιχωμάτων με μίγματα ελαστικού-άμμου (E2, E3) για βαθμό συμπίκνωσης $D_r = 100\%$ και $\sigma_3 = 100$ kPa.

Η τεχνική βελτίωσης με μίγματα ελαστικών - άμμου, εκτός από τη σύσταση του μίγματος, διερευνήθηκε επιπλέον ως προς το μήκος εφαρμογής, προκειμένου να διαπιστωθεί πιθανό ωφέλιμο εύρος διακύμανσης του μήκους βελτίωσης, εφόσον σχετίζεται και με την οικονομικότητα της προτεινόμενης λύσης. Θεωρήθηκαν δυο περιπτώσεις μήκους:

- ίσο με το διπλάσιο του ύψους του ακροβάθρου, $L_1 = 17$ m, και
- ίσο με το ήμισυ το πλάτους του αριθμητικού προσομοιώματος, $L_2 = 125$ m.

Η τεχνική βελτίωσης με τη χρήση συμπιεστών ενθεμάτων ανακυκλωμένων ελαστικών (Σχήμα 1β) εφαρμόστηκε στο συμβατικό επίχωμα E1 και διερευνήθηκαν πάχη ενθέματος 100 mm, 200 mm και 300 mm. Ο σχεδιασμός των συμπιεστών ενθεμάτων που ελέγχθησαν πραγματοποιήθηκε στο Laboratory of Strength of Materials, University of Surrey. Κατά τη διερεύνηση των ιδιοτήτων των ενθεμάτων εξετάστηκαν επιπλέον ως παράμετροι το μέτρο ελαστικότητας και ο δείκτης Poisson. Διενεργήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για την επιρροή του δείκτη Poisson, ν , του ενθέματος και εξετάστηκαν οι εξής τιμές του δείκτη: 0.40, 0.45 και 0.49. Φαίνεται ότι η συμπεριφορά των ενθεμάτων υπό δυναμική φόρτιση δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη μεταβολή της τιμής του δείκτη ν (Georgiadis, 2014). Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για συμπιεστό ένθεμα με δείκτη Poisson ίσο με $\nu = 0.49$, μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E = 56.9$ kPa και πάχος ίσο με $t_{CI} = 300$ mm.

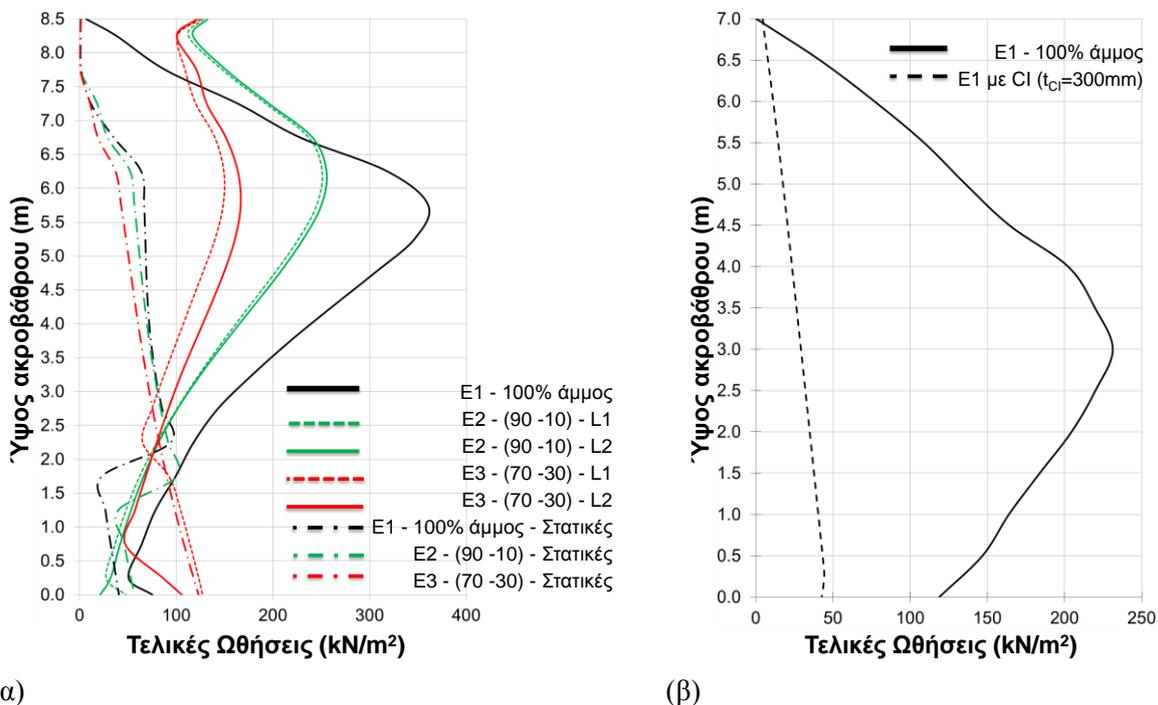
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις αφορούν σε μεγέθη απόκρισης του συστήματος ακροβάθρου - μεταβατικού επιχώματος σε όρους ωθήσεων, καθιζήσεων και παραμορφώσεων του ακροβάθρου υπό σεισμική δράση.

4.1 Παραμένουσες ωθήσεις επιχώματος επί του ακροβάθρου

Σημειώνεται σημαντική μείωση των ωθήσεων επί του ακροβάθρου με τη χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών έναντι εφαρμογής του συμβατικού επιχώματος. Στο Σχήμα 4α παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ωθήσεις για στατικά φορτία (ίδιο βάρος και δυνάμεις τριβής)

και οι τελικές ολικές ωθήσεις (λόγω στατικής και σεισμικής φόρτισης) στο συμβατικό (E1) και τα βελτιωμένα επιχώματα (E2, E3). Στο Σχήμα 4β παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τελικές ολικές ωθήσεις για χρήση συμπιεστού ενθέματος μεταξύ ακροβάθρου και μεταβατικού επιχώματος. Παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση στις ωθήσεις που αναπτύσσονται στο συμβατικό επίχωμα (καμπύλες χρώματος μαύρου, Σχήμα 4α) με τη χρήση μεγαλύτερου ποσοστού ελαστικού κλάσματος στο βελτιωμένο μίγμα (καμπύλες χρώματος πράσινου και κόκκινου, Σχήμα 4α). Η επιρροή του μήκους βελτίωσης στο μέγεθος των ωθήσεων καθ' ύψος του ακροβάθρου εμφανίζεται μικρή. Επομένως, η βελτίωση του επιχώματος έως μήκος ίσο με το διπλάσιο του ύψους του ακροβάθρου κρίνεται επαρκής. Ειδικότερα, η επιτυγχανόμενη μείωση των ωθήσεων για 30% κατά βάρος ελαστικού κλάσματος σε μήκος εφαρμογής 17 m στο επίχωμα πρόσβασης είναι της τάξης του 50% (Σχήμα 4α). Στην περίπτωση χρήσης συμπιεστού ενθέματος πάχους 300 mm πίσω από το ακρόβαθρο, εκτός από μείωση του μεγέθους των ωθήσεων (της τάξης του 80%), επιτυγχάνεται και ομοιομορφοποίηση της κατανομής τους καθ' ύψος (Σχήμα 4β).

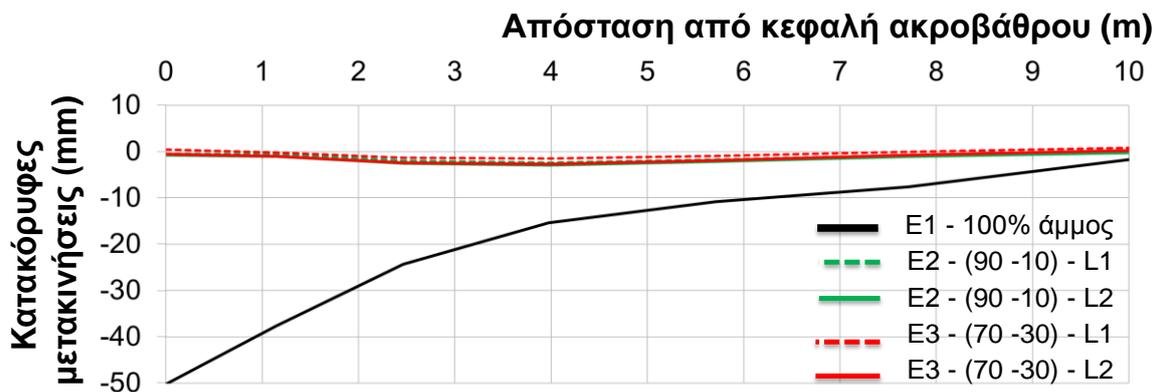


Σχήμα 4. (α) Αρχικές (για στατικά φορτία μόνο) και τελικές ωθήσεις για σεισμική δράση για το συμβατικό επίχωμα (E1) και τα βελτιωμένα επιχώματα (E2, E3), (β) τελικές ωθήσεις για σεισμική δράση χωρίς και με τη χρήση συμπιεστού ενθέματος.

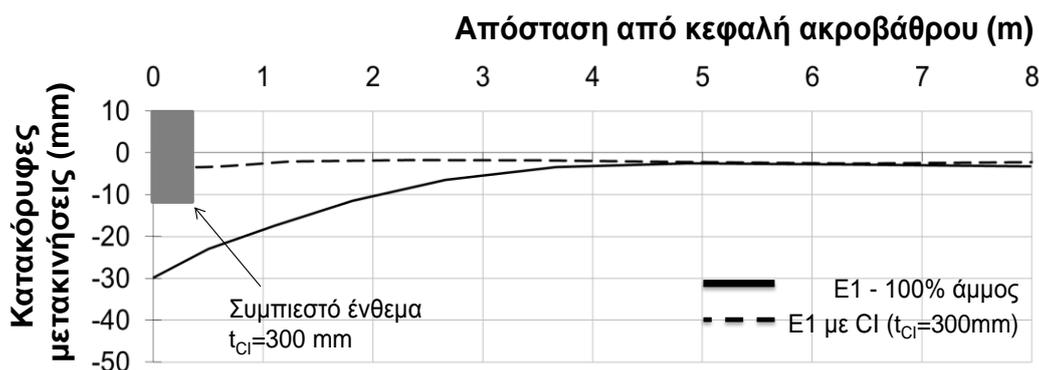
4.2 Καθιζήσεις ελεύθερης επιφάνειας του επιχώματος

Η εφαρμογή ελαστικών πίσω από το ακρόβαθρο, στην περιοχή πρόσβασης της γέφυρας, οδηγεί επίσης σε αξιοσημείωτη μείωση του μεγέθους των καθιζήσεων υπό σεισμική δράση. Στο Σχήμα 5α φαίνεται ενδεικτικά ότι με τη χρήση 30% κατά βάρος ελαστικού σε 17 m επιχώματος επέρχεται σχεδόν μηδενισμός των καθιζήσεων (μείωση της τάξης του 90% σε απόσταση 2 m από την κορυφή του ακροβάθρου). Το μήκος της ζώνης βελτίωσης έχει μικρή επιρροή στη μείωση των καθιζήσεων. Συνεπώς, κρίνεται επαρκής η εφαρμογή βελτιωμένων μιγμάτων έως μήκος ίσο με το διπλάσιο του ύψους του ακροβάθρου. Στο Σχήμα 5β παρουσιάζεται ενδεικτικά η αντίστοιχη επιτυγχανόμενη μείωση των καθιζήσεων στο μεταβατικό επίχωμα με τη χρήση συμπιεστού ενθέματος ανάμεσα σε αυτό και το ακρόβαθρο

για σεισμική φόρτιση (μείωση της τάξης του 90% σε απόσταση 2 m από την κορυφή του ακροβάθρου). Επομένως, με την εφαρμογή των προτεινόμενων λύσεων μπορεί να αποτραπεί η ροή του μη συνεκτικού εδαφικού υλικού επίχωσης στο κενό που δημιουργείται ανάμεσα στο ακρόβαθρο και το επίχωμα, λόγω καθιζήσεων του τελευταίου, το φαινόμενο γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως ratcheting. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή ελαστικών συμβάλει στη διευκόλυνση της κυκλοφορίας μέσω καταστολής του φαινομένου “bump-at-the-end-of-the-bridge”, κρίσιμο τόσο για την κατάσταση λειτουργίας της γέφυρας όσο και για την κυκλοφορία μετά από ένα σεισμικό γεγονός.



(α)



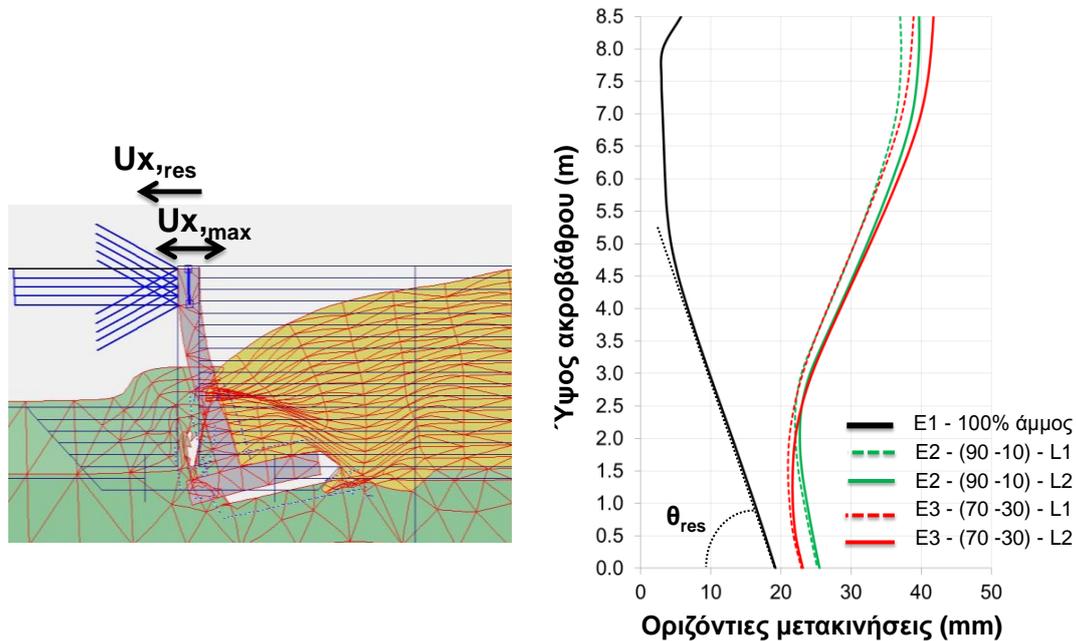
(β)

Σχήμα 5. Καθιζήσεις ελεύθερης επιφάνειας επίχωματος υπό σεισμική δράση (α) για το συμβατικό επίχωμα (E1) και τα βελτιωμένα επίχωματα (E2, E3), (β) χωρίς και με τη χρήση συμπιεστού ενθέματος.

4.3 Παραμορφώσεις ακροβάθρου

Τα βελτιωμένα επίχωματα τροποποιούν το πρόσημο των μόνιμων σχετικών μετακινήσεων του ακροβάθρου υπό δυναμικά φορτία. Με τη χρήση συμβατικού επίχωματος το ακρόβαθρο τείνει προς το κέντρο της γέφυρας απομακρυνόμενο από το επίχωμα, π.χ. στο τέλος ενός σεισμικού γεγονότος (καμπύλη χρώματος μαύρου, Σχήμα 6). Αντίθετα, με την εφαρμογή βελτιωμένων επιχωμάτων με μίγματα ελαστικών – άμμου το ακρόβαθρο τείνει να μετακινείται προς το επίχωμα (καμπύλες χρώματος πράσινου και κόκκινου, Σχήμα 6). Έτσι, παρεμποδίζεται το άνοιγμα κενού μεταξύ ακροβάθρου και επίχωματος και συνακόλουθα η πλήρωσή του με το κοκκώδες εδαφικό υλικό επίχωσης (φαινόμενο “ratcheting”). Το γεγονός αυτό αποτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων παθητικών ωθήσεων επί του ακροβάθρου με το χρόνο. Ταυτόχρονα, αναιρείται η όχληση της κυκλοφορίας στην πρόσβαση της γέφυρας

(φαινόμενο “bump-at-the-end-of-the-bridge”) και διευκολύνεται η ανεμπόδιστη λειτουργία της αμέσως μετά από έναν σεισμό.



Σχήμα 6. Σχήμα μόνιμης παραμόρφωσης ακροβάθρου υπό σεισμική δράση για το συμβατικό επίχωμα (E1) και τα βελτιωμένα επιχώματα (E2, E3).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών ως υλικού σε τεχνικά έργα έχει πολλαπλά οφέλη τόσο για την κατασκευή όσο και για το περιβάλλον. Η εφαρμογή τους στο σύστημα ακρόβαθρο - μεταβατικό επίχωμα, με τη μορφή μιγμάτων ελαστικού – άμμου και συμπιεστών ενθεμάτων, κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική. Η θετική επιρροή είναι περισσότερο εμφανής για μεγαλύτερο ποσοστό ελαστικού κλάσματος στο μίγμα και μεγαλύτερο πάχος συμπιεστού ενθέματος. Η βελτίωση του μεταβατικού επιχώματος έως μήκους ίσο με το διπλάσιο του ύψους του ακροβάθρου κρίνεται επαρκής και οικονομική. Η εφαρμογή συμπιεστών ενθεμάτων μεγάλου πάχους μεγιστοποιεί την αξιοποίηση ανακυκλωμένου ελαστικού. Με δεδομένες τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων ελαστικών, τα οφέλη που απορρέουν από τη χρήση τους συνοψίζονται στα παρακάτω:

- i. **Περιβάλλον:** μείωση των απορριμμάτων, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και γενικά της ανεξέλεγκτης εναπόθεσής τους σε φυσικούς χώρους, με ταυτόχρονη συντήρηση των φυσικών πόρων.
- ii. **Κατασκευή:** η κατασκευή συνεχών συστημάτων γεφυρών με βελτιωμένα επιχώματα συμβάλλει στον έλεγχο
 - του φαινομένου δυναμικής αλληλεπίδρασης ακροβάθρου – μεταβατικού επιχώματος που ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια του σεισμού,
 - των φαινομένων “ratcheting” και “bump-at-the-end-of-the-bridge” μέσω μείωσης των μόνιμων παραμορφώσεων του επιχώματος,
 - των αυξανόμενων με το χρόνο ωθήσεων επί του ακροβάθρου.

Εκτός από τα οφέλη έναντι σεισμικών δράσεων, η χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών στο μεταβατικό επίχωμα μονολιθικών γεφυρών συμβάλλει επίσης στην ανακούφισή τους από καταναγκασμούς λόγω ετήσιων θερμοκρασιακών μεταβολών.

- iii. **Οικονομία:** με τη συνδυασμένη χρήση βελτιωμένων επιχωμάτων ή και συμπιεστών ενθεμάτων σε συνεχή συστήματα γεφυρών επιτυγχάνεται μείωση του τελικού συνολικού κόστους κατασκευής, εξοικονόμηση δαπανών κατά τη λειτουργία του έργου (ελαχιστοποίηση εξόδων συντήρησης – επισκευής - αποκατάστασης), καθώς και επέκταση του οικονομικού χρόνου ζωής του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasiadis A., Senetakis K., Pitolakis K. (2012). Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 30, No.2, pp 363–382.
- Anastasiadis A., Senetakis K., Pitolakis K., Gargala C., Karakasi I. (2012). Dynamic behavior of sand/rubber mixtures. Part I: Effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio. *Journal of ASTM International*, Vol. 9. No.2, (available online at www.astm.org).
- Anastasiadis A., Pitolakis K., Senetakis K. (2009). Dynamic shear modulus and damping ratio curves of sand/rubber mixtures. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2009*, 2nd-3rd October 2009, Alexandria, Egypt.
- Edeskär T. (2006). Use of Tire Shreds in Civil Engineering Applications. Technical and Environmental Properties. Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology.
- Edeskär T. & Westerberg B. (2003). Tire shreds used in a road construction as a lightweight and frost insulation material. *Proceedings of the 5th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative materials 2003*, 4th–6th June 2003, San Sebastian, Spain, pp 293-302.
- EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1: general rules and rules for buildings. prEN 1992-1-1:2003E. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2003.
- EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN1998-1-2004: E, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- Eur-Lex, (1999), “EC Directive 1999/31”, Official Journal of the European Union, European Commission, Brussels.
- Georgiadis I. (2014). Novel compressible inclusions of tyre derived aggregates to improve the performance of integral abutment bridges. MsC Dissertation, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, UK.
- Heimdahl T. & Drescher A. (1999). Elastic anisotropy of tire shreds. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No.5, pp 383-389.
- Humphrey D. (2003). Civil engineering applications using tire derived aggregate (TDA). Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, Maine.
- Humphrey D. & Manion W. (1992). Properties of tire chips for lightweight fill. *Soil Improvement and Geosynthetics*, Vol. 2, pp 1344-1355.
- Mitoulis S., Argyroudis S., Pitolakis K. (2014). Green rubberised compressible inclusions to enhance the longevity of integral abutment bridges. *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology 2014*, 24th – 29th August 2014, Istanbul, Turkey.

- Mitoulis S.A., Tegos I.A. (2011). Two new earthquake resistant integral abutments for medium to long-span bridges. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol. 21, No.2, pp 157-161.
- PERSUADE Project (2010). State-of-the-art regarding poroelastic road surfaces. *European Commission – DG research, Directorate 1 – Environment, Deliverable D8.1*.
- PLAXIS 2D, (2008), Reference Manual, Version 8.
- Senetakis K., Anastasiadis A., Pitolakis K., Souli A. (2012). Dynamic behaviour of sand/rubber mixtures, Part II: Effect of rubber content on G/Go- γ -DT curves and volumetric threshold strain. *Journal of ASTM International*, Vol. 9, No.2, Paper ID JAI103711.
- Senetakis K. (2011). Dynamic properties of granular soils and mixtures of typical sands and gravels with recycled synthetic materials. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece (in Greek).
- Westerberg B. & Mácsik J. (2001). Geotechnical and environmental properties of tire shreds in civil engineering applications. *International Symposium-Recycling and Reuse of Used Tires*, Dundee, 2001.
- Yang S., Lohnes R., Kjartanson B. (2002). Mechanical properties of shredded tires. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No.1, pp 44-52.
- Παλαιοχωρινού Α. (2014). Σεισμική απόκριση συστήματος μονολιθικού ακροβάθρου γέφυρας-μεταβατικού επιχώματος και βελτίωση με χρήση μιγμάτων τυπικών χονδρόκοκκων εδαφών με ανακυκλωμένα ελαστικά στο επίχωμα. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ.
- Πιστόλας Α., Αναστασιάδης Α., Πιτιλάκης Κ. (2012). Μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων άμμου/κοκκοποιημένων ελαστικών υπό αστράγγιστες συνθήκες ανακυκλιζόμενης τριαξονικής φόρτισης. *Ημερίδα ETAM: Η αντισεισμική μηχανική μέσα από την επιστημονική ματιά νέων ερευνητών και μηχανικών 2012*, 10 Δεκεμβρίου 2012, Θεσσαλονίκη.
- Πιστόλας Α., Αναστασιάδης Α., Πιτιλάκης Κ. (2012). Παράμετροι αντοχής μιγμάτων άμμου / κοκκοποιημένων ελαστικών. *Ημερίδα ETAM: Η αντισεισμική μηχανική μέσα από την επιστημονική ματιά νέων ερευνητών και μηχανικών 2012*, 10 Δεκεμβρίου 2012, Θεσσαλονίκη.

Ανάπτυξη Αφροποιημένων Ελαφροβαρών Δομικών Υλικών

Γ.Μ. Τσαούση, Η. Ντούνη, Μ. Ταξιάρχου, Δ. Πάνιας

Εργαστήριο Μεταλλουργίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Λέξεις Κλειδιά: γεωπολυμερισμός, αφροποίηση, αφροποιητικά μέσα, πορώδη υλικά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα πορώδη δομικά υλικά αποτελούν μια ασφαλή, οικολογική και οικονομική λύση στον κατασκευαστικό κλάδο. Πλήθος βιομηχανικών παραπροϊόντων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πρώτη ύλη σε συνδυασμό με το κατάλληλο αφροποιητικό μέσο, προσφέροντας μιας νέας γενιάς θερμομονωτικά υλικά, μέσω της τεχνολογίας του γεωπολυμερισμού. Τα γεωπολυμερή, είναι υλικά που προκύπτουν από τη χημική αντίδραση μεταξύ αργιλοπυριτικών στερεών με αλκαλικά πυριτικά διαλύματα, υπό έντονα αλκαλικές συνθήκες. Η αφροποίηση του εκάστοτε γεωπολυμερούς συστήματος αποτελεί κομβικό σημείο στην κατασκευή των ελαφροβαρών δομικών υλικών, καθώς είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ελεγχόμενου πορώδους, στο οποίο οφείλεται το εύρος των ευεργετικών τους ιδιοτήτων. Ο βασικός μηχανισμός της αφροποίησης είναι η 'γένεση' αερίου, το οποίο δεσμεύεται από τη γεωπολυμερή μήτρα και αποκτά τη μορφή φυσαλίδων ή ανοιχτών πόρων. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί τόσο με φυσικό, όσο και με χημικό τρόπο. Οι φυσικές μέθοδοι αφροποίησης περιλαμβάνουν πεπιεσμένα αέρια (άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα) ή πτητικά υγρά για τη δημιουργία πόρων, ενώ οι χημικές μέθοδοι βασίζονται στην πραγματοποίηση συγκεκριμένης χημικής αντίδρασης. Τα χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι οργανικά παράγοντας μέσω εξώθερμης αντίδρασης αέριο άζωτο ή ανόργανα (όπως ανθρακικά άλατα παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα μέσω ενδόθερμης αντίδρασης ή σκόνη αλουμινίου και υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) παράγοντας αέριο υδρογόνο και αέριο οξυγόνο αντίστοιχα. Τα υλικά που προκύπτουν, εμφανίζουν χαμηλές τιμές πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας, παράγονται σε χαμηλές θερμοκρασίες και αποκτούν αυξημένες αντοχές σε υψηλές θερμοκρασίες.

Development of lightweight foamed building materials

G. M. Tsaousi, I. Douni, M. Taxiarchou, D. Paniais

Laboratory of Metallurgy, National Technical University of Athens

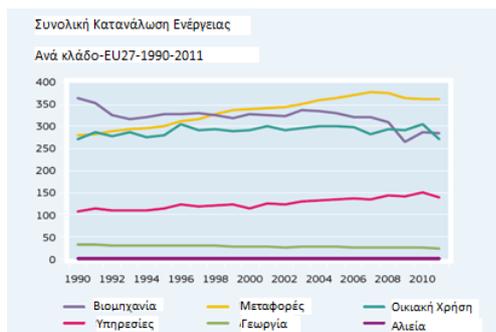
Key words: geopolymerization, foaming, blowing agents, cellular materials.

ABSTRACT: Cellular building materials are a safe, eco-friendly and low budget solution in the construction field. Huge amount of industrial wastes, combined to the ideal blowing agent can be used as raw material, giving a new type of insulating materials through the geopolymerization technology. Geopolymeric materials are produced from a chemical reaction between various alumino-silicate oxides and alkali metal silicate solutions, under highly alkaline conditions. Foaming process of any geopolymeric system is a crucial point in

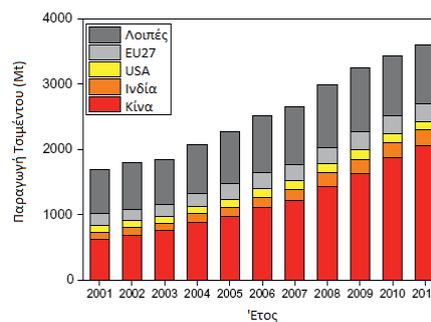
the construction of lightweight building materials, because is responsible for controlled porosity, in which is attributed a big range of important properties. The basic mechanism of foaming is to generate air, which is captured by the polymeric matrix in the form of individual bubbles or an interconnected series of voids. This happens either in a physical, or in a chemical way. Physical foaming methods include compressed gases or liquefied simple gases(nitrogen, carbon dioxide) volatile liquids for the cells formation, in contrast to chemical methods that are based on specific chemical reaction. Chemical reactants can be organic, producing nitrogen gas through exothermic reaction or inorganic(as carbon salts producing carbon dioxide endothermically, or Alumina Powder and hydrogen peroxide(H_2O_2) producing hydrogen and oxygen gas corespondingly. Final materials that come out have low apparent densities and thermal conductivity values, are produced at low temperatures and obtain high strengths for high temperatures.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα είκοσι τελευταία χρόνια, υψηλό ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας (250-300Mtoe) 27 κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποδίδεται στις απαιτήσεις των κτιρίων για θέρμανση, ψύξη και αερισμό (Σχήμα 1) (EU energy and transport, 2011). Ιδιαίτερα επιβαρυντικές προς το περιβάλλον είναι και οι εκπομπές CO₂ που προέρχονται από την παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου και δομικών υλικών (Σχήμα 2) η οποία από το 2001 έως το 2011 σημειώνει συνεχώς αυξανόμενη πορεία (Sinoma, 2010), (CEMBUREAU, 2012), (CCM-China Commodity Marketplace 2011). Η αναζήτηση λύσεων για μείωση και εν δυνάμει αποκατάσταση του προβλήματος οδηγεί στην ανάπτυξη νέων αφρώδων θερμομονωτικών υλικών για ελάττωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα κτίρια, καθώς επίσης και αντικατάσταση του τσιμέντου και των ήδη χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών στη βιομηχανική παραγωγή από αφρώδη υλικά. Η δημιουργία των υλικών αυτών βασίζεται στη διεργασία της αφοροποίησης μέσω φυσικών, χημικών και μηχανικών μεθόδων (Salamone, 1998). Στην περίπτωση της θερμομόνωσης των κτιρίων ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός αφοροποίησης και γεωπολυμερισμού, μια νέας οικονομικής και οικολογικής τεχνολογίας (Davidovits, 2005), η οποία μπορεί να μετατρέψει πλήθος άμορφων πυριτικών και αργιλοπυριτικών πρώτων υλών (Panias κ.α, 2007), σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας.



Σχήμα 1. Διάγραμμα καταναλώσεως ενέργειας 27 κρατών της Ε.Ε από το 1990 μέχρι το 2011 (Mtoe)



Σχήμα 2. Διάγραμμα παραγωγής τσιμέντου παγκοσμίως από το 2001 μέχρι το 2011 (Mt)

2 ΑΦΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

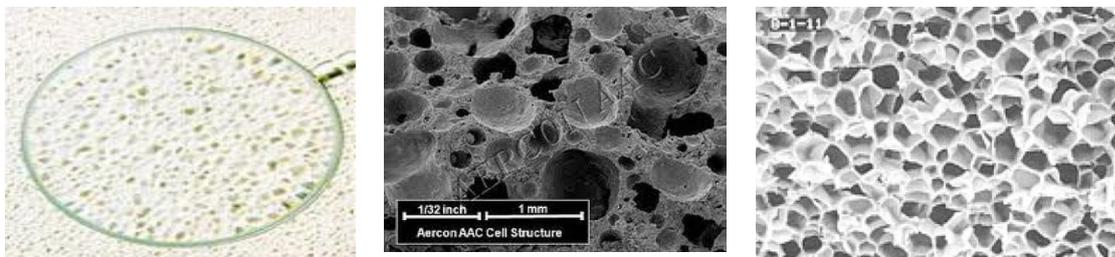
Η αφοροποίηση ενός πολυμερικού ή μη συστήματος αποτελεί κομβικό σημείο στην κατασκευή των ελαφροβαρών δομικών υλικών, καθώς είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ελεγχόμενου πορώδους, στο οποίο οφείλεται το εύρος των ευεργετικών τους ιδιοτήτων. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προκύψουν τα συμβατικά αφοροποιημένα υλικά και τα αφρώδη γεωπολυμερή. Τα συμβατικά χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες: το ελαφροβαρές σκυρόδεμα (aerated concrete), το κυψελωτό σκυρόδεμα παραγόμενο σε αυτόκλειστο (Autoclaved Aerated Concrete-AAC) και τα οργανικά θερμομονωτικά υλικά (εξηλασμένη πολυστερίνη-XPS, διογκωμένη πολυστερίνη-EPS και αφρός πολυουρεθάνης).

2.1 Ελαφροβαρές Σκυρόδεμα

Η σύνθεση του ελαφροβαρούς σκυροδέματος ξεκινά με την ανάμιξη των πρώτων υλών (τσιμέντο, αδρανή υλικά και νερό), με σκοπό τη δημιουργία πάστας. Αυτή η διεργασία πραγματοποιείται σε όχημα μεταφοράς εντός του οποίου είναι εγκατεστημένη ειδική

συσκευή ανάδευσης. Ταυτόχρονα σε μηχανήμα διόγκωσης παράγεται αφρός από ανάμιξη νερού, αεροποιητικού μέσου και εμφύσηση πεπιεσμένου αέρα. Τέλος ο αφρός προστίθεται στην πάστα που βρίσκεται μέσα στο όχημα και με αυτό τον τρόπο παράγεται το αεροποιημένο υλικό που ονομάζεται ελαφροβαρές σκυροδέμα.

Η διαδικασία παραγωγής του ελαφροβαρούς σκυροδέματος είναι αρκετά απλή καθώς οι πρώτες ύλες είναι αρκετά κοινές και ο εξοπλισμός περιορίζεται στο όχημα-μεταφορέα και έναν εξωθητή (extruder). Κάτι τέτοιο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα καθώς το ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας είναι χαμηλό επιβαρύνοντας όσο το δυνατό λιγότερο το περιβάλλον. Το παραγόμενο υλικό παρουσιάζει επίσης πολλά προτερήματα όσον αφορά στις ιδιότητές του, εμφανίζοντας τιμές φαινόμενης πυκνότητας που ξεκινούν μόλις από 200 kg/m^3 και φτάνουν έως και τα 1600 kg/m^3 , τιμές θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ $0,06$ έως $1,4 \text{ W/mK}$ και αντοχή σε θλίψη από 1 μέχρι 10 MPa . Μερικά επιπλέον θετικά χαρακτηριστικά του ελαφροβαρούς σκυροδέματος είναι το μειωμένο βάρος του, προκαλώντας μικρότερες απαιτήσεις στον οπλισμό των κτιρίων, η αντοχή του στη φωτιά, οι ιδανικές ρεολογικές του συνθήκες που το καθιστούν αξιόλογο πληρωτικό υλικό, η χαμηλή προσρόφηση νερού και το ελεγχόμενο και ομοιόμορφο πορώδες του (Σχήμα3Α) (<http://www.ecowall.eu>, <http://www.textrel.com>, <http://www.aerconaac.com>).



Α) Μικροδομή Ελαφροβαρούς Σκυροδέματος, Β) Κυψελωτού Αυτόκλειστου σκυροδέματος και Γ) Αφρωδών Οργανικών Θερμομονωτικών Υλικών.

Το ελαφροβαρές σκυροδέμα βρίσκει ήδη πολλές εφαρμογές, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι η χρήση του σε πάνελ τοίχων και οροφής σε μορφή pre-cast υλικού, η χρήση του σαν πληρωτικό υλικό ρωγμών και κενών χώρων για αποκατάσταση παλιών κτιρίων και η εφαρμογή σκυροδέματος in situ για χρήση του ως μονωτικό υπόστρωμα δαπέδων, οροφών κλπ.)

2.2 Κυψελωτό Σκυρόδεμα Παραγόμενο σε Αυτόκλειστο

Το κυψελωτό σκυρόδεμα παραγόμενο σε αυτόκλειστο αποτελεί μια αρκετά σύνθετη διεργασία. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι τσιμέντο, πυριτική άμμος, ιπτάμενη τέφρα, νερό, οξείδιο του ασβεστίου και σκόνη αλουμινίου σαν αεροποιητικό μέσο. Η διαδικασία παραγωγής ξεκινά με την ανάμιξη των πρώτων υλών και τη δημιουργία πολτού σε αναμικτήριο. Στη συνέχεια η πάστα που προκύπτει χυτεύεται σε ειδικά καλούπια, διογκώνεται και υφίσταται ωρίμανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για τρεις ώρες. Ακολουθεί μεταφορά του υλικού σε αυτόκλειστο για δώδεκα ώρες στους 180°C σε συνθήκες πίεσης μεταξύ 174 psi και 12 Bars . Το τελικό υλικό επικαλύπτεται με προστατευτικές επιστρώσεις (ειδικές βαφές) έτσι ώστε η εξωτερική του επιφάνεια να μην εκτίθεται σε αντίξοες συνθήκες που ενδεχομένως θα προκαλούσαν φθορές (<http://www.masoncontractors.org/2008/10/16/using-autoclaved-aerated-concrete>). Το Κυψελωτό Σκυρόδεμα παραγόμενο σε Αυτόκλειστο είναι ένα υλικό που εμφανίζει πολλά

πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι το ελεγχόμενο, κλειστό πορώδες που κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 1mm (Bonakdar κ.α, 2013) (Σχήμα 3B) του το οποίο με τη σειρά του είναι υπεύθυνο για τις πολύ καλές ιδιότητες του υλικού. Συγκεκριμένα, εμφανίζει χαμηλές τιμές φαινόμενης πυκνότητας από 300-800 kg/m³, πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα από 0,07-0,21 W/mK και πολύ καλή αντοχή σε θλίψη μεταξύ 1,3 και 8,5MPa. Επιπροσθέτως το κυψελωτό σκυρόδεμα σε αυτόκλειστο, ενδείκνυται για ηχομονωτικό υλικό σε κατασκευές καθώς και για πυροπροστατευτικό επίσης καθώς ανήκει στην κατηγορία πυριαντοχής A1. Παρ'όλο που η διαδικασία παραγωγής του είναι πολύπλοκη και πιο δαπανηρή από εκείνη του ελαφροβαρούς, το κόστος του υλικού είναι ιδιαίτερα χαμηλό λόγω της δυνατότητας που διαθέτει να ενσωματώνει υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στο εσωτερικό του. Οι εφαρμογές του κυψελωτού παραγόμενου σε αυτόκλειστο σκυροδέματος είναι η παροχή τους στις κατασκευές σε κυβόλιθους, σε πάνελ και σε δομικά υλικά με δυνατότητα ενσωμάτωσης καλωδίων.

2.3 Αφρώδη Οργανικά Θερμομονωτικά Υλικά

Τα πιο δημοφιλή οργανικά αφρώδη θερμομονωτικά υλικά είναι η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS), η διογκωμένη πολυστερίνη(EPS) (Σχήμα 3Γ) και ο αφρός πολυουρεθάνης. Η διαδικασία παραγωγής αυτών των υλικών είναι παραπλήσια ξεκινώντας με την τροφοδοσία των πρώτων υλών οι οποίες καταλήγουν σε έναν εξωθητή(extruder). Σε έναν δεύτερο εξωθητή γίνεται η διόγκωση των προσθετικών υλικών με τη βοήθεια αεροποιητικών μέσων. Το παραγόμενο υλικό στη συνέχεια μορφοποιείται και κόβεται στο τελικό στάδιο (<http://www.isover.com/Our-solutions/Insulation-materials/Polystyrene-insulation>). Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα των οργανικών θερμομονωτικών είναι η πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η οποία ειδικά στην περίπτωση του αφρού πολυουρεθάνης είναι βέλτιστη και ίση με 0,020W/mK. Ακολουθεί το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος των υλικών (-50 °C έως 120°C), το χαμηλό κόστος, η αντοχή στη διάχυση ατμών και στην απορρόφηση υγρασίας και οι συγκολλητικές ιδιότητες κυρίως στην περίπτωση του αφρού πολυουρεθάνης (Βάου, 2010), (Papadopoulos, 2005).

Σχετικά με τα μειονεκτήματα των εν λόγω υλικών, το πιο σημαντικό είναι η μικρή πυριαντοχή τους, η προσβολή τους από έντομα, τρωκτικά και χημικούς διαλύτες όπως η βενζίνη, η ευαισθησία στην ηλιακή ακτινοβολία και η ανεπαρκής χρήση τους για ηχομόνωση. Οι εφαρμογές των υλικών αυτών εστιάζονται κυρίως στην εσωτερική και εξωτερική μόνωση κτιρίων, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και σαν προσθετικά κονιαμάτων αλλά και σαν πληρωτικά χώρων σε χύμα διάθεση.

3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ο βασικός μηχανισμός της αφροποίησης είναι η 'γένεση' αερίου, το οποίο δεσμεύεται από την πολυμερή μήτρα και αποκτά τη μορφή μικρών ή μεγάλων πόρων (φουσαλίδες ή συνεχόμενοι ανοιχτοί πόροι). Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί είτε με φυσικό είτε με χημικό τρόπο, δημιουργώντας έτσι το πιο σημαντικό κομμάτι στην τεχνολογία των αφρώδων δομικών υλικών, το ελεγχόμενο πορώδες. Αυτό, γιατί το μέγεθος, το είδος και η διασπορά των πόρων καθορίζουν την πυκνότητα και τις αντοχές των δομικών υλικών. Οι πόροι μπορεί να είναι τριχοειδείς ή κυκλικοί και το μέγεθός τους ποικίλει από νανόμετρα έως χιλιοστά (Salamone, 1998).

3.1 Φυσικές Μέθοδοι Αφροποίησης

Κατά τις φυσικές μεθόδους αφροποίησης γεννιέται αέριο κυρίως σε πολυμερείς πάστες με φυσικό τρόπο μετατρέποντας την υγρή φάση σε αέρια χωρίς να αλλάζουν τη χημική της

σύσταση. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται φυσικά αφροποιητικά όπως πεπιεσμένα αέρια (άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα) ή υγρά με χαμηλό σημείο ζέσεως (υδρογονάνθρακες και χλωροφθοράνθρακες).

Στο παρελθόν η χρήση πεπιεσμένων αερίων στον τομέα της αφροποίησης είχε περιορισμένο εύρος εφαρμογών. Η χρήση τους προϋποθέτει την εμφύσησή τους σε πολτούς υπό ισχυρές συνθήκες πίεσης οι οποίες διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα προκαλώντας αφροποίηση μέσω εμφάνισης φυσαλίδων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της διεργασίας αυτής είναι το χαμηλό της κόστος έναντι της χημικής αφροποίησης στην οποία τα αφροποιητικά μέσα έχουν επιπλέον κόστος. Πολλές φορές όμως ο εξειδικευμένος εξοπλισμός που απαιτείται για τα υψηλά επίπεδα πίεσης καθιστά τη φυσική μέθοδο οικονομικά παραπλήσια με τη χημική.

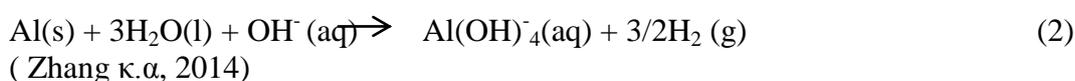
Τα πτητικά υγρά αποτελούν φυσική μέθοδο αφροποίησης και έχουν την ικανότητα να παράγουν υλικά όπως πολυστερίνη και πολυολεφίνη με πολύ χαμηλές πυκνότητες. Αυτοί οι αφροί χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον κατασκευαστικό κλάδο και στις βιομηχανίες συσκευασίας τροφίμων εξαιτίας των θερμομονωτικών τους ιδιοτήτων. Η παραγωγή των ελαφρών αυτών αφρών περιλαμβάνει δυο μηχανές εξώθησης. Στην πρώτη, επιτυγχάνονται οι κατάλληλες συνθήκες ροής της πάστας και η πλήρης ομογενοποίησή της με το αφροποιητικό μέσο. Στη δεύτερη, το μίγμα ψύχεται μέχρι να αποκτήσει ιδανικό ιξώδες για τη διαδικασία αφροποίησης (Salamone, 1998).

3.2 Χημικές Μέθοδοι Αφροποίησης

Οι χημικές μέθοδοι αφροποίησης απαιτούν την παρουσία αφροποιητικών μέσων καθώς η γένεση αερίου γίνεται μέσω συγκεκριμένων χημικών αντιδράσεων. Έτσι λοιπόν το αφροποιητικό μέσο διασπάται μέσω ενδόθερμης αντίδρασης, κατά την προσθήκη του στην πάστα, παράγοντας αέριο. Τα χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα. Την περασμένη δεκαετία χρησιμοποιήθηκε μια εντυπωσιακά μεγάλη ποικιλία χημικών αφροποιητικών από τα οποία ξεχώρισαν κάποια που πληρούν τα εξής κριτήρια: 1) Παραγωγή αξιόλογης ποσότητας αερίου για συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, 2) Σταθερότητα αερίου στη πολυμερή μήτρα, 3) Απουσία τοξικότητας, οσμής, χρώματος και περιβαλλοντικού αποτυπώματος 4) Απουσία δυσμενών αλληλεπιδράσεων με το πολυμερές 5) Ισορροπία κόστους-απόδοσης. Τα συνηθέστερα λοιπόν χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αφροποίησης είναι: Τα αζωδικαρθοναμίδια, τα σουλφονυλο-υδραζίδια, οι ενώσεις αζώτου, τα ημικαρθαζίδια, τα τετραζόλια, τα όξινα ανθρακικά άλατα καθώς και μίγματα ανθρακικών και όξινων ανθρακικών αλάτων με οργανικά οξέα. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι ένα ευρέως διαδεδομένο μέσο χημικής αφροποίησης το οποίο είναι θερμοδυναμικά ασταθές. Επομένως η διάσπασή του στο νερό γίνεται εύκολα, παράγοντας αέριο οξυγόνο μέσω του οποίου αφροποιείται η πολυμερής πάστα. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η εξής (Vaou & Panias, 2010):



Η σκόνη αλουμινίου είναι ένα επίσης δημοφιλές αφροποιητικό μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για την αφροποίηση υλικών μέσω της απελευθέρωσης αερίου υδρογόνου κατά την αντίδρασή του με το νερό:



Τρίτον η silica fume χρησιμοποιείται εξίσου με τα προηγούμενα μέσα αφοροποίησης παράγοντας αέριο υδρογόνο κατά την αντίδραση του πυριτίου με το νερό:

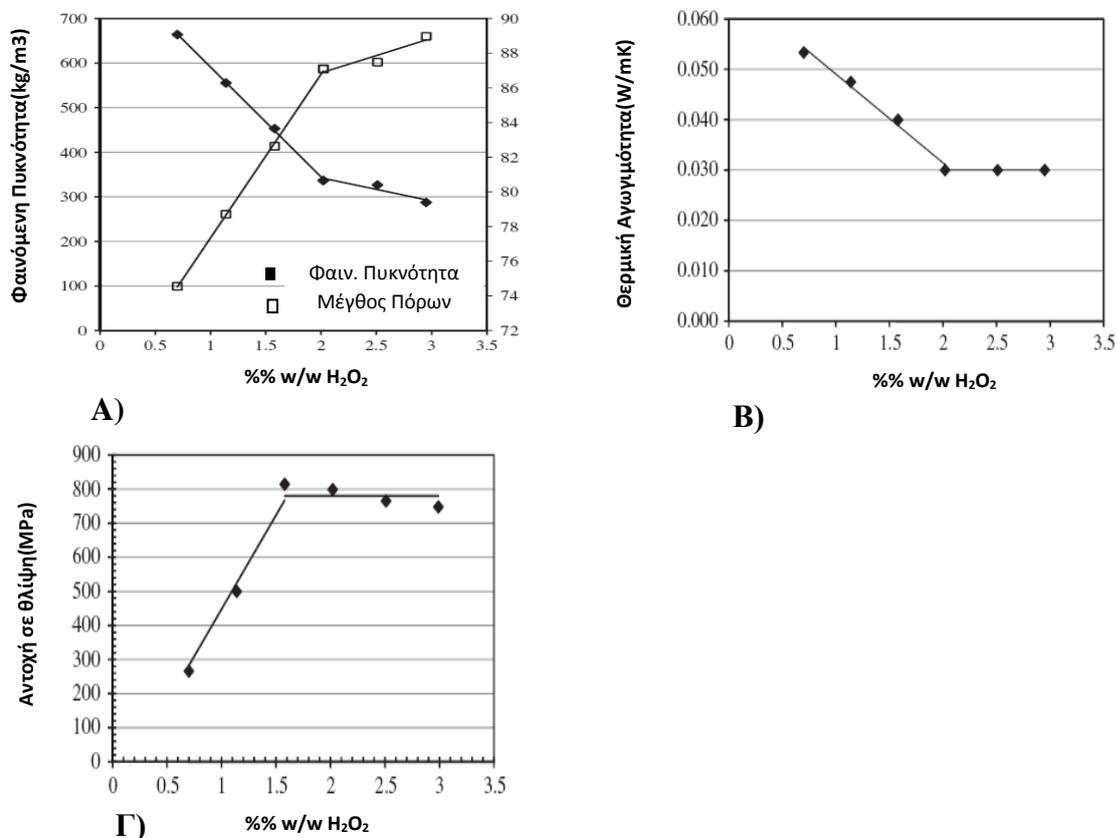


3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΦΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Ο σχηματισμός των γεωπολυμερών υλικών είναι το αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης, ετερογενούς χημικής διεργασίας που λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε ένα αργιλοπυριτικό στερεό και σε ένα ισχυρά αλκαλικό πυριτικό διάλυμα και διεξάγεται κάτω από ήπιες ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία μικρότερη των 100°C και ατμοσφαιρική πίεση) (Phair & Van Deventer, 2001).

Κατά την παραγωγή αφοροποιημένων γεωπολυμερών αρχικά γίνεται η σύνθεση της γεωπολυμερούς πάστας μέσω ανάμιξης αργιλοπυριτικών ορυκτών και αλκαλικού διαλύματος. Σε αυτό το μίγμα προστίθεται το εκάστοτε χημικό αφοροποιητικό και ακολουθεί επιπλέον ανάμιξη. Η αφοροποιημένη πάστα χυτεύεται σε καλούπια συγκεκριμένων διαστάσεων και τοποθετείται σε κλίβανο για ωρίμανση υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας.

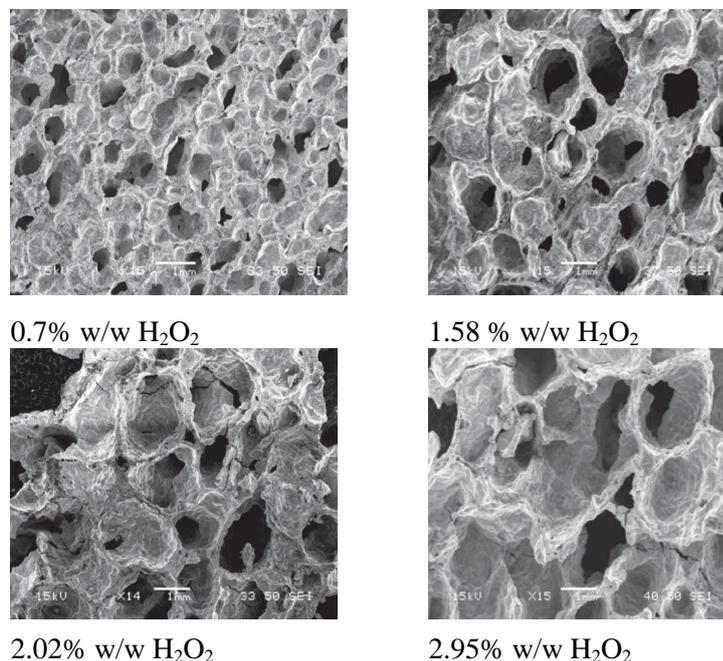
Τα αφρώδη γεωπολυμερή με υπεροξείδιο του υδρογόνου παράγονται απο απόρριμμα υπέρλεπτου περλίτη, διάλυμα καυστικού νατρίου συγκέντρωσης 8M και υπεροξείδιο του υδρογόνου(30%κ.β). Ο λόγος στερεών προς υγρά είναι 1,2g/ml και οι συνθήκες ωρίμανσης της πάστας 2 ώρες στους 35 και 24 ώρες στους 65. Η περιεκτικότητα του πολτού σε υπεροξείδιο κυμαίνεται από 0.62 έως 2.51% κ.β. (Vaou & Panias, 2010).



Σχήμα 5. Α) Διάγραμμα περιεκτικότητας H₂O₂% συναρτήσει φαινόμενης πυκνότητας και %όγκου πόρων, Β) Θερμικής αγωγιμότητας και Γ) Αντοχής σε θλίψη του υλικού.

Παρατηρώντας την επίδραση της προσθήκης υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) (Σχήμα 5A) στη φαινόμενη πυκνότητα του παραγόμενου υλικού φαίνεται ότι η αύξηση του H_2O_2 προκαλεί μείωση της φαινόμενης πυκνότητας ($680-320 \text{ kg/m}^3$) αρχικά ενώ στη συνέχεια παρατηρείται πως η μεγάλη αύξηση του H_2O_2 προκαλεί πολύ μικρή μείωση της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού ($320-290 \text{ kg/m}^3$). Όσον αφορά στην επίδραση (Σχήμα 5A) της προσθήκης υπεροξειδίου H_2O_2 στον % όγκο πόρων του υλικού φαίνεται ότι η αύξηση του πορώδους σε σχέση με την αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου H_2O_2 είναι σχεδόν αναλογική (74.5-87%) αρχικά και στη συνέχεια πλησιάζει στη σταθεροποίηση λαμβάνοντας τιμές μεταξύ 87 και 89% του συνολικού όγκου του κάθε δοκιμίου. Η θερμική αγωγιμότητα (Σχήμα 5B) ακολουθεί τη συμπεριφορά της φαινόμενης πυκνότητας καθώς μειώνεται σταδιακά από $0,053 \text{ W/mK}$ σε $0,03 \text{ W/mK}$ για τιμές H_2O_2 μεταξύ 0,7% και 2,02%. Περαιτέρω αύξηση του H_2O_2 στη γεωπολυμερή πάστα δεν παρουσιάζει αξιόλογη επίδραση στη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Η αντοχή σε θλίψη (Σχήμα 5Γ) των αφρωδών υλικών που παρήχθησαν κυμαίνεται μεταξύ 250-780KPa. Η αύξηση της περιεκτικότητας υπεροξειδίου αρχικά προκαλεί αύξηση της αντοχής των δοκιμίων και από ένα σημείο και μετά δεν παρουσιάζει αξιόλογη επίδραση εξαιτίας του ατελούς γεωπολυμερισμού που προκλήθηκε από σχηματισμό δικτύου μικρών και κλειστών πόρων εμποδίζοντας την εξάτμιση του νερού κατά την ωρίμανση του υλικού.

Παρατηρώντας τη μικροδομή των αφρωδών υλικών φαίνεται ότι οι πόροι που σχηματίζονται είναι κλειστοί και σφαιρικοί για χαμηλές περιεκτικότητες υπεροξειδίου. Όταν το ποσοστό του υπεροξειδίου αυξάνεται στην πάστα, οι πόροι αποκτούν οβάλ σχήμα και δημιουργούν δίκτυο συνδεδεμένων πόρων (Σχήμα 6). Τέλος, τα παραγόμενα υλικά εμφανίζουν ιδιαίτερη αντοχή στη φωτιά με κατάταξη στην καλύτερη κατηγορία πυριαντοχής A1.

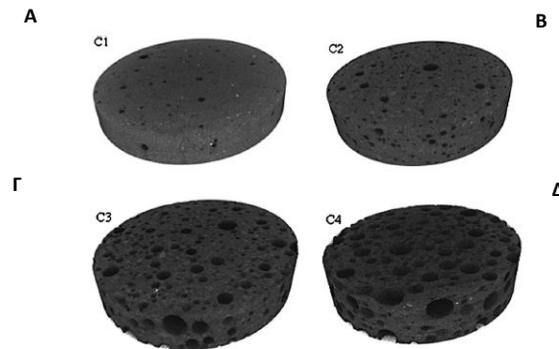


Σχήμα 6. Μικροδομή αφροποιημένων γεωπολυμερών με σταδιακά αυξανόμενο % H_2O_2 (0.7%, 1.58%, 2.02% και 2.95%)

Η σκόνη αλουμινίου αποτελεί ένα επίσης αφροποιητικό μέσο που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη γεωπολυμερών αφρών. Οι πρώτες ύλες περιλαμβάνουν μετακαολίνη, αλκαλικό διάλυμα, αδρανή υλικά (σκωρία ή ιπτάμενη τέφρα) με λόγο υγρών: στερεά 0,6 και προσθήκη

σκόνης αλουμινίου από 0-20mg ανά 100ml του activator δίνοντας πορώδες (λόγω της παραγωγής αερίου υδρογόνου)30-70%(Kamsu κ.α, 2012).

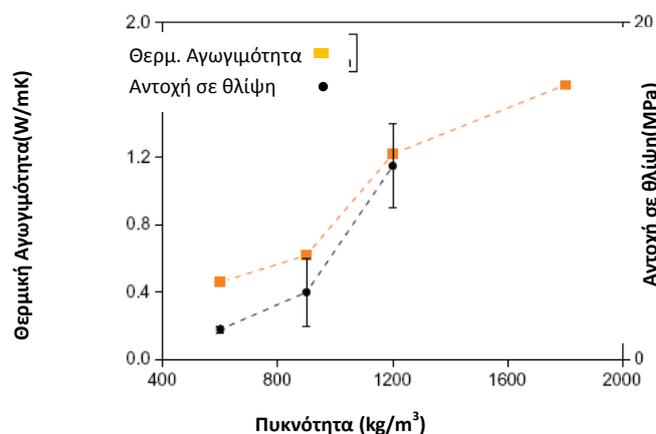
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 7) απεικονίζονται τέτοιου τύπου αφροί με λόγο Si/Al μεγαλύτερο από 1.79 για σχηματισμό ομοιόμορφων πόρων. Απεικονίζεται σταδιακά η επίδραση της ποσότητας της σκόνης αλουμινίου στο πορώδες του υλικού, καθώς προστίθενται 5, 10, 15 και 20 mg αφοροποιητικού σε 100 ml διαλύματος. Παρατηρείται πως η αύξηση του αφοροποιητικού προκαλεί και αύξηση του πορώδους. Η διαδικασία ωρίμανσης πραγματοποιείται σε συνθήκες περιβάλλοντος.



Σχήμα 7. Αφρώδη γεωπολυμερή με διαφορετικές περιεκτικότητες σκόνης αλουμινίου: A=5, B=10, Γ=15 και Δ=20 mg σκόνης αλουμινίου.

Οι περιεκτικότητες στον Σχήματος 7 αντιστοιχούν σε 100 mL αλκαλικού διαλύματος με λόγο Si/Al 2. Το Δ δίνει 70 vol.% πορώδες και έχει διάμετρο κυλίνδρου 18.85 mm. Η ωρίμανση έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος(Kamsu κ.α, 2012).

Το αφρώδες γεωπολυμερές σκυρόδεμα έχει πολλά πλεονεκτήματα ξεκινώντας από τη χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα ($600-1200 \text{ kg/m}^3$), την καλή θερμική αγωγιμότητα 0,4-1,6 W/mK δεδομένου ότι είναι υψηλή γιατί δεν μετρήθηκε επί ξηρού και την αντοχή σε θλίψη που κυμαίνεται μεταξύ 1,3 και 14,5 MPa. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 8), η αύξηση της πυκνότητας προκαλεί αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και της αντοχής του υλικού. Τέλος έχει παρατηρηθεί πως η αντικατάσταση του μετακαολίνης από τέφρα σε ποσοστό 25% βελτιώνει κατά πολύ τις αντοχές του υλικού σε αντίθεση με τη σκωρία που έχει αρνητική επίδραση.

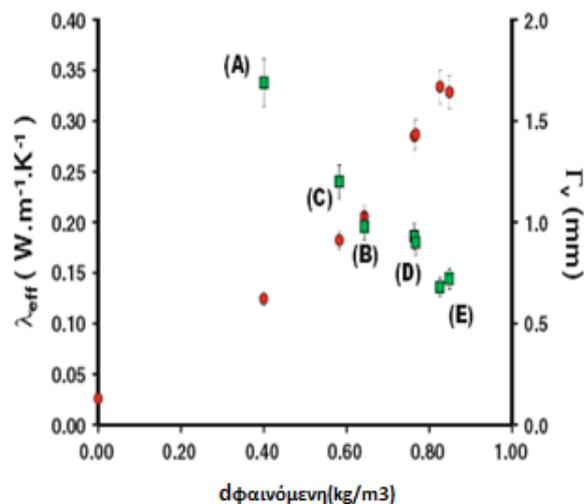


Σχήμα 8. Διάγραμμα πυκνότητας αφρωσών υλικών με σκόνη αλουμινίου συναρτήσει θερμικής αγωγιμότητας και αντοχής σε θλίψη του υλικού

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η in situ αφοροποίηση γεωπολυμερών προσθέτοντας Silica Fume στην πάστα με αποτέλεσμα την απελευθέρωση αερίου.(Prud'homme & Michaud, 2010).

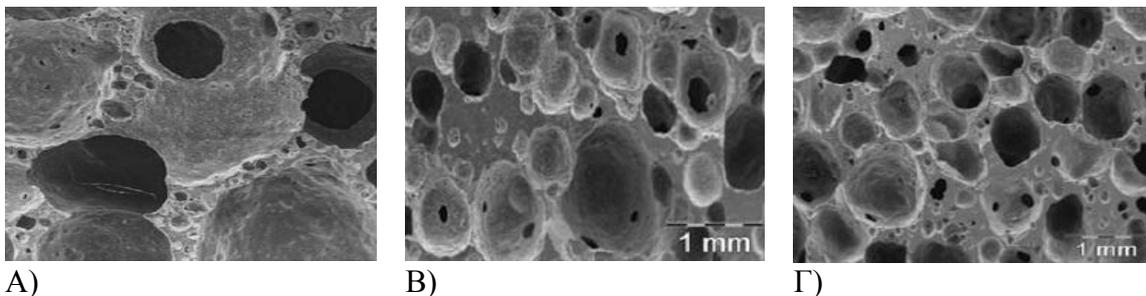
Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε αυτή την πειραματική διαδικασία είναι KOH (11% κ.β), διάλυμα πυριτικού καλίου 51% κ.β, μετακαολίνης 20% κ.β και Silica Fume 18% κ.β. Αρχικά αναμιγνύεται το καυστικό κάλιο με το διάλυμα πυριτικού καλίου και ο μετακαολίνης με τη Silica Fume. Μέσω της ανάμιξης δημιουργείται ο γεωπολυμερής πολτός, ο οποίος χυτεύεται σε ανοιχτά καλούπια και ακολουθεί ωρίμανσή του σε δυο διαφορετικές συνθήκες. Πρώτον από 0-2 ώρες στους 25-75 και δεύτερον από 7-20 ημέρες στους 25-70.

Τα παραγόμενα υλικά παρουσιάζουν χαμηλές τιμές φαινόμενης πυκνότητας $400-850\text{kg/m}^3$ και αρκετά χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας ($0,12-0,33\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) (Σχήμα 9). Είναι εμφανές, ότι η αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας αυξάνει σταδιακά τη θερμική αγωγιμότητα και μειώνει το μέγεθος των πόρων η διάμετρος των οποίων κυμαίνεται μεταξύ $1,65-0,65\text{ mm}$. Βάσει μετρήσεων αντοχής του υλικού σε θλίψη οι τιμές προσεγγίζουν κατά μέσο όρο το 1 MPa.



Σχήμα 9. Διάγραμμα πυκνότητας αφρώδων υλικών με Silica Fume συναρτήσεως θερμικής αγωγιμότητας και μέσης διαμέτρου πόρων του υλικού

Ακολουθεί η απεικόνιση της μικροδομής του υλικού μέσω φωτογραφιών από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Σχήμα 10) στις οποίες φαίνεται η επίδραση τριών διαφορετικών συνθηκών ωρίμανσης στο πορώδες του υλικού. Στους 70°C (Σχήμα 10. A) οι πόροι είναι αρκετά μεγάλοι και όχι ιδιαίτερα ομοιόμορφοι, ενώ στους 50°C (Σχήμα 10. B) το μέγεθός τους μειώνεται και σχηματίζουν ένα ομοιόμορφο κλειστό δίκτυο. Ο συνδυασμός 70°C και 50°C (Σχήμα 10. Γ) δίνει το καλύτερο και το πιο ελεγχόμενο πορώδες με ακόμα μικρότερους και πιο ομοιόμορφους πόρους (Henon κ.α, 2012).

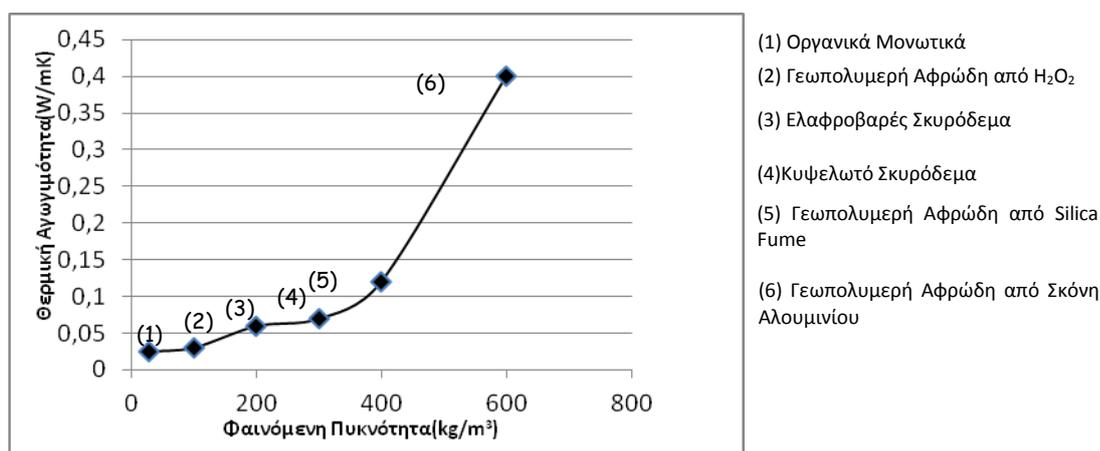


Σχήμα 10. Μικροδομή αφρώδων γεωπολυμερών από Silica Fume σε τρεις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) παρατίθενται οι σημαντικότερες ιδιότητες τόσο των συμβατικών όσο και των γεωπολυμερών αφρώδων υλικών με σκοπό τη μεταξύ τους σύγκριση και τη δυνατότητα διεξαγωγής τελικών συμπερασμάτων. Μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα ($29-55 \text{ kg/m}^3$) και θερμική αγωγιμότητα ($0.024-0.039 \text{ W/mK}$) παρουσιάζουν τα οργανικά μονωτικά υλικά, ενώ ιδιαίτερα χαμηλή είναι και η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας ($0.03-0.06 \text{ W/mK}$) στην περίπτωση των αφρώδων γεωπολυμερών από υπεροξείδιο του υδρογόνου, όπως επιβεβαιώνεται και στο Σχήμα 11. Το μεγαλύτερο εύρος τιμών αντοχής σε θλίψη εμφανίζεται στα αφρώδη γεωπολυμερή από σκόνη αλουμινίου καθώς η μέγιστη τιμή προσεγγίζει τα $14,5 \text{ MPa}$.

Πίνακας 1. Συγκριτικός πίνακας συμβατικών και γεωπολυμερών αφρώδων υλικών

Υλικό	ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΑΦΡΩΔΗ		ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΦΡΩΔΗ			
	Οργανικά Μονωτικά	Ελαφροβαρές Σκυρόδεμα	Κυψελωτό Σκυρόδεμα	Αφρώδη (H_2O_2)	Αφρώδη (Al powder)	Αφρώδη (Silica Fume)
d(kg/m)	29-55	200-1600	300-800	100-650	600-1200	400-800
$\lambda(\text{W/m})$	0.024-0.039	0.06-1.4	0.07-0.21	0.03-0.06	0.4-1.6	0.12-0.33
Αντοχή θλίψης (MPa)	0.07-15	1-10	1.3-8.5	0.25-0.75	1.3-14.5	0.5-1.5



Σχήμα 11. Διάγραμμα φαινόμενης πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας συμβατικών και γεωπολυμερών αφρώδων υλικών

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός ενός εναλλακτικού μοντέλου παραγωγής δομικών υλικών με γνώμονα την αειφόρο ανάπτυξη αποτελεί ιδανική λύση για την εξισορρόπηση των βιομηχανικών απαιτήσεων με την προστασία των οικοσυστημάτων. Η τεχνολογία της αφοποίησης σε συνδυασμό με τον γεωπολυμερισμό μέσω της αξιοποίησης βιομηχανικών παραπρο όντων μπορεί να ανταποκριθεί σε αυτή την περιβαλλοντική πρόκληση. Προτεινόμενη λύση για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων είναι η χρήση γεωπολυμερών δομικών υλικών αφοποιημένων με H_2O_2 . Όσον αφορά στη θερμική αγωγιμότητα, το αφρώδες ανόργανο πολυμερές ανταγωνίζεται τα υπόλοιπα υλικά της κατηγορίας του (διογκωμένη και εξηλασμένη πολυστερίνη) καθώς έχει ισάξιο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα θερμομονωτικά ($\lambda=0.03 \text{ W/mK}$) οργανικά και μη. Η αντοχή του παραγόμενου υλικού σε θλίψη είναι επίσης ικανοποιητική αγγίζοντας τα 0.75 MPa για 2% παραμόρφωση. Επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατάταξή του στην καλύτερη κατηγορία πυριαντοχής A1 λόγω της ανόργανης φύσης του που το καθιστά πλήρως άκαυστο. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σημαντικό για την προστασία του περιβάλλοντος λόγω της αποφυγής

αέριων ρύπων που προκαλούνται κατά την ανάφλεξη των οργανικών θερμομονωτικών (Vaou & Panias, 2010).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βάου, Β. (2010). *Διπλωματική Εργασία, Αφρώδη Θερμομονωτικά Ανόργανα Πολυμερή Υλικά από Πέρλιτη*, Αθήνα.
- Bonakdar^a, A., Babbitt^b, F. & Mobasher^a. (2013). B., Physical and Mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC), ^aSchool of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University, Tempe, AZ, USA, ^bBabbit Nelson Engineering, LLC, Mesa, AZ, USA, pp 82-91
- CCM-China Commodity Marketplace, Policy of China cement industry in the first year of 12th Five Year Plan. <http://www.chinaccm.com/07/0720/072001/news/20110308/161130.asp>; 2011 [accessed 08.03.11].
- CEMBUREAU. The European Cement Association, key, Facts & Figures, <http://www.cembureau.eu/about-cement/key-facts-figures>; 2012 [accessed 09.04.13]
- Davidovits, J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly(sialate) terminology: A very useful and simple model for the promotion and understanding of green chemistry, *Proceedings of the world Congress Geopolymer*, Saint Quentin, France, pp 9-15
- A) http://www.ecowall.ecocrete.eu/EN_32_1.htm
- B) <http://www.textrel.com>
- Γ) <http://www.aerconaac.com>
- EU energy and transport, 2011
- Henon, J., Alzina A. & Absi J., (2012). Stanley Smith D & Rossignol S., Potassium Geopolymer foams made with silica fume pore forming agent for thermal insulation, Groupe d'Etude des Materiaux Heterogenes, Centre Europeen de la Ceramique, 12, rue atlantis, 87068 Limoges cedex, France.
- <http://www.isover.com/Our-solutions/Insulation-materials/Polystyrene-insulation>
- Kamseu, E., Nait-Ali B., Bignozzi MC., Leonelli C., Rossignol S & Smith DS. (2012). Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements, *J Eur. Ceram Soc.* 32(8):1593-603
- <http://www.masoncontractors.org/2008/10/16/using-autoclaved-aerated-concrete>
- Panias D., Giannopoulou I & Perraki T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash based geopolymers, *Colloids Surf, A: Physicochem. Eng. Aspects*, Laboratory of Metallurgy, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece, vol.301, No. 1-3, pp 246-254
- Papadopoulos, A.M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings* 37, 77-86.
- Phair, J.W & Van Deventer, J.S. (2001) Compositional Effects and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymers, Department of Chemical Engineering, University of Melbourne, Victoria, Australia.
- Prud'homme, E & Michaud, P. (2010). Silica fume as porogen agent in geo-materials at low temperature, *J Eur. Ceram Soc.* 30;1641-8.
- Salamone, J.C. (1998). *Concise Polymeric Materials Encyclopedia*, Brendan J Geelan, *Foaming Agents*, USA, Uniroyal Cemical Company, Incorporated, CRC Press
- Sinoma, China, National Development and Reform Commission: Cement production in 2010 increased by 15.5% <http://www.sinoma.cn/news/ShowArticle.asp:ArticleID=6595> [accessed 30.01.11].

Vaou, V & Papias, D. (2010). Thermal insulating foamy geopolymers from perlite, Laboratory of Metallurgy, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece, pp 1146-1151

Zhang, Z^a, Provis, J^b, Reid, A^c & Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, ^aCentre of Excellence in Engineered Fibre Composites(CEEFC), Faculty of Engineering and Surveying, Faculty of Health, Engineering and Science, University of Southern Queensland Toowoomba, Australia. B Department of Materials Science and Engineering, The University of Sheffield, Sir Robert Hadfield Building, Mappin St, Sheffield S1 3JD, United Kingdom, ^cHalok Engineering Co, Ltd. Brisbane, Australia, pp 113-127

Σεισμική απόκριση έργων αντιστήριξης με υλικό επίχωσης μειγμάτων μικρού ειδικού βάρους.

A. Τσινάρης, A. Αναστασιάδης, K. Πιτιλάκης

Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά: Κοκκοποιημένα ανακυκλωμένα ελαστικά, εφαρμογές γεωσυνθετικών υλικών, έργα αντιστήριξης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί ο προσδιορισμός των μηχανικών και δυναμικών ιδιοτήτων μειγμάτων ηφαιστειογενών υλικών με κοκκοποιημένα ελαστικά προερχόμενα από ανακύκλωση μεταχειρισμένων ελαστικών αυτοκινήτων, καθώς και η διερεύνηση του κατά πόσο η χρησιμοποίηση αυτών των «σύνθετων» υλικών ως υλικού επίχωσης μπορεί να έχει ευνοϊκά αποτελέσματα σε ότι αφορά στη σεισμική απόκριση έργων αντιστήριξης. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής φόρτισης, ενώ για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου διάτμησης (G_0), του λόγου απόσβεσης (DT_0) καθώς και της μεταβολής των καμπυλών G/G_0 - γ - DT πραγματοποιήθηκαν στρεπτικές δοκιμές στήλης συντονισμού. Στη συνέχεια, μέσα από μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων μελετήθηκε η σεισμική απόκριση ενός άκαμπτου – ακλόνητου τοίχου βαρύτητας και ενός κρηπιδότοιχου, με τη χρήση ως υλικού επίχωσης ενός χονδρόκοκκου ηφαιστειογενούς υλικού και η διαφοροποίηση της σεισμικής απόκρισης με την προσθήκη κοκκοποιημένων ελαστικών στη μάζα του αντιστηριζόμενου εδάφους.

Seismic response of retaining structures with backfill of mixtures of lightweight materials

A. Tsinaris, A. Anastasiadis, K.Pitilakis

Laboratory of Soil Mechanics, Foundation and Geotechnical Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, AUTH.

Keywords: Granulated recycled tires, applications of geosynthetic materials, retaining structures

ABSTRACT: The objective of this study is the laboratory investigation of the mechanical and dynamical properties of volcanic coarse materials with granulated rubber derived from recycled used tires, as well as the investigation of the potential beneficial effects by using these "synthetic" materials as backfill materials on the seismic response of retaining structures. A set of monotonic triaxial loading tests were performed in order to determine the strength parameters, while a set of torsional column tests were performed in order to determine the initial dynamic shear modulus (G_0), the initial damping ratio (DT_0) and the variation of G/G_0 - γ - DT curves. Finally, a series of numerical analysis were employed to study the seismic response of a rigid and fixed at the base gravity wall and a quay wall, where the embankment consists of a mixture of coarse volcanic material (pumice) with a percentage of granulated rubber (tires).

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πειραματικές έρευνες (Edil et al., 1994, Masad et al., 1996, Feng et al., 2000, Zornberg et al., 2004, Σενατάκης, 2011, Anastasiadis et al., 2012, Nakhaei et al., 2012, Τσινάρης, 2012, Senetakis et al., 2012, Πιστόλας, 2014a & 2014b και Τσινάρης, 2014a) έχουν καταδείξει ότι γεωυλικά μικρού ειδικού βάρους και υψηλής απόσβεσης όπως τα ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων, τα οποία αφού υποστούν κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε καθαρή μορφή είτε σε μείγματα με φυσικά τυπικά ή ηφαιστιογενή εδάφη καθώς παρουσιάζουν ικανοποιητικές φυσικές, μηχανικές και δυναμικές ιδιότητες (μικρό ειδικό βάρος, υψηλή αντοχή, υψηλή ελαστικότητα και παραμορφωσιμότητα, υψηλή αποσβεστική ικανότητα και μεγάλη διαπερατότητα). Οι παραπάνω ιδιότητες τα καθιστούν ελκυστικά τα τελευταία χρόνια σε πολλές εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού, κυρίως γεωτεχνικού ενδιαφέροντος, όπως σαν υλικό επίχωσης σε τεχνητά πρανή, επιχώματα και έργα οδοποιίας, σαν υλικό πλήρωσης έργων αντιστήριξης καθώς και σαν υλικό στρώσεων αποστράγγισης και σεισμικής μόνωσης κατασκευών (Humphrey et al., 1993, Lee et al., 1999, Edeskar, 2006, Τσινάρης, 2012, Hazarika et al., 2012, Ravichandran et al., 2014, και Τσινάρης, 2014b). Επιπλέον, η χρήση κοκκοποιημένων ελαστικών παρουσιάζει χαμηλό κόστος και ευκολία εφαρμογής στο πεδίο, ενώ η επαναχρησιμοποίηση μεταχειρισμένων ελαστικών έχει ευεργετικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, καθώς αξιοποιούνται μεγάλες ποσότητες μη ανακυκλώσιμων υλικών οι οποίες συσσωρεύονται σε χώρους απόθεσης.

Η παρούσα εργασία μελετά τις μηχανικές και δυναμικές ιδιότητες ενός ομοιομορφου κλάσματος κίσηρης καθώς και δύο μειγμάτων εδαφικού υλικού με κοκκοποιημένα ελαστικά σε δύο διαφορετικά ποσοστά ελαστικών κατά βάρος μείγματος (5% και 10%). Οι κυριότερες παράμετροι που εξετάζονται είναι η επιρροή του ποσοστού του ελαστικού στην εκτροπική τάση, στην αξονική παραμόρφωση και στις παραμέτρους αντοχής των μειγμάτων καθώς και η διαφοροποίηση του μέτρου διάτμησης και του ποσοστού απόσβεσης συναρτήσει του ποσοστού του ελαστικού στο μείγμα, του πλάτους παραμόρφωσης και του επιπέδου της μέσης περιβάλλουσας τάσης.

Για την εκτίμηση των μηχανικών και δυναμικών ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα η συσκευή μονοτονικής τριαξονικής δοκιμής Wykeham & Farrance και η συσκευή στήλης συντονισμού Long-Tor, η οποία είναι τύπου «πακτωμένου – ελεύθερου» άκρου και έχει τη δυνατότητα να υποβάλλει το δοκίμιο σε αξονική ή στρεπτική αρμονική ταλάντωση, που υπάρχουν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ.

Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση των "βελτιωμένων" υλικών σε τυπικά έργα αντιστήριξης με κύριο στόχο τη διερεύνηση της ευνοϊκής επιρροής των υλικών σε ότι αφορά τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού. Για το σκοπό αυτό μελετάται ένα απλοποιημένο προσομοίωμα άκαμπτου και ακλόνητου τοίχου αντιστήριξης και ενός κρηπιδότοιχου, μέσα από μια σειρά διδιάστατων (2D) ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων με τη χρήση ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης το οποίο παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού ως ισοδύναμου γραμμικού τύπου με υστερητικού τύπου απόσβεση.

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

2.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Για την πειραματική μελέτη των παραμέτρων αντοχής και της δυναμικής συμπεριφοράς σε μικρά ως μεσαία πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης ηφαιστειογενών εδαφών αλλά και μειγμάτων ηφαιστειογενών εδαφών με ελαστικά εξετάστηκαν τα εξής δείγματα : (i) ένα χονδρόκοκκο κλάσμα καθαρής κίσηρης (υαλώδης ρυόλιθος από την περιοχή της Νισύρου) διερχόμενο από το κόσκινο N^ο4 και συγκρατούμενο στο κόσκινο N^ο40 με κωδική ονομασία LWC2D3, (ii) ένα μείγμα κίσηρης με ελαστικό υλικό σε ποσοστό 5% κ.β. μείγματος με κωδική ονομασία LWC2D3-R2-95/5 και (iii) ένα μείγμα κίσηρης με ελαστικό υλικό σε ποσοστό 10% κ.β. μείγματος με κωδική ονομασία LWC2D3-R2-90/10.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της κοκκομετρίας, το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων καθώς και ο μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων του ηφαιστειογενούς και του συνθετικού (ελαστικού) υλικού.

Πίνακας 1. Φυσικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων υλικών.

Υλικό	Κωδική ονομασία	D ₅₀ (mm)	C _U	C _C	G _s (gr/cm ³)	e _{max}	e _{min}
Κίσηρη	LWC2D3	3.000	1.55	0.86	2.18	2.633	1.477
Ελαστικό	R2	1.553	1.78	0.97	1.10	1.398	0.637

2.2 Πρόγραμμα δοκιμών

Στην τριαξονική δοκιμή μελετήθηκαν εννιά (9) κορεσμένα δοκίμια διαστάσεων 5x10cm, εκ των οποίων τρία (3) κλάσματα καθαρής κίσηρης, τρία (3) μείγματα εδαφικού υλικού και κοκκοποιημένων ελαστικών με 5% ελαστικό κατά βάρος μείγματος και τρία (3) μείγματα εδαφικού υλικού και κοκκοποιημένων ελαστικών με 10% ελαστικό κατά βάρος μείγματος. Τα παραπάνω δοκίμια μελετήθηκαν σε τάσεις στερεοποίησης ίσες προς 100, 200 και 300 kPa.

Αντίστοιχα στη στήλη συντονισμού εξετάστηκαν τρία (3) κορεσμένα δοκίμια διαστάσεων 7x14cm, από τα οποία το ένα (1) ήταν κλάσμα καθαρής κίσηρης και τα άλλα δύο (2) μείγματα εδαφικού υλικού και κοκκοποιημένων ελαστικών με δύο διαφορετικά ποσοστά ελαστικών κατά βάρος μείγματος (5% και 10%). Τα δοκίμια μελετήθηκαν σε ένα εύρος τιμών μέσης ενεργού περιβάλλουσας τάσης από 25 ως 200 kPa.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μελετηθέντων δοκιμίων της τριαξονικής δοκιμή και της στήλης συντονισμού.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά δοκιμίων τριαξονικής δοκιμής και στήλης συντονισμού.

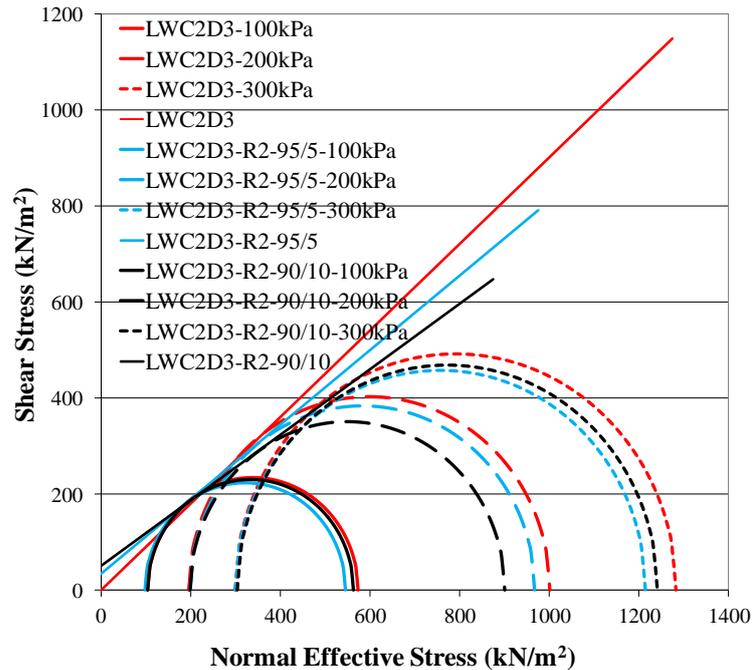
Κωδική ονομασία δοκιμίου	Δοκιμή	Ποσοστό ελαστικού κ.β. μείγματος (%)	G _s (gr/cm ³)	e	Dr (%)
LWC2D3	TRX	0	2.18	2.403	19.9
LWC2D3_R2_95_5	TRX	5	2.13	2.006	49.7
LWC2D3_R2_90_10	TRX	10	2.07	1.884	56.0
LWC2D3	RC	0	2.18	2.048	49.4
LWC2D3_R2_95_5	RC	5	2.13	1.923	57.1
LWC2D3_R2_90_10	RC	10	2.07	1.244	66.3

Σε όλες τις περιπτώσεις κρατήθηκε σταθερός ο βαθμός ενέργειας συμπύκνωσης των δοκιμίων ώστε να προκύψουν δοκίμια με ομοιόμορφο δείκτη πόρων αλλά και για να υπάρξει ομοιομορφία στον τρόπο παρασκευής των δοκιμίων.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στις παραμέτρους αντοχής των μειγμάτων

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύκλων του Mohr όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, με προσαρμογή της περιβάλλουσας αστοχίας στις κορυφαίες τιμές της εκτροπικής τάσης για διαφορετικές τιμές της ενεργού μέσης περιβάλλουσα τάση, σ'_m , (100 kPa, 200 kPa και 300 kPa).



Σχήμα 1. Διαγράμματα κύκλων του Mohr καθαρής κίσηρης και μειγμάτων κίσηρης με 5% και 10% κ.β. ελαστικών.

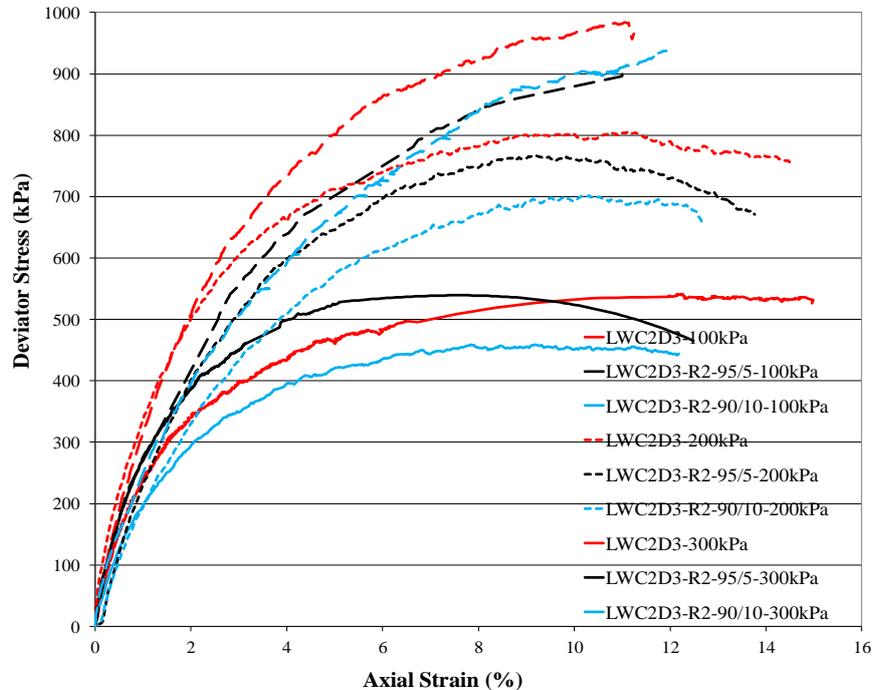
Παρατηρείται ότι με την προσθήκη ελαστικού στο μείγμα η γωνία τριβής μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση της συνοχής λόγω της παρουσίας των στερεών ελαστικών κόκκων στη μάζα του μείγματος. Στον Πίνακα 3 δίνονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι αντοχής των μελετηθέντων δοκιμίων της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 3. Παράμετροι αντοχής των μελετηθέντων δοκιμίων.

Κωδική ονομασία δοκιμίου	Ποσοστό ελαστικού κ.β. μείγματος (%)	$\varphi(^{\circ})$	$c(\text{kPa})$
LWC2D3	0	42	0
LWC2D3_R2_95_5	5	33	65
LWC2D3_R2_90_10	10	33	59

3.2 Επιρροή του ποσοστού σε ελαστικό στην εκτροπική τάση και στην αξονική παραμόρφωση των μειγμάτων

Στο Σχήμα 2 δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής της εκτροπικής τάσης, q , με την αξονική παραμόρφωση, ε_a , συναρτήσει του ποσοστού (%) σε ελαστικό για διάφορες τιμές της ενεργού μέσης περιβάλλουσας τάσης, σ'_m , (100 kPa, 200 kPa και 300 kPa).



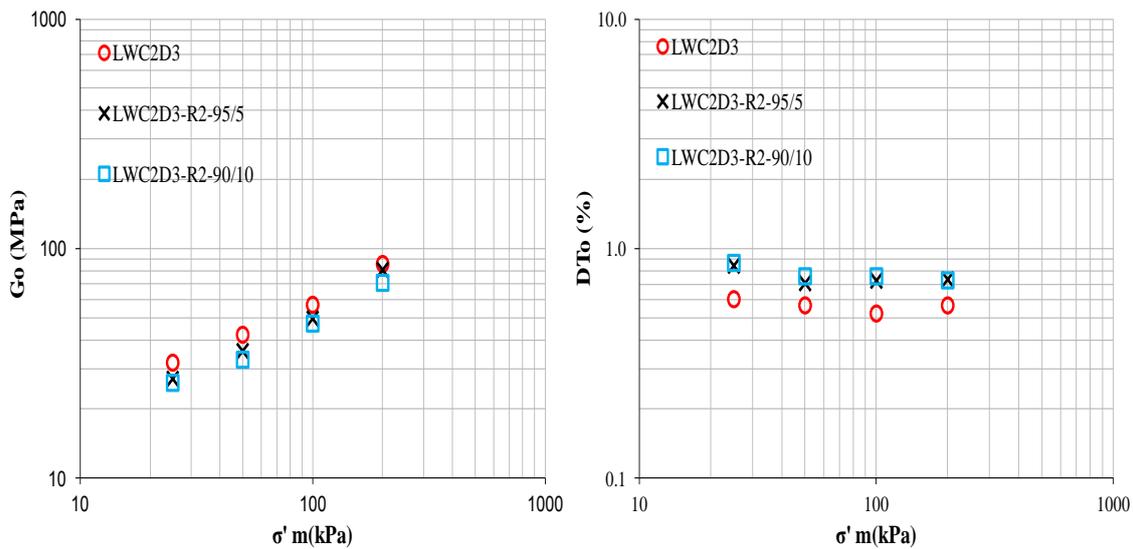
Σχήμα 2. Διαγράμματα εκτροπικής τάσης, q , με την αξονική παραμόρφωση, ε_a , συναρτήσει του ποσοστού σε ελαστικό για ενεργό μέση περιβάλλουσα τάση ίση με 100, 200 και 300 kPa.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη ελαστικού προκαλεί γενικά μείωση των κορυφαίων τιμών της εκτροπικής τάσης με ταυτόχρονη όμως μείωση της αντίστοιχης τιμής της αξονικής παραμόρφωσης καθώς οι ελαστικοί κόκκοι λόγω μικρότερης διαμέτρου καλύπτουν τα κενά μεταξύ των στερεών εδαφικών κόκκων δημιουργώντας πυκνότερα δοκίμια μεγαλύτερης δυσκαμψίας. Όμως, κατά την αύξηση του ποσοστού του ελαστικού από 5% σε 10% κ.β. μείγματος παρατηρείται ότι η αξονική παραμόρφωση αστοχίας παρουσιάζει μια σχετική αύξηση καθώς η συμπεριφορά του δοκιμίου αρχίζει να επηρεάζεται από την παρουσία του ελαστικού με αποτέλεσμα τη δημιουργία δοκιμίων δυνητικά μεγαλύτερης παραμορφωσιμότητας. Τέλος, παρατηρείται ότι η αύξηση της ενεργού μέσης περιβάλλουσας τάσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης εκτροπικής τάσης και τη αντίστοιχης παραμόρφωσης αστοχίας των δοκιμίων, ανεξαρτήτως του περιεχόμενου ποσοστού σε ελαστικό.

3.3 Δυναμικές ιδιότητες σε μικρά και μεγάλα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης

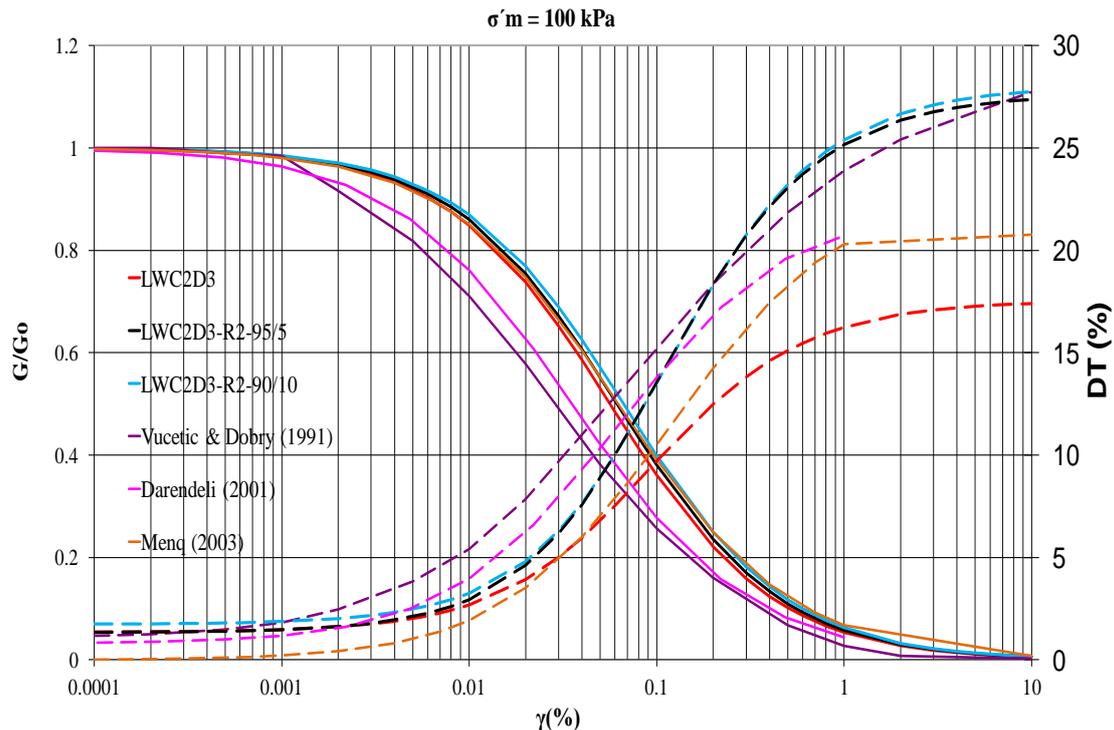
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέγιστου μέτρου διάτμησης, G_0 , και του ελάχιστου λόγου απόσβεσης, DT_0 , σε μικρά πλάτη παραμόρφωσης συναρτήσει της μέσης ενεργού περιβάλλουσας τάσης σ'_m , για διαφορετικά ποσοστά συνθετικού υλικού κ.β. μείγματος.

Γίνεται σαφές ότι η προσθήκη ελαστικού, ανεξαρτήτως της μέσης ενεργού περιβάλλουσας τάσης στο δοκίμιο, μειώνει το μέγιστο δυναμικό μέτρο διάτμησης G_0 , και αυξάνει το λόγο στρεπτικής απόσβεσης DT_0 , σε σχέση με τα δοκίμια καθαρής κίσηρης. Οι μεταβολές αυτές γίνονται εντονότερες με την αύξηση του ποσοστού του ελαστικού κατά βάρος μείγματος καθώς αυξάνεται και το ποσοστό του ελαστικού κατά όγκο μείγματος, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά του μείγματος να αρχίζει να επηρεάζεται από την ύπαρξη του ελαστικού κλάσματος.



Σχήμα 3. Διαγράμματα $\log G_0$ - $\log \sigma'_m$ και $\log DT_0$ - $\log \sigma'_m$ κορεσμένων δοκιμίων κίσηρης με μεταβλητό ποσοστό ελαστικού κατά βάρος μείγματος.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι καμπύλες $G_0/G-\gamma-DT$ των πλήρως κορεσμένων δοκιμίων καθαρής κίσηρης και μειγμάτων κίσηρης με συνθετικά υλικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία για ενεργό μέση περιβάλλουσα τάση ίση με 100 kPa καθώς και οι αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες $G_0/G-\gamma-DT$ των Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) και Menq (2003) για αμμώδη εδάφη.



Σχήμα 4. Πειραματικές καμπύλες G_0/G - γ - DT πλήρως κορεσμένων δοκιμίων κίσηρης με μεταβλητό ποσοστό του συνθετικού υλικού κ.β. μείγματος για ενεργό μέση περιβάλλουσα τάση $\sigma'_m=100$ kPa.

Όσο αφορά την επιρροή του ελαστικού στη μη γραμμική περιοχή παρατηρούνται τα εξής:

i) Η παρουσία του ελαστικού προκαλεί μια πολύ μικρή αύξηση του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης, σε αντίθεση με τη μείωση που παρατηρήθηκε στα μικρά πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης, η οποία πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι οι καμπύλες G_0/G - $\log\gamma$ - DT γίνονται περισσότερο ομαλές με την παρουσία ελαστικού καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση αναφοράς γ_{ref} , η οποία αντιστοιχεί στην τιμή $G/G_0=0,5$.

ii) Η παρουσία του ελαστικού προκαλεί αύξηση του λόγου στρεπτικής απόσβεσης. Στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων παρατηρούνται υψηλότερες τιμές στρεπτικής απόσβεσης ενώ στην περιοχή των μεγάλων παραμορφώσεων οι καμπύλες στρεπτικής απόσβεσης όλων των μειγμάτων τείνουν να συγκλίνουν. Συνεπώς, με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού σε ελαστικό οι καμπύλες G_0/G - $\log\gamma$ - DT παρουσιάζουν ελαφρώς πιο γραμμική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στο ελαστικό κλάσμα.

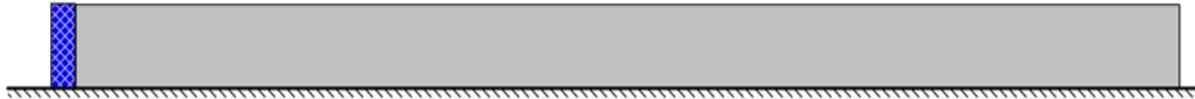
iii) Τα ηφαιστειογενή υλικά, τόσο σε καθαρή μορφή όσο και σε μείγματα με ελαστικό, παρουσιάζουν εντονότερη γραμμική συμπεριφορά συγκριτικά με τα τυπικά αμμώδη εδάφη με αποτέλεσμα οι πειραματικές καμπύλες G_0/G - $\log\gamma$ και DT - $\log\gamma$ να βρίσκονται αντίστοιχα στο άνω και κάτω όριο των καμπυλών που προτείνονται από τη βιβλιογραφία για αμμώδη εδάφη.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

4.1 Τοίχος Βαρύτητας

Μελετήθηκε η περίπτωση ενός άκαμπτου και ακλόνητου τοίχου βαρύτητας ύψους 8.0 m και πλάτους 2.0 m, (Σχήμα 5). Το συνολικό μήκος το προσομοιώματος ελήφθη 120 m

προκειμένου αφενός μεν να εξασφαλιστούν στα άκρα συνθήκες ελεύθερου πεδίου ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του δισδιάστατου προσομοιώματος με αντίστοιχα αποτελέσματα μονοδιάστατης ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης αφετέρου δε το πλευρικό όριο να είναι αρκούντως απομακρυσμένο από τον τοίχο ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατόν ανεπιθύμητα κύματα ανάκλασης. Για λόγους απλότητας όλο το επίχωμα και όχι μόνο το πρίσμα των ωθήσεων συνίσταται από το υπό μελέτη υλικό.



Σχήμα 5. Προσομοίωμα ακλόνητου τοίχου βαρύτητας και επιχώματος.

Για τη διακριτοποίηση του τοίχου όσο και του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν 1440 τετράκομβρα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης με δύο βαθμούς ελευθερίας διαστάσεων (0.67x0.67m) έτσι ώστε να είναι αρκετές φορές (8-10) μικρότερες από το μήκος του διαδιδόμενου κύματος για τη μέγιστη συχνότητα της ανάλυσης. Στο δεξιό πλευρικό όριο και στον πυθμένα του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα στοιχεία «ορίων», ενώ μεταξύ των στοιχείων της διεπιφάνειας τοίχου-εδάφους έγινε παραδοχή μη-αποκόλλησης και μη-ολίσθησης. Το σύνολο των δισδιάστατων αναλύσεων πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων TELDYN.

Χάριν απλότητας ο τοίχος θεωρείται πακτωμένος στη βάση του, δύσκαμπτος και συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά, ενώ το αντιστηριζόμενο έδαφος αποτελείται από μια ομοιόμορφη και ομοιογενή στρώση ισοδύναμα γραμμικού υλικού, με ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων $V_s=200\text{m/s}$ και ιδιοσυχνότητα $F=6,25\text{Hz}$. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αντιστηριζόμενου επιχώματος (Πίνακας 4). Οι δυναμικές ιδιότητες (καμπύλες $G/G_0-\gamma-DT$) των υλικών της κίσηρης και του μείγματος προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 4. Ειδικό βάρος, γ_d , υλικού επίχωσης.

Εξεταζόμενη περίπτωση υλικού επίχωσης	Κωδική Ονομασία	γ_d (kN/m ³)
Τυπική άμμος, PI=0	Vucetic & Dobry	18.00
Καθαρή κίσηρη	LWC2D3	7.15
Μείγμα κίσηρης με ελαστικά σε ποσοστό 10% κ.β.	LWC2D3_R2_90/10	9.22

Για τη σεισμική κίνηση στη βάση του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν τυπικοί παλμοί Ricker με διαφορετικές συχνότητες (6.0, 3.0 και 1.0 Hz) και διαφορετικά πλάτη κορυφαίας επιτάχυνσης για κάθε συχνότητα διέγερσης (0.001, 0.1, 0.2, 0.4 και 0.6g), καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από την ιδιοσυχνότητα του συστήματος μέχρι την «ιονεί στατική» φόρτιση, καθώς και ένα ευρύ φάσμα προκαλούμενων παραμορφώσεων.

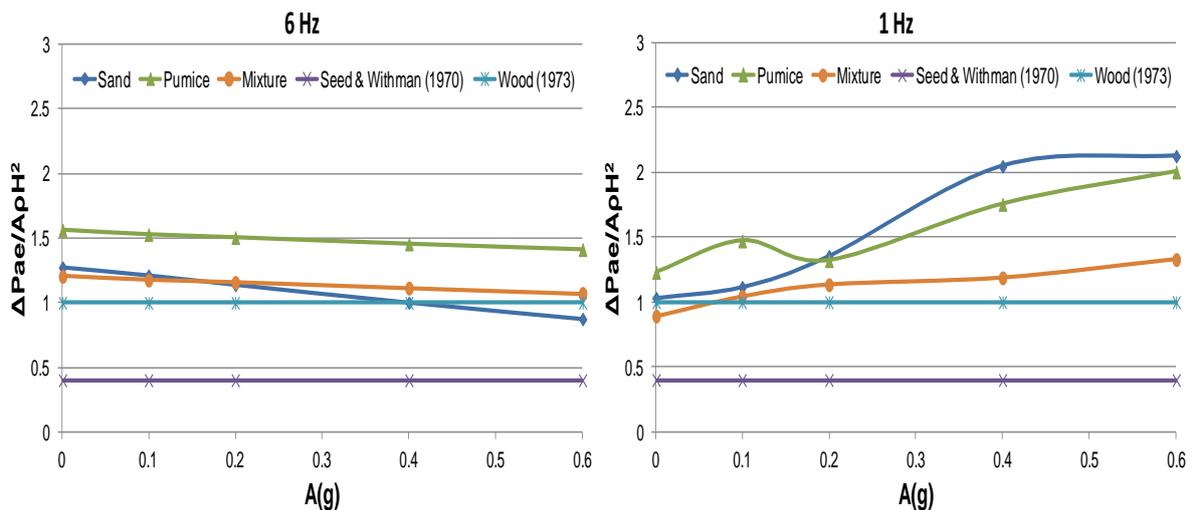
Σύμφωνα με τους Seed & Whitman (1970) και τη «ψευδοστατική μέθοδο» ανάλυσης αντισεισμικού σχεδιασμού τοίχων αντιστήριξης, η μέγιστη κανονικοποιημένη δυναμική ενεργητική ώθηση που ενεργεί σε έναν τοίχο αντιστήριξης είναι ίση με :

$$\overline{\Delta P}_{AE} = \frac{\Delta P_{AE}}{A\rho H^2} \approx 0.4 \quad (1)$$

όπου A είναι η μέγιστη επιτάχυνση στη βάση, ρ είναι η πυκνότητα του εδάφους και H είναι το ύψος του τοίχου.

Σύμφωνα δε με τον Wood (1975), ο οποίος βασίζεται στις ελαστικές λύσεις, η παραπάνω σχέση για περιπτώσεις διεγέρσεων χαμηλών συχνοτήτων ισούται με μονάδα.

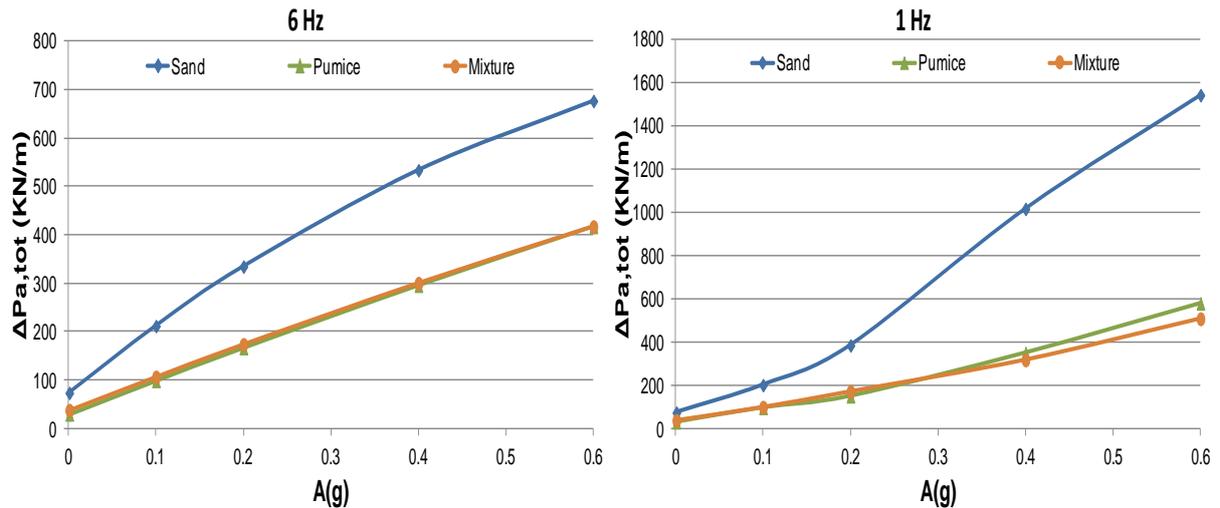
Το Σχήμα 6 παρουσιάζει τη σύγκριση των τιμών της μέγιστης κανονικοποιημένης πρόσθετης σεισμικής ώθησης (μόνο το δυναμικό μέρος) ως συνάρτηση της μέγιστης επιβαλλόμενης εδαφικής επιτάχυνσης στη βάση του προσομοιώματος, ανάμεσα στα διάφορα υλικά επίχωσης που χρησιμοποιήθηκαν και για παλμό εισαγωγής με κεντρική συχνότητα 6 Hz (αριστερά) και 1 Hz (δεξιά). Στο ίδιο γράφημα φαίνονται επίσης οι αντίστοιχες προτάσεις των Wood (1973) και Seed & Whitman (1970).



Σχήμα 6. Μέγιστη κανονικοποιημένη πρόσθετη σεισμική ώθηση ως συνάρτηση της μέγιστης επιβαλλόμενης εδαφικής επιτάχυνσης στη βάση του προσομοιώματος στην παρεία του τοίχου για περίπτωση τυπικής άμμου, καθαρής κίσηρης και μείγματος κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β από τη χρήση ενός παλμού Ricker με κεντρική συχνότητα 6 Hz και 1 Hz.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6 φαίνεται ότι η χρήση της κίσηρης ως υλικού επίχωσης έναντι μιας τυπικής άμμου οδηγεί σε μικρή αύξηση των σεισμικών εδαφικών ωθήσεων όταν η δεσπόζουσα συχνότητα της σεισμικής διέγερσης είναι κοντά στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Αντίθετα, όταν η δεσπόζουσα συχνότητα της σεισμικής διέγερσης είναι πρακτικά ίση με την «οιονεί στατική» φόρτιση παρατηρείται μείωση των σεισμικών εδαφικών ωθήσεων με την αύξηση της μη γραμμικότητας του εδάφους, καθώς μόνο τότε η μέγιστη κανονικοποιημένη σεισμική ώθηση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μιας τυπικής άμμου. Η προσθήκη ελαστικών στη επίχωση κίσηρης συμβάλει θετικά στη σεισμική συμπεριφορά του συστήματος μειώνοντας ακόμα περισσότερο τις σεισμικές εδαφικές ωθήσεις.

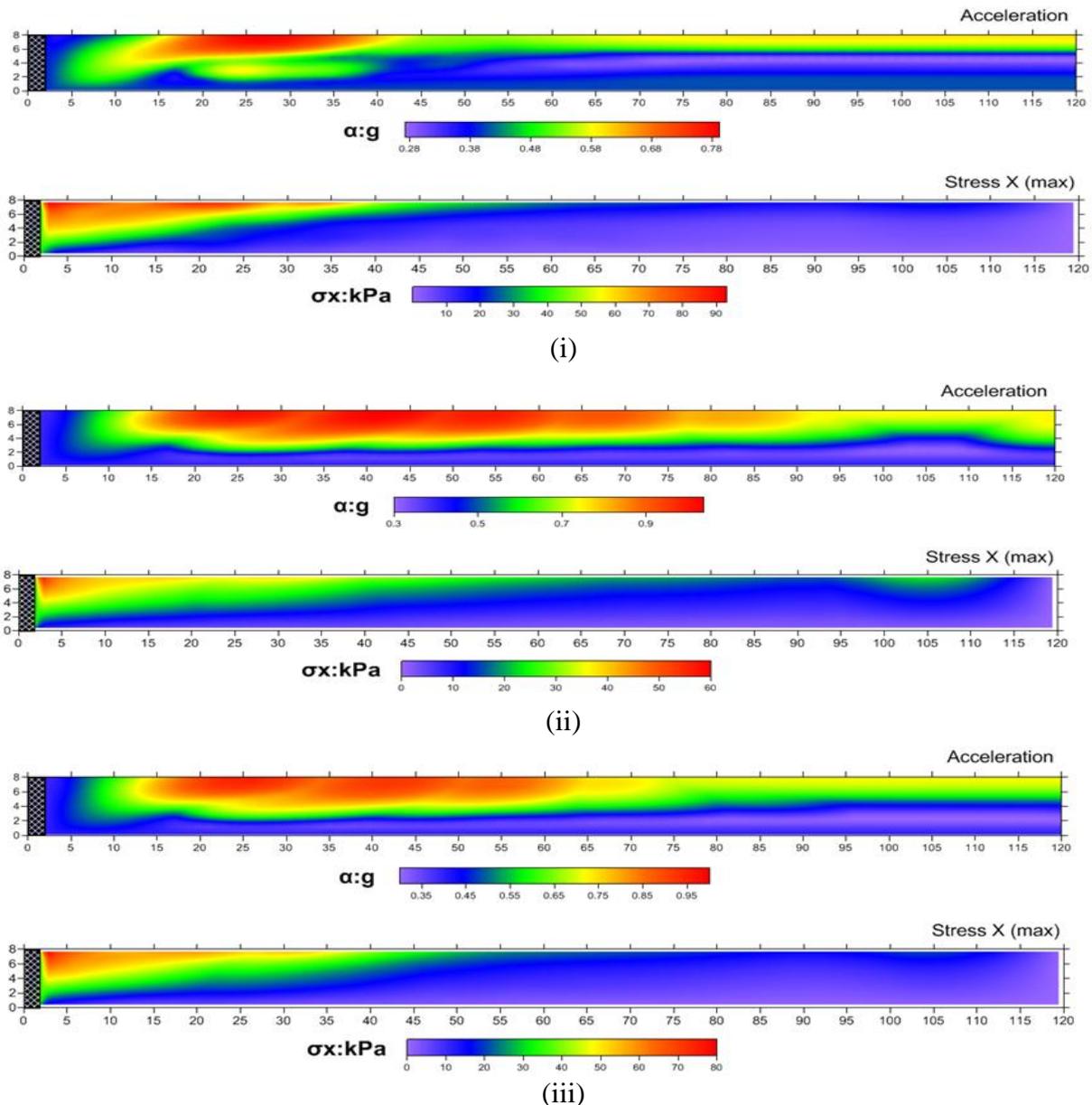
Τέλος, στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής ενεργητικής ώθησης (γεωστατική και δυναμική) ως συνάρτηση της μέγιστης επιβαλλόμενης εδαφικής επιτάχυνσης στη βάση του προσομοιώματος, ανάμεσα στα διάφορα υλικά επίχωσης που χρησιμοποιήθηκαν και για παλμό εισαγωγής με κεντρική συχνότητα 6 Hz και 1 Hz



Σχήμα 7. Συνολική ενεργητική ώθηση (γεωστατική και δυναμική) ως συνάρτηση της μέγιστης επιβαλλόμενης εδαφικής επιτάχυνσης στη βάση του προσομοιώματος στην παρειά του τοίχου για περίπτωση τυπικής άμμου, καθαρής κίσηρης και μείγματος κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β από τη χρήση ενός παλμού Ricker με κεντρική συχνότητα 6 Hz και 1 Hz.

Από τη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων παρατηρείται γενικά μια σημαντικότερη μείωση των ολικών ωθήσεων όταν χρησιμοποιείται ως υλικό επίχωσης κίσηρη σε καθαρή μορφή ή σε μείγμα με ελαστικούς κόκκους. Ειδικότερα παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου η δεσπόζουσα συχνότητα της σεισμικής διέγερσης είναι κοντά στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του συστήματος, η χρήση καθαρού κλάσματος κίσηρης, ή μείγματος κίσηρης με κοκκοποιημένα ελαστικά, μειώνει σημαντικά τις συνολικές ενεργητικές ωθήσεις σε σχέση με μια τυπική άμμο, (6Hz) εξαιτίας κυρίως του μικρού ίδιου βάρους των προαναφερθέντων υλικών. Στην περίπτωση που η συχνότητα διέγερσης είναι πρακτικά ίση με την «οιονεί στατική» φόρτιση, η χρήση καθαρού κλάσματος κίσηρης ή μείγματος κίσηρης με κοκκοποιημένα ελαστικά μειώνει σημαντικά τις συνολικές ενεργητικές ωθήσεις σε σχέση με μια τυπική άμμο, ανεξαρτήτως του πλάτους της κορυφαίας επιτάχυνσης.

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των αναλύσεων, (οριζόντιες επιταχύνσεις και οριζόντιες τάσεις), για την περίπτωση που το επίχωμα αποτελείται από : (i) τυπική άμμο, (ii) καθαρή κίσηρη και (iii) μείγμα κίσηρης με κοκκοποιημένα ελαστικά σε ποσοστό 10% κ.β για συχνότητα διέγερσης 6Hz και εδαφική επιτάχυνση 0.4g.



Σχήμα 9. Οριζόντιες επιταχύνσεις και οριζόντιες τάσεις, για την περίπτωση που το επίχωμα αποτελείται από : (i) τυπική άμμο, (ii) καθαρή κίσηρη και (iii) μείγμα κίσηρης με κοκκοποιημένα ελαστικά σε ποσοστό 10% κ.β για συχνότητα διέγερσης 6Hz και εδαφική επιτάχυνση 0.4g.

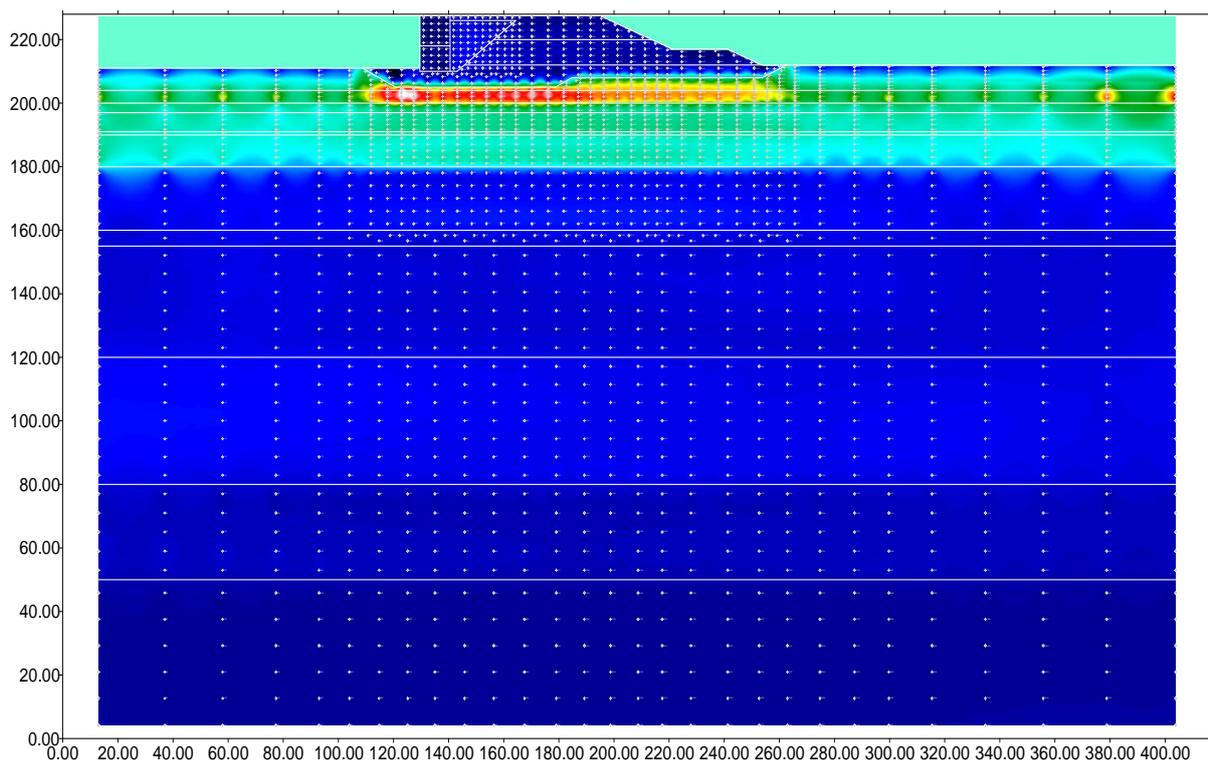
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρείται ότι η χρήση καθαρής κίσηρης σε σχέση με μια τυπικά άμμο προκαλεί μείωση των οριζοντίων τάσεων καθώς και μείωση των οριζοντίων επιταχύνσεων κοντά στον τοίχο και αύξηση τους μακριά από αυτόν. Η χρήση μείγματος κίσηρης με ελαστικά έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των οριζοντίων επιταχύνσεων, αλλά επιφέρει μια μικρή αύξηση στις τιμές των οριζοντίων τάσεων σε σχέση με το κλάσμα καθαρής κίσηρης.

4.2 Κρητιδότοιχος

Το προσομοίωμα που μελετάται στην παρούσα παράγραφο βασίζεται σε διαθέσιμα στοιχεία για την επέκταση του 6^{ου} προβλήτα Λιμένος Θεσσαλονίκης, Σχήμα 10. Το σύνολο των

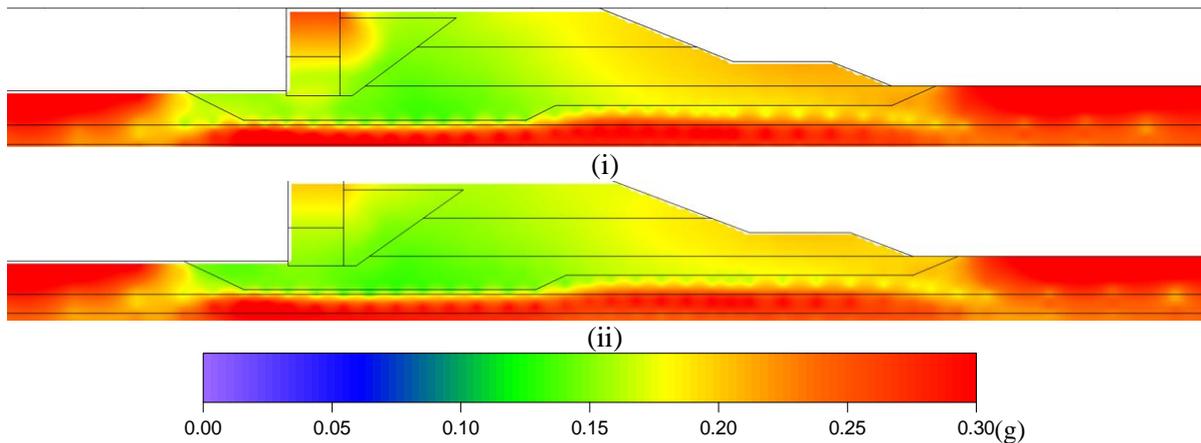
δισδιάστατων αναλύσεων πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων TELDYN με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων σε επίπεδη παραμόρφωση, με προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού ως ισοδύναμου γραμμικού με υστερητικού τύπου απόσβεση.

Για τη διακριτοποίηση του κρηπιδότοιχου όσο και του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν 2112 πεπερασμένα στοιχεία, τριγωνικά και ορθογωνικά, με κατάλληλη πύκνωση στην περιοχή του έργου ενώ στα όρια του μοντέλου τοποθετήθηκαν οι απαραίτητοι αποσβεστήρες, προκειμένου να αποφευχθούν οι ανεπιθύμητες ανακλάσεις των κυματισμών προς το εσωτερικό του μοντέλου κατά την πρόσκρουσή τους στο παράπλευρο περίγραμμα του προσομοιώματος.

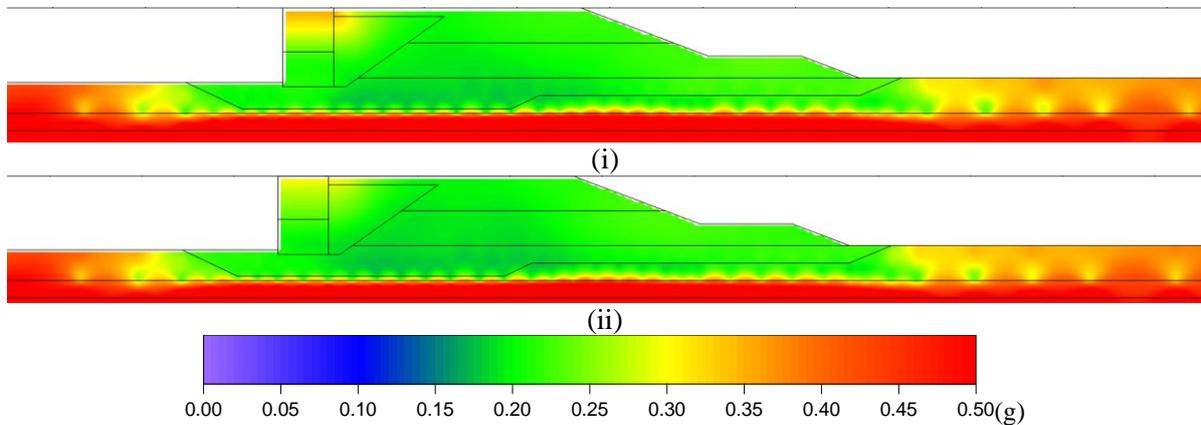


Σχήμα 10. Προσομοίωμα κρηπιδότοιχου του 6^{ου} προβλήτα Λιμένος Θεσσαλονίκης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων TELDYN.

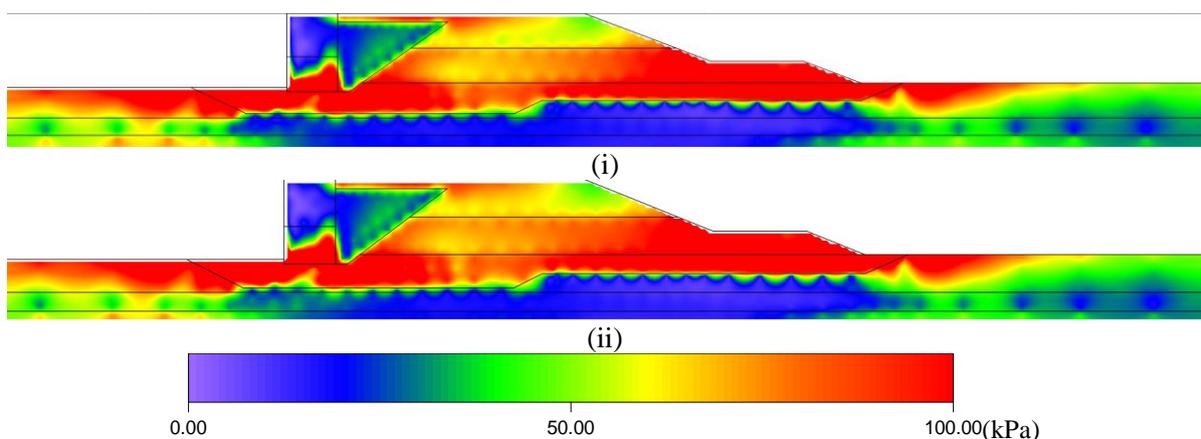
Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση ανάμεσα στις τιμές των κορυφαίων οριζοντίων επιταχύνσεων, των δυναμικών ωθήσεων και της καθ' ύψους κατανομής των κανονικοποιημένων δυναμικών εδαφικών τάσεων στη διεπιφάνεια του τοίχου με το έδαφος και σε απόσταση ενός μέτρου από τον τοίχο, για σεισμό εισαγωγής 0,174g και 0,4g, για τις περιπτώσεις όπου ως υλικό επίχωσης του ανακουφιστικού πρίσματος πίσω από τα κυψελωτά κιβώτια (caisson) χρησιμοποιήθηκε : (i) καθαρή κίσηρης και (ii) μείγμα κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β., Σχήματα 11 ως 15. Οι δυναμικές ιδιότητες (καμπύλες G/G_0 - γ -DT) των υλικών της κίσηρης και του μείγματος προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της παρούσας εργασίας.



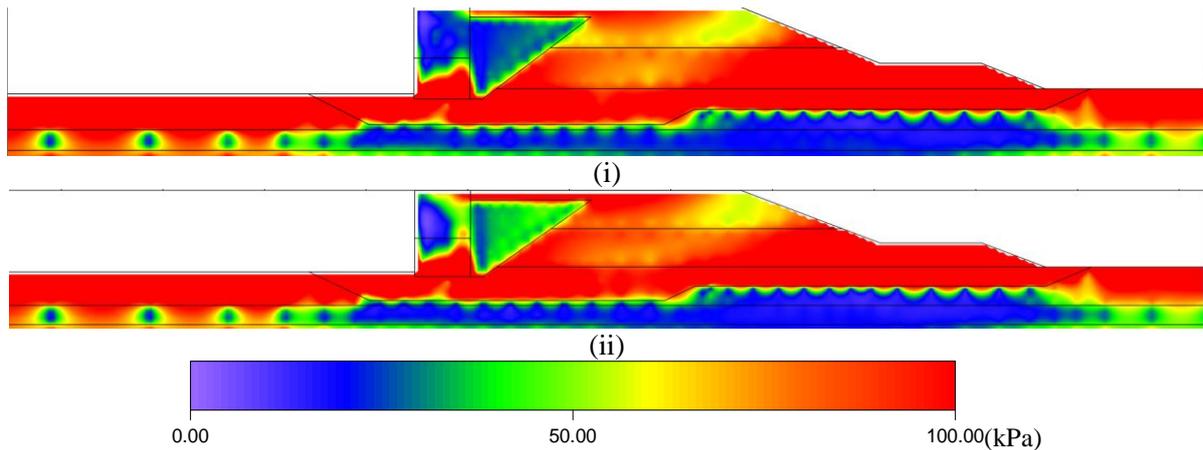
Σχήμα 11. Διαφοροποίηση των κορυφαίων τιμών οριζοντίων επιταχύνσεων εντός της μάζας του κρηπιδότοιχου για σεισμό εισαγωγής 0,174g από τη χρήση ως υλικού επίχωσης του ανακουφιστικού πρίσματος πίσω από τα κυβελωτά κιβώτια (caisson) : (i) καθαρής κίσηρης και (ii) μείγματος κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β.



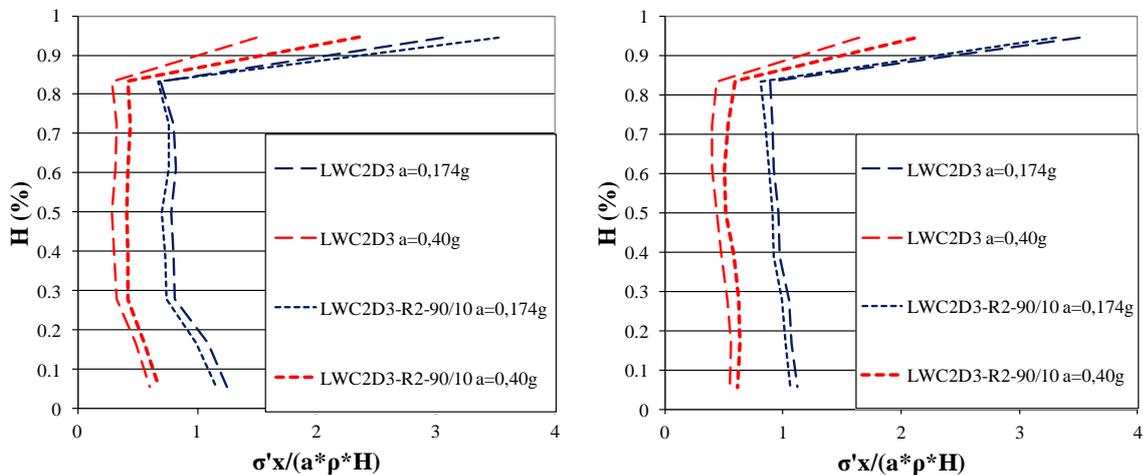
Σχήμα 12. Διαφοροποίηση των κορυφαίων τιμών οριζοντίων επιταχύνσεων εντός της μάζας του κρηπιδότοιχου για σεισμό εισαγωγής 0,4g από τη χρήση ως υλικού επίχωσης του ανακουφιστικού πρίσματος πίσω από τα κυβελωτά κιβώτια (caisson) : (i) καθαρής κίσηρης και (ii) μείγματος κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β.



Σχήμα 13. Διαφοροποίηση οριζοντίων δυναμικών ωθήσεων εντός της μάζας του κρηπιδότοιχου για σεισμό εισαγωγής 0,174g από τη χρήση ως υλικού επίχωσης του ανακουφιστικού πρίσματος πίσω από τα κυβελωτά κιβώτια (caisson) : (i) καθαρής κίσηρης και (ii) μείγματος κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β.



Σχήμα 14. Διαφοροποίηση οριζοντίων δυναμικών ωθήσεων εντός της μάζας του κρηπιδότοιχου για σεισμό εισαγωγής 0,4g από τη χρήση ως υλικού επίχωσης του ανακουφιστικού πρίσματος πίσω από τα κυψελωτά κιβώτια (caisson) : (i) καθαρής κίσηρης και (ii) μείγματος κίσηρης με ελαστικό σε ποσοστό 10% κ.β.



Σχήμα 15. Καθ' ύψος κατανομή των κανονικοποιημένων δυναμικών εδαφικών τάσεων στη διεπιφάνεια του τοίχου με το έδαφος (αριστερά) και σε απόσταση ενός μέτρου από τον τοίχο (δεξιά), για την περίπτωση καθαρής κίσηρης και μείγματος κίσηρης με ελαστικά σε ποσοστό 10% κ.β, για σεισμό εισαγωγής 0,174g και 0,4g.

Από τη σύγκριση των τιμών των κορυφαίων οριζοντίων επιταχύνσεων, των δυναμικών ωθήσεων και την κατανομή καθ' ύψος των κανονικοποιημένων δυναμικών εδαφικών τάσεων διαπιστώνεται ότι για σεισμό εισαγωγής 0,174g η προσθήκη ελαστικού βελτιώνει τη σεισμική συμπεριφορά του ανακουφιστικού πρίσματος της κίσηρης καθώς δίνει μικρότερες τιμές κορυφαίων οριζοντίων επιταχύνσεων, δυναμικών ωθήσεων και δυναμικών εδαφικών τάσεων τόσο στη διεπιφάνεια τοίχου/εδάφους όσο και στη μάζα του εδαφικού υλικού πίσω από τον τοίχο, εξαιτίας της υψηλής απόσβεσης λόγω της παρουσίας του ελαστικού στη μάζα του κρηπιδότοιχου. Στην περίπτωση όμως όπου ο σεισμός εισαγωγής είναι 0,4g παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη ελαστικού μειώνει μόνο τις τιμές των κορυφαίων οριζοντίων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στον τοίχο.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών της παρούσας εργασίας κατέδειξαν ότι η προσθήκη ελαστικού στο μείγμα, ακόμα και για μικρά ποσοστά ελαστικού, μειώνει τη γωνία τριβής και τις κορυφαίες τιμές της εκτροπικής τάσης με ταυτόχρονη όμως μείωση της αντίστοιχης τιμής της αξονικής παραμόρφωσης, καθώς οι ελαστικοί κόκκοι λόγω μικρότερης διαμέτρου καλύπτουν τα κενά μεταξύ των στερεών εδαφικών κόκκων δημιουργώντας πυκνότερα δοκίμια μεγαλύτερης δυσκαμψίας. Με την αύξηση του ποσοστού του ελαστικού παρατηρείται μια σχετική αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης αστοχίας καθώς η συμπεριφορά του δοκιμίου αρχίζει να επηρεάζεται από την παρουσία του ελαστικού κλάσματος.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των δυναμικών δοκιμών κατέδειξαν ότι η προσθήκη ελαστικού στο εδαφικό κλάσμα μειώνει το μέγιστο μέτρο διάτμησης των δοκιμίων καθώς δεν συμβάλει καθόλου στην αύξηση της δυστημψίας των μειγμάτων, ενώ αντίθετα αυξάνει τον ελάχιστο λόγο στρεπτικής απόσβεσης των δοκιμίων καθώς προσδίδει στο μείγμα μια εντονότερη γραμμική συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, τα ηφαιστειογενή υλικά παρουσιάζουν περισσότερο έντονα γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με ομοιογενή αμμώδη εδάφη, ενώ με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού σε ελαστικό, οι καμπύλες $G/G_0 - \log \gamma - DT_0$ αποκτούν μια πιο γραμμική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στο ελαστικό κλάσμα.

Η επιρροή επομένως του ελαστικού κλάσματος εμφανίζεται τόσο στις μηχανικές όσο και στις δυναμικές ιδιότητες των μειγμάτων, δημιουργώντας μία πρόκληση για την κατάλληλη εκμετάλλευση του νέου αυτού υλικού σε διάφορες περιπτώσεις έργων Πολιτικού Μηχανικού όπου απαιτείται μείωση των επιβαλλόμενων φορτίων και ωθήσεων όπως είναι τα επιχώματα, οι τοίχοι αντιστήριξης και οι κρηπιδότοιχοι.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας φαίνεται πως η χρήση ηφαιστειογενούς υλικού ως υλικού επίχωσης οδηγεί σε ευμενέστερα αποτελέσματα καθώς παρατηρήθηκαν μειώσεις των συνολικών δυναμικών ωθήσεων (γεωστατικές και δυναμικές) καθώς και των οριζοντίων επιταχύνσεων, συγκριτικά με τη χρήση μιας τυπικής άμμου (ως υλικό επίχωσης), εξαιτίας κυρίως του μικρού ειδικού βάρους του ηφαιστειογενούς υλικού. Τέλος, η προσθήκη κοκκοποιημένων ελαστικών στη μάζα του εδάφους αντιστήριξης βελτιώνει τη σεισμική απόκριση του συστήματος μειώνοντας τις επιταχύνσεις και τις σεισμικές ωθήσεις στον τοίχο εξαιτίας της υψηλότερης απόσβεσης, του μικρού ειδικού βάρους τους και της παρουσίας του ελαστικού στη μάζα του επιχώματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Πιστόλας, Γ.Α., Αναστασιάδης, Α. & Πιτιλάκης, Κ. (2014a). Μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων άμμου/κοκκοποιημένων ελαστικών υπό αστράγγιστες συνθήκες ανακυκλιζόμενης τριαξονικής φόρτισης. *Πρακτικά, 7ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής*, Αθήνα, Αίγλη Ζαπείου, 5-7 Νοεμβρίου 2014.
- Πιστόλας, Γ.Α., Αναστασιάδης, Α. & Πιτιλάκης, Κ. (2014b). Παράμετροι αντοχής μιγμάτων άμμου/κοκκοποιημένων ελαστικών. *Πρακτικά, 7ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής*, Αθήνα, Αίγλη Ζαπείου, 5-7 Νοεμβρίου 2014.
- Σενετάκης, Κ. (2011). *Δυναμικές ιδιότητες χονδρόκοκκων εδαφών και μιγμάτων τυπικών άμμων και χαλικών με ανακυκλωμένα συνθετικά υλικά*. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Ελλάδα.
- Τσινάρης, Α. (2012). *Προσδιορισμός μηχανικών και δυναμικών ιδιοτήτων μιγμάτων χονδρόκοκκων ηφαιστειογενών εδαφών με προσθήκη κοκκοποιημένων ανακυκλωμένων ελαστικών. Εφαρμογή στη σεισμική απόκριση κρηπιδότοιχων και ακλόνητων τοίχων αντιστήριξης*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Ελλάδα.

- Τσινάρης, Α., Πιστόλας, Γ.Α., Αναστασιάδης, Α. & Πιτιλάκης, Κ. (2014a). Μηχανικές και δυναμικές ιδιότητες μειγμάτων χονδρόκοκκων ηφαιστιογενών εδαφών με προσθήκη κοκκοποιημένων ελαστικών. *Πρακτικά, 7ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής*, Αθήνα, Αίγλη Ζαπτείου, 5-7 Νοεμβρίου 2014.
- Τσινάρης, Α., Αναστασιάδης, Α. & Πιτιλάκης, Κ. (2014b). Σεισμική απόκριση ακλόνητου τοίχου αντιστήριξης με υλικό επίχωσης μείγμα ηφαιστιογενούς υλικού και κοκκοποιημένων ελαστικών. *Πρακτικά, 7ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής*, Αθήνα, Αίγλη Ζαπτείου, 5-7 Νοεμβρίου 2014.
- Anastasiadis, A., Senetakis, K., Pitilakis, K., Gargala, C. & Karakasi, I. (2012). Dynamic behavior of sand/rubber mixtures, Part I: Effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio. *Journal of ASTM International*, 9(2), Paper ID JAI103680.
- Darendeli, M.B. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, U.S.A
- Edeskar, T. (2006). Use of type shreds in civil engineering applications: Technical and environmental properties. Ph. D. Dissertation, Lulea University of Technology, Sweden.
- Edil, T. & Bosscher, P. (1994). Engineering properties of tire chips and soil mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 453–464.
- Feng, Z.Y. & Sutter, K. (2000). Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 338–344.
- Hazarika, H., Otani, J. & Kikuchi, Y. (2012). Evaluation of tyre products as ground improving geomaterials, *Proceedings ICE - Ground Improvement*, 01 November 2012, Volume 165, Issue 4, Pages 267–282.
- Humphrey, D. & Sandford, T. (1993). Tire chips as lightweight subgrade fill and retaining wall backfill, *Proceedings, Recycling Ahead*, October 19-22, Denver, U.S.A.
- Lee, J., Salgado, R., Bernal, A. & Lovell, C. (1999). Shredded tires and rubber-sand as a lightweight backfill. *Journal of Geotec. And Geoenv. Eng.*, Vol. 125, No. 2, pp. 132–141.
- Masad, E., Taha, R., Ho, C. & Papagiannakis, T. (1996). Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.19, No.3, September, pp.297-304.
- Menq, F.Y. (2003). *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Nakhaei, A., Marandi, S.M., Sani Kermani, S. & Bagheripour, M.H. (2012). Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 43, pp. 124-132.
- Ravichandran, N. & Huggins, L. (2014). Applicability of Shredded Tire Chips as a Lightweight Retaining Wall Backfill in Seismic Regions. *ASCE Geo-Congress*, Technical Papers: pp. 3496-3505.
- Seed, H. & Whitman, R. (1970). Design of earth retaining structures for dynamic loads, *ASCE Spec. Conf. Lateral Stresses in the ground and design of retaining structures*, Cornell, pp. 103 – 147.
- Senetakis, K., Anastasiadis, A., Pitilakis, K. & Souli, A. Dynamic behavior of sand/rubber mixtures, Part II: Effect of rubber content on G/Go-γ-DT curves and volumetric threshold strain. *Journal of ASTM International*, 9(2), Paper ID JAI103711.
- Vucetic, M. & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, Vol.117, No.1, pp.89-107.
- Wood, J. (1973). Earthquake-induced soil pressure on structures. Rep. EERL 73 – 05, *Earthquake Engineering Research Laboratory*, California Inst. of Technol., Pasadena, Calif.
- Zornberg, J., Carbal, A. & Viratjandr, C. (2004). Behaviour of tire shred - sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, pp. 227–241.

Αξιοποίηση απορριμμάτων κεραμοποιίας & υπολειμμάτων εξορυκτικής διεργασίας στην παραγωγή πυρίμαχου κονιάματος

Κ. Ανδρεούλη¹, Ζ. Τσιμπούκη¹, Β. Μπακέας¹, Θ. Ζαμπετάκης², Π. Παπανικολάου², Σ. Παπαγιαννάκης³

1. EBETAM A.E., Παράρτημα Θηβών, 72^ο χλμ. Αθηνών-Λαμίας, 341 00, Χαλκίδα

2. ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΛΕΥΚΟΛΙΘΟΙ AMBNEE, Ερευνητικό Κέντρο, 570 06 Βασιλικά Θεσσαλονίκης

3. NORDIA A.E., 1^ο χλμ. Μαρκόπουλου-Ωρωπού, 190 14 Πολυδένδρι Αττικής

Λέξεις κλειδιά: αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, απορρίματα κεραμοποιίας, στείρα εξορυκτικής διεργασίας, σερπεντινωμένος δουνίτης, πυρίμαχη λάσπη κτισίματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η πυρίμαχη λάσπη για πυρότουβλα παράγεται με βάση το πυρίμαχο τσιμέντο και αδρανή ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις εστίες των τζακιών, φούρνων και καπνοδόχων. Διερευνήθηκε η υποκατάσταση των χρησιμοποιούμενων πυριμάχων αδρανών (chamotte) με τα εξής δύο εναλλακτικά υλικά: α) απορρίματα κεραμοποιίας, θραύσματα οικοδομικών τούβλων, (υλικό ήδη ψημένο) και β) στείρα υπολείματα εξορυκτικής διεργασίας μαγνησίτη, που κατά μεγάλο μέρος τους αποτελούνται από σερπεντινωμένο δουνίτη, ένα υλικό πυρανθεκτικό. Οι δοκιμές μηχανικών χαρακτηριστικών και πυρανθεκτικότητας έδωσαν, για όλα τα ποσοστά υποκατάστασης των χρησιμοποιούμενων αδρανών, αποτελέσματα εφάμιλλα ή και καλύτερα του ετοιμού προϊόντος, πράγμα που ενθαρρύνει την περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησής τους στην παραγωγή πυριμάχου κονιάματος κτισίματος. Το όφελος για την βιομηχανία κονιαμάτων θα ήταν η εξοικονόμηση πρώτων υλών, και για την κεραμική βιομηχανία και συγκεκριμένο κλάδο της μεταλλευτικής βιομηχανίας, θα ήταν η εξοικονόμηση των εξόδων διάθεσης των απορριμμάτων τους.

Exploitation of waste residues of ceramic and mining process to produce refractory adhesive mortar

K. Andreouli¹, Z. Tsibouki¹, V. Mpaekas¹, Th. Zambetakis², P. Papanikolaou², S. Papagiannakis³

1. MIRTEC S.A. Thiva branch, 72nd km of Athens-Lamia National Road, 341 00 Chalkida

2. GRACIAN MAGNESITE MISCOSA, Research Center, 570 06 Vasilika Thessaloniki

3. NORDIA S.A. 1st km Country Road Markopoulo-Oropou, 190 14 Polydendri Attica

Keywords: by-product utilization, bricks industry waste, mining industry waste, serpentized dunite, refractory adhesive mortar

ABSTRACT: Refractory adhesive mortar is produced with refractory cement and aggregate resistant to high temperatures developed in fireplaces, stoves and chimneys. This study investigates the replacement of refractory aggregate (chamotte) by two alternative materials: a) waste of bricks industry, building bricks fragments, (an already burnt material) and b) waste rock from magnesite extraction, essentially consisting in serpentized dunite, a material resistant to high temperatures. The tests on mechanical characteristics and refractoriness gave results comparable to those of the commercial product at all replacement rates, thus encouraging further investigation of such a use of the wastes in question. The

benefit for the mortar industry would be the saving of raw materials, and for the ceramic industry and a specific section of the mining industry would be the saving of the wastes disposal costs.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη πυρίμαχης λάσπης κτισίματος πυροτούβλων, μειωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με αξιοποίηση απορριμμάτων κεραμοποιίας αφ' ενός και στείρων από την εξόρυξη μαγνησίτη αφ' ετέρου.

Η εταιρεία Nordia - Marmoline παράγει ένα πυρίμαχο κονίαμα κτισίματος πυροτούβλων, που είναι ένα ειδικό κονίαμα με βάση πυρίμαχο τσιμέντο και πυρίμαχα αδρανή, και χρησιμοποιείται στο κτίσιμο και την αρμολόγηση των πυροτούβλων σε εστίες τζακιών, φούρνων, καπνοδόχων και ψησταριών σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Τόσο το πυρίμαχο τσιμέντο (αλουμινικό), όσο και τα πυρίμαχα αδρανή (chamotte) είναι υλικά υψηλού κόστους και καθιστούν το προϊόν ακριβό. Έτσι η εταιρεία αναζητεί εναλλακτικές πρώτες ύλες, τόσο με μικρότερο κόστος όσο και με μειωμένο περιβαλλοντικό και ενεργειακό αποτύπωμα και αυτό αποτέλεσε έναυσμα για την μελέτη αξιοποίησης απορριμμάτων άλλων βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Το chamotte είναι προϊόν υψηλής πυριμαχικότητας, με υψηλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, θεωρητικά υψηλότερη από την απαιτούμενη για τη συγκεκριμένη χρήση. Στην παρούσα εργασία δοκιμάστηκε η αντικατάσταση του chamotte με απορρίμματα βιομηχανικών ή εξορυκτικών διεργασιών, τα οποία παρουσιάζουν μέτρια προς υψηλή πυριμαχικότητα. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν: α) απορρίμματα κεραμοποιίας και β) στείρα της εξορυκτικής δραστηριότητας της εταιρείας Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Ε.

Η αξιοποίηση των απορριμμάτων της κεραμοποιίας, ως αδρανών σε σκυροδέματα και κονιάματα είναι κάτι που έχει διερευνηθεί προ πολλού και έχει τεθεί ήδη σε εφαρμογή (Binici, 2007 & Παπαγιάννη κ.ά., 2005).

Η χρήση δε θραυστών κεραμικών υλικών ως αδρανών υλικών ή και του λεπτόκοκκου κλάσματος ως κονιάς είναι γνωστή από την αρχαιότητα, με πολλές αναφορές για την παραγωγή κονιαμάτων υψηλής ανθεκτικότητας στον χρόνο (Baronio et al., 1997 & Vejmelková et al., 2012). Ασβεστοκονιάματα με ψημένα θραυστά κεραμικά εμφανίζουν υψηλές μηχανικές αντοχές και ως εκ τούτου, τα οφέλη από τη χρήση κεραμικών απορριμμάτων από τις κεραμοποιίες για την παραγωγή κονιαμάτων έχει πολλά σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα (Matiasa et al., 2014).

Το επί πλέον στοιχείο της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η αξιοποίηση της πυριμαχικότητας των κεραμικών με την χρήση τους σε κονιάματα, που προορίζονται για έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και ο συνδυασμός τους με άλλα πυρίμαχα αδρανή απορρίμματα.

Τα στείρα από την εξόρυξη μαγνησίτη προέρχονται από το ορυχείο Γερακινής της Ελληνικοί Λευκόλιθοι ΑΕ. Συνίστανται σε σερπεντινωμένο δουνίτη, του οποίου το βασικό συστατικό είναι ο ολιβίνης, ένα κατ' εξοχήν πυρίμαχο υλικό, που ήδη χρησιμοποιείται στην παραγωγή υλικών μέτριας έως υψηλής πυριμαχικότητας. Άλλα παραπροϊόντα από την εξόρυξη μαγνησίτη έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ως βάσεις-υποβάσεις και ως άμμος σε κονιάματα και σκυρόδεμα (Τσώχος, 2004).

Η μελέτη αξιοποίησης των ανωτέρω απορριμμάτων διεξήχθη στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου ΠΑΒΕΤ με τίτλο: «Ανάπτυξη Κονιαμάτων με Μειωμένο Ενεργειακό Αποτύπωμα – ΚΟΝΙΕΝΕΡΓΟΝ.

2 ΥΛΙΚΑ

2.1 Απορρίμματα Κεραμοποιίας

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται σήμερα περί τις 25 κεραμικές βιομηχανίες. Μεταξύ των απορριμμάτων τους είναι και τα ψημένα αργιλοπυριτικά υλικά που προέρχονται από αστοχίες

κατά την πύρωση και σπασμένα κεραμικά. Το ύψος των αστοχιών κυμαίνεται γύρω στο 1% της παραγωγής, που μεταφράζεται σε δεκάδες χιλιάδων τόνων. Τα απορρίμματα αυτά είναι υλικά που έχουν ήδη ψηθεί σε θερμοκρασία 800 - 1.000 °C και επομένως δέν διασπώνται σε υψηλές θερμοκρασίες, άρα είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή σε πυράντοχα κονιάματα μέτριας πυριμαχικότητας.

2.2 Σερπεντινωμένος Δουνίτης

Στο ορυχείο Γερακινής της εταιρείας Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Ε., το βασικό εξορυκτικό απόβλητο είναι σερπεντινωμένος δουνίτης πλούσιος σε ολιβίνη. Ο κύριος όγκος του αποτίθεται σε εξοφλημένες περιοχές του μεταλλείου και ακολουθεί περιβαλλοντική αποκατάσταση του τοπίου.

Ο καθαρός ολιβίνης είναι κατεξοχήν πυρίμαχο υλικό (Σ.Τ. > 1.700°C) και χρησιμοποιείται ήδη σε συνθέσεις πυριμάχου σκυροδέματος υψηλών προδιαγραφών για πυροπροστασία σε σήραγγες καθώς και πυριμάχων μαζών για φούρνους τσιμεντοβιομηχανίας και μεταλλουργικής βιομηχανίας. Η διαφοροποίηση του απορρίμματος σε σχέση με τον καθαρό ολιβίνη συνίσταται στην κυμαινόμενη κλίμακας σερπεντινίωση, δηλαδή την μετάπτωση του ολιβίνης σε αντιγορίτη, που συνεπάγεται την μείωση της πυριμαχικότητας του υλικού.

Ο σερπεντινωμένος δουνίτης που χρησιμοποιήθηκε στην ερευνητική εργασία συνίσταται κατά κύριο λόγο σε ολιβίνη και αντιγορίτη και δευτερευόντως σε μαγνησίτη, ενστατίτη και χαλαζία.

Η αξιοποίηση της χαμηλής πυριμαχικότητάς του μέσω της χρήσης του σε πυράντοχα κονιάματα ειδικών εφαρμογών θά συνέβαλλε περαιτέρω στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στην μείωση κατανάλωσης ενέργειας.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα απορρίμματα κεραμοποιίας και ο δουνίτης θραύσθηκαν και διαχωρίστηκαν σε κοκκομετρικά κλάσματα 0-1 mm και 1-3 mm, προκειμένου να προσομοιωθεί η κοκκομετρική διαβάθμιση του chamotte που χρησιμοποιείται στο βιομηχανικό προϊόν.

Η σύνθεση του βιομηχανικού προϊόντος διατέθηκε από την Nordia. Επίσης δόθηκαν από την Nordia πληροφορίες για την ενδεδειγμένη εργασιμότητα των κονιαμάτων και την απαιτούμενη ποσότητα νερού ανάμιξης.

Σαν σύνθεση αναφοράς για τις πειραματικές συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακή σύνθεση του προϊόντος, ενώ δοκιμάσθηκε και το έτοιμο βιομηχανικό προϊόν της Nordia, PYRO PRO.

Πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εργαστηριακές συνθέσεις:

- 4 συνθέσεις στις οποίες το απόρριμμα κεραμοποιίας αντικατέστησε το chamotte κατά 33%, 50%, 67% και 100 % κ.β.
- 3 συνθέσεις όπου το chamotte αντικαταστάθηκε με μίγμα απορρίμματος κεραμοποιίας/δουνίτη σε αναλογίες 67/33, 50/50 και 33/67
- 1 σύνθεση με πλήρη αντικατάσταση του chamotte με δουνίτη

Στις πειραματικές συνθέσεις διενεργήθηκαν κατ' αρχήν οι δοκιμές νωπού κονιάματος: εξάπλωση, ειδικό βάρος νωπού κονιάματος, αεροπεριεκτικότητα.

Από τις δοκιμές σε σκληρυμένο κονίαμα, οι αντοχές μετρήθηκαν σε τρεις σειρές δοκιμών μετά από ωρίμανση 28 ημερών, (7 ημέρες σε RH 95±5 %, και 21 σε RH 65±5 %).

- Η πρώτη σειρά δοκιμών δοκιμάσθηκε σε αντοχή αμέσως μετά το πέρας της συντήρησης.
- Η δεύτερη μετά από ωρίμανση 28 ημερών και έψηση σε θερμοκρασία 600 °C.
- Η τρίτη μετά από ωρίμανση 28 ημερών και έψηση στους 900 °C.

Πρίν από την θέρμανση μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δοκιμίων προκειμένου να ελεγχθεί ενδεχόμενη συρρίκνωση κατά την θέρμανση.

Η θέρμανση έγινε με ρυθμό 4 °C/min. Όταν η θερμοκρασία έφτανε την επιθυμητή, (600/900 °C), ο φούρνος έσβηνε και τα δοκίμια παρέμεναν σε σβηστό φούρνο επί 24 ώρες. Ακολουθούσε περαιτέρω ψύξη στο χώρο του εργαστηρίου, μέτρηση των διαστάσεών τους, και προσδιορισμός αντοχής σε κάμψη και θλίψη.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι συνθέσεις των κονιαμάτων που παρήχθησαν και τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά νωπού κονιάματος, σκληρυμένου και ψημένου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, ενώ οι συγκριτικές αντοχές τους δίνονται στα διαγράμματα 1 και 2.

Η επίτευξη της επιθυμητής εργασιμότητας στα κονιάματα όπου συμμετείχαν τα κεραμικά απαιτήσε αύξηση του νερού ανάμιξης, που ήταν ανάλογη με το ποσοστό συμμετοχής κεραμικών, πράγμα αναμενόμενο λόγω της πορώδους δομής τους.

Τα αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών έδειξαν ότι γενικά η αντικατάσταση του chamotte από εναλλακτικά αδρανή εννόησε σημαντικά τις αντοχές στα άψητα δοκίμια, αλλά ακόμη περισσότερο στα ψημένα.

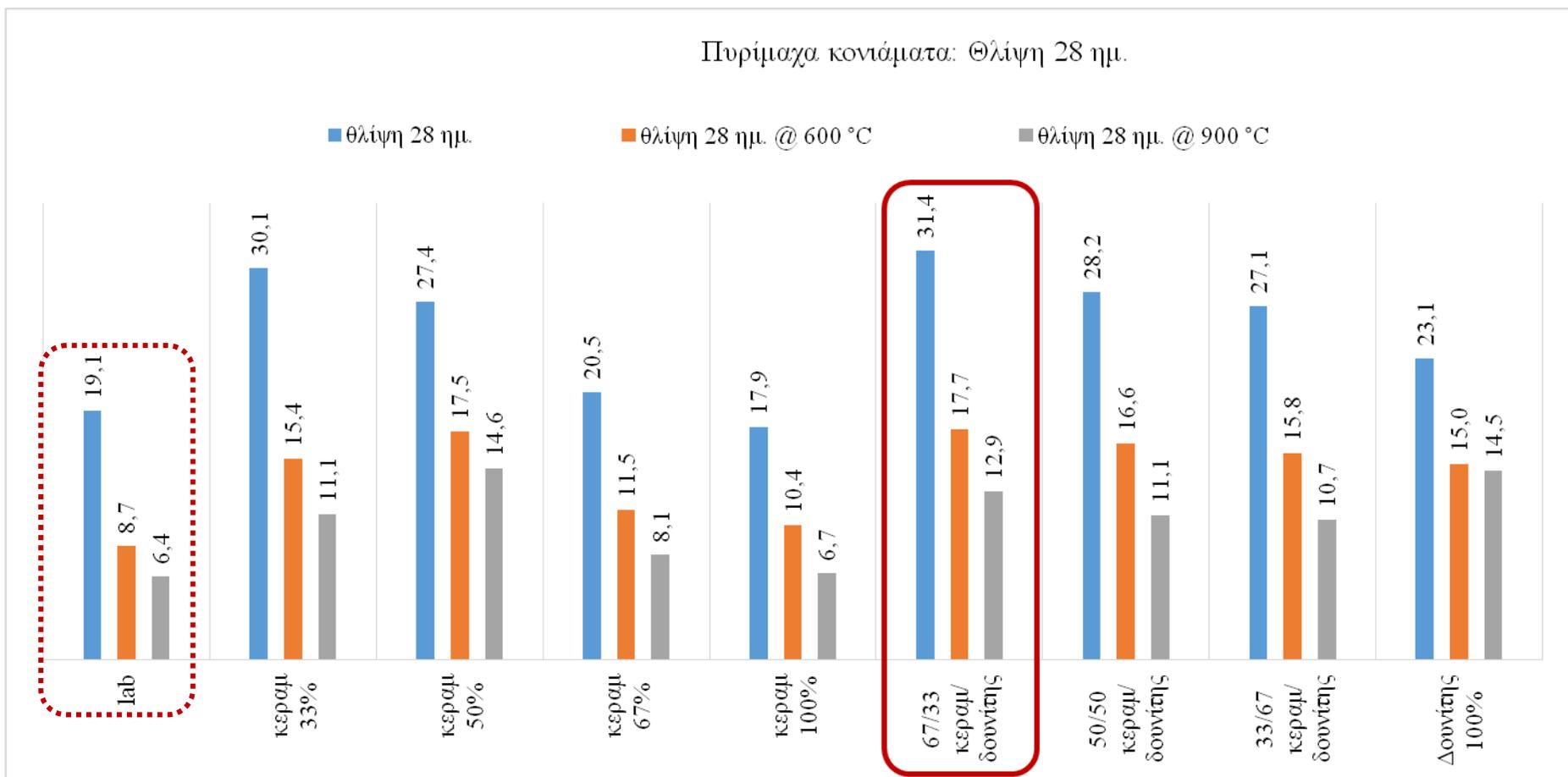
Η αντικατάσταση κατά 33 % του chamotte με απορρίμματα κεραμοποιίας έδωσε μία αύξηση κατά 57 % στις αντοχές 28 ημερών, η οποία δείχνει σαφή πτωτική τάση όσο αυξάνεται το ποσοστό συμμετοχής των απορριμμάτων κεραμοποιίας εις βάρος του chamotte.

Η πλήρης αντικατάσταση του chamotte από συνδυασμούς απορριμμάτων κεραμοποιίας και δουνίτη σε τρεις αναλογίες είχε σταθερά ενισχυτική επίδραση στις αντοχές, με καλύτερη επίδοση το μίγμα, το πλουσιότερο σε κεραμικά.

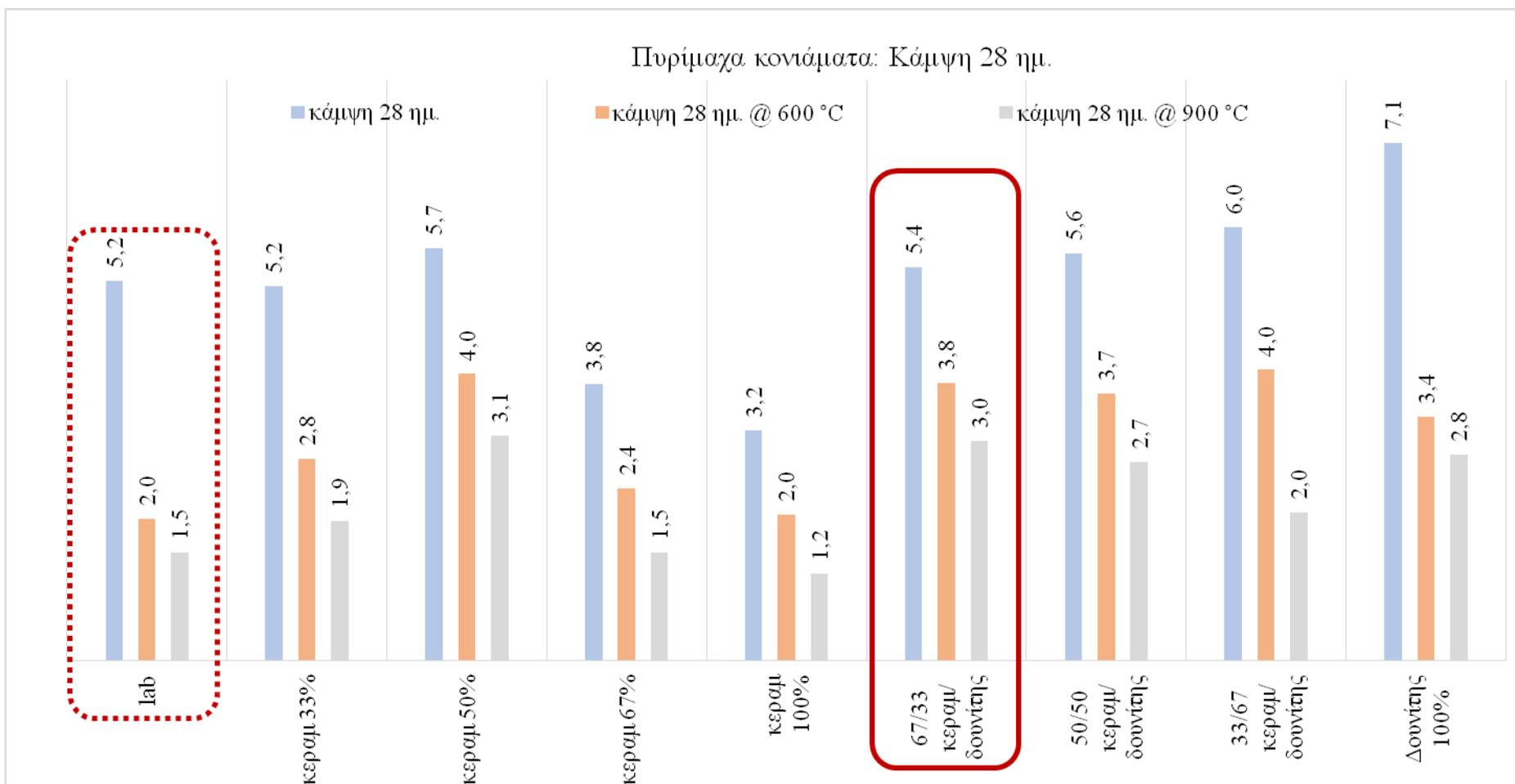
Εντυπωσιακή ωστόσο ήταν η ενίσχυση των αντοχών των κονιαμάτων μετά από την έψηση, όπου σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρήθηκε διπλασιασμός των αντοχών σε σχέση με το κονίαμα αναφοράς, (αύξηση αντοχών κατά 90 - 130 %), πράγμα που επιβεβαίωσε την πολύ ικανοποιητική πυριμαχικότητα των δοκιμασθέντων εναλλακτικών αδρανών.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η αντικατάσταση του chamotte με κεραμικά έχει επιπροσθέτως και αισθητικό αποτέλεσμα, καθώς τα κεραμικά προσδίδουν στο κονίαμα μία χρώση κεραμιδί απομακρύνοντας το απο το σκούρο γκρίζο του βιομηχανικού προϊόντος.

Πίνακας 1. PYRO PRO Πυρίμαχη Λάσπη για πυρότουβλα με απορρίμματα κεραμοποιίας και δουνίτη ως αδρανές										
	Βιομ. Προϊόν	Εργαστηρι ακό Προϊόν	Εργαστηριακό προϊόν με αντικαταστάσεις αδρανών από απορρίμματα κεραμοποιίας και δουνίτη							
			33 % των αδρανών Κεραμ.	50 % των αδρανών Κεραμ	67 % των αδρανών Κεραμ	100 % των αδρανών Κεραμ	67/33 κεραμ/δουνίτης	50/50 κεραμ/δουνίτης	33/67 κεραμ/δουνίτης	100 % των αδρανών Δουνίτης
Chamotte, %		71,32	47,3	35,7	23,6					
Απόρριμμα Κεραμοποιίας, %			23,7	35,7	47,0	71,3	47,8	35,7	23,5	
Δουνίτης, %							23,5	35,7	47,8	71,3
Νερό ανάμιξης, %	20	20	19,9	21	22,5	24,7	22	21,5	20	18
Εξάπλωση, mm	186	152	151	175	169	161	176	189	168	152
Ειδ. Βάρος νωπού, kg/m ³	1.809	1.782	1.908	1.929	1.874	1.805	1.968	1.949	1.959	1.900
Αεροπεριεκτικότητα, %	17	17,5	13,8	12	5,8	9,5	10,5	11,5	12,8	14,8
Ξηρά φαιν. πυκνότητα, kg/m ³	1.670	1.640	1.720	1.750	1.670	1.600	1.790	1.800	1.830	1.723
Θερμ. Αγωγιμ. P=90%, W/mK	0,74	0,71	0,80	0,84	0,74	0,66	0,89	0,89	0,94	0,80
Κάμψη 28 ημ., MPa	5,4	5,2	5,2	5,7	3,8	3,2	5,4	5,6	6,0	7,1
Θλίψη 28 ημ., MPa	19,2	19,1	30,1	27,4	20,5	17,9	31,4	28,2	27,1	23,1
Κάμψη ψημ. @ 600 °C, MPa	0,9	2	2,8	4,0	2,4	2,0	3,8	3,7	4,0	3,4
Θλίψη ψημ. @ 600 °C, MPa	7,4	8,7	15,4	17,5	11,5	10,4	17,7	16,6	15,8	15,0
Συστολή έγνησης @ 600 °C, %	0,66	0,67	0,53	1,28	1,04	0,93	0,82	0,54	0,63	0,88
Κάμψη ψημ. @ 900 °C, MPa	0,8	1,5	1,9	3,1	1,5	1,2	3,0	2,7	2,0	2,8
Θλίψη ψημ. @ 900 °C, MPa	5,7	6,4	11,1	14,6	8,1	6,7	12,9	11,1	10,7	14,5
Συστολή έγνησης @ 900 °C, %	0,70	0,91	1,15	1,05	0,59	1,02	1,03	1,32	1,32	0,98



Διάγραμμα 1. Συγκριτικό της αντοχής σε θλίψη άψητων και ψημένων δοκιμίων Πυρίμαχης Λάσσης με εναλλακτικά αδρανή. Με διάστικτο περίγραμμα σημειώνεται η σύνθεση αναφοράς (lab: εργαστηριακή αναπαραγωγή εμπορικού προϊόντος) και με συνεχές περίγραμμα επισημαίνεται η σύνθεση που αξιολογήθηκε ως η επιτυχέστερη για την πιλοτική δοκιμή.



Διάγραμμα 2. Συγκριτικό της αντοχής σε κάμψη άψητων και ψημένων δοκιμίων Πυρίμαχης Λάσπης με εναλλακτικά αδρανή.

Από τις πειραματικές συνθέσεις που σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν στα εργαστήρια της EBETAM στην Ριτσώνα, η πλέον επιτυχής σύνθεση αφορά την περίπτωση όπου το chamotte αντικαθίσταται εξ ολοκλήρου από μίγμα απορριμμάτων κεραμοποιίας/δουνίτη σε αναλογία 70/30, πράγμα που αντιστοιχεί σε συμμετοχή των απορριμμάτων κεραμοποιίας κατά 47,8 %κ.β και του δουνίτη κατά 23,5 %κ.β στη σύνθεση. Η βέλτιστη αυτή σύνθεση επελέγη για την πιλοτική εργοστασιακή παραγωγή από τη Nordia.

Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της βέλτιστης αυτής σύνθεσης εμφανίζονται στον Πίνακα 2. Στην επιλεγείσα αυτή σύνθεση διενεργήθηκαν δοκιμές και ελέγχθησαν τα χαρακτηριστικά της σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς.

Πίνακας 2. PYRO PRO Πυρίμαχο κονίαμα – Επιτυχέστερη σύνθεση		
	Εργαστηριακό Προϊόν	67/33 κεραμικά/δουνίτης
Chamotte, %	71,3	
Απόρριμμα Κεραμοποιίας, %		47,8
Δουνίτης, %		23,5
Νερό ανάμιξης, %	20	22
Εξάπλωση, mm – EN 1015-3	152	176
Ειδ. Βάρος νωπού, kg/m ³ – EN 1015-6	1.782	1.968
Αεροπεριεκτικότητα, % – EN 1015-7	17,5	10,5
Εργάσιμος χρόνος, min – EN 1015-9	67	83
Ξηρά φαίν. πυκνότητα, kg/m ³ - EN 1015-10	1.640	1.790
Θερμ. Αγωγιμ. P=90%, W/mK – EN 1745	0,71	0,89
Κάμψη 28 ημ., MPa - EN 1015-11	5,2	5,4
Θλίψη 28 ημ., MPa - EN 1015-11	19,1	31,4
Κάμψη ψημ. @ 600 °C, MPa	2,0	3,8
Θλίψη ψημ. @ 600 °C, MPa	8,7	17,7
Συστολή έψησης @ 600 °C, %	0,67	0,82
Κάμψη ψημ. @ 900 °C, MPa	1,5	3,0
Θλίψη ψημ. @ 900 °C, MPa	6,4	12,9
Συστολή έψησης @ 900 °C, %	0,91	1,03
Τριχοειδής απορρόφηση, kg/(m ² .min ^{0,5}) – EN 1015-18	0,4	0,3

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η παρούσα ερευνητική εργασία δείχνει ότι τα απορρίμματα της κεραμοποιίας και τα δουνιτικά απορρίμματα της εξορυκτικής διεργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν επιτυχώς στην παραγωγή πυρίμαχου κονιάματος για ειδικές χρήσεις.

Τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς φάνηκε ότι η αντικατάσταση του chamotte από εναλλακτικά πυράντοχα αδρανή αυξάνει σημαντικά τις συμβατικές αντοχές του πυρίμαχου κονιάματος, αλλά και ακόμα περισσότερο τις αντοχές του μετά την έκθεσή του στις υψηλές θερμοκρασίες.

Αναμφίβολα η χρήση των απορριμμάτων κεραμοποιίας και δουνίτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για βιομηχανική αξιοποίηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baronio G, Binda L, Lombardini N. (1997). The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks. *Construction and Building Materials*, pp.33-40.
- Binici H. (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, p.1191.
- Matiasa G., Fariab P., Torresc I. (2014). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction and Building Materials* 73, pp.125-136.
- Vejmelková E, Keppert M, Rovnaníková P, Keršner Z, Černý R. (2012). Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. *Composites Part B: Engineering*, pp.3534-40.
- Παπαγιάννη Ι., Στεφανίδου Μ., Πάχτα Β. (2005). Χρήση θραυστού κεραμικού υλικού για την παραγωγή έγχρωμων κονιαμάτων και ενεμάτων. *1^ο ΕΒΠΠΑΡ*.
- Τσώχος Γ. (2004). Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων και Εναλλακτικών Υλικών στην Οδοποιία. *Ημερίδα Εργαστηρίου Οδοποιίας*.

Αξιοποίηση ξηράς ιλύος της χρωματοβιομηχανίας στην παραγωγή τσιμεντοκονιαμάτων

Z. Τσιμπούκη¹, K. Ανδρεούλη¹, B. Μπακέας¹, Σ. Παπαγιαννάκης²

1. EBETAM A.E., Παράρτημα Θηβών, 72^ο χλμ. Αθηνών-Λαμίας, 341 00, Χαλκίδα

2. NORDIA A.E., 1^ο χλμ. Μαρκόπουλου-Ωρωπού, 190 14 Πολυδένδρι Αττικής

Λέξεις κλειδιά: αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, τσιμεντοκονιάματα, ιλύς χρωματοβιομηχανίας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η ιλύς της χρωματοβιομηχανίας είναι ένα απόρριμμα που παράγεται κατά τον καθαρισμό των αναμικτήρων παραγωγής. Έχει μορφή πυκνού αιωρήματος, το οποίο μετά από διάφορα στάδια επεξεργασίας καταλήγει σε ξηρό στερεό απόβλητο, που παραδίδεται σε εταιρείες διαχείρισης αποβλήτων με παράλληλη καταβολή υψηλού τιμήματος. Η ξηρά ιλύς συνίσταται κατά κύριο λόγο σε ανθρακικό ασβέστιο και οξείδιο του τιτανίου. Διερευνήθηκε η χρήση της σε τσιμεντοκονιάματα, όπως λάσπη κτισίματος, τσιμεντοκονία γεμίματος δαπέδων και επισκευαστικό σοβά. Η ξηρά ιλύς χρησιμοποιήθηκε σε αντικατάσταση μέρους της άμμου μετά από θραύση, ή σε αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου μετά από άλεση. Οι δοκιμές μηχανικών χαρακτηριστικών έδωσαν αποτελέσματα εφάμιλλα ή και καλύτερα των αντιστοίχων έτοιμων προϊόντων, πράγμα που ενθαρρύνει την περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της ιλύος σε τέτοιες χρήσεις. Τα οφέλη θα ήταν σημαντικά αφ' ενός για την βιομηχανία τσιμεντοκονιαμάτων, που θα μπορούσε να εξοικονομήσει πρώτες ύλες, αφ' ετέρου και κυρίως για την χρωματοβιομηχανία που θα εξοικονομούσε τα υψηλά έξοδα διάθεσης αποβλήτων.

Exploitation of dry mud of paint industry in the production of cement mortars

Z. Tsibouki¹, K. Andreouli¹, V. Mpakeas¹, S. Papagiannakis²

1. MIRTEC S.A. Thiva branch, 72nd km of Athens-Lamia National Road, 341 00 Chalkida

2. NORDIA S.A. 1st km Country Road Markopoulo-Oropou, 190 14 Polydendri Attica

Keywords: by-product utilization, cement mortars, paint industry mud

ABSTRACT: The mud of paint industry is a waste generated during purification of mixers. It has the form of concentrated suspension, which after various processing steps results in a dry solid waste, which is delivered to waste management companies while paying a high price. The dry mud consists essentially in calcium carbonate and titanium oxide. Its utilization in cement mortars, such as masonry mortar, floor screed and repair mortar was investigated. The mud was used as partial replacement of the sand after being crushed, or as partial replacement of cement after being ground. The tests on mechanical characteristics gave results comparable to the ones of the respective commercial products, thus encouraging further investigation of such uses of the mud. The benefits would be significant for both the cement mortars industry, which would save raw materials, and much more for the paint industry, which would save the high costs of waste disposal.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η ανάπτυξη τσιμεντοκονιαμάτων μειωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος με αξιοποίηση της ξηράς ιλύος που προκύπτει από τη φυσικοχημική και βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων της βιομηχανίας χρωμάτων, που παράγονται κατά την έκπλυση των αναμικτήρων παραγωγής των χρωμάτων βάσεως νερού. Η προκύπτουσα ιλύς είναι ένα απόρριμμα, που επιβαρύνει σημαντικά την χρωματοβιομηχανία λόγω του κόστους διάθεσής της σε εταιρείες διαχείρισης αποβλήτων.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία η ιλύς δοκιμάστηκε σε συνθέσεις λάσπης κτισίματος, κονιάματος για πλήρωση δαπέδων και επισκευαστικού κονιάματος.

Η εργασία διεξήχθη στο πλαίσιο ερευνητικού έργου ΠΑΒΕΤ με τίτλο: «Ανάπτυξη Κονιαμάτων με Μειωμένο Ενεργειακό Αποτύπωμα – KONIENERPON».

2 ΙΛΥΣ ΧΡΩΜΑΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Η βιομηχανία χρωμάτων παράγει απόβλητα από την έκπλυση των δοχείων, μύλων και αναμικτήρων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία. Τα απόνερα του καθαρισμού διοχετεύονται συνήθως σε δεξαμενές καθίζησης, όπου υφίστανται φυσικοχημική επεξεργασία με την χρήση κατάλληλων κροκιδωτικών/πολυηλεκτρολυτών (Ζάγκλης κ.ά., 2013).

Από την διεθνή βιβλιογραφία βρέθηκε ότι υπάρχουν αρκετές προσπάθειες για αξιοποίηση αυτών των αποβλήτων από διάφορες βιομηχανίες χρωμάτων.

Ιλύς χρωμάτων αυτοκινητοβιομηχανίας έχει χρησιμοποιηθεί για νέα πρόσμικτα τσιμέντου (Soroushian et al., 1996) και άλλα δομικά προϊόντα όπως σκυρόδεμα και ασφατικά (Matheson et al., 2006). Αξιοσημείωτη επίσης είναι η περίπτωση μίας ινδικής εταιρίας χρωμάτων η οποία το 2005 εισήγαγε στην παραγωγή της, μία καινοτόμο τεχνολογία ανακύκλωσης της ιλύος των χρωμάτων από την βαφή οχημάτων, για την παραγωγή υψηλής ποιότητας ασταριού, ενώ πλέον η ίδια εταιρεία ερευνά την χρήση της και σε ασφαλτοσκυρόδεμα (Sen, 2011).

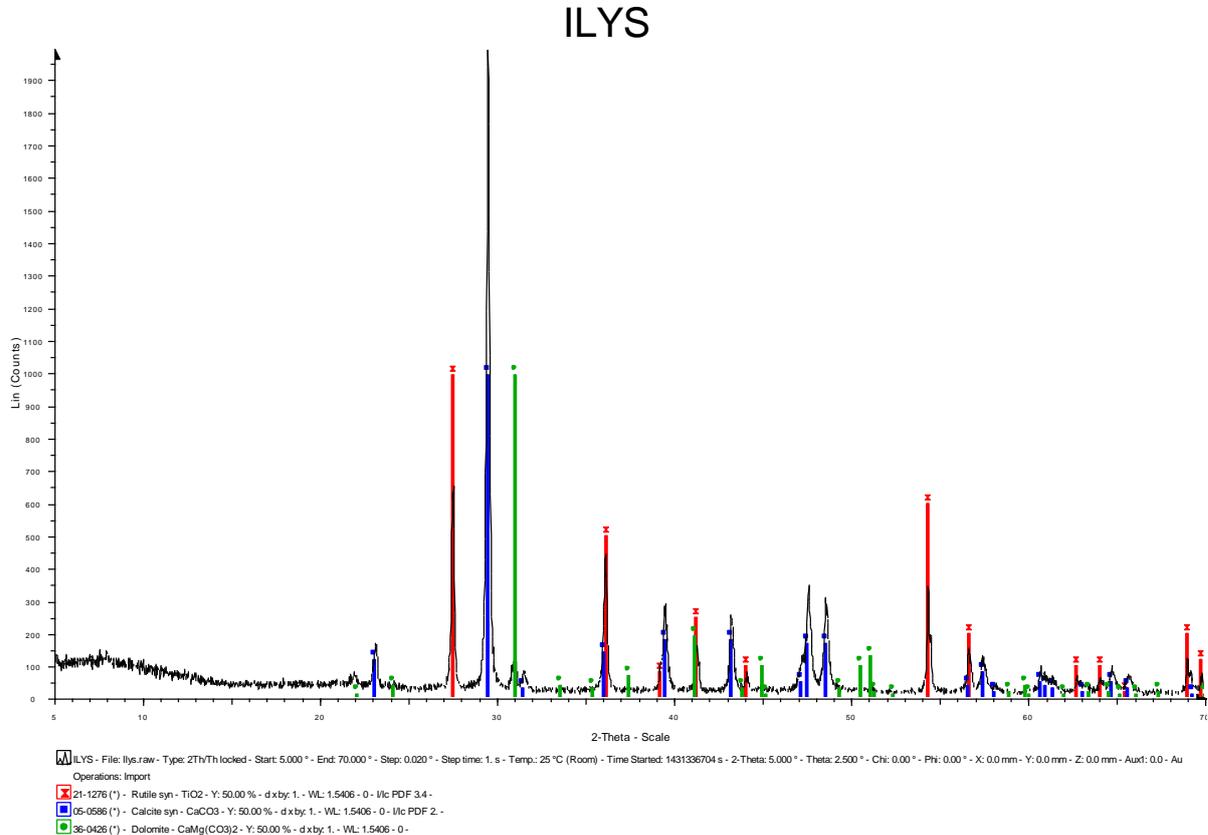
Στην παρούσα μελέτη, εξετάζεται η αξιοποίηση ιλύος χρωμάτων με βάση το νερό, έτσι όπως προέκυψε από τη φυσικοχημική επεξεργασία σε μια ελληνική χρωματοβιομηχανία. Η ιλύς, μετά την διαδικασία της καθίζησης, αποτίθεται σε κλίνες ξήρανσης και διατίθεται σταδιακά σε ειδικά αδειοδοτημένη εταιρεία διαχείρισης αποβλήτων, με παράλληλη καταβολή υψηλού τιμήματος. Η ιλύς που παράγεται από την συγκεκριμένη βιομηχανία είναι περί τους 300 τόνους ανά έτος και η διάθεσή της επιβαρύνει την εταιρεία με ένα υψηλό κόστος ανά τόνο υλικού. Το υψηλό κόστος διάθεσης έχει σαν συνέπεια την συσσώρευση μεγάλου όγκου ξηράς ιλύος στις υπαίθριες εγκαταστάσεις της βιομηχανίας χρωμάτων και κάνει επιτακτική την ανάγκη διαχείρισης και αξιοποίησης της.

Η συγκεκριμένη υγρή ιλύς αποτελείται από νερό και κατάλοιπα χρωμάτων βάσεως νερού. Λόγω της πολύ λεπτής κοκκομετρικής διαβάθμισης των στερεών πρώτων υλών της βιομηχανίας χρωμάτων, η ξηρά ιλύς συνίσταται σε συσσωματώματα πολύ λεπτομερών υλικών, ενώ η σύνθεσή της δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις που σχετίζονται με την ποικιλία των παραγομένων προϊόντων. Μια ενδεικτική σύνθεση, αντιπροσωπευτική της παρτίδας που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, είναι η εξής:

- > Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) ~53 %
- > Οξείδιο του τιτανίου (TiO_2) ~20 %
- > Οργανικά ~22 %

Η ορυκτολογική ανάλυση της ιλύος φαίνεται στο παρατιθέμενο διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων που έχουν γίνει κατά καιρούς δεν περιέχει βαρέα μέταλλα ή άλλα συστατικά που να την καθιστούν επικίνδυνη για το περιβάλλον ή την υγεία. Στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού προγράμματος εξετάστηκε η εκπλυσιμότητά της. Οι συγκεντρώσεις όλων των βαρέων μετάλλων στο έκπλυμα βρέθηκαν χαμηλότερες από 0,01 ppm.



Διάγραμμα 1. Ορυκτολογική ανάλυση XRD της ιλύος

— Ασβεστίτης CaCO_3 — Ρουτίλιο TiO_2 — Δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Το οργανικό φορτίο της ιλύος θέτει την ανάγκη διερεύνησης της συμπεριφοράς στη φωτιά των δομικών προϊόντων που σχεδιάζονται με την ιλύ ως συστατικό τους.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η ιλύς προέρχεται από ανάμιξη σημαντικής μεν ποσότητας υπολειμμάτων λευκού χρώματος, αλλά και μικρών ποσοτήτων διαφόρων χρωμάτων, ικανών να σκουρύνουν σημαντικά την ιλύ. Δεδομένου αυτού του χαρακτηριστικού, διερευνήθηκε η χρήση της σε κονιάματα, όπου η γκρίζα απόχρωσή της δεν θα επιδείνωνε το χρωματισμό των προϊόντων. Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα των αρχικών δοκιμών έδωσαν έναυσμα στη διερεύνηση της χρήσης της ιλύος και σε κονιάματα με βάση το λευκό τσιμέντο.

Η ξηρά ιλύς χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη τριών ειδών κονιαμάτων: λάσπη κτισίματος, κονίαμα δαπέδων και επισκευαστικό κονίαμα και υποκατέστησε ή μέρος των αδρανών ή μέρος του τσιμέντου.

Ο σχεδιασμός των κονιαμάτων στηρίχθηκε σε συνθέσεις αντιστοίχων εμπορικών προϊόντων της Marmoline, η οποία και διέθεσε τις πρώτες ύλες για την εργαστηριακή παραγωγή.

Τα προϊόντα που σχεδιάστηκαν με βάση το φαιό τσιμέντο είναι:

- Λάσπη κτισίματος, με βάση το εμπορικό προϊόν “LX40”
- Τσιμεντοκονία γεμίματος δαπέδων, με βάση το προϊόν “GB30”

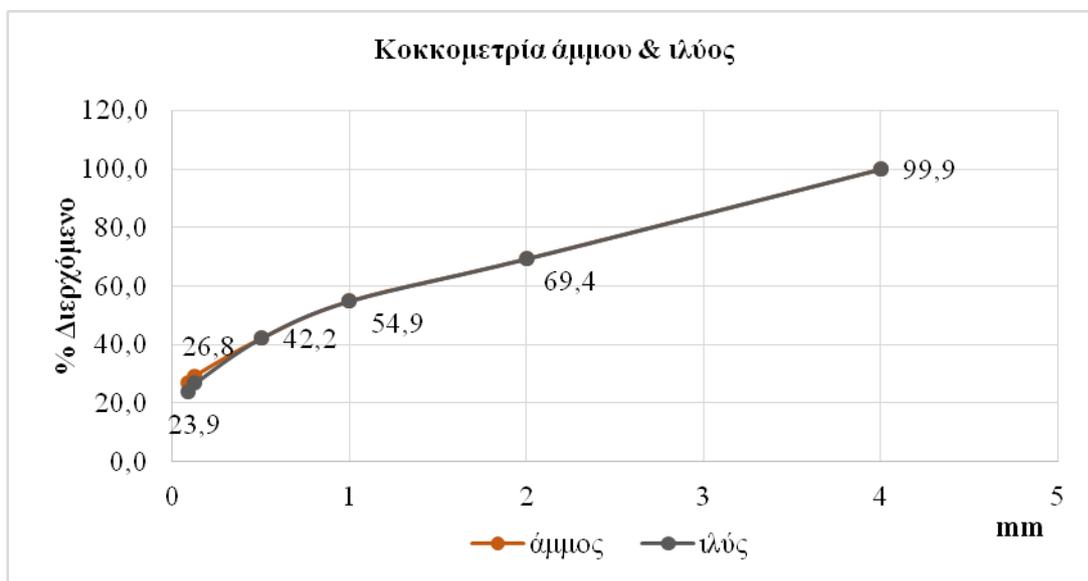
Και με βάση το λευκό τσιμέντο:

- Επισκευαστικό κονίαμα, με βάση το “SV101 ταχύπηκτος επισκευαστικός σοβάς μιας στρώσης”

Η ξηρά ιλύς βρίσκεται σε απόθεση στις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας σε μορφή σκληρών, χονδρών συσσωματωμάτων, που εξακολουθούν να εμπεριέχουν κάποια υγρασία και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές απαιτείται περαιτέρω ξήρανση και θραύση, ενώ σε περίπτωση υποκατάστασης του τσιμέντου χρήζει και άλεσης.

Η επεξεργασία αυτή, (ξήρανση, θραύση, άλεση) πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της Nordia – Marmoline, και κατάλληλες ποσότητες επεξεργασμένης ιλύος απεστάλησαν στις εγκαταστάσεις Ριτσώνας της EBETAM όπου και πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές συνθέσεις και ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων. Οι πρώτες ύλες για τη σύνθεση των κονιαμάτων (τσιμέντα, μαρμαρόσκονη διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων, χημικά πρόσθετα) καθώς και οι συνταγές για την παραγωγή των προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες διατέθηκαν από την Nordia.

Μετά το στάδιο της ξήρανσης και θραύσης, η ιλύς προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο μέρους των αδρανών, διαχωρίστηκε σε κοκκομετρικά κλάσματα παραπλήσια αυτών της μαρμαρόσκονης που χρησιμοποιείται από τη Nordia. Το κατωτέρω διάγραμμα δείχνει την κοκκομετρική διαβάθμιση της μαρμαρόσκονης και της θραυσμένης ιλύος.



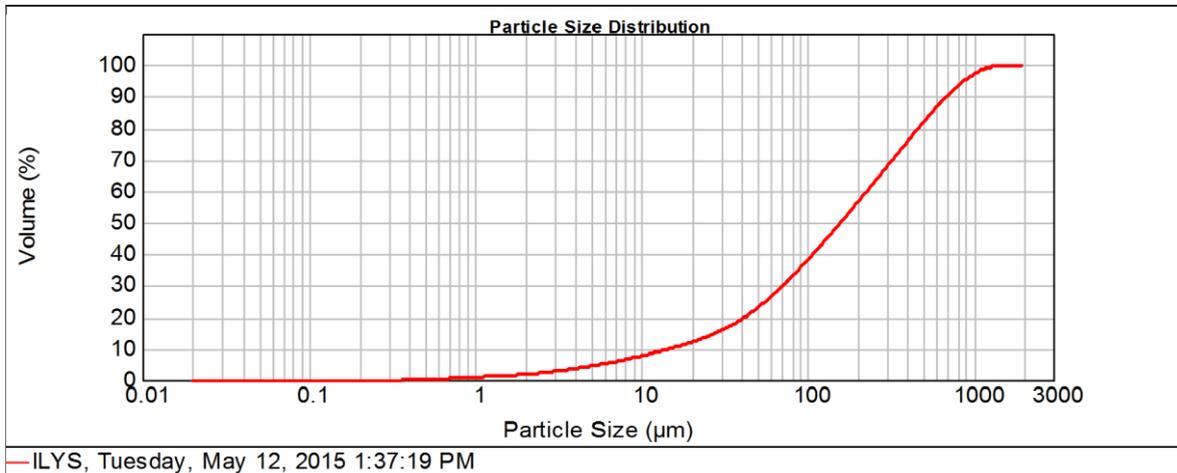
Διάγραμμα 2. Κοκκομετρική διαβάθμιση συμβατικών και εναλλακτικών αδρανών των κονιαμάτων

Η θραυσμένη ιλύς χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές συνθέσεις για την υποκατάσταση των αντιστοίχων κοκκομετρικών κλασμάτων της άμμου κατά 10 % κ.β. και 20 % κ.β.

Η αλεσμένη ξηρά ιλύς χρησιμοποιήθηκε για την υποκατάσταση του τσιμέντου κατά 5 % κ.β. και 10 % κ.β., ή του λεπτού κοκκομετρικού κλάσματος μαρμαρόσκονης κατά 100 % κ.β.

Σημειώνεται ότι σε όλες τις πειραματικές συνθέσεις, η ξηρά ιλύς υποκατέστησε ένα μόνον είδος συστατικών, ή αδρανή ή τσιμέντο. Δεν πραγματοποιήθηκε σύνθεση με υποκατάσταση και των δύο συστατικών.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση της αλεσμένης ιλύος απεικονίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3. Κοκκομετρική διαβάθμιση αλεσμένης ιλύος
D10 = 15 μm, D50 = 156 μm, D90 = 674 μm

Για τις τρεις κατηγορίες εξεταζομένων κονιαμάτων, (λάσπη κτισίματος, κονίαμα δαπέδων και επισκευαστικό κονίαμα), σαν συνθέσεις αναφοράς για τις πειραματικές συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακές συνθέσεις των εμπορικών προϊόντων.

Συγκεκριμένα, οι πειραματικές συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα τρία είδη κονιαμάτων διακρίνονται σε:

- 4 συνθέσεις για λάσπη κτισίματος με αντικατάσταση των αδρανών κατά 10 και 20 % κ.β. με θραυσμένη ιλύ, και του τσιμέντου κατά 5 και 10 % κ.β. με αλεσμένη ιλύ
- 4 συνθέσεις κονιάματος δαπέδου με ίδιες αντικαταστάσεις ως ανωτέρω
- 3 συνθέσεις επισκευαστικού κονιάματος, όλες με χρήση αλεσμένης ιλύος, η οποία στη μία δοκιμή αντικατέστησε πλήρως το λεπτόκοκκο κλάσμα των αδρανών και στις άλλες δύο αντικατέστησε το τσιμέντο κατά 5 και 10 % κ.β.

Αναλυτικά, οι συνθέσεις των κονιαμάτων και τα φυσικομηχανικά τους χαρακτηριστικά, παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 έως 3 που ακολουθούν.

Πίνακας 1. Συνθέσεις Λάσσης Κτισίματος LX40 με βάση CEM IV 32,5 και με ιλύ θραυσμένη ως αδρανές, ή αλεσμένη ως τσιμέντο							
	Δηλούμενα Χαρακτηριστικά	Βιομηχανικό Προϊόν	Εργαστηριακό Προϊόν	Πειραματικό προϊόν με αντικαταστάσεις αδρανών ή τσιμέντου από ιλύ			
				10 % των αδρανών από θραυσμ. ιλύ	20 % των αδρανών από θραυσμ. ιλύ	5 % του τσιμέντου από αλεσμ. ιλύ	10% του τσιμέντου από αλεσμ. ιλύ
Αλεσμένη ιλύς, %						0,7	1,4
Θραυσμένη ιλύς, %				8,6	17,3		
Νερό ανάμιξης, %	15	14,9	15	15,6	16,7	15,5	15,5
Εξάπλωση, mm	170-180	160	170	168	169	174	175
Ειδ. Βάρος νοπού, kg/m ³	2.000	1.774	1.864		1.977	1.892	1.959
Αεροπεριεκτικότητα, %		18,5	15,5		7,8	15	11
Κάμψη 28 ημ., MPa	1,6	1,4	2,1	2,8	2,9	2,1	2,3
Θλίψη 28 ημ., MPa	6,0	4,8	5,6	9,2	8,9	6,0	7,4

Πίνακας 2. Τσιμεντοκονία Γεμίματος Δαπέδων GB30 με βάση CEM IV 32,5 με ιλύ θραυσμένη ως αδρανές, ή αλεσμένη ως τσιμέντο							
	Δηλούμενα Χαρακτηριστικά	Βιομηχανικό Προϊόν	Εργαστηριακό Προϊόν	Πειραματικό προϊόν με αντικαταστάσεις αδρανών ή τσιμέντου από ιλύ			
				10 % των αδρανών από θραυσμ. ιλύ	20 % των αδρανών από θραυσμ. ιλύ	5 % του τσιμέντου από αλεσμ. ιλύ	10% του τσιμέντου από αλεσμ. ιλύ
Αλεσμένη ιλύς, %						0,7	1,4
Θραυσμένη ιλύς, %				8,6	17,2		
Νερό ανάμιξης, %	12,5-13,8	13,6	13,3	14,4	16,1	13,4	13,4
Εξάπλωση, mm	170-180	197	177	147	147	175	174
Ειδ. Βάρος νοπού, kg/m ³	2.100	1.871	1.989		2.023	2.108	2.132
Αεροπεριεκτικότητα, %		15,5	11,5		5		7,5
Κάμψη 28 ημ., MPa	2	3,2	3,4	5	3,8	4,1	3,5
Θλίψη 28 ημ., MPa	10	11,2	10,6	15,6	11,3	13,4	12,7

Πίνακας 3. Συνθέσεις Επισκευαστικού Σοβά SV 101 με βάση CEM I 52,5 - Αλεσμένη ιλύς ως τσιμέντο ή ως αδρανές					
	Δηλούμενα Χαρακτηριστικά	Εργαστηριακό Προϊόν	Πειραματικό προϊόν με αντικαταστάσεις αδρανών και τσιμέντου από ιλύ		
			5 % του τσιμέντου αλεσμ. ιλύς	10% του τσιμέντου αλεσμ. ιλύς	Κλάσμα 0/0,09 των αδρανών αλεσμ. ιλύς
Αλεσμένη ιλύς, %			0,7	1,4	11,9
Νερό ανάμιξης, %	20-22	21	21	21	22
Εξάπλωση, mm	170-180	175	175	172	151
Ειδ. Βάρος νωπού, kg/m ³	1.630	1.680	1.701	1.699	1.832
Αεροπεριεκτικότη., %		19,5	18	18,5	11,2
Κάμψη 28 ημ., MPa	1,5	3,7	3,5	3,6	4,1
Θλίψη 28 ημ., MPa	5	9	8,7	8,3	10,9

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι συγκριτικές αντοχές των κονιαμάτων που ανατύχθηκαν παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1 έως 3.

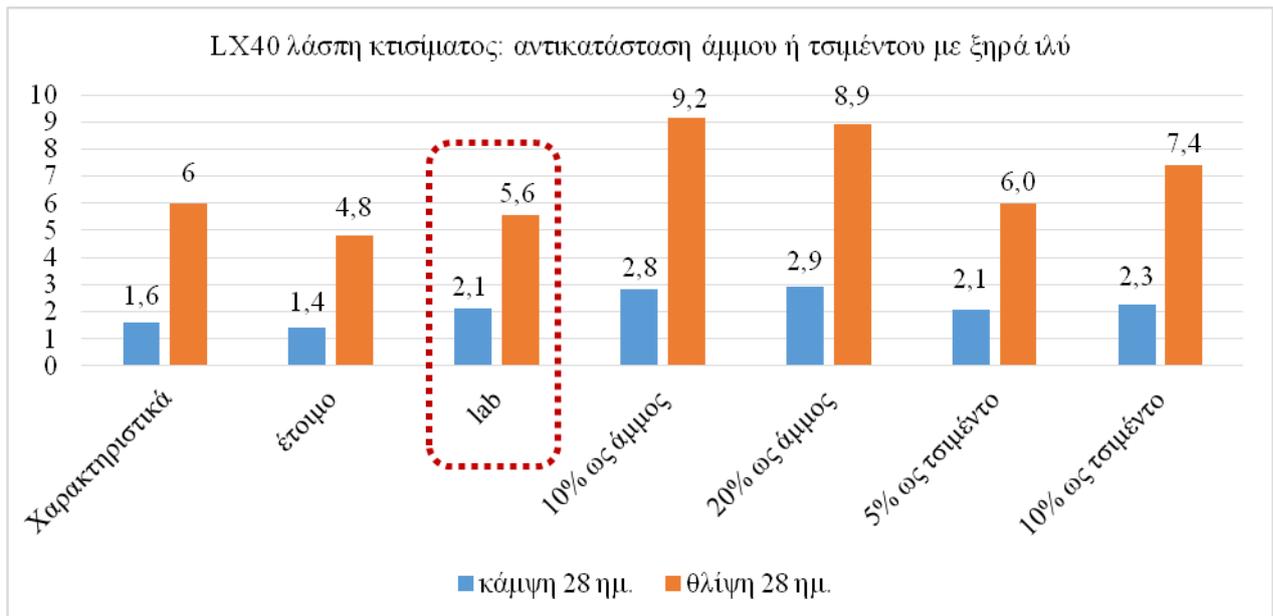
Στις πειραματικές συνθέσεις για λάσπη κτισίματος, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής 28 ημερών με χρήση της ιλύος ήταν θεαματική και κυμάνθηκε από 8 ως 64 %, με τις υψηλότερες επιδόσεις να εμφανίζονται εκεί όπου η ιλύς αντικατέστησε τα αδρανή και όχι το τσιμέντο.

Στις συνθέσεις κονιαμάτων δαπέδου, η αύξηση των αντοχών κυμάνθηκε από 7 ως 48 %.

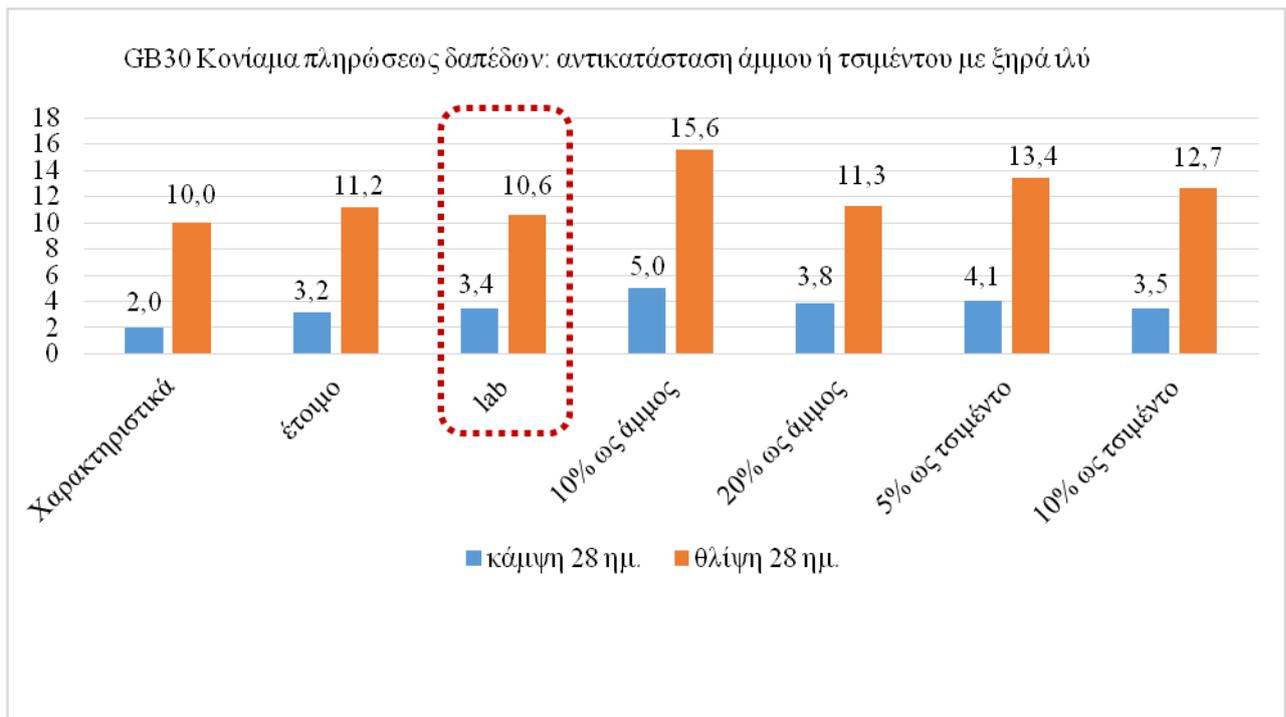
Στην περίπτωση των επισκευαστικών κονιαμάτων, η αύξηση αντοχών δεν παρατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις, παρά μόνον στην περίπτωση αντικατάστασης της λεπτής μαρμαρόσκονης με αλεσμένη ιλύ, όπου μετρήθηκε αύξηση κατά 22 %. Στις περιπτώσεις αντικατάστασης τσιμέντου παρατηρήθηκε μείωση των αντοχών κατά 3 με 8 %.

Η διαφορετική αυτή εικόνα της επίδρασης στις αντοχές μπορεί να αποδοθεί στον διαφορετικό τύπο τσιμέντου που χρησιμοποιείται στα επισκευαστικά κονιάματα, το CEM I 52,5 έναντι του CEM IV 32,5, που χρησιμοποιείται στους άλλους δύο τύπους κονιαμάτων. Λόγω της πολύ υψηλότερης αντοχής του CEM I 52,5 και του υψηλότερου ρυθμού ανάπτυξης αντοχών, η μερική αντικατάστασή του από ιλύ μειώνει την αντοχή του κονιαματος, (ωστόσο κατά ένα ποσοστό χαμηλότερο του ποσοστού αντικατάστασης).

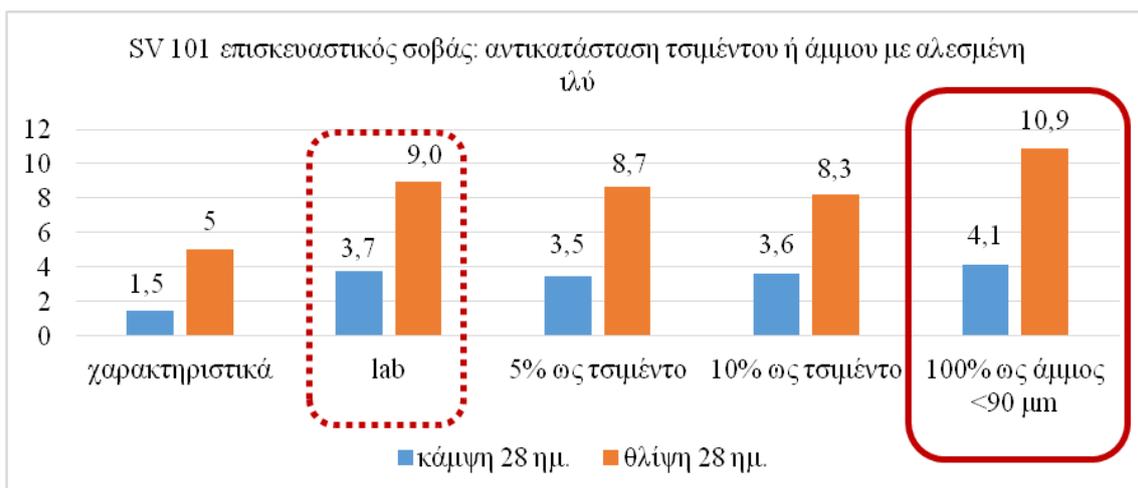
Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και στην περίπτωση αντικατάστασης του τσιμέντου, η μικρή μείωση των αντοχών είναι αποδεκτή, αφού εξοικονομείται μια ακριβή πρώτη ύλη δι' αντικαταστάσεώς της με μια φθηνότερη εναλλακτική. Επί πλέον, σε όλες τις περιπτώσεις οι μετρούμενες αντοχές είναι υψηλότερες από τις δηλούμενες αντοχές των εργοστασιακών προϊόντων, συνεπώς τα αποτελέσματα θεωρούνται θετικά.



Διάγραμμα 4. Σύγκριση αντοχών λάσπης κτισίματος. Με διάστικτο περίγραμμα σημειώνεται το εργαστηριακό κονίαμα αναφοράς



Διάγραμμα 5. Σύγκριση αντοχών τσιμεντοκονίας δαπέδων. Με διάστικτο περίγραμμα σημειώνεται το εργαστηριακό κονίαμα αναφοράς



Διάγραμμα 6. Σύγκριση αντοχών επισκευαστικού σοβά. Με διάστικτο περίγραμμα σημειώνεται το κονιάμα αναφοράς και με συνεχές η επιτυχέστερη πειραματική σύνθεση επισκευαστικού κονιάματος, που επιλέχθηκε για την πιλοτική δοκιμή.

Από όλες τις πειραματικές συνθέσεις που σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν στα εργαστήρια της EBETAM στην Ριτσώνα, η πλέον επιτυχής σύνθεση επισκευαστικού κονιάματος αφορά την σύνθεση όπου το λεπτό κλάσμα της άμμου αντικαθίσταται εξ ολοκλήρου από αλεσμένη ιλύ, πράγμα που αντιστοιχεί σε συμμετοχή της αλεσμένης ιλύος στη σύνθεση κατά 11,9 % κ.β., η οποία και είναι στην φάση της πιλοτικής εργοστασιακής παραγωγής από τη Nordia.

Στην βέλτιστη αυτή σύνθεση διενεργήθηκαν περαιτέρω έλεγχοι προκειμένου να συγκριθούν τα χαρακτηριστικά του κονιάματος με εκείνα του κονιάματος αναφοράς. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Σύνθεση και χαρακτηριστικά βέλτιστης σύνθεσης επισκευαστικού σοβά SV101		
	Εργαστηριακό Προϊόν	Κλάσμα 0/0,09 των αδρανών αλεσμ. ιλύς
Αλεσμένη ιλύς, %		11,9
Νερό ανάμιξης, %	21	22
Εξάπλωση, mm – EN 1015-3	175	151
Ειδ. Βάρος νωπού, kg/m ³ – EN 1015-6	1.680	1.832
Αεροπεριεκτικότητα, % – EN 1015-7	19,5	11,2
Εργάσιμος χρόνος, min – EN 1015-9	190	126
Κάμψη 28 ημ., N/mm ² – EN 1015-11	3,7	4,1
Θλίψη 28 ημ., N/mm ² – EN 1015-11	9,0	10,9
Πρόσφυση, N/mm ² – EN 1015-12	0,5	0,3
Τριχοειδής απορρόφηση, kg/(m ² .min ^{0,5}) – EN 1015-18	0,4	0,4
Ξηρά φαινόμενη πυκνότητα, kg/m ³ – EN 1015-10	1.500	1.580
Θερμική αγωγιμότητα P=90 % – EN 1745	0,57	0,65

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η παρούσα ερευνητική εργασία δείχνει ότι η ιλύς της βιομηχανίας χρωμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην παραγωγή τσιμεντοκονιαμάτων.

Στην περίπτωση λάσπης κτισίματος και κονιαμάτων δαπέδου, η προσθήκη τη ιλύος επιφέρει σημαντική αύξηση των αντοχών, όταν χρησιμοποιείται σε αντικατάσταση μέρους των αδρανών και μικρή αύξηση των αντοχών όταν αντικαθιστά μέρος του τσιμέντου.

Στην περίπτωση του επισκευαστικού σοβά, η προσθήκη αλεσμένης ιλύος επιφέρει αύξηση αντοχών όταν αντικαθιστά μέρος της λεπτής μαρμαρόσκονης.

Δεδομένων των ενθαρρυντικών αυτών αποτελεσμάτων, η απορρόφησή της ιλύος από τη βιομηχανία κονιαμάτων εκτιμάται ότι μπορεί να είναι πολύ υψηλή, και θα μπορούσε να είναι ακόμη και ολοκληρωτική, εάν η χρωματοβιομηχανία προβεί σε κάποιες διεργασίες διαχωρισμού και συλλογής του απορρίμματός της, π.χ. διαχωρισμό των αποβλήτων που προέρχονται από την παραγωγή λευκού χρώματος από τα απόβλητα των υπολοίπων χρωμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Matheson R.R., Dixon D.M., Moore J.R., Fischer D.A. (2006). Process for producing building materials from raw paint sludge. *US Patent 7,128,780*.

Sen P. (2011). Painting the way to a greener future.

<http://www.sustainabilityoutlook.in/content/painting-way-greener-future>.

Soroushian P., Okwuegbu A.C. (1996). Shrinkage compensating concrete with expansive additive. *US Patent N° 5,489,3333*.

Ζάγκλης Δ., Κουτσούκος Π., Παρασκευά Χ. (2013). Συνδυασμός κροκίδωσης/καθίζησης και διήθησης μεμβρανών για την επεξεργασία υγρών βιομηχανικών αποβλήτων μονάδας παραγωγής χρωμάτων. Πρακτικά 9^{ου} ΠΕΣΧΜ, Ε.Μ.Π., Αθήνα 23-25 Μαΐου 2013.

Κρίσιμο μήκος διάτμησης ινοπλισμένων τσιμεντοειδών με μεγάλα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας

Αντρούλα Β. Γεωργίου (1), Σταυρούλα Ι. Πανταζοπούλου (1) + (2)

(1) Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Κύπρος

(2) Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ελλάδα (σε άνευ αποδοχών άδεια)

Λέξεις κλειδιά: αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, πλάστιμο ινοπλισμένο τσιμεντούχο σύνθετο υλικό, κανονιστικό πλαίσιο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα ινοπλισμένα τσιμεντούχα σύνθετα μείγματα (Fiber reinforced cementitious composites-FRCC) τα οποία σχηματίζονται με ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA) και ψηλά ποσοστά ιπτάμενης τέφρας, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες σε όρους μεγάλης ικανότητας εφελκυστικής παραμόρφωσης και πλαστιμότητας και θεωρούνται το μέλλον των κατασκευών από τσιμέντο. Παραμένει η πρόκληση για να επανα-εδραιωθούν κανόνες σχεδιασμού και διαδικασίες ανάλυσης ειδικά σχεδιασμένες για κατασκευές με αυτού του τύπου τα υλικά. Προς αυτή τη κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς με διαφορετικά μήκη διατμητικού ανοίγματος για να καθοριστεί η συμπεριφορά αυτού του καινοτόμου υλικού σε διάτμηση. Το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα έφτανε το 60% και ήταν συνολικά 34% του βάρους του συνόλου των υλικών του μείγματος. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δοκούς με και χωρίς την προσθήκη μεταλλικού οπλισμού και συγκρίθηκαν με τις κανονιστικές διατάξεις για υπολογισμό της διατμητικής αντοχής δοκών με κανονικό σκυρόδεμα. Η προσθήκη ινών έδωσε αυξημένη ικανότητα διατμητικής αντοχής και παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα σε όρους διατμητικής αντοχής συσχετίζονται με αποτελέσματα άμεσου εφελκυσμού στο ίδιο υλικό από πειράματα που έγιναν στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Critical shear span of fiber reinforced composites with high amounts of fly ash

Androula V. Georgiou (1), Stavroula J. Pantazopoulou (1) + (2)

(1) Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cyprus, Cyprus

(2) Democritus University of Thrace, Greece (on leave of absence)

Keywords: by-product utilization, ductile cementitious composites, regulatory framework

ABSTRACT: Fiber reinforced cementitious composites (FRCC) made with hybrid Polyvinyl Alcohol Fibers and high amounts of fly ash, show advantageous mechanical properties in terms of very large tensile strain capacity and ductility and are considered the future of cement based construction. The challenge that remains is to re-establish design rules and analysis procedures specifically tailored to structures made of these materials. In this direction, four point bending tests on beams with multiple shear span-lengths were conducted in order to determine the behaviour of this novel ductile concrete to shear. The amount of cement replacement by fly ash in the composite was in the order of 60% reaching 34% by weight of total mixed materials. Tests were conducted on mixes with and without longitudinal

and shear reinforcement and were compared to Eurocode estimation of shear resistance of beams for normal concrete. The addition of fibers showed a significant effect on shear capacity and ductility. Shear strength is characterized based on stress-strain diagrams of the composite extracted from direct tensile tests conducted in the University of Cyprus.

1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η βιομηχανία παρασκευής τσιμέντου ευθύνεται για το 5% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Η παρασκευή τσιμέντου είναι υπερβολικά εντατική σε ενέργεια και εκπομπές λόγω των ψηλών θερμοκρασιών που χρειάζονται για την παρασκευή του. Η παρασκευή ενός τόνου τσιμέντου χρειάζεται 4.7 εκατομμύρια BTU ενέργειας, που αντιστοιχούν σε 180kg άνθρακα, και δημιουργούν σχεδόν ένα τόνο CO₂ (GNCS, 2009). Η παρασκευή σκυροδέματος απαιτεί υπερβολική κατανάλωση ασβέστου, αργίλου και ενέργειας για την παραγωγή του τσιμέντου, αλλά και την χρήση νερού και διαβαθμισμένων σπαστών αδρανών για το μείγμα. Το σκυρόδεμα είναι το δεύτερο σε ποσότητα περισσότερο χρησιμοποιούμενο υλικό στη Γή μετά το νερό, για την κατασκευή κτιρίων, γεφυρών, δρόμων, αυτοκινητοδρόμων, πεζοδρομίων και φραγμάτων. Όντας αναντικατάστατο για την κατασκευαστική βιομηχανία, η κατανάλωση τσιμέντου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παγκόσμια οικονομία. Η παρασκευή τσιμέντου αυξάνεται κατά 2.5% ετησίως, και αναμένεται να ανέβει από 2.55 δισεκατομμύρια τόνους το 2006 σε 3.7-4.4 δισεκατομμύρια τόνους μέχρι το 2050 (GNCS, 2009).

Οι πρωτοβουλίες βιωσιμότητας ξεκινούν από το περιβαλλοντικό κίνημα στην δεκαετία του '60 και στην ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του '70. Η Κύπρος και η Ελλάδα σαν μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι υποχρεωμένες να συμμορφώνονται με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία για μέτρηση, παρακολούθηση και υποβολή εκθέσεων των εκπομπών αερίων των θερμοκηπίου (GHG), ακόμα και αν η Κύπρος δεν είναι υποχρεωμένη από το Πρωτόκολλο του Κιότο να μειώσει τις εκπομπές αερίου της, λόγω των περιορισμένων επιδράσεων που μπορεί να έχουν εξαιτίας του μικρού της μεγέθους (Massai, 2010). Με βάση δεδομένα από την ετήσια καταγραφική έκθεση από το Ευρωπαϊκό Περιβαλλοντικό Πρακτορείο για το 2005, οι εκπομπές από την παραγωγή τσιμέντου είναι 2.7% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην Κύπρο (απουσία άλλης βαριάς βιομηχανίας) ενώ η αντίστοιχη τιμή για την Ελλάδα είναι μόλις 1.3% (Fatta, 2005). Ο βιώσιμος σχεδιασμός θα πρέπει να επικεντρωθεί στη μείωση εκπομπών CO₂, στην διατήρηση των φυσικών πόρων και στη μεγιστοποίηση της χρήσης αποβλήτων.

1.1 Εκπομπές CO₂

Οι εκπομπές CO₂ δημιουργούνται ταυτόχρονα από την καύση ασβεστόλιθου κατά την διαδικασία παρασκευής τσιμέντου αλλά και από τα καύσιμα που καίγονται για την παραγωγή αυτής της θερμότητας. Αυτή η διαδικασία της ασβεστοποίησης (calcination) ευθύνεται για το 50% των εκπομπών CO₂ της όλης διαδικασίας παραγωγής του τσιμέντου. Το υπόλοιπο 40% συντελείται από έμμεσες εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων. Ο ηλεκτρισμός που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση των μηχανημάτων των εργοστασίων και την τελική μεταφορά του τσιμέντου, αντιπροσωπεύουν επιπλέον πηγές έμμεσων εκπομπών, περίπου 5-10% των συνολικών εκπομπών της βιομηχανίας. Μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές μείωσης των εκπομπών λόγω της διαδικασίας ασβεστοποίησης, είναι η χρήση σύνθετων τσιμέντων με την αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ από ασβεστόλιθο (limestone-based clinker) με άλλα υλικά, κυρίως ιπτάμενη τέφρα (Bilodeau, A., and Malhotra, 2000).

1.2 Συμβολή έρευνας: Βιώσιμος σχεδιασμός

Θα έπρεπε να επιδιώκονται δύο διαφορετικές γραμμές δράσης προκειμένου να επιτευχθεί αυτό που ονομάζουμε βιώσιμο δομικό σχεδιασμό. Η πρώτη γραμμή δράσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη την οικολογική πτυχή και την βιώσιμη αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Η δεύτερη αφορά στην παράταση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής των έργων. Αν αγνοηθεί η

διασύνδεση μεταξύ ανάπτυξης του υλικού, δομοστατικού σχεδιασμού και προοπτικών βιωσιμότητας οδηγούμαστε σε πιο βραχύβιες, μεγαλύτερου κόστους και μεγαλύτερης κατανάλωσης φυσικών πόρων κατασκευές που θα χρειάζονται περισσότερη συντήρηση (Alimoradi, 2015).

Η έρευνα αυτή αφορά ένα υλικό ικανό να ισορροπήσει όλους τους στόχους αειφορίας που λαμβάνουν υπόψη το σύνολο της ενέργειας που ενσωματώνεται μέσα σε μια κατασκευή. Το υλικό αυτό έχει αυξημένη βιωσιμότητα, που επιτυγχάνεται με μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Portland με ιπτάμενη τέφρα, χωρίς τη χρήση χονδρόκοκκων αδρανών και την προσθήκη ινών για την αύξηση της ικανότητας κατανάλωσης μηχανικής ενέργειας. Αυτό το Μηχανικώς Σχεδιασμένο Τσιμεντοειδές (Engineered Cementitious Composite ECC) είναι ένα υψηλής απόδοσης ενισχυμένο με ίνες σύνθετο τσιμεντοειδές (HPFRCC) σχεδιασμένο να αντέχει μεγάλες εφελκυστικές και διατμητικές παραμορφώσεις, ενώ παραμένει συμβατό με το σύνηθες σκυρόδεμα σε όλες σχεδόν τις άλλες απόψεις, όπως αντοχή σε θλίψη και ανθεκτικότητα (Li, 2007).

Προηγούμενες έρευνες για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας (Arezoumandi et al., 2015; Dunstan, 1980) έχουν δείξει πολλές ευεργετικές πτυχές της χρήσης ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, όπως η χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή αντοχή. Επίσης, για υψηλής αντοχής σκυρόδεμα είναι συνήθης πρακτική η αντικατάσταση του τσιμέντου Portland σε ποσοστό 35% για τον έλεγχο της μέγιστης θερμοκρασίας ενυδάτωσης (Myers, J.J., Carrasquillo, 2000). Ο (Gopalan, 1993) έχει δείξει ότι σε σκυροδέματα με μεγάλα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα (HVFA High Volume Fly Ash Content – αντικατάσταση πάνω από το 50% του τσιμέντου) το μείγμα έχει μικρότερη συρρίκνωση, ερπυσμό και διαπερατότητα, και μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα (CC). Αλλά με βάση την ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, υπάρχει έλλειψη στοιχείων σχετικά με την μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών όταν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Χωρίς αυτό το υπόβαθρο, δεν υπάρχει ποσοτική βάση για την ασφαλή εφαρμογή των ECC στο δομικό σχεδιασμό. Τρέχουσες μελέτες στο Πανεπιστήμιο Κύπρου σκοπό έχουν να μελετήσουν αυτό το συγκεκριμένο ζήτημα. Για το λόγο αυτό διενεργήθηκε σειρά πειραμάτων για να αξιολογήσει την μηχανική συμπεριφορά δοκών ECC υπό την δράση διάτμησης. Παράμετρος μελέτης ήταν η επίδραση του λόγου απόστασης φορτίου-στήριξης προς ύψος, γνωστό και ως μήκος διάτμησης (a/d). Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το μήκος διάτμησης των δοκιμαζόμενων δοκών με και χωρίς οπλισμό κάμψης ή/και οπλισμό διάτμησης. Το πειραματικό πρόγραμμα, τα αποτελέσματα των δοκιμών, και αναλύσεις από την μελέτη παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

1.3 Πρόσφατες εξελίξεις στην επιστήμη και Κανονισμοί

Η ιπτάμενη τέφρα για αντικατάσταση του τσιμέντου στο συμβατικό σκυρόδεμα έχει τυποποιηθεί, αλλά η παραγωγή του ECC δεν έχει ακόμη ενσωματωθεί στους σύγχρονους κώδικες. Ως Ιπτάμενη Τέφρα ορίζεται από τον ASTM C618 (ASTM C618, 2008) «το λεπτός διαμερισμένο υπόλειμμα που προκύπτει από την καύση του άνθρακα ξηρής μορφής και που μεταφέρεται με την ροή αερίων». Το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI) 232.2R-03 χωρίζει την ιπτάμενη τέφρα σε τρεις κατηγορίες: τις κατηγορίες N, F, και C με βάση τη χημική σύνθεση της Ιπτάμενης Τέφρας (ACI Committee 232, 2003). Στο φράγμα του Τάμεση στο Ηνωμένο Βασίλειο και στο φράγμα Upper Stillwater στις Ηνωμένες Πολιτείες, χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα περίπου σε ποσοστό αντικατάστασης του υδραυλικού τσιμέντου κατά 30-75% κατά μάζα για τη μείωση της παραγωγής θερμότητας κατά την διαδικασία ενυδάτωσης (ACI Committee 232, 2003). Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιείται

συνήθως στο δομικό σκυρόδεμα ως υποκατάστατο ή συμπληρωματικό υλικό περιορίζεται από τους κανονισμούς σε ποσοστό 15-25% του τσιμέντου (ACI Committee 211, 1998).

Μέχρι στιγμής η βιβλιογραφία σχετικά με το ECC περιορίζεται σε ακαδημαϊκή έρευνα και επιστημονικούς οργανισμούς και τεχνικές επιτροπές (Fischer & Li, 2003), (Carpinteri, Brighenti, Spagnoli, & Vantadori, 2013), (Naaman & Reinhardt, 2006), (JSCE COMMITTEE, 2008), (Bentur & Alexander, 2000).

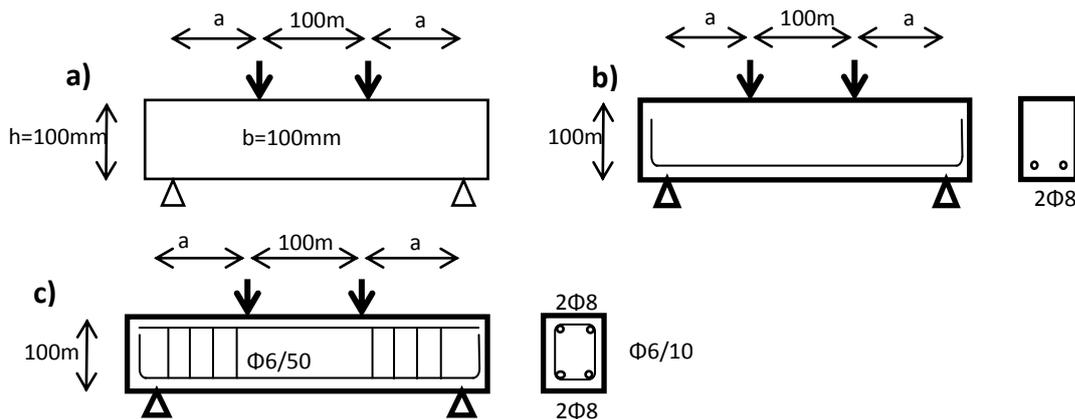
2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

2.1 Σχεδιασμός δοκιμίων

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε συνολικά 24 δοκούς από τσιμεντοειδές υλικό με κράτυνση (Strain hardening cementitious composite SHCC). Παράμετροι της μελέτης ήταν α) η επίδραση του λόγου διάτμησης (που ορίζεται ως ο λόγος διατμητικού ανοίγματος προς το ύψος της διατομής) που ελάμβανε τιμή: 1, 2 και 3.5, β) της διατμητικής απαίτησης (δηλ. της τέμνουσας σχεδιασμού) που ελεγχόταν με μεταβολή της καμπτικής αντοχής μέσω της προσθήκης διαμήκουσ οπλισμού γ) την επίδραση της ταυτόχρονης χρήσης συνδετήρων (Πίνακας 1). Το σύνθετο υλικό αποτελείται από 34% κατά βάρος ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F και 2% κατ'όγκο ινών PVA (Πολυβινυλική Αλκοόλη) κατόπιν πρότερης επικάλυψής τους με ειδικό υλικό για έλεγχο της διεπιφανειακής συνάφειας. Όπως διαπιστώθηκε στη (Georgiou, Pantazopoulou, & Petrou, 2014), η επικάλυψη των υδρόφιλων ινών PVA αυξάνει την διασπορά τους και την πλαστιμότητα του τελικού σύνθετου προϊόντος, αλλάζοντας τις ιδιότητες της διεπιφάνειας και τις δυνάμεις αγκύρωσης μεταξύ των ινών και της μήτρας. Η απόσταση μεταξύ των σημείων φόρτισης διατηρήθηκε σταθερή για όλες τις δοκούς (100mm), καθώς και οι διαστάσεις της διατομής (100x100mm). Όλα τα δοκάρια προεξείχαν 50mm πέραν των στηρίξεων προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή αγκύρωση του οπλισμού σε κάμψη όπου χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 1). Κωδικοί δειγμάτων έχουν ως εξής: Στο παράδειγμα «B1LS» - το πρώτο ψηφίο, 1, καθορίζει τον λόγο διάτμησης a/d, το δεύτερο ψηφίο, L, καθορίζει την ύπαρξη ή όχι οπλισμού κάμψης, το τρίτο ψηφίο, S, καθορίζει την ύπαρξη ή όχι οπλισμού διάτμησης. Εξετάστηκαν τρία δοκίμια για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 1. Διαστάσεις δοκών και οπλισμός (b=100mm, d=100mm)

Αρίθμηση Πειραματικής Μελέτης	Όνομα	a/d	Κάτω οπλισμός	Πάνω οπλισμός	Συνδετήρες	Εικόνα 1
F6-20,21,22	B1	1	-	-	-	A
F7s-20,21,22	B1L	1	2Φ8	2Φ8	-	B
F7ss-23,24,25	B1LS	1	2Φ8	2Φ8	Φ6/50	C
F6-26,27,28	B2	2	-	-	-	A
F7s-14,15,16	B2L	2	2Φ8	2Φ8	-	B
F7ss-17,18,19	B2LS	2	2Φ8	2Φ8	Φ6/50	C
F6-35,36,37	B3.5	3.5	-	-	-	A
F7s-8,9,10	B3.5L	3.5	2Φ8	2Φ8	-	B



Σχήμα 1: Πειραματική διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων και λεπτομέρειες όπλισης για a) δοκούς χωρίς οπλισμό, b) δοκούς με οπλισμό κάμψης ούτως ώστε να αυξηθεί η απαίτηση σε τέμνουσα c) με οπλισμό κάμψης και οπλισμό διάτμησης

2.2 Υλικά

Διεξήχθη εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα για την επιλογή του σχεδιασμού του μείγματος, υπό το πρίσμα απαιτήσεων αυτοσυμπύκνωσης και των ιδιοτήτων των ινών. Η επιλογή έγινε μεταξύ μιας ποικιλίας προτεινόμενων μειγμάτων. Έτσι, για τις ίνες PVA η επιλεγόμενη σύνθεση ήταν το ECC-M45 (Lerech & Li, 2009). Αυτό το μείγμα αναπτύχθηκε για μεγάλης κλίμακας σκυροδέτηση. Έγιναν προσαρμογές στα υλικά και τις ποσότητες ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των προϊόντων στην Κύπρο. Έτσι, το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σύνθετο τσιμέντο Πόρτλαντ EN 197-1 CEM II / AM (LS) 42,5 R. Αυτό το είδος σύνθετου τσιμέντου παράγεται με τη χρήση καθαρού ασβεστόλιθου και δίνει τελικά προϊόντα πιο αδιαπέρατα και με πυκνότερη δομή σε σύγκριση με το σύνηθες τσιμέντο Πόρτλαντ (OPC-Ordinary Portland Cement), με υψηλότερο βαθμό λειτουργικότητας και μειωμένη πλαστική συρρίκνωση. Η αντοχή σε θλίψη στις 28 ημέρες είναι ισοδύναμη με εκείνη του 42,5 R OPC και ανώτερη στις 2 και 7 ημέρες. Επίσης η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στο μείγμα ήταν πυριτική (> 95% περιεχόμενο σε Si) με μέγιστο μέγεθος κόκκου 300μm.

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου F η οποία ήταν εισαγόμενη, εφόσον δεν υπάρχει παραγωγή του προϊόντος στην Κύπρο. Αυτή η κατηγορία ιπτάμενης τέφρας έχει πουζολανικές ιδιότητες. Η ιπτάμενη τέφρα τύπου F παράγεται από την καύση ανθρακίτη ή πίσσας άνθρακα, αλλά μπορεί επίσης να παραχθεί από λιγνίτη. Όταν συνδυάζεται με OPC, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο με ποσοστό αντικατάστασης που κυμαίνεται από 20-30% της μάζας του τσιμεντοειδούς υλικού, αλλά στην παρούσα μελέτη το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας ήταν 20% κατά βάρος περισσότερο από την ποσότητα του σύνηθες τσιμέντου. Οι οπλισμοί ήταν χαλύβδινοι S500 με μέτρο ελαστικότητας 200MPa. Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι διαμέτρων 6 και 8mm. Οι ράβδοι διαμέτρου 6mm δεν είχαν νευρώσεις. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν ίνες PVA μήκους 12mm και διαμέτρου 39μm (με εμπορική ονομασία Kurallon K-II, ειδική επιφάνεια ινών $2.5 \times 10^{-8} \text{m}^2$). Η ονομαστική αντοχή των ινών αυτών σε εφελκυσμό είναι 1600 MPa, το μέτρο ελαστικότητας 40GPa και η πυκνότητα 1300kg / m³. Οι λεπτομέρειες του μείγματος παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ποσότητες μείγματος για σύνθετο υλικό με κράτυνση.

Τσιμέντο	Ιπτάμενη Τέφρα	Άμμος	Νερό	Υπερ-ρευστοποιητής	Ινες (% κατ'όγκο)
1.00	1.20	0.80	0.60	0.02	2

‡Όλα τα ξηρά υλικά προστίθενται πρώτα στον αναδευτήρα (τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, άμμος) και αναδεύονται μέχρι να είναι επαρκώς αναμεμειγμένα. Στη συνέχεια το 90% του νερού μαζί με τον ρευστοποιητή προστίθενται αργά στο μείγμα. Αφού το μείγμα φτάσει σε κατάσταση ρευστότητας αυτοσυμπυκνούμενου μείγματος, προστίθενται οι ίνες και το υπόλοιπο νερό με τον ρευστοποιητή.

2.3 Κατασκευή και ωρίμανση των δοκιμίων

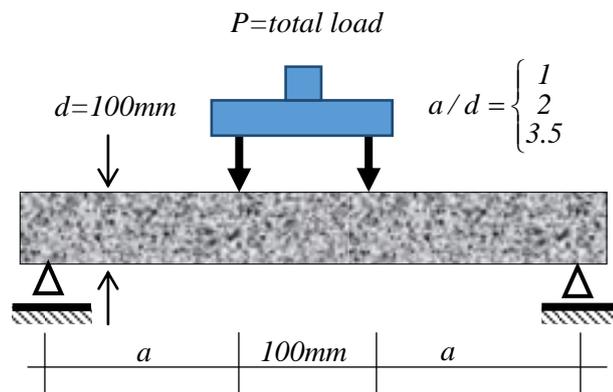
Τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν χωρίς δόνηση καθώς το μείγμα ήταν αυτοσυμπυκνούμενο και έρεε. Στη συνέχεια αφήθηκαν στα καλούπια για 24 ώρες, ενώ ήταν καλυμμένα με πλαστικό φύλλο. Στις 24 ώρες τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το καλούπια και τοποθετήθηκαν είτε σε δεξαμενές με νερό, εάν δεν είχαν οπλισμούς, είτε τυλίχθηκαν σε λινάτσες και μεμβράνες πλαστικές με συνεχή διαβροχή τους μέχρι την ηλικία των 100 ημερών. Αυτό έγινε γιατί όπως διαφάνηκε σε προηγούμενες έρευνες η ηλικία του δοκιμίου έδειξε να έχει επίδραση στην ολκιμότητα του υλικού, λόγω της αλλαγής των διεπιφανειακών ιδιοτήτων μεταξύ της μήτρας και των ινών που φαίνεται να αλλάζει με την ηλικία.



Σχήμα 2: Ωρίμανση δοκιμίων με οπλισμό

2.3 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Οι δοκοί δοκιμάστηκαν υπό κάμψη τεσσάρων σημείων, με έλεγχο με βάση τις βυθίσεις, με ταχύτητα βύθισης 1.5μm/s και 3μm/s για τις άοπλες και οπλισμένες δοκούς αντίστοιχα. Το πλαίσιο φόρτισης είχε απόσταση 100mm μεταξύ των ενδιάμεσων σημείων φόρτισης. Οι δοκοί στηρίζονταν σε ακραίες κυλινδρικές στηρίξεις με μεταβλητό μήκος απόστασης από τις ενδιάμεσες στηρίξεις. Πέντε μηχανοκίνητα (LVDTs) χρησιμοποιήθηκαν για να μετρήσουν την κατακόρυφη βύθιση στις στηρίξεις, στα σημεία φόρτισης και στο μέσο της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.

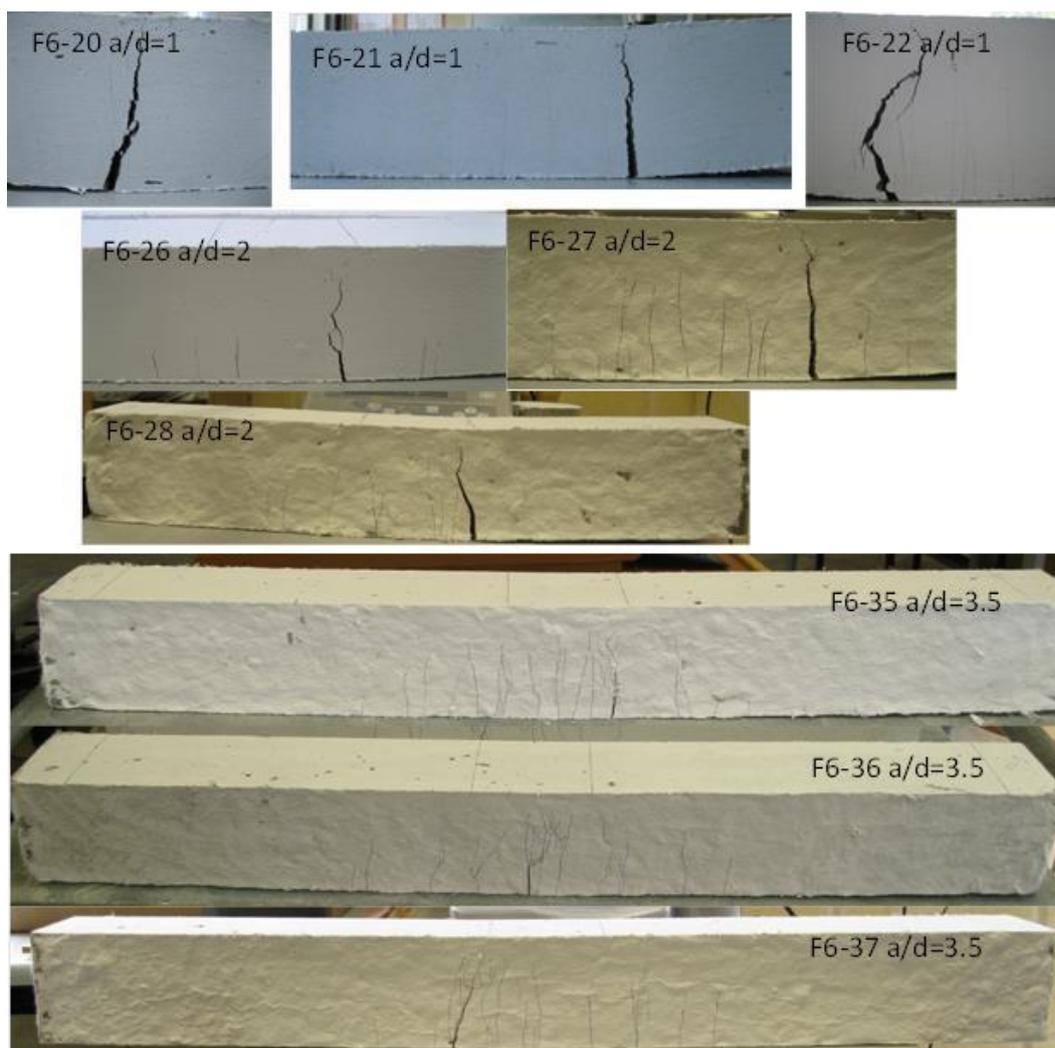


Σχήμα 3: Πειραματική διάταξη και LVDT για το πείραμα κάμψης 4 σημείων

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

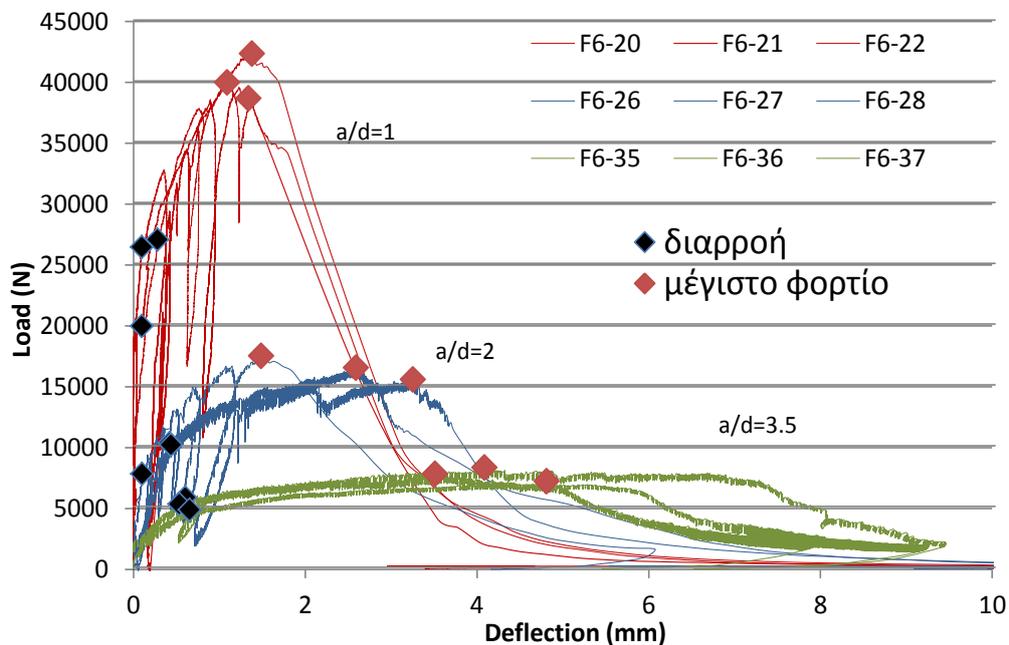
3.1 Μέρος Α. Δοκοί χωρίς χαλύβδινους οπλισμούς

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει την μορφή της ρηγμάτωσης (πολλαπλή ρηγμάτωση και ρωγμή αστοχίας) για τις δοκούς χωρίς χαλύβδινους οπλισμούς (περιπτώσεις Σχήμ. 1α). Σε όλες τις περιπτώσεις στην αρχή εμφανίζεται πολλαπλή ρηγμάτωση, όχι μόνο στη περιοχή σταθερής ροπής (δηλ. στην περιοχή ενδιάμεσα των δύο φορτίων) αλλά και ενδιάμεσα στα διατμητικά ανοίγματα εκατέρωθεν της περιοχής σταθερής ροπής. Μετά την έναρξη της πολλαπλής ρηγμάτωσης, η δυσκαμψία των δοκών μειώνεται αλλά η ικανότητα παραλαβής φορτίου αυξάνεται (κράτυνση). Πέραν μιας σχετικής μετακίνησης της τάξης του 1% για τις πιο κοντές δοκούς και 1.8% για τις δοκούς μεγαλύτερου διατμητικού ανοίγματος, η παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε μία ρωγμή (η ρωγμή αυτή δημιουργείται εντός του διαστήματος σταθερής ροπής ή κάτω από τα σημεία φόρτισης) και παρατηρείται ένα πλατώ όπου το φορτίο παραμένει σταθερό ενώ η ρωγμή διευρύνεται και επεκτείνεται προς την θλιβόμενη ζώνη. (περισσότερες πληροφορίες για το πλατώ σταθερής αντοχής έχουν αναφερθεί προηγουμένως (Georgiou & Pantazopoulou, 2014). Μόλις η θλιβόμενη ζώνη ξεπεράσει την οριακή παραμόρφωση σύνθλιψης, ξεκινάει η χαλάρωση του στοιχείου, με γενική απομείωση της αντοχής. Όλες οι δοκοί αστόχησαν σε κάμψη.



Σχήμα 4: Μορφή ρηγματώσης σε δοκούς χωρίς οπλισμό υπό κάμψη τεσσάρων σημείων

Τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης όλων των δοκών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 5, όλες οι καμπύλες δίνουν μια αρχική ελαστική σχέση μεταξύ φορτίου και βύθισης, με την δυσκαμψία να αυξάνεται με μείωση του λόγου διάτμησης. Μετά από αυτή την αρχική δυσκαμψία, το σημείο διαρροής (εμφάνιση της πρώτης ρωγμής) δίνει την απαρχή της πολλαπλής ρηγματώσης και την συμπεριφορά κράτυνσης της δοκού. Οι ρωγμές εμφανίζονται σε ένα ευρύ διάστημα της δοκού, πέραν του μήκους σταθερής ροπής, μέχρι το σημείο που το φαινόμενο της ψευδο-κράτυνσης (Georgiou et al., 2014) φτάνει στο όριο σταθεροποίησης της ρηγματώσης (παύουν πλέον να ανοίγουν άλλες ρωγμές) ακολουθούμενο από συγκέντρωση της παραμόρφωσης σε μια ρωγή και πτώση φορτίου. Σημαντικά σημεία από αυτές τις καμπύλες είναι τα φορτία και οι σχετικές μετακινήσεις διαρροής και αστοχίας. Αυτά τα σημεία συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Στον Πίνακα αυτό οι τιμές αστοχίας (δηλαδή τα σημεία έναρξης σταθεροποίησης της ρηγματώσης) καθορίζονται από το σημείο του μέγιστου φορτίου της κάθε καμπύλης Φορτίου-Βύθισης του Σχήματος 5.



Σχήμα 5: Διαγράμματα Φορτίου-Βύθισης δοκών χωρίς χαλύβδινους οπλισμούς με διαφορετικά μήκη διάτμησης ($a/d=1, 2, 3.5$)

Πίνακας 3. Σημεία διαρροής και σταθεροποίησης της ρηγμάτωσης σε σχέση με το μήκος διάτμησης a/d .

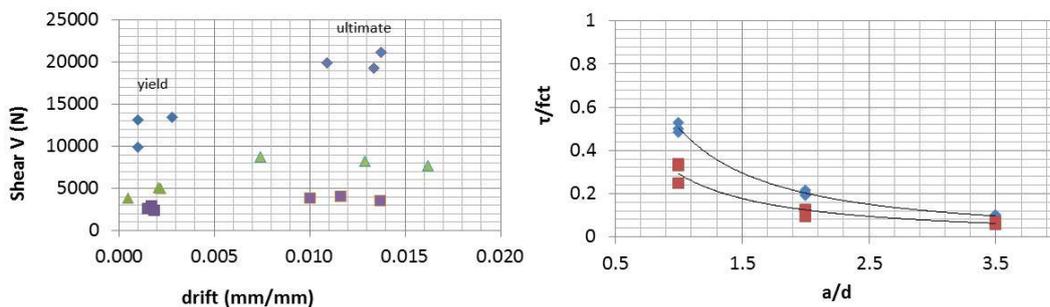
	a/d	δ_y (mm)	ϕ_y	P_y^* (N)	V_y^{**} (N)	M_y^x (kNm)	δ_u	ϕ_u	P_u (N)	V_u (N)	M_u (kNm)
B1-1	1	0.282	0.003	26942	13471	1.35	1.38	0.014	42259	21129	2.11
B1-2	1	0.100	0.001	26343	13172	1.32	1.34	0.013	38590	19295	1.93
B1-3	1	0.100	0.001	19845	9923	0.99	1.09	0.011	39893	19947	1.99
B2-1	2	0.103	0.001	7673	3836	0.77	1.48	0.007	17390	8695	1.74
B2-2	2	0.422	0.002	10203	5101	1.02	3.24	0.016	15458	7729	1.55
B2-3	2	0.440	0.002	10068	5034	1.01	2.58	0.013	16431	8216	1.64
B3.5-1	3.5	0.606	0.002	5726	2863	1.00	4.07	0.012	8212	4106	1.44
B3.5-2	3.5	0.537	0.002	5202	2601	0.91	3.50	0.010	7688	3844	1.35
B3.5-3	3.5	0.654	0.002	4723	2362	0.83	4.79	0.014	7089	3544	1.24

P^* είναι το συνολικό επιβαλλόμενο φορτίο από την μηχανή όπως φαίνεται στο Σχήμα

V^{**} είναι η τέμνουσα στο μήκος διάτμησης όπως υπολογίζεται από $P/2$

M^x είναι η μέγιστη ροπή της διατομής στην περιοχή μεταξύ των κεντρικών σημείων φόρτισης όπως υπολογίζεται από το γινόμενο $V \cdot a$

Τα σημεία διαρροής και μέγιστης διατμητικής δύναμης για όλες τις δοκούς σχεδιάζονται συναρτήσει της σχετικής μετακίνησης (στροφής των σημείων επιβολής της φόρτισης ως προς τα σημεία στήριξης τους $\theta = \delta/a$) καταγράφονται στο Σχήμα 6 (αριστερά). Οι καταγραφές κατά την διάρκεια του πειράματος διενεργούνταν και στα τέσσερα σημεία που το δοκίμιο ερχόταν σε επαφή με το μηχάνημα φόρτισης και οι τελικές τιμές βύθισης λαμβάνονται ως ο μέσος όρος των σχετικών μετακινήσεων των δύο σημείων φόρτισης. Από το γράφημα φαίνεται μια περίπου σταθερή τιμή σχετικής μετακίνησης η οποία αντιστοιχεί στην διαρροή όλων των δοκών της τάξης του 0.2%. Η στροφή διαρροής σχετίζεται με την διαρροή της διατομής λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής διαρροής στην εφελκυσόμενη ζώνη. Η τιμή αυτή είναι ανεξάρτητη του λόγου διάτμησης στην περίπτωση κάμψης τεσσάρων σημείων, καθώς έχει να κάνει κυρίως με την γεωμετρία της διατομής, η οποία παραμένει σταθερή για όλα τα δοκίμια αυτής της πειραματικής μελέτης. Αντίθετα στην περίπτωση των μεγίστων φορτίων παρατηρούμε μια διασπορά τιμών σχετικής στροφής η οποία είναι χειρότερη στην περίπτωση του λόγου διάτμησης $a/d=2$. Οι τιμές σχετικής στροφής στην θέση του μέγιστου φορτίου είναι της τάξης του 1.3%.



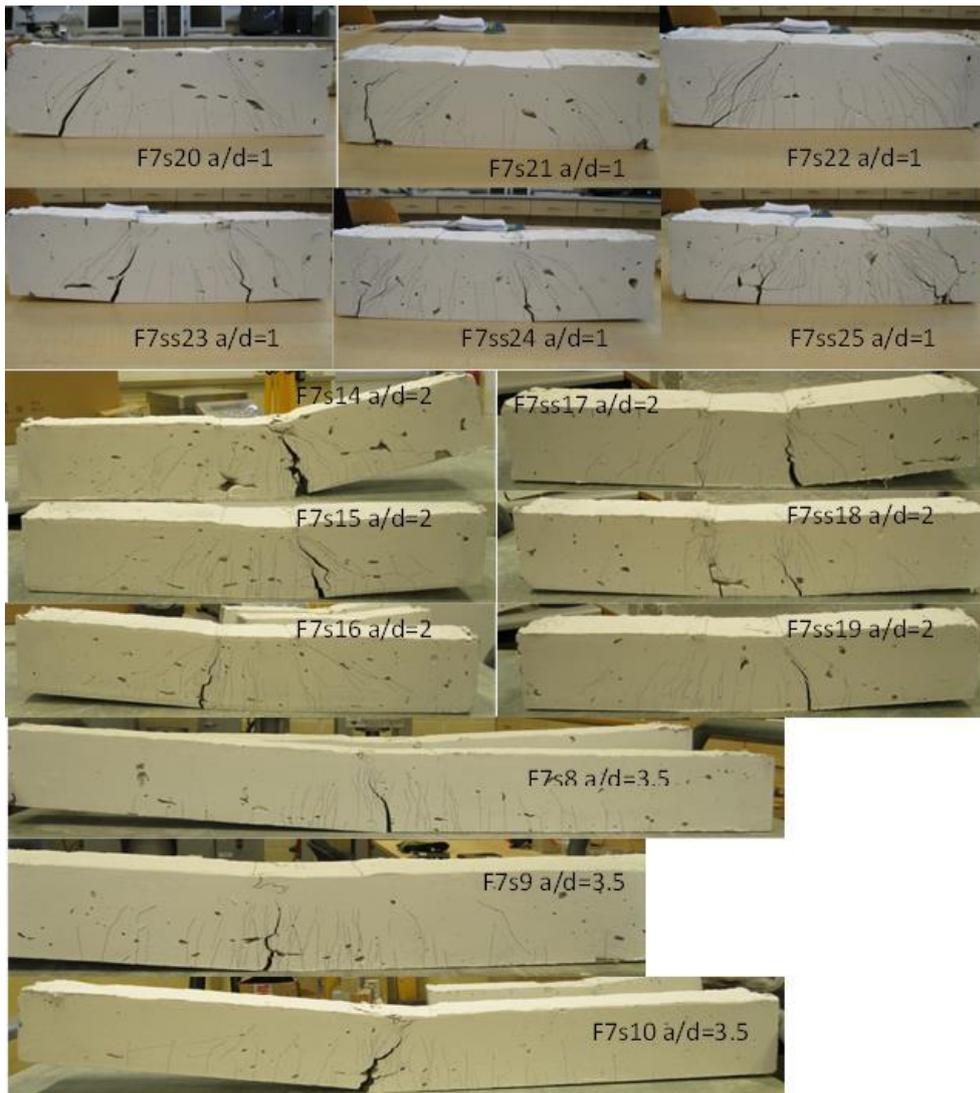
Σχήμα 6. Σημεία Τέμνουσας - Σχετικής μετακίνησης διαρροής και μέγιστου φορτίου (αριστερά) και λόγοςδιατμητικής τάσης/ εφελκυστικής τάσης (μέγιστη με μπλέ και διαρροή με κόκκινο) ως προς το διατμητικό άνοιγμα (a/d) (δεξιά) για δοκίμια χωρίς οπλισμό

Στο ίδιο Σχήμα 6. αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής διατμητικής τάσης ως προς τον λόγο διάτμησης a/d . Η εφελκυστική αντοχή του υλικού όπως δοκιμάστηκε σε ειδική πειραματική διάταξη άμεσου εφελκυσμού (Georgiou & Pantazopoulou, 2014)

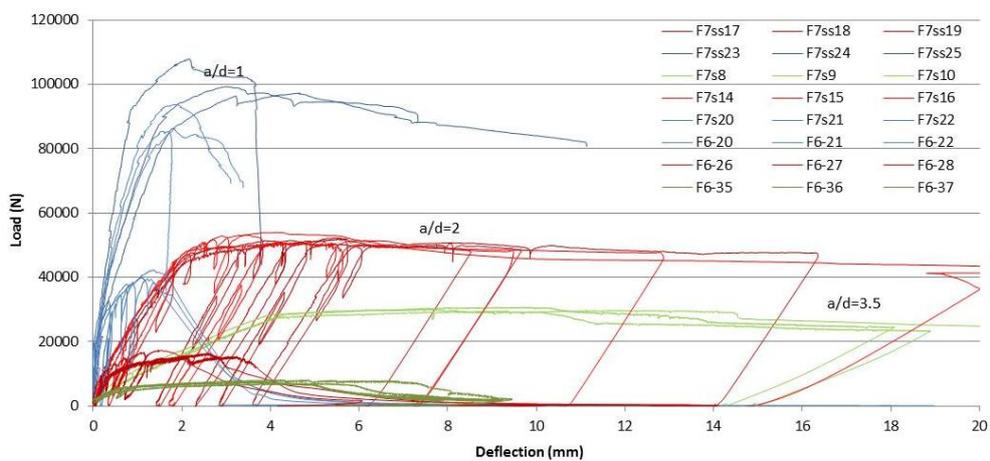
έδωσε τιμές της τάξης των 4MPa. Η μέση διατμητική τάση στις δοκούς όπως αυτή προκύπτει κατόπιν αναγωγής της τέμνουσας (διαρροής ή αστοχίας) με το εμβαδόν της διατομής και την εφελκυστική αντοχή του τσιμεντούχου ινοπλισμένου υλικού, μειώνεται με αύξηση του λόγου διάτμησης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 αριστερά, η διατμητική αυτή τάση στην περίπτωση των δοκών χωρίς εφελκυσμένους οπλισμούς δεν αναλώνει σε καμία περίπτωση τα περιθώρια εφελκυστικής/διατμητικής αντοχής της διατομής.

3.2 Μέρος Β. Δοκοί με χαλύβδινους οπλισμούς

Στο πρώτο μέρος (Παρ. 3.1) για τις δοκούς χωρίς χαλύβδινους οπλισμούς, όλες οι αστοχίες ήταν καμπτικές, λόγω της υποδιαστασιολόγησης τους σε κάμψη και επομένως της χαμηλής απαίτησης σε τέμνουσα. Όταν προστίθεται διαμήκης οπλισμός, παρατηρούμε αύξηση της καμπτικής αντοχής και ταυτόχρονη ανάλογη αύξηση της απαίτησης σε διάτμησης, ούτως ώστε σε όλες τις περιπτώσεις να παρατηρείται κάποια μορφή διατμητικής παραμόρφωσης μέχρι και διατμητικής αστοχίας στις δοκούς με τον μικρότερο λόγο διάτμησης, αν και στα μακρύτερα δοκίμια η αστοχία που επικρατεί έχει καμπτοδιατμητική μορφή και ποτέ καθαρή διάτμηση. Αλλά σε όλες τις περιπτώσεις κάποιας μορφής διατμητική αστοχία ήταν παρούσα. Έτσι από το Μέρος Α των πειραμάτων, η διατμητική τάση που αναπτύχθηκε για την μέγιστη καμπτική αντοχή, θεωρείται ένα κατώτατο όριο της διαθέσιμης συμβολής του τσιμεντούχου υλικού στην διάτμηση (κατά αναλογία της λεγόμενης «συμμετοχής σκυροδέματος» στο συμβατικό σκυρόδεμα, βλ. ΕΚΟΣ 2000, και Model Code 2010). Σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμίων της σειράς Β η διατμητική αντοχή ήταν μεγαλύτερη αυτών που ανέπτυξαν τα δοκίμια της σειράς Α. Σημειώνεται ότι απουσία συνδετήρων η πραγματική διατμητική αντοχή εκτιμάται με μεγαλύτερη προσέγγιση από τις δοκούς με το μικρότερο μήκος διάτμησης. Σημειώνεται ότι στις δοκούς με το μικρότερο μήκος διάτμησης $a/d=1$, παρουσιάστηκαν ψαθυρές μορφές διατμητικής αστοχίας με απότομη πτώση της αντοχής μετά το μέγιστο φορτίο. Η μέγιστη διατμητική δύναμη που παρατηρήθηκε σε αυτή την περίπτωση ήταν της τάξης των 40kN, άρα η μέση διατμητική τάση αντοχής της διατομής είναι 4MPa. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται όλες οι μορφές αστοχίας και η ρηγματώση των δοκών με χαλύβδινους οπλισμούς (ως κωδικούς ταυτοποίησης χρησιμοποιούνται: s- για καμπτικό οπλισμό, ss- για καμπτικό και διατμητικό οπλισμό).



Σχήμα 7. Ρηγματώσεις σε δοκούς με οπλισμό κάμψης/διάτμησης σε πειράματα κάμψης τεσσάρων σημείων



Σχήμα 8. Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης δοκών με και χωρίς οπλισμούς κάμψης/διάτμησης

Τα διαγράμματα Φορτίου-Βύθισης όλων των δοκών που εξετάστηκαν με και χωρίς οπλισμό κάμψης/διάτμησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 8. Η μορφή αστοχίας συσχετίζεται

στη συνέχεια με την διατμητική αντοχή των δοκών. Στις περιπτώσεις των δοκών με λόγους διάτμησης 2 και 3.5 οι μορφές αστοχίας παρουσιάζουν πλαστιμότητα πέραν του ορίου διαρροής, ενώ για την περίπτωση των δοκιμών με διατμητικό άνοιγμα $a/d=1$ παρατηρήθηκε ψαθυρή διατμητική αστοχία. Επίσης από το ίδιο διάγραμμα είναι εμφανές ότι η ψαθυρή αστοχία στην περίπτωση με $a/d=1$ μετατρέπεται σε πιο πλαστική με την προσθήκη συνδετήρων ακόμα και αν υπάρχει μείωση της ικανότητας παραλαβής φορτίου μετά το μέγιστο. Σε όλες τις περιπτώσεις αυτή η μείωση παρατηρείται ταυτόχρονα με αστοχία της ακραίας θλιβόμενης ίνας της διατομής.

Πίνακας 4: Μέγιστη τιμή αντοχής δοκών με οπλισμό κάμψης

Ref. in test series	Name	a/d	δ_u	ϕ_y	P_u^* (N)	V_u^+ (N)	V_u^{**} (Μέρος Α)
F7S8	B3.5L1	3.5	9.74	0.028	30745	15372	3831
F7S9	B3.5L2	3.5	9.27	0.026	29547	14774	
F7S10	B3.5L3	3.5	7.62	0.022	30026	15013	
F7S14	B2L1	2	5.22	0.026	51077	25539	8213
F7S15	B2L2	2	4.16	0.021	53907	26954	
F7S16	B2L3	2	3.43	0.017	53144	26572	
F7S20	B1L1	1	1.85	0.018	93690	46845	20124
F7S21	B1L2	1	1.54	0.015	85333	42667	
F7S22	B1L3	1	1.85	0.018	86184	43092	

P_u^* συνολικό φορτίο που επιβάλλει η διάταξη φόρτισης

V_u^+ μέγιστη τέμνουσα δύναμη στη δοκό με οπλισμό κάμψης = $P_u/2$

V_u^{**} μέγιστη τέμνουσα δύναμη που παραλήφθηκε από δοκό ίδιου διατμητικού μήκους χωρίς οπλισμό κάμψης (η τιμή προέρχεται από μέσο όρο των τιμών του Μέρους Α)

Η προσθήκη καμπτικού οπλισμού αύξησε την καμπτική αντοχή όλων των δοκών όπως φαίνεται στον Πίν. 4. Αυτή η αύξηση μπορεί να υπολογιστεί με συνυπολογισμό επί της αντοχής των δοκών χωρίς οπλισμό, της πρόσθετης ροπής 2 χαλύβδινων ράβδων, διαμέτρου 8mm. Η πρόσθετη καμπτική ροπή υπολογίζεται ως εξής:

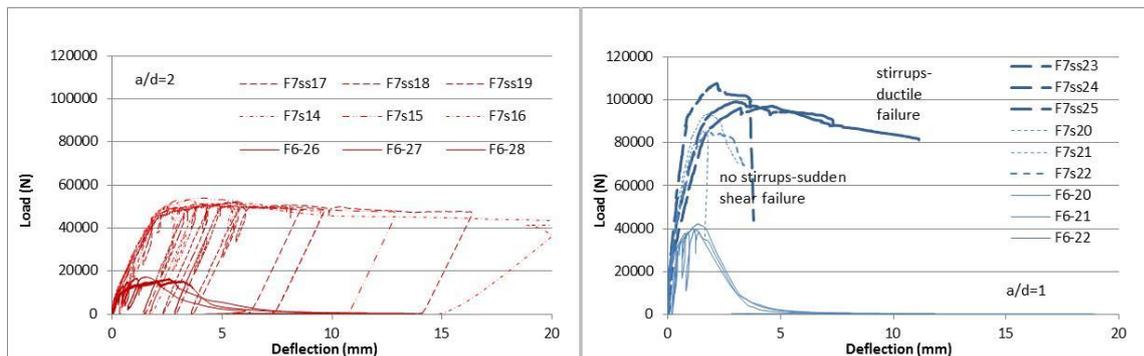
$$M_{flex} = z \cdot A_s \cdot f_y = 0.85 \cdot d \cdot (2 \cdot \pi \cdot \Phi^2 / 4) \cdot f_y = 0.85 \cdot 100 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 8^2 / 4) \cdot 500 = 4.27 \text{ kNm}$$

Η τιμή αυτή μετατρέπεται σε ικανοτική τέμνουσα για το κάθε μήκος διάτμησης αντίστοιχα: για $a/d=1$, $V = M_{flex}/a = 42726 \text{ N}$, για $a/d=2$, $V = 21362 \text{ N}$ και για $a/d=3.5$, $V = 12207 \text{ N}$; (σε όρους συνολικού φορτίου μηχανής φόρτισης αυτά είναι $P_{1s} = 85451 \text{ N}$, $P_{2s} = 42725 \text{ N}$ και $P_{3s} = 24415 \text{ N}$). Οι τελικές τιμές αντοχών των δοκιμών με οπλισμούς κάμψης, V_{tot} , ως προερχόμενες από το άθροισμα της καμπτικής αντοχής της άοπλης δοκού καθώς και της συμβολής των διαμηκών οπλισμών σε όρους ικανοτικής τέμνουσας όπως δίνονται από τα πειραματικά αποτελέσματα στο Σχ. 8 είναι κοντά αλλά υπερβαίνουν τις πειραματικές τιμές στα δοκίμια καμπτικού τύπου, ενώ η υπερεκτίμηση είναι σημαντική στα δοκίμια με μικρό λόγο διάτμησης γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη διατμητικού τύπου αστοχίας. (βλ. Πίν. 5).

Πίνακας 5: Υπολογισμός ικανοτικής τέμνουσας δοκών με οπλισμό κάμψης

Name	V_u^{++} (N)	M_{flex} (kN/m)	V_{flex} (N)	$V_{tot}=V_u^{++}+V_{flex}$ (N)	V_u^+ (N)
B3.5L1	3831	4.27	12207	16038	15372
B3.5L2					14774
B3.5L3					15013
B2L1	8213		21363	29576	25539
B2L2					26954
B2L3					26572
B1L1	20124		42726	62849	46845
B1L2					42667
B1L3					43092

Για επιβεβαίωση των ως άνω παρατηρήσεων συσχετίζεται η πλαστιμότητα των διαγραμμάτων φορτίου βύθισης που δίδονται στο Σχ. 9, με την μορφή αστοχίας. Συνάγεται ότι η προσθήκη καμπτικού οπλισμού στις δοκούς αυξάνει μεν την ικανοτική τέμνουσα αλλά ταυτόχρονα οδηγεί τις πιο κοντές δοκούς να αστοχήσουν σε διάτμηση. Στην περίπτωση που προστίθεται διατμητικός οπλισμός στο μήκος διάτμησης, η διατμητική αστοχία που προέχει στην περίπτωση των κοντών δοκών ($a/d=1$) αλλάζει από ψαθυρή διατμητική αστοχία σε πλάστιμη, με διαρροή του διαμήκους οπλισμού.



Σχήμα 9. Διαγράμματα Φορτίου-Βύθισης για όλες τις περιπτώσεις με $a/d=2$ (αριστερά) και $a/d=1$ (δεξιά)

Η διατμητική αντοχή δοκών χωρίς προένταση και χωρίς οπλισμό διάτμησης δίνεται από τον Ευρωκώδικα (EN1992-1-1, 2004) ως:

$$V_{Rk,c} = \left[C_{Rk,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

Για τα δοκίμια μελέτης η Εξ. (1) χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμήσει την συμβολή του σκυροδέματος σε διάτμηση ως εξής:

$$V_{Rk,c} = \left[0.18 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0.01 \cdot 50)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot 100 \cdot 100 = 13263\text{N}.$$

Παρατηρείται ότι αυτή η εκτίμηση της διατμητικής αντοχής από τον Ευρωκώδικα υποεκτιμά την πραγματική αντοχή σε διάτμηση δοκών από κρατυνόμενο ινοπλισμένο τσιμεντοειδές εάν συγκριθεί με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης όπου παραλήφθηκαν ικανοτικές τέμνουσες της τάξης των 40000N χωρίς συνδετήρες (βλ. δοκίμια B1L1, B1L2, B1L3). Από τη στιγμή που η διάτμηση είναι πρόβλημα διαγώνιου εφελκυσμού και το SHCC παρουσιάζει κράτυνση σε άμεσο εφελκυσμό, η διατμητική αντοχή φαίνεται να οφείλεται στη

δράση των ινών που διαπερνούν τις ρωγμές γεφυρώνοντας την μεταφορά των τάσεων. Με βάση τις πιο κοντές δοκούς ($a/d=1$) η διατμητική αστοχία συνέβη στα 40000N. Έτσι η μέση διατμητική τάση στη διατομή υπολογίζεται ως $40000/100/100=4\text{MPa}$, δηλαδή περίπου ίση με την αντοχή του υλικού σε άμεσο εφελκυσμό, όπως θα μπορούσε να υπολογιστεί με βάση τις σχέσεις της τεχνικής μηχανικής. Όμως η διατμητική αυτή τάση διατηρείται μέχρι πολύ μεγάλα επίπεδα παραμόρφωσης – δηλαδή κληροδοτείται η πλαστιμότητα που διαθέτει το τσιμεντούχο υλικό στον εφελκυσμό και στην περίπτωση της διάτμησης, και άρα δεν υφίσταται απώλεια της συμμετοχής του σκυροδέματος στην διατμητική αντοχή μετά τη ρηγμάτωση όπως συμβαίνει στο συμβατικό σχεδιασμό.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε όρους μορφολογίας ρωγμών, διάδοσης της ρηγμάτωσης και συμπεριφοράς φορτίου βύθισης, το ινοπλισμένο τσιμεντούχο μείγμα με ψηλά ποσοστά ιπτάμενης τέφρας (PVA ECC) είναι πολύ πιο πλάστιμο από το σύνηθες σκυρόδεμα. Γενικώς, οι δοκοί από PVA ECC χωρίς σπλισμό υπερβαίνουν κατά πολύ την καμπτική αντοχή, και διαθέτουν κατά τάξη μεγέθους μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σχέση με το σύνηθες σκυρόδεμα. Παρατηρείται ότι το τσιμεντοειδές υλικό που σχηματίζεται από PVA ECC καταλήγει σε υψηλότερη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια θραύσης και σε αντίστοιχη αύξηση της διατμητικής αντοχής την οποία διατηρεί μέχρι μεγάλα μεγέθη εύρους ρωγμής και καμπτικής παραμόρφωσης σε αντίθεση με το σύνηθες σκυρόδεμα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες στον Δρ. Ν. Άρχοντα για την βοήθεια του στην κατασκευή του μείγματος και σκυροδέτηση των δοκιμίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACI Committee 211. (1998). Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, 93(Reapproved).
- ACI Committee 232. (2003). *Use of fly ash in concrete*. Farmington Hills, MI.
- Alimoradi, A. (2015). Sustainable Structural Design: Outlook and Potentials. *Journal of Structural Engineering*, 141(3), B2514001.
- Arezoumandi, M., Ph, D., Asce, M., Volz, J. S., Ortega, C. A., Myers, J. J., & Asce, F. (2015). Shear Behavior of High-Volume Fly Ash Concrete versus Conventional Concrete : Experimental Study, 1–11.
- ASTM C618. (2008). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use* (pp. 1–4).
- Bentur, P. A., & Alexander, M. G. (2000). CEMENTITIOUS COMPOSITES A review of the work of the RILEM TC 159-ETC : Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites, 33(March), 82–87.
- Bilodeau, A., and Malhotra, V. M. (2000). High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development. *ACI Mater. J.*, 97(1), 41–48.
- Carpinteri, A., Brighenti, R., Spagnoli, A., & Vantadori, S. (2013). Tensile Cracking Behaviour of Strain-Hardening Cement-Based Composites using a Micromechanical Lattice Model. *CP2009*, 0(1).
- Dunstan, E. R. (1980). A possible method for identifying fly ashes that will improve the sulfate resistance of concretes. *Cem. Concr. Aggregates*, 2(1), 20–30.
- Fatta, D. (2005). *Domestic growth and the environment* (p. 690).

- Fischer, G., & Li, V. C. (2003). Intrinsic response control of moment-resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements. *ACI Structural Journal*, (100).
- Georgiou, A., & Pantazopoulou, S. (2014). Determination of direct tensile stress-strain curve from simple three point bending tests. In *FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop*.
- Georgiou, A., Pantazopoulou, S., & Petrou, M. (2014). Increasing ductility of FRCC with proprietary coating agents. In *10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Quebec City.
- GNCS. (2009). *Mitigating Emissions from Cement* (pp. 2008–2009).
- Gopalan, M. K. (1993). Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Mater. J.*, 90(2), 117–121.
- JSCE COMMITTEE. (2008). *JSCE Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composite with Multiple Fine Cracks*.
- Lepech, M. D., & Li, V. C. (2009). Large-Scale Processing of Engineered Cementitious Composites, (105).
- Li, V. C. (2007). Engineered Cementitious Composite (ECC): Material, Structural, and Durability Performance. *Concrete Construction Engineering Handbook*, 1–47.
- Massai, L. (2010). *The Kyoto Protocol in the EU* (p. 431). T.M.C. Asser Press.
- Myers, J.J., Carrasquillo, R. L. (2000). Influence of Hydration Temperature on the Durability and Mechanical Property Performance of HPC Prestressed / Precast Beams, *I*(1696), 131–142.
- Naaman, A. E., & Reinhardt, H. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures*, 39(5), 547–555.

Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας χρήσης των τεφρών βιομάζας ως συμπληρωματικών υδραυλικών υλικών

Τ.Γ. Τάπαλη¹, Σ. Δέμης², Ε.Γ. Παπαδάκης¹

¹Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Γ. Σεφέρη 2, 30100 Αγρίνιο, vgpapadakis@upatras.gr

²Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Πάτρα

Λέξεις κλειδιά: Ανάπτυξη αντοχής, Επίθεση χλωριόντων, Περιεκτικότητα πυριτίου, Συγκριτική αξιολόγηση, Τέφρα βιομάζας, RCPT

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η αξιοποίηση των τεφρών βιομάζας από αγρό-βιομηχανικά παραπροϊόντα στη παραγωγή τσιμέντου ή/και σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση αντί της ενσωμάτωσης των παραδοσιακών συμπληρωματικών υδραυλικών υλικών. Η παρούσα εργασία παρέχει μια αξιολόγηση των τεφρών βιομάζας με διαφορετικό περιεχόμενο σε πυρίτιο (SiO_2), ως προς την αντοχή σκυροδέματος και τη συμπεριφορά έναντι δράσης χλωριόντων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα υλικά αυτά είναι αποτελεσματικά ως προς την ανάπτυξη αντοχής σκυροδέματος και εξαιρετικά αποδοτικά στην αύξηση της αντίστασης έναντι χλωριόντων. Επίσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά αυτή επηρεάζεται από τη σύνθεση της τέφρας βιομάζας ως προς τα συστατικά της.

An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as supplementary cementing materials

J.G.Tapali¹, S. Demis², V.G. Papadakis¹

¹ University of Patras, Department of Environmental and Natural Resources Management, Seferi 2, Agrinio, 30100, Greece, vgpapadakis@upatras.gr

² University of Patras, Department of Civil Engineering, Patras, 26500, Greece

Key words: Benchmarking, Biomass ash, Chloride attack, RCPT, Silica content, Strength development

ABSTRACT: Utilisation of biomass ashes from agro-industrial by-products in cement manufacturing and/or concrete production can be an alternative solution to the incorporation of the traditionally used supplementary cementing materials (SCM). An evaluation of biomass ashes, with varying SiO_2 contents in terms of concrete strength and performance in chloride exposure is the focus of this study. Results indicate that these materials are effective on concrete strength development and extremely efficient in increasing the concrete chloride resistance. It was also concluded that this behavior is affected by the composition of biomass ashes.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κοινό τσιμέντο Portland αναγνωρίζεται παγκοσμίως ως το πιο σημαντικό κατασκευαστικό υλικό. Λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά θέματα που συνδέονται με το τσιμέντο (σε σχέση με την ενέργεια και τις πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή του), μια άμεση μείωση του περιεχόμενου κλίνκερ χρησιμοποιώντας βιομηχανικά παραπροϊόντα ως **Συμπληρωματικά Υδραυλικά Υλικά (SCM)** αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο πρώτο βήμα για την μείωση σε σημαντικό βαθμό του σχετιζόμενου περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Έχει υπολογιστεί (Ecosmart Concrete, 2008) πως 18% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland θα οδηγούσε σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 17% ενώ με την αντικατάσταση του τσιμέντου κατά 30% από SCM θα μπορούσε να αντιστραφεί η αύξηση των εκπομπών CO₂ από την παραγωγή τσιμέντου.

Βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως η σκωρία υψικαμίνων, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη, έχουν χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά ως SCM τα τελευταία 25 χρόνια. Μια σειρά ερευνών έχουν επιδείξει την εγκυρότητα χρήσης των υλικών αυτών για τεχνικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά ακόμα και για οικονομικούς (Papadakis et al, 2002 Antiohos et al, 2007). Πρόσφατες έρευνες (Ganesan et al, 2007 Frias et al 2007 Tangchirapat et al, 2010 Sousa Coutino and Papadakis, 2011) υποδεικνύουν την βιωσιμότητα χρήσης ποζολανών που προέρχονται από την αγροτική βιομηχανία, μέσω της αξιοποίησης βιομάζας. Η βιομάζα θεωρείται γενικά ως μια από τις κυριότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αφού αντιστοιχεί σε περισσότερο από το 4% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (IEA statistics, 2011). Παρά το γεγονός ότι η βιομάζα χρησιμοποιείται ευρέως ως πηγή ενέργειας, ένα μεγάλο μέρος των αποβλήτων που παράγονται παραμένουν ανεπεξέργαστα (Von Bergs et al, 2005). Διάφοροι τύποι βιομάζας παράγουν τέφρα (όπως τέφρα φλοιού ρυζιού, τέφρα φοινικέλαιου, τέφρα βγαύσης ζαχαροκάλαμου κλπ.) η οποία υπό ειδικές συνθήκες (χημική & ορυκτολογική σύνθεση, επίπεδο λεπτότητας) μπορεί να παρουσιάζει ποζολανική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή της ιπταμένης τέφρας από την καύση άνθρακα (Ganesan et al, 2007 Frias et al 2007, Tangchirapat et al, 2010, Sousa Coutino and Papadakis, 2011, Wang et al., 2008). Οι τέφρες αγροτικών αποβλήτων περιέχουν σημαντικές ποσότητες πυριτίου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ποζολανικά υλικά αντικαθιστώντας το τσιμέντο (Rajamma et al, 2009).

Η αυστηρή ερμηνεία του προτύπου ASTM C618 (ASTM Standard, 2012) (και των περισσότερων προτύπων σε άλλες χώρες που πραγματεύονται παρόμοια θέματα) αποκλείει τη χρήση στη παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος κάθε υλικού (συμπεριλαμβανομένης της τέφρας βιομάζας) που δεν προέρχεται από την καύση άνθρακα. Το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας το οποίο ικανοποιεί την παραπάνω απαίτηση για χρήση στο σκυρόδεμα παρουσιάζει σημαντική μείωση λόγω της συν-καύσης του άνθρακα με καύσιμα και της προσθήκης υλικών για τον έλεγχο των εκπομπών (Wang et al., 2008). Αυτή η παρατήρηση είναι αρκετά σημαντική, δεδομένου ότι η τέφρα βιομάζας μπορεί να προέρχεται από διάφορες διαδικασίες οι οποίες περιλαμβάνουν καύση καθαρής στερεής βιομάζας ή συν-καύση (με ενεργειακό περιεχόμενο σε βιομάζα μικρότερο από 10%) με άνθρακα. Συνεπώς, η συν-καύση βιομάζας είναι ένας οικονομικός και αποδοτικός τρόπος παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αλλά λόγω των χαμηλών ποσοτήτων βιομάζας παράγονται χαμηλά ποσοστά τέφρας βιομάζας. Η καύση στερεής βιομάζας αποτελεί μια θεμελιωμένη διαδικασία για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, όπου χρησιμοποιούνται κυρίως οι τεχνολογίες ρευστοστερεάς κλίνης και καύσης σε σχάρα κλιβάνου (Loo & Korpejan, 2003 Yin et al., 2008). Η ποσότητα και ποιότητα των τεφρών που παράγονται στα ηλεκτρικά εργοστάσια βιομάζας, επηρεάζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης βιομάζας (Loo et al, 2003 Yin et al, 2008 Masia et al, 2007). Η καύση του ξύλου για παράδειγμα παράγει μικρότερες ποσότητες τεφρών ενώ η πλώδης βιομάζα, τα αγροτικά απόβλητα και ο φλοιός

έχουν υψηλότερο περιεχόμενο σε τέφρα (Rajamma et al., 2009). Οι τέφρες βιομάζας διαφέρουν από τις τέφρες άνθρακα ως προς την χημική σύσταση και την ορυκτολογία. Τα χαρακτηριστικά των τεφρών από καύση βιομάζας ποικίλουν και επηρεάζονται από τα εξής: i) Χαρακτηριστικά βιομάζας (για παράδειγμα, πώδες υλικό, ξύλο ή φλοιός), ii) Τεχνολογία καύσης (για παράδειγμα, σταθερής ή ρευστοστερεάς κλίνης), iii) Την τοποθεσία συλλογής των τεφρών (για παράδειγμα, τέφρες πυθμένα ή ιπτάμενες τέφρες) (Loo et al, 2003 Yin et al, 2008 Obernberger et al, 1997). Τυπικά, η ιπτάμενη τέφρα από καθαρή καύση βιομάζας έχει περισσότερα αλκάλια (Na και K) και λιγότερη αλουμίνα (Al_2O_3) σε σχέση με την ιπτάμενη τέφρα άνθρακα (Liorente and Garcia, 2006 Thy et al, 2006).

Για παράδειγμα, η καύση του ξύλου παράγει μικρές ποσότητες διαχειρίσιμων τεφρών. Το μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας που παράγεται στα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια είτε εναποτίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής είτε ανακυκλώνεται σε χωράφια ή δάση (Loo & Korpejan, 2003). Αξίζει να αναφερθεί ότι το κόστος απόθεσης των τεφρών βιομάζας αλλά και οι συνολικοί όγκοι των τεφρών αυτών αυξάνονται (παγκοσμίως), οπότε θα πρέπει να εδραιωθεί μια βιώσιμη διαχείριση των τεφρών βιομάζας. Επίσης, η εκμετάλλευση των αγρό-βιομηχανικών παραπροϊόντων από την βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει μια ιδιαίτερος ελκυστική δραστηριότητα για αρκετές χώρες οι οποίες χρησιμοποιούν τέφρα φλοιού ρυζιού, καύσιμο φοινικέλαιο και τέφρα βγάσσσης ζαχαροκάλαμου ως βιομάζα σε διεργασίες παραγωγής ενέργειας (όπως Κίνα, Ινδία, Βραζιλία και Ταϊλάνδη).

Στο πλαίσιο προηγούμενων μελετών (Papadakis et al, 2002, Antiohos et al, 2007) αναπτύχθηκαν αναλυτικά μοντέλα για την αξιολόγηση ενσωμάτωσης των SCM στο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας την έννοια του συντελεστή ενεργότητας (k -value). Συνεπώς, έχει αναγνωριστεί η υψηλή προστιθέμενη αξία των υλικών αυτών και οι ποζολανικές τους ιδιότητες στο τσιμέντο και τα κονιάματα καθώς και η επίδραση τους στην πρώιμη αντοχή σκυροδέματος και την σταθερότητα όγκου (Papadakis, 1999 Papadakis, 2013).

Η ίδια αρχή μπορεί να εφαρμοστεί και στις τέφρες βιομάζας, όπως παρουσιάζεται στη μελέτη αυτή. Επιλέγοντας δεδομένα για αντιπροσωπευτικούς τύπους τεφρών βιομάζας από την βιβλιογραφία διερευνάται η βιωσιμότητα χρήσης τους στην βιομηχανία τσιμέντου ως ποζολανικών υλικών. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μια αξιολόγηση των τεφρών σε σχέση με τους προκύπτοντες συντελεστές ενεργότητας για θλιπτική αντοχή 28 ημερών (όπως υπολογίστηκαν βάσει των αναλυτικών μοντέλων πρόβλεψης της αντοχής, τα οποία έχουν αναπτυχθεί και επικυρωθεί από ορισμένους συγγραφείς της εργασίας αυτής), οι οποίοι ενισχύονται περαιτέρω από την συμπεριφορά τους στη διείδυση χλωριόντων, όπως καθορίζεται από το ASTM C1202 (ASTM Standard C1202, 2012). Κύριος στόχος είναι η εξέταση της επίδρασης των κύριων χαρακτηριστικών τεφρών βιομάζας στην ανάπτυξη αντοχής σκυροδέματος και την συμπεριφορά σε έκθεση χλωριόντων, διερευνώντας κατά αυτόν τον τρόπο τη μελλοντική τους χρήση στη τσιμεντοβιομηχανία.

2 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΦΡΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

2.1 Τύποι βιομάζας που διερευνήθηκαν

Βάσει δεδομένων από την βιβλιογραφία, χαρακτηριστικοί τύποι βιομάζας (και άλλων) τεφρών επιλέχθηκαν: τέφρα φλοιού ρυζιού και μίγματα (RHA), τέφρα φοινικέλαιου (POFA), τέφρα βγάσσσης ζαχαροκάλαμου (SCBA) και τέφρες ξύλου (WA). Η προέλευση και η χημική τους σύνθεση παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χημική σύνθεση και χαρακτηρισμός τεφρών

Type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	LOI	d ₅₀ (mm)	Density (kg/m ³)	*
Rice GRHBA ¹	87.0	1.08	2.58	1.25	0.09	0.08	1.0	5.71	10.8	2150	k
Husk GRHBA	74.8	0.20	0.80	5.90	0.50	0.20	2.0	11.2	10.8	2150	k
Ash BRWA ²	78.4	2.60	1.70	7.40	1.10	0.20	3.7	3.60	15.5	2100	k
RHA	91.0	0.35	0.41	1.95	1.21	0.08	3.21	8.50	12.0	2060	k
RHA	87.3	0.22	0.28	0.48	-	1.02	3.14	2.10	3.80	2060	k, RCPT
RHA	92.9	0.31	0.26	0.53	-	0.08	2.06	1.97	-	-	RCPT
RHA	91.6	0.35	0.40	0.60	-	0.30	1.60	3.70	7.41	2050	RCPT
Palm GPOFA ³	65.3	2.50	1.90	6.40	0.40	0.30	5.70	10.0	19.9	2170	k
Oil GPOFA ⁴	65.3	2.50	1.90	6.40	0.40	0.30	5.70	10.0	10.1	2330	k
Fuel GPOFA	65.3	2.60	2.00	6.40	0.50	0.30	5.70	10.1	10.1	2330	k
Ash POFA	55.5	9.20	5.60	12.4	2.30	-	-	7.90	10.7	2530	k
POFA	63.6	1.60	1.40	7.60	0.20	0.10	6.90	9.60	7.20	2250	RCPT
Sugar SCBA ⁵	78.3	8.90	3.60	2.20	-	0.10	3.50	-	2.70	2530	k
Cane SCBA	64.2	9.05	5.52	8.14	-	0.92	1.35	4.90	5.40	1850	k, RCPT
SCBA	78.4	8.55	3.61	2.15	-	0.12	3.46	0.42	-	2530	k, RCPT
Wood W(S)A ⁶	31.8	28.0	2.64	10.5	0.45	6.50	10.4	27.0	-	2130	k
Ash HCWA ⁷	28.0	4.10	2.50	39.0	1.00	1.00	7.40	7.22	5.16	2520	k

¹ GRHBA: Ground rice Husk Bark Ash, 65% rice husk and 35% eucalyptus bark

² BRWA: Βαγάσσης rice husk wood ash, 15% rice husk, 82.5% βαγάσσης ash and 2.5% chop wood

³ GPOFA: Ground palm oil fuel ash, coarse ground

⁴ GPOFA: Ground palm oil fuel ash, fine ground

⁵ SCBA: Sugar cane βαγάσσης ash

⁶ W(S)A: Wood (sawdust) ash

⁷ HCWA: High calcium wood ash

* Denotes if the particular type of ash was used for strength (k) or for Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) assessment

Η τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA) είναι ένα αγροτικό παραπροϊόν το οποίο παράγεται από ελεγχόμενη καύση φλοιού ρυζιού και περιέχει ενεργό πυρίτιο το οποίο μπορεί να συμβάλλει χημικά στα συστατικά του τσιμέντου Portland. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν τυπικές, έντονα δραστικές, τέφρες RHA (Hwang et al, 2011, Saraswathy and Song, 2007, Ganesan et al., 2008) με ποσοστό πυριτίου πάνω από 90%. Η αντιδραστικότητα τους οφείλεται στο υψηλό ποσοστό άμορφου πυριτίου και στην πολύ μεγάλη εσωτερική επιφάνεια λόγω της κυτταρικής δομής. Γενικά, η αντιδραστικότητα ενισχύεται με την αύξηση της λεπτότητας της RHA (στην παρούσα εργασία εκφράζεται με το d₅₀ σε μm). Η τέφρα RHBA (Chalee et al, 2013) (rice husk-bark ash) είναι ένα παραπροϊόν το οποίο παράγεται από την καύση ενός μίγματος φλοιού ρυζιού και φλοιού ευκαλύπτου μέσω μιας διαδικασίας καύσης ρευστοστερεάς κλίνης σε ένα ηλεκτρικό εργοστάσιο βιομάζας (χρησιμοποιείται ως καύσιμο).

Το επίπεδο του SiO₂ (μεγαλύτερο του 74%) υποδεικνύει ένα υψηλό δυναμικό για ποζολανική αντιδραστικότητα. Σύμφωνα με το ASTM C618, η τέφρα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως φυσική ποζολάνη (Class N), αφού το άθροισμα SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ είναι υψηλότερο ή γύρω στο 70%, το περιεχόμενο σε SO₃ δεν είναι υψηλότερο από 4% και η απώλεια πύρωσης (LOI) είναι γύρω στο 10%. Η τέφρα BRWA (Bagasse-Rice husk-Wood) (Horsakulthai, 2011) είναι ένα παραπροϊόν το οποίο προέρχεται από τα ηλεκτρικά εργοστάσια βιομάζας, όπου γίνεται συν-καύση βαγάσσης, φλοιού ρυζιού και κομματιών ξύλου, οπότε ο ατμός που δημιουργείται χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα εργοστάσια ζάχαρης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η BRWA εναποτίθεται ως απόβλητο σε χώρους υγειονομικής ταφής, γεγονός το οποίο δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα όπως ρύπανση του αέρα καθώς και προβλήματα με την ποιότητα του υπόγειου νερού. Σε ότι αφορά τη χημική σύνθεση, το άθροισμα SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ ήταν 82.7% και η απώλεια πύρωσης (LOI) 3.6% (<10%), οπότε συμφωνεί με τις απαιτήσεις του προτύπου ASTM C618 για τις φυσικές ποζολάνες.

Η τέφρα φοινικέλαιου (POFA) είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας φοινικέλαιου. Είναι ένα απόβλητο το οποίο προέρχεται από καύση ινών φοινικέλαιου, κελυφών και τσαμπιών ως καύσιμο για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας για τη διαδικασία εξαγωγής φοινικέλαιου. Γενικά η τέφρα φοινικέλαιου περιέχει υψηλές ποσότητες οξειδίων και έγινε πρόσφατα αποδεκτή ως ποζολανικό υλικό (Tangchirapat & Jaturapitakkul, 2010). Σύμφωνα με την χημική σύνθεση των τεφρών POFA που επιλέχθηκαν για την μελέτη (Tangchirapat, 2010, Sata et al., 2007 Tangchirapat et al., 2012 Chindaprasirt et al., 2008) με μέση σύνθεση σε SiO₂ από 55% έως 65% και απώλεια πύρωσης άνθρακα (LOI) γύρω στο 10% μπορεί να λεχθεί πως παρότι η POFA δεν είναι μια φυσική ποζολάνη, μπορεί να χαρακτηριστεί ως class N (φυσική) ποζολάνη σύμφωνα με το ASTM C618 (ASTM Standard C618, 2012).

Η τέφρα βαγάσσης ζαχαροκάλαμου (SCBA) είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής ζαχαροκάλαμου και αλκοόλ. Προηγούμενες έρευνες έδειξαν ότι η SCBA παρουσιάζει χημική σύνθεση κατάλληλη για εφαρμογή της τέφρας ως ποζολάνη, κυρίως σε ότι αφορά το υψηλό περιεχόμενο σε πυρίτιο και την παρουσία άμορφου πυριτίου (Cordeiro et al, 2009). Παρόλα αυτά θα πρέπει να σημειωθεί πως το περιεχόμενο SiO₂ καλύπτει το άμορφο και κρυσταλλικό πυρίτιο (από την SCBA), ενώ έχει παρατηρηθεί και κάποια επιμόλυνση από άμμο, η οποία διαπιστώνεται από την παρουσία χαλαζία και κρυστοβαλίτη. Το υψηλό ποσοστό του χαλαζία οφείλεται στην άμμο η οποία προσκολλάται στο ζαχαροκάλαμο κατά τη συγκομιδή. Ακόμα και μετά την πλύση του ζαχαροκάλαμου, η άμμος είναι δυνατόν να αντιπροσωπεύει έως και 2% κατά βάρος του υλικού υπό επεξεργασία. Μετά την απώλεια της οργανικής ύλης κατά την καύση της βαγάσσης, το ποσοστό αυτό αυξάνεται σημαντικά. Η παρουσία του κρυστοβαλίτη μπορεί να συνδέεται με την υψηλή θερμοκρασία στην κάμνο. Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει πως η SCBA παρουσιάζει την κατάλληλη χημική σύνθεση για εφαρμογή ως ποζολάνη, κυρίως σε ότι αφορά το υψηλό ποσοστό σε πυρίτιο και την παρουσία άμορφου πυριτίου.

Η τέφρα ξύλου είναι το ανόργανο και οργανικό υπόλειμμα το οποίο παράγεται από την καύση ξύλου και προϊόντων ξύλου (πριονίδι, φλοιός κτλ.). Υπό μια έννοια σχετίζεται με την ιπτάμενη τέφρα η οποία προέρχεται από κάρβουνο, το οποίο είναι ένα απολιθωμένο ξύλο. Η χημική σύσταση των τεφρών ξύλου που επιλέχθηκαν υποδεικνύουν πολύ υψηλό ποσοστό LOI, υψηλό ποσοστό αλκαλίων και χαμηλές τιμές SiO₂. Ο άκαυστος άνθρακας δεν είναι ποζολανικός και η παρουσία του χρησιμεύει ως υλικό πλήρωσης. Γενικά, οι συγκεκριμένοι τύποι τεφρών ξύλου δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις των κανονισμών ASTM C 618 (ASTM Standard C618, 2012), ώστε να χαρακτηριστούν ως φυσικές ποζολάνες (class N). Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί πως η υψηλή απώλεια πύρωσης σημαίνει πως η τέφρα ξύλου περιέχει σημαντικό ποσοστό άκαυστου άνθρακα που μειώνει την ποζολανική δραστηριότητα.

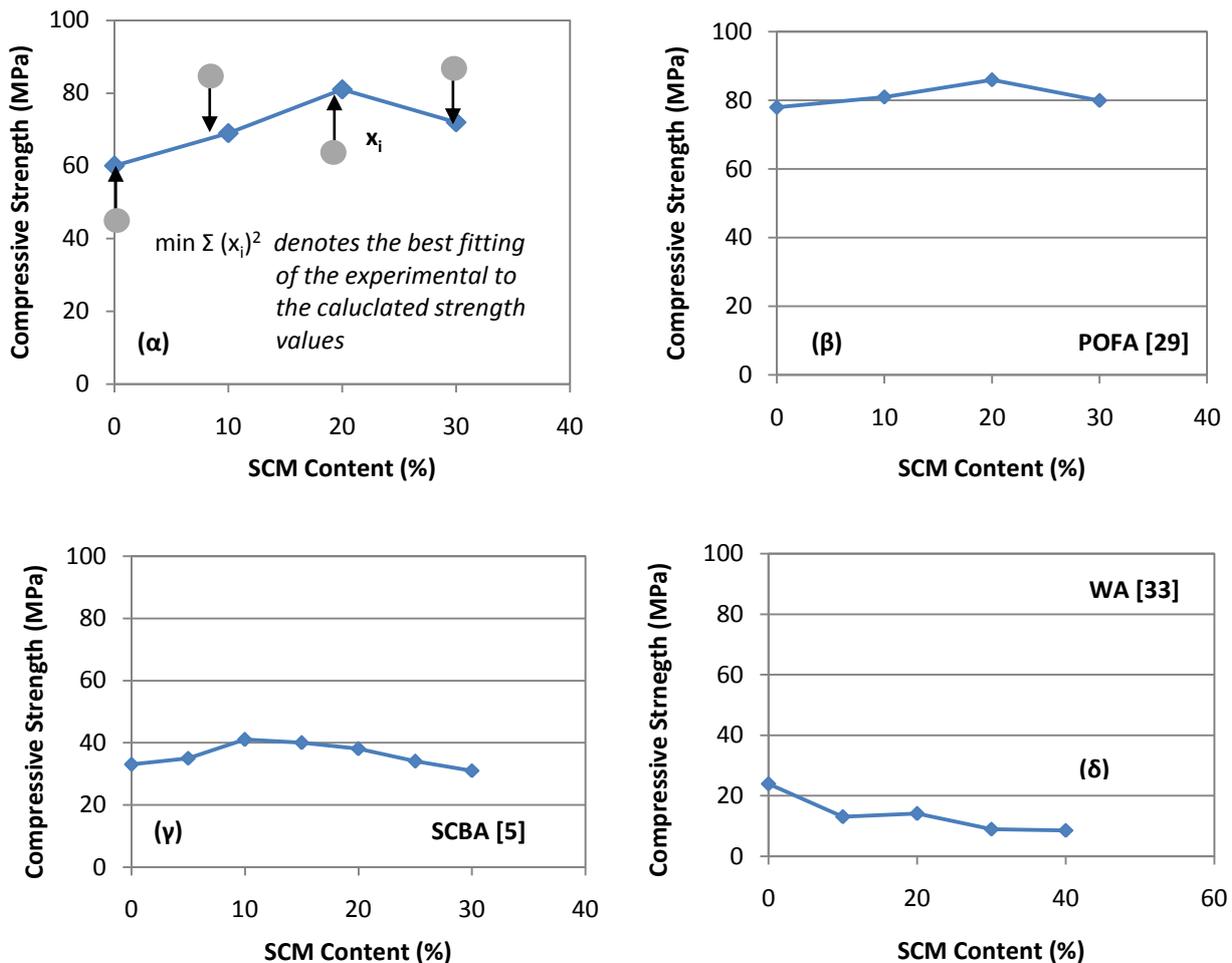
2.2 Μεθοδολογία για την αξιολόγηση των τεφρών βιομάζας ως υδραυλικά υλικά

Σύμφωνα με την χημική σύνθεση των επιλεγμένων τύπων τέφρας, τη σύνθεση μίγματος (λόγος νερού προς τσιμέντο, περιεχόμενο τσιμέντο, επίπεδο αντικατάστασης με SCM, μέγεθος αδρανών) που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μελέτη και βάσει των δεδομένων θλιπτικής αντοχής από την βιβλιογραφία (πειραματικά), έγινε εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής για ένα εύρος συντελεστών ενεργότητας (*k*-values). Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια ενός αναλυτικού εργαλείου για την εκτίμηση της αντοχής και της διάρκειας ζωής, το οποίο αναπτύχθηκε από ορισμένους συγγραφείς της μελέτης αυτής. Για κάθε τύπο τέφρας βιομάζας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, διαφορετικά σετ δεδομένων θλιπτικής αντοχής υπολογίστηκαν για ένα εύρος συντελεστών *k*-values (από 0.2 έως 1.7). Κάθε σετ δεδομένων αξιολογήθηκε ως προς την στατιστική προσέγγιση σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, βάσει των αρχών της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (Πίνακας 2, Σχήμα 1). Ο συντελεστής *k*-value από το σετ δεδομένων που παρουσίασε την καλύτερη προσαρμογή θεωρήθηκε ως ο συντελεστής απόδοσης (για θλιπτική αντοχή 28 ημερών) της τέφρας βιομάζας.

Πίνακας 2. Ανάλυση παλινδρόμησης για τον υπολογισμό του *k*-value των τεφρών βάσει του υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής

SCM		Experimental compressive strength (MPa)	Calculated Compressive Strength (MPa) <i>k</i> factor for 28 days compressive strength			
Type	(%)		1.0	1.2	1.4	1.6
RHBA	0	78	80.1	80.1	80.1	80.1
	10	86	80.1	81.8	83.4	85.0
	20	88	80.3	83.6	86.7	89.9
	30	85	71.0	74.0	77.1	82.0
		SLSQ	294.5	162.4	75.3	18.0

Επιπλέον, όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα αξιολογήθηκε η συμπεριφορά των τεφρών βιομάζας ως προς την διείσδυση ιόντων χλωρίου, εκφρασμένη ως το συνολικό φορτίο που διέρχεται από τα δοκίμια σκυροδέματος με τέφρα βιομάζας (σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1202). Βάσει των τιμών του φορτίου (Coulombs) που διήλθε διαμέσου κάθε σκυροδέματος με τέφρα βιομάζας, με αυξανόμενο ποσοστό SCM, η διαφορά με το σκυροδέμα ελέγχου υπολογίστηκε, όπως φαίνεται στην παράγραφο 3.2 της παρούσας μελέτης.



Σχήμα 1. Υπολογισμός των συντελεστών ενεργότητας με ανάλυση παλινδρόμησης (α) Σχηματική επισκόπηση, (β) POFA (Sata et al, 2007), (γ) SCBA (Ganesan et al, 2007), και (δ) WA (Abdullahi, 2006).

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε ότι αφορά την ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής, μια κοινή παρατήρηση που προκύπτει από την βιβλιογραφία (όπως φαίνεται στο Σχήμα 1) είναι πως υπάρχει ένα βέλτιστο επίπεδο αντικατάστασης τσιμέντου από τέφρες βιομάζας. Μετά από ένα συγκεκριμένο ποσοστό τέφρας βιομάζας, οι προκύπτουσες τιμές αντοχής μειώνονται (σε μερικές περιπτώσεις είναι υψηλότερες από το δοκίμιο αναφοράς). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον αρχικό γρήγορο ρυθμό της ποζολανικής αντίδρασης, ενώ σε υψηλά επίπεδα αντικατάστασης ο ρυθμός αυτός πέφτει σε τιμές κάτω της μονάδας και η επίδραση του συνδετικού υλικού γίνεται πιο έντονη.

Γενικά στα περισσότερα μίγματα RHA τα υψηλά επίπεδα άμορφου πυριτίου και το λεπτό μέγεθος των κόκκων αποτελούν τους βασικούς λόγους για την εξαιρετική ποζολανική δραστηριότητα και την αύξηση της θλιπτικής αντοχής που παρατηρείται.

Η χρήση τεφρών φοινικέλαιου στο μίγμα σκυροδέματος (με περιεχόμενο σε SiO_2 65% κατά μέσο όρο) συνέβαλε στην θλιπτική αντοχή, μέσω μιας γρήγορης ποζολανικής αντίδρασης, ανάλογα με την λεπτότητα της τέφρας POFA. Η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με 20% τέφρα POFA βρέθηκε υψηλότερη σε σχέση με τα μίγματα που περιείχαν 10% και 30% POFA (Σχήμα 1β). Σε μια άλλη μελέτη (Tangchirapat et al., 2010) για το ίδιο ποσοστό

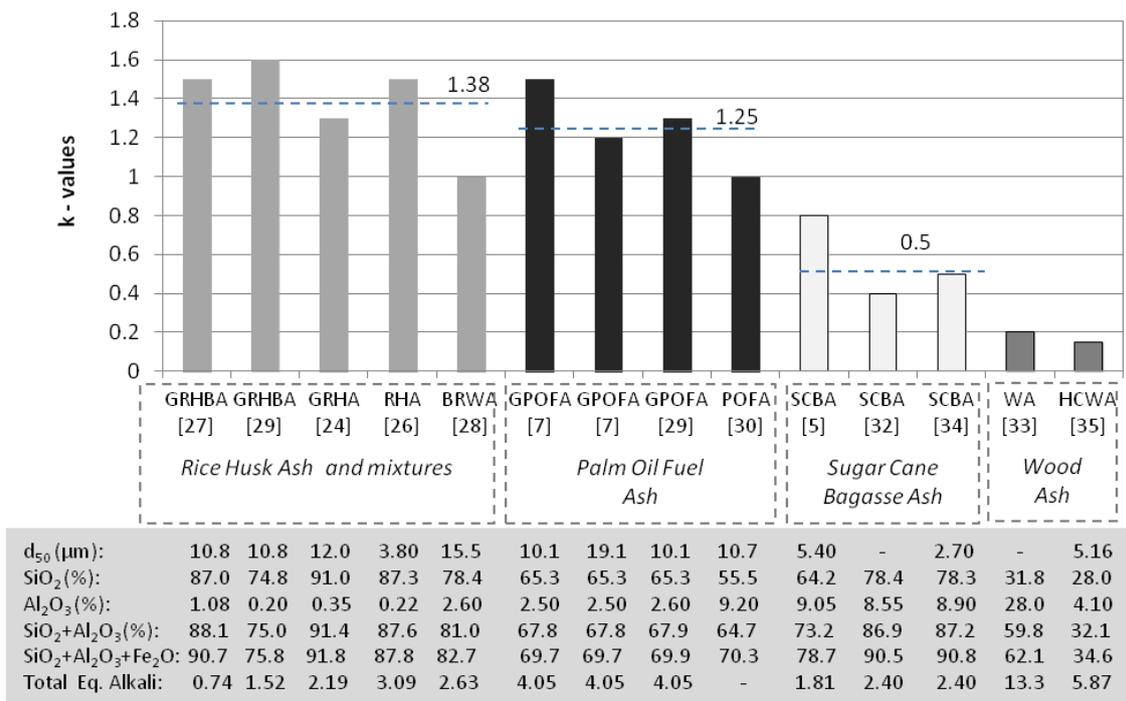
τέφρας POFA (20%) της ίδιας χημικής σύνθεσης αλλά διαφορετικού επιπέδου λεπτότητας (μέσου μεγέθους κόκκου 19.9 mm και 10.1 mm), η τέφρα με το χαμηλότερο μέσο μεγέθους κόκκου οδήγησε σε υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής 28 ημερών (33MPa, για d_{50} 10.1 μm , σε σύγκριση με 27 MPa για d_{50} 19,1 μm).

Το ίδιο παρατηρήθηκε και για μίγματα SCBA (Ganesan et al., 2007). Για ποσοστά αντικατάστασης έως και 20% η θλιπτική αντοχή ήταν υψηλότερη σε σχέση με τα δείγματα ελέγχου, ενώ σε υψηλότερα επίπεδα η αντοχή μειώθηκε.

Σε ότι αφορά την τέφρα ξύλου τα αποτελέσματα από την βιβλιογραφία (Abdullahi, 2006 Cordeiro et al., 2012, Chee et al., 2012) έδειξαν ότι γενικά η αύξηση των επιπέδων αντικατάστασης τσιμέντου οδήγησε σε σταδιακή μείωση της θλιπτικής αντοχής. Το μίγμα που περιείχε 20% τέφρα ξύλου είχε υψηλότερη αντοχή σε σχέση με το μίγμα με 10% τέφρα ξύλου στις 28 ημέρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πυρίτιο από το μίγμα με 10% τέφρα ξύλου δεν ήταν αρκετό να αντιδράσει με το υδροξείδιο του ασβεστίου από την ενυδάτωση του τσιμέντου.

3.1 Συντελεστές ενεργότητας

Μια παρουσίαση των υπολογισμένων συντελεστών ανά κατηγορία τεφρών βιομάζας που εξετάστηκαν, φαίνεται στο Σχήμα 2 και τον Πίνακα 3. Μια βασική παρατήρηση που προκύπτει είναι πως η διαφορετική προέλευση και χημική σύνθεση των τεφρών οδήγησαν σε διαφορετικές τιμές του συντελεστή ενεργότητας. Συνολικά, κατά μέσο όρο ο συντελεστής ενεργότητας βρέθηκε 1.38 για την τέφρα φλοιού ρυζιού και μίγματα, 1.2 και 0.5 για την τέφρα φοινικέλαιου και τέφρα ζαχαροκάλαμου αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο οι συντελεστές k-value για τις τέφρες ξύλου βρέθηκαν χαμηλοί, κάτω από 0.2.



Σχήμα 2. Υπολογισμός των συντελεστών ενεργότητας για διάφορες τέφρες βιομάζας.

Πίνακας 3. Συντελεστές ενεργότητας (k-values) των τεφρών που διερευνηθηκαν στη μελέτη

SCM Type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	LOI (%)	d ₅₀ (mm)	k
GRHBA	87.0	1.08	2.58	88.1	90.7	1.25	0.09	0.08	1.00	5.71	10.8	1.5
GRHBA	74.8	0.20	0.80	75.0	75.8	5.90	0.50	0.20	2.00	11.2	10.8	1.6
RHA	91.0	0.35	0.41	91.3	91.8	1.95	1.21	0.08	3.21	8.50	12.0	1.3
RHA	87.3	0.22	0.28	87.5	87.8	0.48	-	1.02	3.14	2.10	3.80	1.5
BRWA	78.4	2.60	1.70	81.0	82.7	7.40	1.10	0.20	3.70	3.60	15.5	1.0
GPOFA	65.3	2.50	1.90	67.8	69.7	6.40	0.40	0.30	5.70	10.0	10.1	1.5
GPOFA	65.3	2.50	1.90	67.8	69.7	6.40	0.40	0.30	5.70	10.0	19.1	1.2
GPOFA	65.3	2.60	2.00	67.9	69.9	6.40	0.50	0.30	5.70	10.1	10.1	1.3
POFA	55.5	9.20	5.60	64.7	70.3	12.4	2.30	-	-	7.90	10.7	1.0
SCBA	64.2	9.05	5.52	73.2	78.7	8.14	-	0.92	1.35	4.90	5.40	0.8
SCBA	78.3	8.55	3.61	86.9	90.5	2.15	-	0.12	3.46	0.42	-	0.4
SCBA	78.3	8.90	3.60	87.2	90.8	2.20	-	0.10	3.50	-	2.70	0.5
W(S)A	31.8	28.0	2.64	59.8	62.1	10.5	0.45	6.50	10.4	27.0	-	0.2
HCWA	28.0	4.10	2.50	32.1	34.6	39.0	1.00	1.00	7.40	7.22	5.16	0.15

Πιο συγκεκριμένα, αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω:

- Η τέφρα RHA και τα μίγματα (πλούσια σε τέφρα φλοιού ρυζιού) παρήγαγαν k-values πάνω από 1.3 έως 1.6 (εκτός από την BRWA (Horsakulthai et al., 2011) με 15% συμμετοχή της RHA η οποία παρήγαγε k-value 1.0).
- Το χαμηλό επίπεδο λεπτότητας (εκφρασμένο ως d₅₀) από 3.8 μm έως 10.8 μm δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στους προκύπτοντες συντελεστές k-factors, αφού οι τέφρες RHA παρόμοιας σύνθεσης παρήγαγαν τιμές περίπου 1.5 έως 1.6. Παρόλα αυτά για ένα μέσο μέγεθος κόκκου 12μm, οι προκύπτοντες συντελεστές ενεργότητας ήταν ελαφρώς χαμηλότεροι.
- Αυτές οι ασυνέπειες σχετικά με το επίπεδο λεπτότητας παρατηρήθηκαν επίσης στην περίπτωση της τέφρας ζαχαροκάλαμου – βγάσσησης αλλά για παρόμοιες τιμές d₅₀. Ένας συγκεκριμένος τύπος SCBA με d₅₀ 2.70 μm παρήγαγε k-value 0.5 (Cordeiro et al., 2009) ενώ ένας παρόμοιος τύπος SCBA με μεγαλύτερο d₅₀ 5.4 μm παρήγαγε k-value 0.8 (Ganesan et al., 2007). Αυτή η διαφορά ωστόσο μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η SCBA με το χαμηλό k-value ήταν πλούσια σε κρυσταλλικό πυρίτιο.
- Οι τέφρες φοινικέλαιου (POFA) με μικρότερο περιεχόμενο σε SiO₂ από την RHA παρήγαγαν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις παρόμοιους συντελεστές k-factors, συγκεκριμένα 1.3 (Sata et al, 2007) και 1.5 (Tangchirapat & Jaturapitakkul, 2010).
- Το επίπεδο της λεπτότητας φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στα μίγματα της POFA (Tangchirapat & Jaturapitakkul, 2010 Sata et al, 2007 Tangchirapat et. al, 2012). Για την ίδια χημική σύνθεση POFA μείωση του d₅₀ από 19.1 μm σε 10,1 μm μεταφράστηκε σε αύξηση των k-values. Παρόλα αυτά, ένας άλλος τύπος POFA με παρόμοιο επίπεδο λεπτότητας (10.7 μm) (Tangchirapat et. al, 2012) παρήγαγε k-value 1.0 (αρκετά χαμηλότερο από 1.5).

3.2 Διείσδυση χλωριόντων

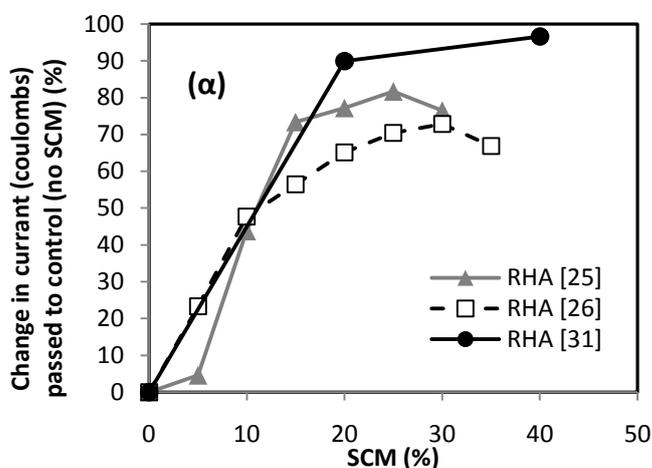
Όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα, αξιολογήθηκε η συμπεριφορά των τεφρών βιομάζας ως προς την διείσδυση ιόντων χλωρίου (μετρημένη βάσει του ASTM C1202). Η διαφορά (%) με τον έλεγχο (χωρίς SCM) σε σχέση με το διερχόμενο ρεύμα για αυξανόμενο περιεχόμενο SCM παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Συμπεριφορά στη δοκιμή RCPT ως προς την μείωση του διερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος

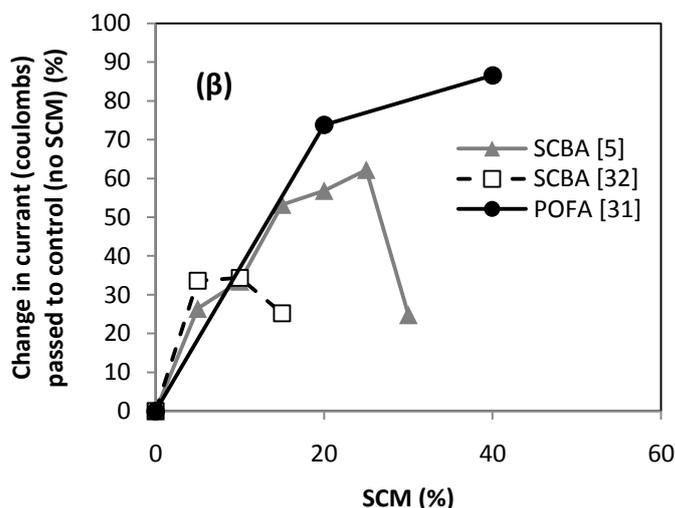
SCM (%)	SCBA		SCBA		RHA		RHA		RHA		POFA	
	(C)	D(%)										
0	2780	0	1179	0	1161	0	7450	0	2870	0	7450	0
5	2045	26.4	783	33.6	1108	4.57	-	-	2200	23.3	-	-
10	1850	33.5	774	34.4	653	43.8	-	-	1500	47.7	-	-
15	1300	53.3	882	25.2	309	73.4	-	-	1250	56.5	-	-
20	1200	56.8	-	-	265	77.2	750	89.9	1000	65.2	1950	73.8
25	1050	62.2	-	-	213	81.7	-	-	850	70.4	-	-
30	2090	24.8	-	-	273	76.5	-	-	780	72.8	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	950	66.9	-	-
40	-	-	-	-	-	-	250	96.6	-	-	1000	86.6

(C) Charge passed (in Coulombs), (D) Difference to the control value (%)

charge ranging from 1000 to 2000 C: low permeability, while from 100 to 1000 C: very low permeability



	RHA [25]	RHA [31]	RHA [26]
SiO ₂ (%)	92.9	91.6	7.3
Al ₂ O ₃ (%)	0.31	0.35	0.22
Fe ₂ O ₃ (%)	0.26	0.40	0.28
CaO (%)	0.53	0.60	0.48
SO ₃ (%)	-	-	-
LOI (%)	1.97	3.70	2.10
d ₅₀ (μm)	-	7.41	3.80



	SCBA [5]	SCBA [32]	POFA [31]
SiO ₂ (%)	64.2	78.4	63.6
Al ₂ O ₃ (%)	9.05	8.55	1.60
Fe ₂ O ₃ (%)	5.52	3.61	1.40
CaO (%)	8.14	2.15	7.60
SO ₃ (%)	-	-	0.20
LOI (%)	4.90	0.42	9.60
d ₅₀ (μm)	5.40	-	7.20

Σχήμα 3. Συμπεριφορά αντιπροσωπευτικών τεφρών βιομάζας στη δοκιμή RCPT.

Συνολικά, το διερχόμενο ρεύμα μειώθηκε σημαντικά με την ενσωμάτωση τεφρών βιομάζας στο μίγμα σκυροδέματος. Η αντικατάσταση τσιμέντου από τέφρα φλοιού ρυζιού μείωσε σημαντικά την ταχεία διεισδυτικότητα χλωριόντων του σκυροδέματος από χαμηλά (1000 έως 2000 C) σε πολύ χαμηλά (100 έως 1000 C) επίπεδα (ASTM C1202). Γενικά η RHA αποδείχτηκε πολύ δραστική σε σχέση με την SCBA και την POFA. Ενσωμάτωση 20% (Σχήμα 3α) οδήγησε σε μείωση του διερχόμενου ρεύματος πάνω από 60% (και έως 90%),

ενώ για χαμηλότερες ποσότητες τεφρών βιομάζας (10%) μια σταθερή μείωση (για όλες τις τέφρες RHA που εξετάστηκαν) 43% κατά μέσο όρο παρατηρήθηκε.

4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση των κύριων χαρακτηριστικών των τεφρών βιομάζας στους συντελεστές ενεργότητας, αξίζει να σημειωθεί ότι:

- Γενικά οι τέφρες φλοιού ρυζιού πλούσιες σε πυρίτιο (>85%) παρήγαγαν υψηλές τιμές k-values
- Τέφρες ξύλου με χαμηλό ποσοστό σε πυρίτιο (<30%) παρήγαγαν χαμηλότερες τιμές k-values

Συνεπώς, φαίνεται πως η επίδραση του SiO₂ στον προκύπτοντα συντελεστή ενεργότητας της τέφρας είναι αρκετά σημαντική. Παρόλα αυτά, εάν ληφθεί υπόψη πως η τέφρα SCBA με υψηλότερο περιεχόμενο σε SiO₂ από την τέφρα POFA, παρήγαγε μικρότερους συντελεστές ενεργότητας, η επίδραση του SiO₂ στον συντελεστή ενεργότητας δεν είναι απ' ευθείας ανάλογη με το περιεχόμενο του.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Papadakis et al., 2002, Lothenbach et al., 2012), η δραστηριότητα των SCMs γενικά (συμπεριλαμβανομένων των τεφρών βιομάζας) αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι περιέχουν σημαντικές ποσότητες ενεργών συστατικών (ενεργού πυριτίου) που συνδυάζονται με το Ca(OH)₂, το οποίο παράγεται από την ενυδάτωση του τσιμέντου, ώστε να σχηματιστούν προϊόντα ενυδάτωσης με δεσμευτικές ικανότητες. Το ενεργό πυρίτιο, το οποίο αποτελεί μέρος του συνολικού πυριτίου που περιέχεται στο SCM, συμμετέχει στις αντιδράσεις ενυδάτωσης, οπότε παράγεται CSH, στο οποίο αποδίδεται η ανάπτυξη αντοχής του τσιμέντου. Ωστόσο, για πολλές από τις τέφρες βιομάζας που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη, δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες για το ενεργό πυρίτιο. Συνεπώς, ο Πίνακας 5 και το Σχήμα 4 παρουσιάζουν την αξιολόγηση των διαφόρων τύπων τέφρας που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, ως προς την επίδραση του SiO₂ και την συνδυασμένη επίδραση του SiO₂ και των άλλων βασικών οξειδίων (Al₂O₃, Fe₂O₃) στους συντελεστές ενεργότητας που προκύπτουν.

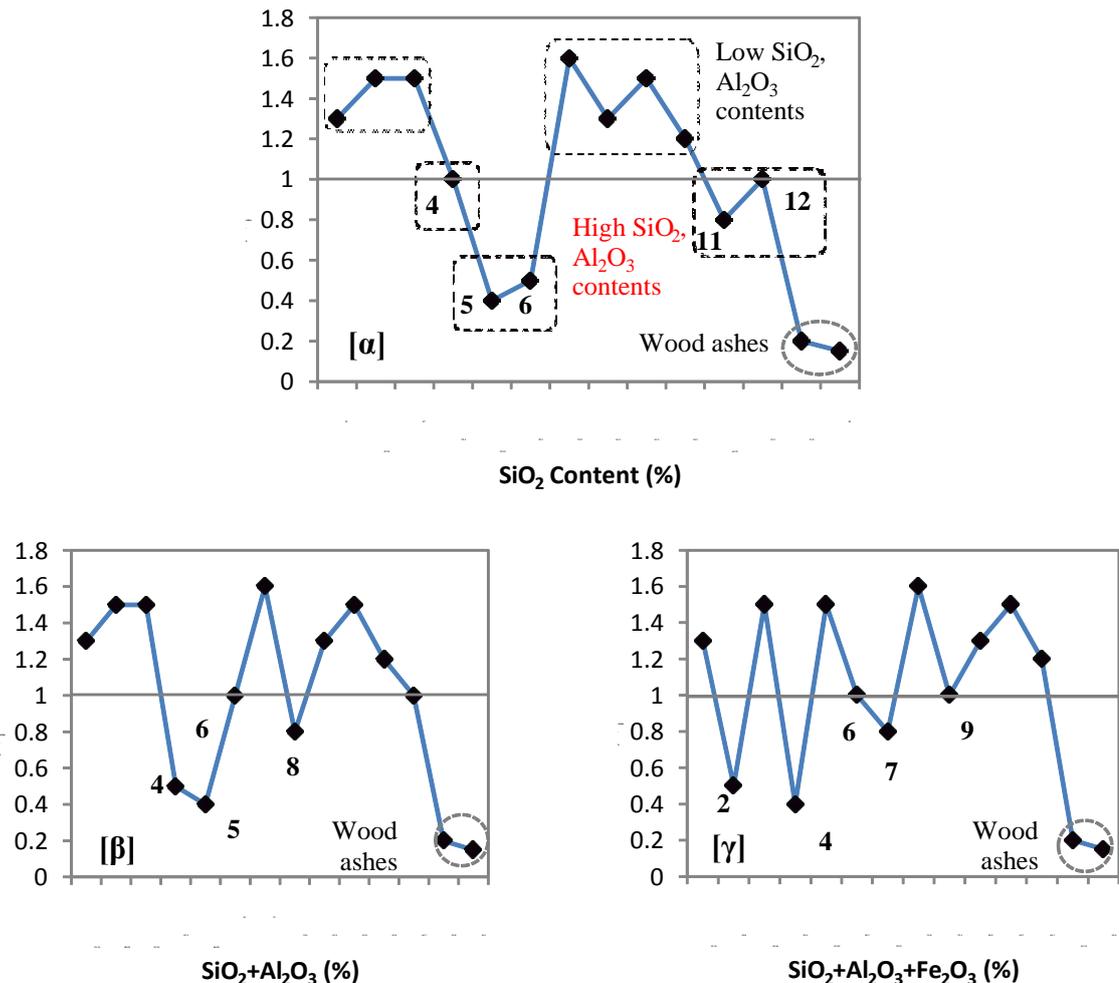
Παρά το γεγονός ότι διαφαίνεται η τάση (Σχήμα 4α) πως μειώνοντας το ποσοστό SiO₂ προκύπτουν χαμηλότεροι συντελεστές ενεργότητας (k-values), συγκεκριμένες “ανωμαλίες” (σημεία 4,5 και 6 που φαίνονται στο Σχήμα 4α και στον Πίνακα 5α) παραμορφώνουν αυτήν την εικόνα.

Με μια πιο προσεκτική παρατήρηση προκύπτει πως υψηλό περιεχόμενο σε SiO₂ και χαμηλό (έως 2.6%) σε Al₂O₃ και Fe₂O₃ οδήγησαν σε τιμές του συντελεστή ενεργότητας (k-values) μεγαλύτερες της μονάδας. Ωστόσο, τέφρες με υψηλό ποσοστό Al₂O₃ (πάνω από 8%) και Fe₂O₃ (πάνω από 2.6%) ακόμα και αν είναι πλούσιες σε SiO₂ (78%), παρήγαγαν τιμές (k-values) κάτω από 0.8. Οι προαναφερόμενες “ανωμαλίες” αναφέρονται σε τέτοιους τύπους τεφρών, δηλαδή τεφρών ζαχαροκάλαμου – βαγάσσης, σημεία 5 (Cordeiro et al. 2009), 6 (Frias et al., 2007), 11 (Ganesan et al., 2007) στο Σχήμα 4α.

Πίνακας 5. Κατηγοριοποίηση τερρών βιομάζας βάσει του περιεχομένου σε κύρια οξείδια [α] SiO₂ (%), [β] SiO₂+Al₂O₃ (%) και [γ] SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (%) περιεχόμενα

	a/a	SCM Type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	Eq. Alk. (%)	LOI (%)	d ₅₀ (μm)	k
α	1	GRHA	91.0	0.35	0.41	91.4	91.8	1.95	1.2	2.19	8.50	12.0	1.3
	2	RHA	87.3	0.22	0.28	87.5	87.8	0.48	-	3.09	2.10	3.80	1.5
	3	GRHB	87.0	1.08	2.58	88.1	90.7	1.25	0.0	0.74	5.71	10.8	1.5
	4	BRWA	78.4	2.60	1.70	81.0	82.7	7.40	1.1	2.63	3.60	15.5	1
	5	SCBA	78.3	8.55	3.61	86.9	90.5	2.15	-	2.40	0.42	-	0.4
	6	SCBA	78.3	8.90	3.60	87.2	90.8	8.14	-	1.81	4.90	5.40	0.5
	7	GRHB	74.8	0.20	0.80	75.0	75.8	5.90	0.5	1.52	11.2	10.8	1.6
	8	GPOFA	65.3	2.60	2.00	67.9	69.9	6.40	0.5	4.05	10.1	10.1	1.3
	9	GPOFA	65.3	2.50	1.90	67.8	69.7	6.40	0.4	4.05	10.0	10.1	1.5
	10	GPOFA	65.3	2.50	1.90	67.8	69.7	6.40	0.4	4.05	10.0	19.1	1.2
	11	SCBA	64.1	9.05	5.52	73.2	78.7	8.14	-	1.81	4.90	5.40	0.8
	12	POFA	55.5	9.20	5.60	64.7	70.3	12.4	2.3	0.00	7.90	10.7	1
	13	WA	31.8	28.0	2.34	59.8	62.1	10.5	0.4	13.3	27.0	-	0.2
	14	HCWA	28.0	4.10	2.50	32.1	34.6	39.0	1.0	5.87	7.22	5.16	0.1
β	1	GRHA	91.0	0.35	0.41	91.4	91.8	1.95	1.2	2.19	8.50	12.0	1.3
	2	GRHB	87.0	1.08	2.58	88.1	90.7	1.25	0.0	0.74	5.71	10.8	1.5
	3	RHA	87.3	0.22	0.28	87.5	87.8	0.48	-	3.09	2.10	3.80	1.5
	4	SCBA	78.3	8.90	3.60	87.2	90.8	8.14	-	1.81	4.90	5.40	0.5
	5	SCBA	78.3	8.55	3.61	86.9	90.5	2.15	-	2.40	0.42	-	0.4
	6	BRWA	78.4	2.60	1.70	81.0	82.7	7.40	1.1	2.63	3.60	15.5	1
	7	GRHB	74.8	0.20	0.80	75.0	75.8	5.90	0.5	1.52	11.2	10.8	1.6
	8	SCBA	64.2	9.05	5.52	73.2	78.7	8.14	-	1.81	4.90	5.40	0.8
	9	GPOFA	65.3	2.60	2.00	67.9	69.9	6.40	0.5	4.05	10.1	10.1	1.3
	10	GPOFA	65.3	2.50	1.90	67.8	69.7	6.40	0.4	4.05	10.0	10.1	1.5
	11	GPOFA	65.3	2.50	1.90	67.8	69.7	6.40	0.4	4.05	10.0	19.1	1.2
	12	POFA	55.5	9.20	5.60	64.7	70.3	12.4	2.3	0.00	7.90	10.7	1
	13	WA	31.8	28.0	2.34	59.8	62.1	10.5	0.4	13.3	27.0	-	0.2
	14	HCWA	28.0	4.10	2.50	32.1	34.6	39.0	1.0	5.87	7.22	5.16	0.1
γ	1	GRHA	91.0	0.35	0.41	91.8	91.4	1.95	1.2	2.19	8.50	12.0	1.3
	2	SCBA	78.3	8.90	3.60	90.8	87.2	8.14	-	1.81	4.90	5.40	0.5
	3	GRHB	87.0	1.08	2.58	90.7	88.1	1.25	0.0	0.74	5.71	10.8	1.5
	4	SCBA	78.3	8.55	3.61	90.5	86.9	2.15	-	2.40	0.42	-	0.4
	5	RHA	87.3	0.22	0.28	87.8	87.5	0.48	-	3.09	2.10	3.80	1.5
	6	BRWA	78.4	2.60	1.70	82.7	81.0	7.40	1.1	2.63	3.60	15.5	1
	7	SCBA	64.2	9.05	5.52	78.7	73.2	8.14	-	1.81	4.90	5.40	0.8
	8	GRHB	74.8	0.20	0.80	75.8	75.0	5.90	0.5	1.52	11.2	10.8	1.6
	9	POFA	55.5	9.20	5.60	70.3	64.7	12.4	2.3	0.00	7.90	10.7	1
	10	GPOFA	65.3	2.60	2.00	69.9	67.9	6.40	0.5	4.05	10.1	10.1	1.3
	11	GPOFA	65.3	2.50	1.90	69.7	67.8	6.40	0.4	4.05	10.0	10.1	1.5
	12	GPOFA	65.3	2.50	1.90	69.7	67.8	6.40	0.4	4.05	10.0	19.1	1.2
	13	WA	31.8	28.0	2.34	62.1	59.8	10.5	0.4	13.3	27.0	-	0.2
	14	HCWA	28.0	4.10	2.50	34.6	32.1	39.0	1.0	5.87	7.22	5.16	0.1

Επίσης, δύο ακόμα σημεία αξίζει να σχολιασθούν: Ένας τύπος τέφρας POFA (Chindaprasirt et al, 2008) (σημείο 12) με υψηλό περιεχόμενο σε Al₂O₃ και Fe₂O₃, αλλά επίσης πλούσια σε CaO (12.4%) και ένα μίγμα τέφρας BRWA (Horsakulthai et al, 2011) (σημείο 4) η οποία περιλαμβάνει μια μικρή ποσότητα (15%) τέφρας φλοιού ρυζιού και ξύλου, με χαμηλό ποσοστό Al₂O₃ και Fe₂O₃ αλλά υψηλό περιεχόμενο σε CaO (7.4%).



Σχήμα 4. Επίδραση περιεχομένου κύριων οξειδίων στους συντελεστές ενεργότητας (k-values) των τερφών βιομάζας [α] SiO₂ (%), [β] SiO₂+Al₂O₃ (%) και [γ] SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (%) περιεχόμενο.

Συνεπώς η επίδραση του επιπέδου SiO₂ της τέφρας στην παραγόμενη τιμή του συντελεστή ενεργότητας μπορεί να θεωρηθεί βασική, αλλά η τιμή αυτή επηρεάζεται επίσης από την σύνθεση της τέφρας σε άλλα οξείδια. Πάνω σε αυτήν την βάση, εξετάζεται η επίδραση του SiO₂ σε συνδυασμό με τα άλλα βασικά οξείδια (Al₂O₃ και Fe₂O₃). Διερευνώντας την συνδυασμένη επίδραση του περιεχόμενου SiO₂+Al₂O₃, παρατηρείται μια παρόμοια συμπεριφορά (Πίνακας 5β,γ, Σχήμα 4β,γ). Η ίδια τάση παρατηρείται και στην περίπτωση της επίδρασης του περιεχόμενου SiO₂, με αποτέλεσμα οι ίδιοι τύποι τέφρας και οι ιδιαιτερότητες τους όπως εξηγήθηκαν προηγουμένως (ως προς την σύνθεση σε βασικά οξείδια και CaO) να αποκλίνουν σε σημαντικό βαθμό. Μια τέτοια απόκλιση γίνεται ακόμα πιο εμφανής όταν εξετάζεται η συνδυασμένη επίδραση και των τριών οξειδίων στους συντελεστές ενεργότητας.

Μια κοινή παρατήρηση όλων των παραπάνω ταξινομήσεων τέφρας είναι ότι συγκεκριμένοι τύποι τέφρας που παράγουν υψηλές τιμές k εμφανίζονται στην κορυφή αυτών των ταξινομήσεων ενώ οι τέφρες ξύλου (WA (Abdullahi, 2006), HCWA (Chee & Mahyuddin, 2012) κατατάσσονται τελευταίες. Οι τέφρες ξύλου συνήθως έχουν πολύ χαμηλό περιεχόμενο σε SiO₂ και περιέχουν σημαντικές ποσότητες άκαυστου άνθρακα (έως και 27% σε μία συγκεκριμένη τέφρα ξύλου (Abdullahi, 2006) η οποία εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη) η οποία μειώνει την ποζολανική τους δραστηριότητα σε σημαντικό βαθμό. Υψηλά ποσοστά άκαυστου άνθρακα, η κύρια μορφή της απώλειας πύρωσης στην τέφρα, είναι

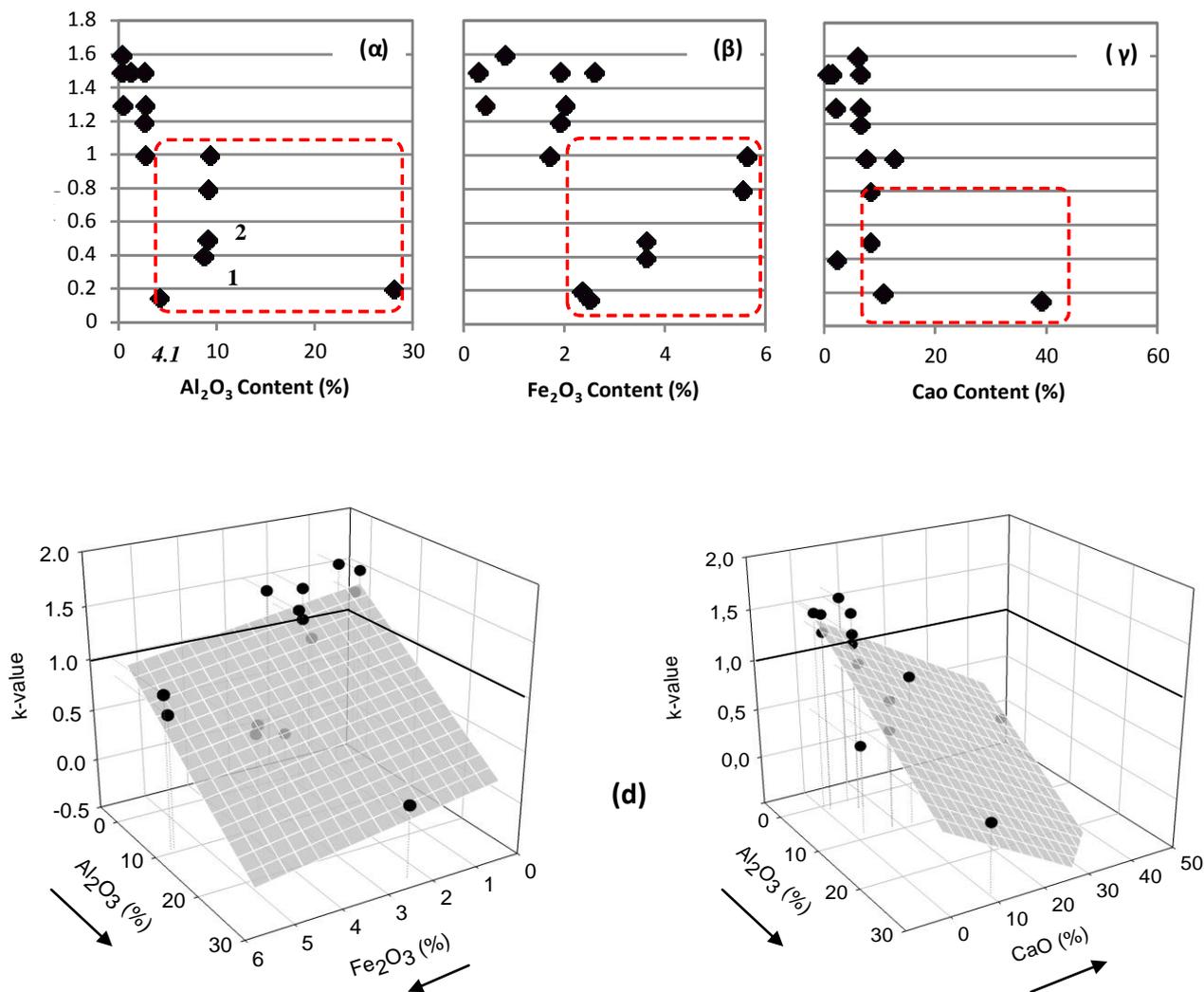
γνωστό πως ευθύνονται για προβλήματα ανάπτυξης αντοχής και ανθεκτικότητας (αυξημένη απαίτηση σε νερό, αυξημένη διαπερατότητα) (Hwang et al, 2011, Cordeiro et al, 2012, Wang and Baxter, 2007).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως όταν η τέφρα παράγεται σε βιομηχανικά συστήματα καύσης, η θερμοκρασία καύσης, η καθαρότητα του καυσίμου βιομάζας και η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μπορούν να έχουν έντονες επιδράσεις στα χαρακτηριστικά της τέφρας, κυρίως όσον αφορά το περιεχόμενο του άκαυστου άνθρακα. Ελεγχόμενη καύση στους 800°C, διαμέσου μιας διαδικασίας καύσης ρευστοστερεάς κλίνης, οδήγησε σε σημαντικά υψηλότερες τιμές, σε σύγκριση με καύση στους 1300°C (Sata et al., 2007). Ωστόσο, παρατηρήθηκε πως μικρότερες τιμές LOI (ή κατάλοιπα περιεχόμενα άνθρακα) έως 12%, που παρουσίασε κάθε τέφρα που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, εκτός από την τέφρα ξύλου, δεν είχε καμία καταστροφική επίδραση στην αντοχή και την μικροδομή του τσιμέντου και του σκυροδέματος (Hornain et al., 1992).

Συνολικά, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι έως ένα συγκεκριμένο ποσοστό του περιεχομένου της τέφρας σε Al_2O_3 , Fe_2O_3 και CaO , υψηλό περιεχόμενο σε SiO_2 μεταφράζεται σε υψηλό συντελεστή k-value. Παρόλα αυτά σε υψηλές συνθέσεις CaO , ακόμα και για χαμηλό περιεχόμενο σε Al_2O_3 , Fe_2O_3 και/ή για υψηλά περιεχόμενα σε Al_2O_3 , Fe_2O_3 οι συντελεστές k-values που προκύπτουν δεν είναι γραμμικοί με αυτό το υψηλό περιεχόμενο σε SiO_2 . ο τρόπος με τον οποίο το περιεχόμενο σε Al_2O_3 , Fe_2O_3 και CaO επηρεάζει το επίπεδο του συντελεστή k-value που προκύπτει ακόμα και για υψηλό ποσοστό SiO_2 στην τέφρα) φαίνεται στο σχήμα 5.

Σχετικά με τις τέφρες βιομάζας που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, με παρόμοιο μέσο μέγεθος κόκκου και LOI, συγκέντρωση σε Al_2O_3 πάνω από 4.1 % παρήγαγε συντελεστές ενεργότητας κάτω από 1.0, ακόμα και για υψηλό περιεχόμενο σε SiO_2 (πάνω από 78%), όπως φαίνεται στα σημεία 1 (Cordeiro et al, 2009) και 2 (Cordeiro et al, 2012) στο Σχήμα 5α. Σε ότι αφορά το περιεχόμενο σε Fe_2O_3 και CaO , συγκέντρωση πάνω από 3.0% και 8.0% αντίστοιχα, παρήγαγε συντελεστές ενεργότητας κάτω από 1.0. Γενικά, βάσει της συνδυασμένης τους επίδρασης, φαίνεται πως όσο τα ποσοστά τους στην τέφρα αυξάνονται, οι προκύπτοντες συντελεστές k-values πέφτουν κάτω από 1.0, ακόμα και κάτω από 0.5 (Σχήμα 5δ).

Σε σχέση με την επίδραση του CaO τα αποτελέσματα είναι αντιφατικά. Σύμφωνα με την θεωρία, το υψηλό περιεχόμενο της τέφρας σε CaO συμβάλλει στην υδραυλική δραστηριότητα (Rajamma, 2011). Η ποζολανική δραστηριότητα της τέφρας στο τσιμέντο ενισχύει τον σχηματισμό πηγματος C-S-H μέσω της αντίδρασης του άμορφου πυριτίου που περιέχεται στην τέφρα με την ελεύθερη άββεστο από την ενυδάτωση του τσιμέντου. Πάνω σε αυτήν την βάση έχει βρεθεί πως τα υψηλά ποσοστά CaO βοηθούν περαιτέρω αυτήν την συγκεκριμένη διαδικασία αντιδρώντας με το περιεχόμενο SiO_2 της τέφρας. Ωστόσο έχει αποδειχτεί πως υψηλά ποσοστά άνθρακα οδήγησαν σε αυξημένες απαιτήσεις σε νερό του μίγματος σκυροδέματος (Hwang et al, 2011, Saraswathy and Song, 2007, Ganesan et al, 2008, Chalee et al, 2013, Horsakulthai et al, 2011, Sata et al, 2007).



Σχήμα 5. Επίδραση των υψηλών ποσοτήτων Al₂O₃ (%) [α], Fe₂O₃ [β] και CaO [γ] περιεχομένων στους συντελεστές ενεργότητας (k-values) των τερρών.

Παρά το γεγονός πως υψηλά ποσοστά αλουμίνας (και οξειδίων σιδήρου) στο τσιμέντο με τη μορφή φάσεων C₃A (3·CaO·Al₂O₃) ή C₄AF (4·CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) έχουν μικρή συνεισφορά στην ανάπτυξη της πρώιμης αντοχής, η επίδραση τους στην ικανότητα του τσιμέντου να δεσμεύει το χλώριο είναι κρίσιμη. Υψηλό περιεχόμενο σε αλουμίνα αυξάνουν το δυναμικό του τσιμέντου για παραγωγή αλάτων Friedels'. Αυτά σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της δέσμευσης χλωρίου από τα συστατικά του τσιμέντου (φάσεις C₃A, C₄A). Η διεργασία αυτή είναι ευεργετική, όσον αφορά την διαπερατότητα των χλωριόντων, αφού ο σχηματισμός των αλάτων Friedels' έχει ως αποτέλεσμα μια λιγότερη πορώδης δομή, συνεπώς οδηγεί σε μειωμένη «μεταφορά» χλωριόντων στο μίγμα σκυροδέματος.

Μια τέτοια λιγότερο πορώδης δομή παρατηρήθηκε σε ένα πλήθος τερρών βιομάζας που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη βάσει της αλλαγής στη μείωση της διαπερατότητας από «χαμηλή» σε πολύ χαμηλή κατάσταση (σύμφωνα με το ASTM C1202), όπως ήδη σχολιάστηκε. Η δοκιμή RCPT έδειξε πως το συνολικό ρεύμα που διήλθε από τα δοκίμια σκυροδέματος με τέφρα βιομάζας μειώθηκε σημαντικά έως και 90% (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3) για 20% αντικατάσταση από RHA. Σημαντικές μειώσεις επίσης παρατηρήθηκαν για άλλους τύπους τερρών βιομάζας (73.8 % για 20% ενσωμάτωση POFA και 56.8% για SCBA).

Γενικά η μεταφορά των ιόντων χλωρίου (και των επακόλουθων ηλεκτροχημικών διεργασιών) διαμέσου των ποζολανικών σκυροδεμάτων με τέφρα βιομάζας εξαρτάται από το πορώδες του σκυροδέματος, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους όσο και από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος των πόρων (Ganesan et al, 2008). Γενικά, τα λεπτά μόρια των τεφρών αναπτύσσουν μια ασυνεχή και ελικοειδή δομή σκυροδέματος και οι πόροι του σκυροδέματος καλύπτονται εξολοκλήρου από τα λεπτά μόρια. Δεδομένου ότι το συνολικό ρεύμα που διέρχεται από το σκυρόδεμα εξαρτάται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα, το χαμηλό ποσοστό άκαυστου άνθρακα σε κάποιες τέφρες βιομάζας συμβάλλει σε σημαντική μείωση του διερχόμενου ρεύματος. Γενικά η μείωση του ποσοστού άνθρακα μπορεί να είναι ευεργετική σε ότι αφορά την διείσδυση ιόντων χλωρίου. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται τέφρα φλοιού ρυζιού, η οποία έχει χαμηλή τιμή απώλεια πύρωσης σε σχέση με το τσιμέντο Portland προς μερική αντικατάσταση του τσιμέντου, η αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων βελτιώνεται σημαντικά. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε μια μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος η οποία οφείλεται στην μείωση του περιεχομένου του άκαυστου άνθρακα στην τέφρα RHA, καθώς επίσης και στην λεπτότητα της δομής των πόρων και στην αγωγιμότητα του διαλύματος των πόρων. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται περαιτέρω εάν ληφθούν υπόψη οι σημαντικές μειώσεις στο διερχόμενο φορτίο οι οποίες επιτυγχάνονται όταν αξιοποιείται η RHA με χαμηλές τιμές LOI από 1.97 έως 3.7%.

Συνολικά, βάσει των αποτελεσμάτων της διείσδυσης ιόντων χλωρίου συνίσταται η λεπτότητα πόρων λόγω της ποζολανικής αντίδρασης της πολύ λεπτής τέφρας βιομάζας και αναδεικνύεται το σημαντικό δυναμικό αυτών των τεφρών ως μεταλλικές προσμίξεις στο σκυρόδεμα, με την προϋπόθεση ότι μια κατάλληλη στρατηγική άλεσης χρησιμοποιείται και επιτυγχάνεται λεπτότητα του τελικού προϊόντος.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα τεφρών βιομάζας οι οποίες εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία, με την εκτίμηση συντελεστών ενεργότητας για τη θλιπτική αντοχή και τη διείσδυση χλωριόντων. Προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Διακυμάνσεις στις συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία καύσης, χρησιμοποιούμενη τεχνολογία) και στη πηγή της βιομάζας μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα χημικά χαρακτηριστικά των τεφρών βιομάζας, ακόμα και της ίδιας κατηγορίας.
- Υψηλό ποσοστό SiO_2 στη τέφρα βιομάζας δεν υπονοεί αυτόματα ένα αποτελεσματικό ποζολανικό υλικό με υψηλό συντελεστή απόδοσης.
- Φαίνεται πως μετά από συγκεκριμένα ποσοστά στη συγκέντρωση τέφρας σε Al_2O_3 , Fe_2O_3 και CaO , ακόμα και για υψηλό ποσοστό SiO_2 , υψηλό επίπεδο λεπτότητας και χαμηλές τιμές LOI, οι προκύπτοντες συντελεστές απόδοσης πέφτουν κάτω από 1.0.
- Οι τέφρες βιομάζας (εκτός από τις τέφρες οι οποίες σχετίζονται με το ξύλο) από μια ποικιλία αγρό-βιομηχανικών προϊόντων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αντικατάστασης τσιμέντου με ευεργετικά αποτελέσματα για την ανάπτυξη αντοχής και τη συμπεριφορά ως προς την αντίσταση έναντι διείσδυσης χλωριόντων.
- Η αξιοποίηση της τέφρας φλοιών ρυζιού μείωσε δραστικά τις τιμές Coulomb και κατά συνέπεια την αντίστοιχη διείσδυση χλωριόντων.
- Οι ιδιότητες στεγανότητας σκυροδέματος βελτιώνονται σημαντικά λόγω της λεπτότητας των πόρων στα σκυροδέματα με τέφρες βιομάζας σε σύγκριση με το σκυρόδεμα αναφοράς.

- Γενικά, η αξιοποίηση αγρό-βιομηχανικών παραπροϊόντων για παραγωγή τέφρας βιομάζας μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική πηγή μελλοντικού ποζολανικού υλικού για παραγωγή σκυροδέματος.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα προς την κατεύθυνση αξιολόγησης σε βάθος ενός μεγαλύτερου εύρους τεφρών βιομάζας για την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdullahi M. (2006). Characteristics of Wood ASH/OPC Concrete, *Leonardo Electron J Pract Technol*,8, pp 9-16.
- Antiohos SK, Papadakis VG, Chaniotakis E, Tsimas S. (2007). Improving the Performance of Ternary Blended Cements by Mixing Different Types of Fly Ashes, *Cem Concr Res*,37(6), pp 877-885.
- ASTM Standard C1202-12. (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. USA: ASTM International; DOI:10.1520/C1202-12
- ASTM Standard C618 - 12a. (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. USA: ASTM International,2012, DOI: 10.1520/C0618-12A
- Chalee W, Sasakul T, Suwanmaneechot P, Jaturapitakkul C. (2013). Utilization of rice husk–bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment, *Cem Concr Compos*, (in press)
- Chee Ban Ch, Mahyuddin R. (2012). Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. *Constr Build Mater*,30, pp 320–329.
- Chindaprasirt P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Constr Build Mat*,22, pp 932-938.
- Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, De Moraes Rego Fairbairn E. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane βαγάσσης ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cem Concr Res*,39, pp 1101-1115.
- Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, Fairbairn EMR. (2012). Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Constr Build Mater*,29, pp 641-646.
- Ecosmart Concrete. (2008). Environmental impact - Cement production and the CO₂ challenge. Canada:Ecosmart Foundation;
- Frias M, Villar-Cocin E, Valencia-Morales E. (2007). Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction, calcining temperature and kinetic parameters”, *Waste Management*,27, pp 533–538.
- Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. (2007). Evaluation of βαγάσσης ash as supplementary cementitious material”, *Cem Concr Compos*,29 (6), pp 515–524.
- Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Constr Build Mater*,22, pp 1675-1683
- Hornain H, Miersman F, Marchand J. (1992). Influence of residual carbon in fly ash on microstructure and strength development of mortars and concretes. In: *The 4th international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*, Istanbul, Turkey, 1992, pp 21–36.

- Horsakulthai V, Phiuvanna S, Kaenbud W. (2011). Investigation on the corrosion resistance of βαγάσσης-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage, *Constr Build Mater*,25, pp 54–60.
- Hwang Chao-Lung, Bui Le Anh-Tuan, Chen Chun-Tsun. (2011). Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Constr Build Mater*, 25, pp 3768–3772.
- IEA Statistics. (2011). International Energy Agency Statistics Renewables Information, Paris, France: IEA Publications.
- Llorente MJF, Garcia JEC. (2006). Concentration of elements in woody and herbaceous biomass as a function of the dry ashing temperature. *Fuel* 2006,85, pp 1273–9.
- Loo SV, Koppejan J. (2003). *Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, The Netherlands: Twente University Press.
- Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. (2012). Supplementary cementitious materials. *Cem Concr Res*,41(12), pp 1244–1256.
- Masia AAT, Buhre BJP, Gupta RP, Wall TF. (2007). Characterising ash of biomass and waste. *Fuel Process Technol* 2007,88, pp 1071–1081.
- Obernberger I, Biedermann F, Widmann W, Riedl R. (1997). Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fraction. *Biomass and Bioenergy*,12, pp 211–224.
- Papadakis VG. (1999). Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in Concrete, *Cem Concr Res*,29(1), pp 79-86.
- Papadakis VG.(1999). Effect of fly ash on Portland cement systems. Part I: Low calcium fly ash, *Cem Concr Res*,29(11), pp 1727-1736.
- Papadakis VG, Antiohos S, Tsimas S. (2002). Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part II: A Fundamental Estimation of the Efficiency Factor, *Cem Concr Res*,32(10), pp 1533-1538.
- Papadakis VG, Tsimas S. (2002). Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design, *Cem Concr Res*,32, pp1525-1532
- Papadakis VG, Demis S (2013) Predictive Model of Concrete Compressive Strength Based on Cement Strength Class, *Comput Concr*;11(6), pp 587-602.
- Rajamma R, Ball RJ, Tarelho LAC, Geoff AC, Labrincha JA, Ferreira VM. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *J Hazard Mater*,172, pp 1049–1060.
- Rajamma R. (2011). *Biomass fly ash incorporation in cement based materials*, PhD Thesis, University of Aveiro, Department of Materials and Ceramic Engineering, Portugal;
- Saraswathy V, Song HW. (2007). Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. *Const Build Mater*,21, pp 1779–1784.
- Sata V, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Constr Build Mater*,21, pp1589–1598.
- Sousa-Coutinho J, Papadakis VG (2011) Rice Husk Ash – Importance of fineness for its use as a pozzolanic and chloride-resistant material. In: Proceedings of the 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components,2011, Porto, Portugal.
- Tangchirapat W, Jaturapitakkul C, (2010). Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. *Cem Concr Compos*,32,pp 767–774.
- Tangchirapat W, Khamklai S, Jaturapitakkul C. (2012). Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates. *Mater Des*,41,150–157.
- Thy P, Jenkins BM, Grundvig S, Shiraki R, Leshner CE. (2006). High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. *Fuel*, 85,pp783–95.

- Von Bergs W, Feuerborn HJ. (2005). Present Situation and Perspectives of CCP Management in Europe. In: Proceedings of 2005 World of Coal Ash, April 11-15, USA:ECOBA (European Coal Combustion Products Association);
- Wang S, Baxter L. (2007). Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Process Technol*,88(11):pp 1165-1170.
- Wang S, Miller A, Llamazos E, Fonseca F, Baxter L. (2008). Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*,87:pp 365–371.
- Yin C, Rosendahl LA, Kaer SK. (2008). Grate-firing of biomass for heat and power Production”, *Prog Energy Combust Sci*,34:pp 725–754.

Αξιοποίηση ασβεστούχου ιπτάμενης τέφρας στην παρασκευή ποζολανικών τσιμεντών ανθεκτικών σε θειικά

Β. Κορομηλάς¹, Ε. Μπαδογιάννης¹, Σ. Αντίοχος², Ε. Χανιωτάκης², Σ. Τσιβιλής³

¹Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα

²Τμήμα Έρευνας και Ανάπτυξης Προϊόντων, Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΤΙΤΑΝ, Εργοστάσιο Καμαρίου, 19200 Ελευσίνα.

³Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα.

Λέξεις κλειδιά: τσιμέντα ανθεκτικά σε επίθεση θειικών (SR), ποζολανικά τσιμέντα, ποζολανικότητα, ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα, επίθεση θειικών, διόγκωση, ανθεκτικότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 επιτρέπει τη χρήση μόνο πυριτικής ιπτάμενης τέφρας (V) για τη σύνθεση τσιμεντών ανθεκτικών σε επίθεση θειικών (τύπου SR). Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας ένταξης ποζολανικών τσιμεντών (CEM IV/A) που περιέχουν Ελληνική ασβεστούχο ιπτάμενη τέφρα (W), στην κατηγορία των τσιμεντών τύπου SR. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν έξι (6) εργαστηριακά ποζολανικά τσιμέντα, με αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ με ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης (W₁) και Πτολεμαΐδας (W₂), φυσική ποζολάνη (P) και ασβεστόλιθο (L), σε συνολικό ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ έως και 35%. Τρία (3) τσιμέντα χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά σύγκρισης: ένα τσιμέντο τύπου I, ανθεκτικό σε θειικά (CEM I-SR-5), ένα τσιμέντο τύπου CEM IV/A-SR με αντικατάσταση κλίνκερ από φυσική ποζολάνη σε ποσοστό 30% και ένα σκωριοτσιμέντο τύπου CEM III/A, το οποίο αν και κανονιστικά δεν είναι, μπορεί να θεωρηθεί ως τσιμέντο SR. Αρχικά εξετάστηκε αν τα παρασκευασθέντα τσιμέντα ικανοποιούν τις μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1. Στη συνέχεια μελετήθηκε η ανθεκτικότητα των τσιμεντών στα θειικά σύμφωνα με το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C 1012. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες, υψηλής περιεκτικότητας σε CaO, μπορούν να υποκαταστήσουν το κλίνκερ για την παρασκευή ποζολανικών τσιμεντών ανθεκτικών σε περιβάλλον θειικών, συντελώντας κατά αυτό τον τρόπο τόσο στην περιβαλλοντική ελάφρυνση, όσο και στην παρασκευή τσιμεντών με βελτιωμένες ιδιότητες.

Exploitation of calcareous fly ash in the production of sulfate resisting pozzolanic cements

V. Koromilas¹, E. Badogiannis¹, S. Antiohos², E. Chaniotakis², S. Tsivilis³

¹ Reinforced Concrete Laboratory, School of Civil Engineering NTUA, 5 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

² Group R&D and Quality Department, Titan Cement Company S.A., Kamari Plant, Elefsina, Greece.

³ Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineering NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

Key words: sulfate resisting cements (SR), pozzolanic cements, pozzolanicity, calcareous fly ash, sulfate attack, expansion, durability

ABSTRACT : According to EN1971 -1, siliceous fly ash only allowed to be used for the production of sulfate resisting cements (SR type). The subject of the current study is the experimental investigation on the potential use of Greek calcareous fly ash (W) for the production of pozzolanic cements (CEM IV/A) and their classification in sulfate resisting type cements (SR). For this purpose six (6) pozzolanic cements were produced, in which klinker was replaced with fly ash from Megalopolis (W_1) or from Ptolemaida (W_2), natural pozzolan (P) and limestone (L), at levels up to 35%. Three (3) cements were used as a reference: a type I sulfate resisting cement (CEM I-SR-5), a pozzolanic cement CEM IV/A-SR in which klinker was replaced by 30 % from natural pozzolana and a slag cement of type CEM III/A, which it could be considered, although it is not classified, as a SR type cement. Initially, it was examined whether the produced cements fulfill the mechanical, physical and chemical requirements of EN 197-1. Next, the sulfate resisting of these cements was evaluated, according to ASTM C 1012. The results indicate that Greek fly ashes of high CaO content, can replace the klinker in order to produce pozzolanic sulfate resisting cements, contributing to the environmental relief, as well as to the production of cements with improved properties.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δράση των θειϊκών είναι από τις πιο επιθετικές περιβαλλοντικές δράσεις οι οποίες επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα. Κατασκευές όπως προβλήτες, γέφυρες, θεμέλια και αγωγοί από σκυρόδεμα, καθόλη τη διάρκεια της ζωής τους εκτίθενται στην προσβολή θειϊκών. Η δράση θειϊκών στο σκυρόδεμα συμβαίνει όταν το σκυρόδεμα είναι σε επαφή με πηγή θειϊκών ιόντων, όπως τα υπόγεια ύδατα, το έδαφος ή το νερό της βροχής. Η επίδραση των θειϊκών ιόντων εκδηλώνεται με διόγκωση και ρηγμάτωση του σκυροδέματος, συνοδευόμενη από θρυμματισμό και εν τέλει απώλεια αντοχής (Menéndez et al, 2013).

Η προσβολή του τσιμέντου και του σκυροδέματος από τα θειϊκά ιόντα, μπορεί να οφείλεται στην εξωτερική δράση θειϊκών ιόντων του περιβάλλοντος. Μπορεί επίσης να εμφανιστεί εσωτερικά από το μηχανισμό του μεθύτερου σχηματισμού ετρινγκίτη (Delayed Ettringite Formation-DEF). Η αυξημένη συγκέντρωση θειϊκών ιόντων στο εξωτερικό περιβάλλον, μπορεί να συμβαίνει είτε φυσιολογικά (θαλάσσιο περιβάλλον, έδαφος) είτε ως συνέπεια κάποιας διαταραχής (περιβαλλοντική μόλυνση). Η αυξημένη συγκέντρωση θειϊκών ιόντων στο εσωτερικό του σκυροδέματος μπορεί να συμβεί λόγω των συστατικών του (Mehta et al, 2006).

Δύο παράγοντες θεωρούνται ως οι σημαντικότεροι οι οποίοι καθορίζουν την αντίσταση του σκυροδέματος στη δράση των θειϊκών: η χημική σύσταση του τσιμέντου και η διαπερατότητα του σκυροδέματος. Ειδικότερα, έχει αναγνωριστεί ότι ο έλεγχος της σύνθεσης του τσιμέντου και συγκεκριμένα της περιεκτικότητάς του σε αργιλικό τριασβέστιο (C_3A), καθορίζει την αντίσταση του στην προσβολή θειϊκών (Menéndez et al, 2013). Για παράδειγμα, παρόλο που και στα σύνθετα ποζολανικά τσιμέντα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη ή σκωρία, σχηματίζονται μονοθειϊκά ενυδατωμένα άλατα, δεν διατίθεται αρκετό Al_2O_3 για τον περαιτέρω μετασχηματισμό τους σε διογκούμενες φάσεις. Σε αυτά τα τσιμέντα, το Al_2O_3 δεσμεύεται σε προϊόντα ενυδάτωσης όπως ο υδροταλκίτης ή υδρογρανάτης και έτσι δεν υπάρχει δυνατότητα υποκατάστασης Ca^{2+} από τη δομή του C-S-H, προς το σχηματισμό μονοθειϊκών αλάτων. Επιπλέον, λόγω των ποζολανικών αντιδράσεων, η διαθεσιμότητα του $Ca(OH)_2$ είναι περιορισμένη και έτσι δεν είναι εφικτός ο εκ νέου σχηματισμός γύψου, που θα αντιδράσει με τα μονοθειϊκά για σχηματισμό δευτερογενούς ετρινγκίτη (Gollor et al 1996).

Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 (Πιν. 2), εκτός από τα τσιμέντα με χαμηλό ποσοστό C_3A , και τα σκωριοτσιμέντα, προδιαγράφει ως τσιμέντα ανθεκτικά σε θειϊκά (SR) και τα ποζολανικά τσιμέντα, τα οποία μπορούν να περιέχουν μεταξύ άλλων και ιπτάμενη τέφρα. Ωστόσο, για την παρασκευή τους προβλέπεται η χρήση πυριτικής ιπτάμενης τέφρας (siliceous fly ash) και όχι ασβεστούχου (calcareous fly ash).

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ένταξης ποζολανικών τσιμέντων με Ελληνική ιπτάμενη τέφρα ασβεστούχου σύστασης στην κατηγορία των τσιμέντων τύπου SR. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν εργαστηριακά έξι (6) διαφορετικές συνθέσεις ποζολανικών τσιμέντων με ανάμιξη συγκεκριμένης αναλογίας πρώτων υλών έτσι ώστε οι συνθέσεις να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου για τα ποζολανικά τσιμέντα (CEM IV) ανθεκτικά σε θειϊκά. Μελετήθηκαν οι φυσικές (αρχικός χρόνος πήξης) και οι μηχανικές (θλιπτική αντοχή 7, 28 ημερών) ιδιότητες. Τέλος μελετήθηκε η αντίσταση των τσιμέντων στο περιβάλλον θειϊκών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1012. Για σύγκριση, χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) τσιμέντα αναφοράς, δυο από τα οποία παρασκευάστηκαν εργαστηριακά και εντάσσονται στην κατηγορία των τσιμέντων τύπου SR, ενώ το τρίτο αποτελεί εμπορικό σκωριοτσιμέντο τύπου CEM III/A.

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Για την παρασκευή των ποζολανικών τσιμέντων χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι κλίνκερ (K_1 , K_2), φυσική ποζολάνη (P), ασβεστόλιθος (L), γύψος (G) καθώς και δύο ιπτάμενες τέφρες W_1 και W_2 , διαφορετικής χημικής σύστασης. Στον Πίνακα 1, δίνονται οι χημικές αναλύσεις όλων των πρώτων υλών, ενώ στον Πίνακα 2, η ορυκτολογική ανάλυση του κλίνκερ.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση (%) κ.β. πρώτων υλών

	Κλίνκερ (K_1)	Κλίνκερ (K_2)	Ασβ/θος(L)	Γύψος (G)	Ι.Τ. (W_1)	Ι.Τ. (W_2)	Ποζολάνη (P)
SiO₂	20.55	21.22	8.21	1.00	47.98	31.08	74.86
Al₂O₃	4.85	4.43	0.83	1.00	17.08	12.88	11.19
Fe₂O₃	3.73	4.68	0.52	0.01	8.57	4.97	1.29
CaO	64.79	65.12	49.77	32.55	13.34	33.15	1.79
MgO	3.51	1.19	0.47	1.00	2.68	4.45	0.21
K₂O	0.57	0.89	0.17	0.00	1.72	0.87	3.99
Na₂O	0.12	0.18	0.01	0.00	0.57	0.37	2.49
TiO₂	0.25	0.21	0.03	-	0.81	0.57	-
SO₃	1.28	0.92	0.09	44.00	2.21	6.82	0.10
Cl	0.03	0.04	0.00	-	-	-	-
LOI	0.33	1.04	39.50	21.00	1.88	2.98	4.08

Πίνακας 2. Ορυκτολογική σύσταση (%) κ.β. και δείκτες των δύο κλίνκερ

	Κλίνκερ (K_1)	Κλίνκερ (K_2)
C₃S	70.13	68.13
C₂S	6.40	10.04
C₃A	6.58	3.88
C₄AF	11.43	14.36
LSF	0.99	0.96
S_M	2.40	2.30
A_M	1.30	0.95

Ο συνολικός αριθμός των τσιμέντων που μελετώνται είναι εννέα (9) εκ των οποίων τα οκτώ (8) παρασκευάστηκαν εργαστηριακά. Στον Πίνακα 3 δίνονται οι συνθέσεις των οκτώ (8) τσιμέντων που παρασκευάστηκαν εργαστηριακά καθώς και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή τους. Οι αναλογίες των πρώτων υλών επιλέχθηκαν κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του EN 197-1, που αφορούν στα τσιμέντα ανθεκτικά σε περιβάλλον θειικών, τύπου SR.

Έτσι, παρασκευάστηκαν ένα αμιγές τσιμέντο Πόρτλαντ με κλίνκερ (K_2) χαμηλής περιεκτικότητας σε αργιλικό τριασβέστιο (3.88%). Επίσης παρασκευάστηκε ποζολανικό τσιμέντο (CEM IV/A P-30), που περιέχει φυσική ποζολάνη σε υψηλό ποσοστό (30%). Τα δύο (2) αυτά τσιμέντα, χρησιμοποιούνται ως τσιμέντα αναφοράς, καθώς ικανοποιούν τις σχετικές απαιτήσεις του προτύπου EN 197-1 και μπορούν να θεωρηθούν ως τσιμέντα τύπου SR, CEM I-SR-5 και CEM IV/A-SR, αντίστοιχα. Επιπλέον, ως τσιμέντο αναφοράς χρησιμοποιείται και ένα έτοιμο εμπορικό σκωριοτσιμέντο τύπου CEM III/A το οποίο αν και κανονιστικά δεν είναι, μπορεί να θεωρηθεί ως τσιμέντο SR. Τέλος παρασκευάστηκαν έξι (6) ποζολανικά τσιμέντα με ιπτάμενη τέφρα τα οποία κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες με βάση το είδος της Ι.Τ.. Για κάθε ομάδα, χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 30%, 20% και 10%. Το ποσοστό του ασβεστόλιθου διατηρήθηκε και για τις έξι εργαστηριακές συνθέσεις σταθερό στο 5%, ενώ τα ποσοστά της γύψου (G) και της φυσικής ποζολάνης (P) υπολογίστηκαν έτσι ώστε το άθροισμα όλων των θειικών να μην υπερβαίνει το 3.50%.

Πίνακας 3. Κωδικοποίηση και αναλογίες (% κ.β.) α' υλών των εργαστηριακών συνθέσεων

a/a	Κωδικός τσιμέντου	K ₁	K ₂	G	P	W ₁	W ₂	L
1	CEM I	-	91.00	4.50	-	-	-	4.50
2	CEM IV/A P-30	62.10	-	4.50	28.40	-	-	5.00
3	CEM IV/A W ₁ -30	63.00	-	3.10	-	28.90	-	5.00
4	CEM IV/A W ₁ -20	62.70	-	3.60	9.50	19.20	-	5.00
5	CEM IV/A W ₁ -10	62.40	-	4.00	19.10	9.50	-	5.00
6	CEM IV/A W ₂ -30	65.00	-	-	-	-	30.00	5.00
7	CEM IV/A W ₂ -20	64.10	-	1.40	9.50	-	20.00	5.00
8	CEM IV/A W ₂ -10	63.10	-	2.90	19.00	-	10.00	5.00

Η λεπτότητα και το ειδικό βάρος των τσιμέντων των εργαστηριακών συνθέσεων προσδιορίστηκε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196-6. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Ειδική επιφάνεια και ειδικό βάρος τσιμέντων εργαστηριακών συνθέσεων

a/a	Κωδικός τσιμέντου	Ειδική επιφάνεια (cm ² /g)	Ειδικό βάρος
1	CEM I	3000	3.18
2	CEM IV/A P-30	4000	2.96
3	CEM IV/A W ₁ -30	4710	2.98
4	CEM IV/A W ₁ -20	4180	2.96
5	CEM IV/A W ₁ -10	4090	2.94
6	CEM IV/A W ₂ -30	5940	3.09
7	CEM IV/A W ₂ -20	5490	2.98
8	CEM IV/A W ₂ -10	4775	2.91

Η δοκιμή ποζολανικότητας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196-5, όπου συγκρίθηκε η συγκέντρωση του CaO υδατικού διαλύματος ενυδατωμένου τσιμέντου οκτώ (8) ημερών, με την ικανή συγκέντρωση κορεσμού διαλύματος CaO ίσης αλκαλικότητας.

Για κάθε ένα από τα υπό μελέτη τσιμέντα προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή 1, 2, 7, 28 ημερών, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196-1. Σκοπός της δοκιμής ήταν, εκτός από τον χαρακτηρισμό της αντοχής των τσιμέντων, να εξεταστεί κατά πόσο τα παρασκευασθέντα τσιμέντα, ικανοποιούν τις απαιτήσεις του EN 197, αναφορικά με τη θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών της κατηγορίας που εντάσσονται τα τσιμέντα (32.5 N). Σύμφωνα με το πρότυπο, τα υπό μελέτη τσιμέντα πρέπει να έχουν θλιπτική αντοχή επτά (7) ημερών ≥ 16 MPa και είκοσι οκτώ (28) ημερών ≥ 32.5 MPa.

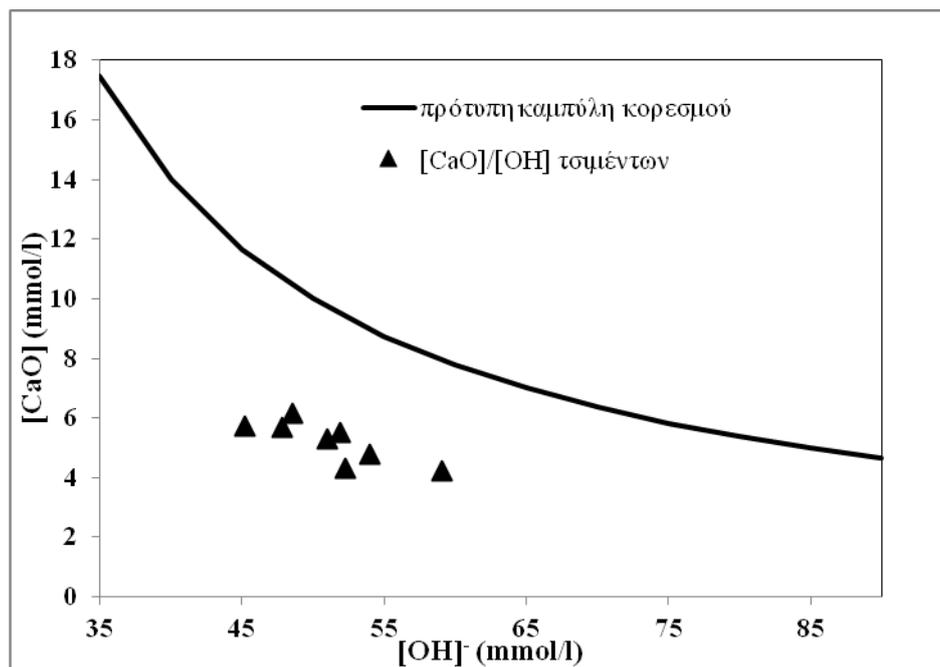
Ο προσδιορισμός του χρόνου αρχής και τέλους πήξης καθώς και της συνεκτικότητας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196-3 προκειμένου να διαπιστωθεί η συμμόρφωση των τσιμέντων στις απαιτήσεις του EN 197-1 για τα τσιμέντα κατηγορίας αντοχής 32.5 N και συγκεκριμένα, η απαίτηση για αρχικό χρόνο πήξης ≥ 75 min.

Η ανθεκτικότητα των τσιμέντων στο περιβάλλον θειικών μελετήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1012. Για κάθε τσιμέντο κατασκευάστηκαν τέσσερα επιμήκη πρίσματα ορθογωνικής διατομής, διαστάσεων 25×25×285 (mm). Η σύνθεση των πρισμάτων πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο ASTM C 305. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρασκευής του κονιάματος για κάθε σύνθεση, τα δοκίμια σε μήτρες τοποθετήθηκαν στο θάλαμο συντήρησης για 24h. Στη συνέχεια ξεκαλουπώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή νερού σε θερμοκρασία 23±2 °C, όπου μετά από την απαραίτητη σύμφωνα με το πρότυπο ωρίμανση, εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θειϊκού νατρίου Na₂SO₄ συγκέντρωσης 50 g/L.

Μετρήσεις μεταβολής του μήκους των πρισμάτων πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 490, πριν την εμφάνιση μετά το πέρας της 1ης, 2ης, 3ης, 4ης, 8ης, 13ης, 15^{ης}, 20^{ης} και 30^{ης} εβδομάδας από τη στιγμή που τα πρίσματα εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θειϊκού νατρίου.

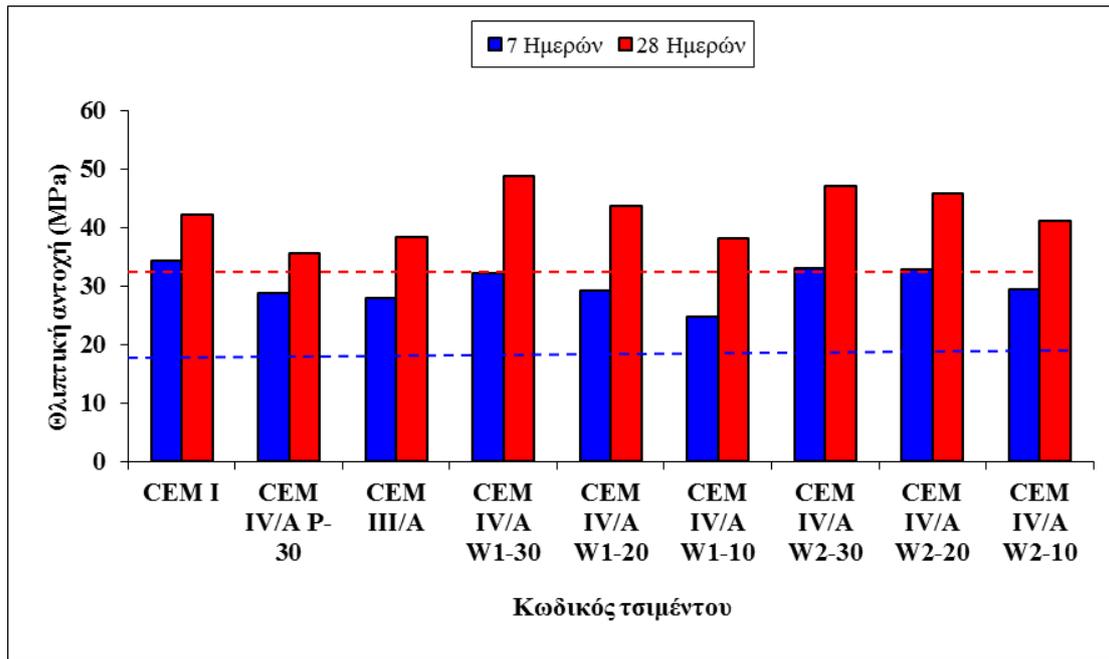
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όλα τα τσιμέντα ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ποζολανικής δοκιμής, καθώς η συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου του διαλύματος είναι χαμηλότερη από τη συγκέντρωση κορεσμού, όπως αυτό αναπαρίσταται διαγραμματικά στο Σχήμα 1.



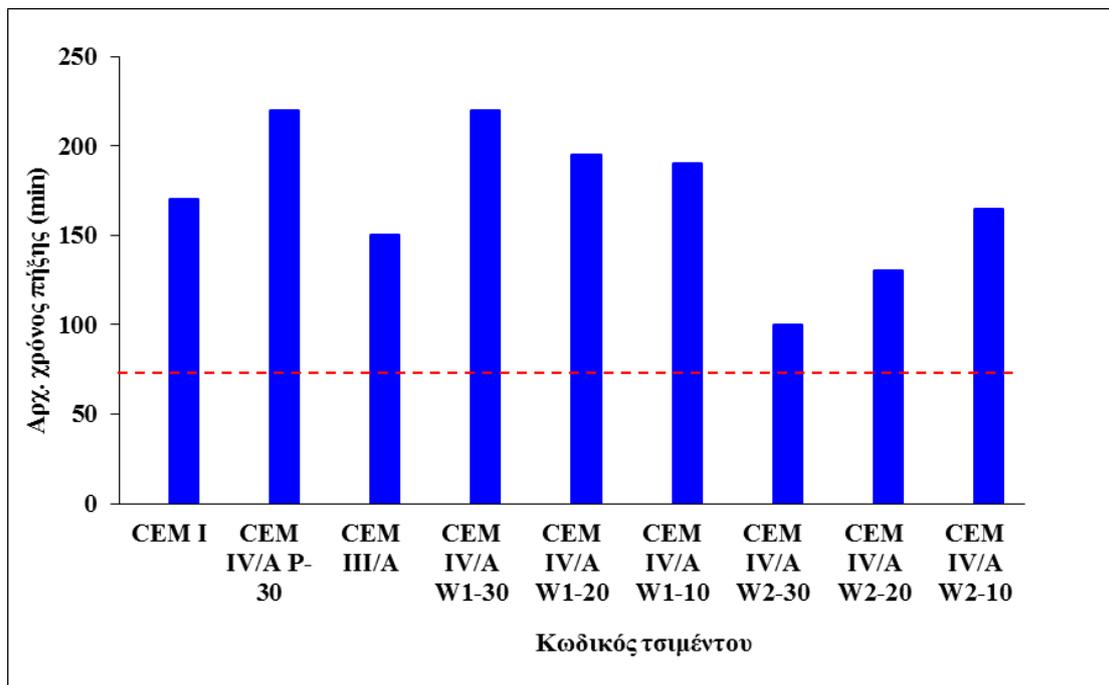
Σχήμα 1. Αποτελέσματα δοκιμής ποζολανικότητας υδατικού διαλύματος ενυδατωμένων τσιμεντών, στις οκτώ (8) ημέρες

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη, δείχνουν ότι οι απαιτήσεις σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή, επίσης ικανοποιούνται. Όλα τα τσιμέντα αναπτύσσουν αντοχή 7 και 28 ημερών μεγαλύτερη από 16 και 32.5 MPa αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



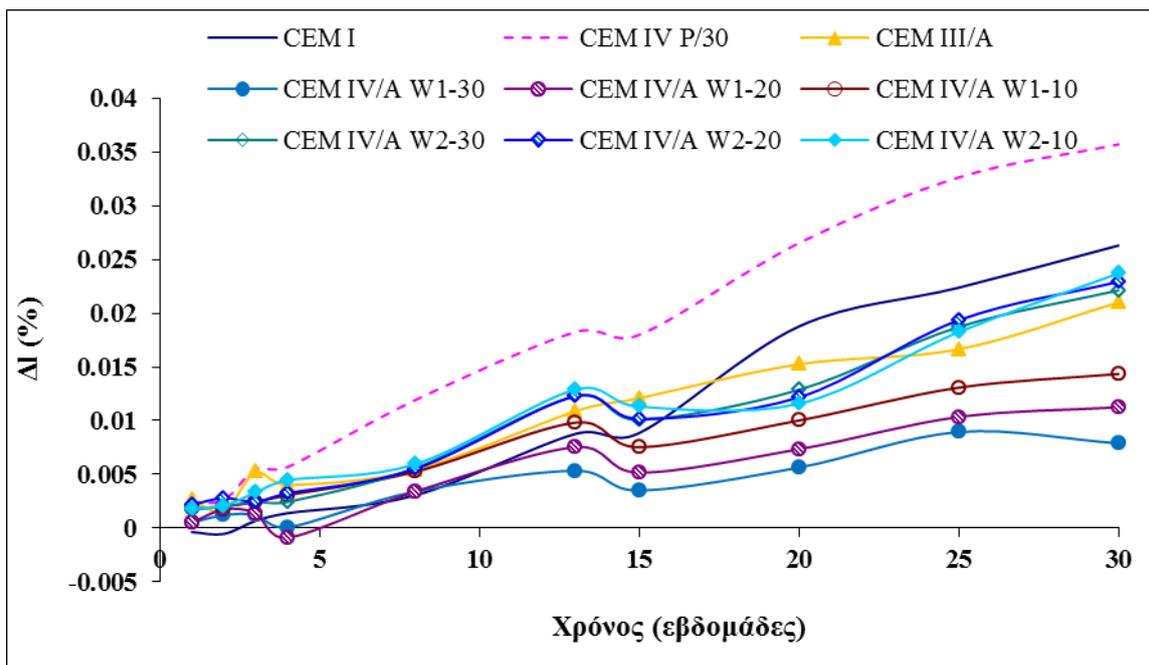
Σχήμα 2. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών και ελάχιστα απαιτούμενα όρια θλιπτικής αντοχής (μπλε και κόκκινη γραμμή), αντίστοιχα

Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, τα εννέα (9) τσιμέντα πληρούν την απαίτηση για τον αρχικό χρόνο πήξης, αφού η έναρξή της προσδιορίζεται σε τιμές μεγαλύτερες από 75 min.



Σχήμα 3. Χρόνοι αρχής πήξης των τσιμέντων σε σχέση με το απαιτούμενο όριο (κόκκινη γραμμή) του EN 197-1

Στο Σχήμα 4 εμφανίζεται για κάθε σύνθεση, ο μέσος όρος της ποσοστιαίας μεταβολής μήκους για κάθε πλήθος (6) πρισμάτων, στο χρόνο (εβδομάδες). Παρά τις όποιες διακυμάνσεις, καταγράφεται μια σαφώς αυξητική τάση στη μεταβολή του μήκους των δοκιμίων. Συνεπώς σταδιακά με την πάροδο του χρόνου τα πρίσματα επιμηκύνονται, φαινόμενο που μπορεί να αποδοθεί στο αναμενόμενο σχηματισμό δευτερογενούς ετρινγκίτη.



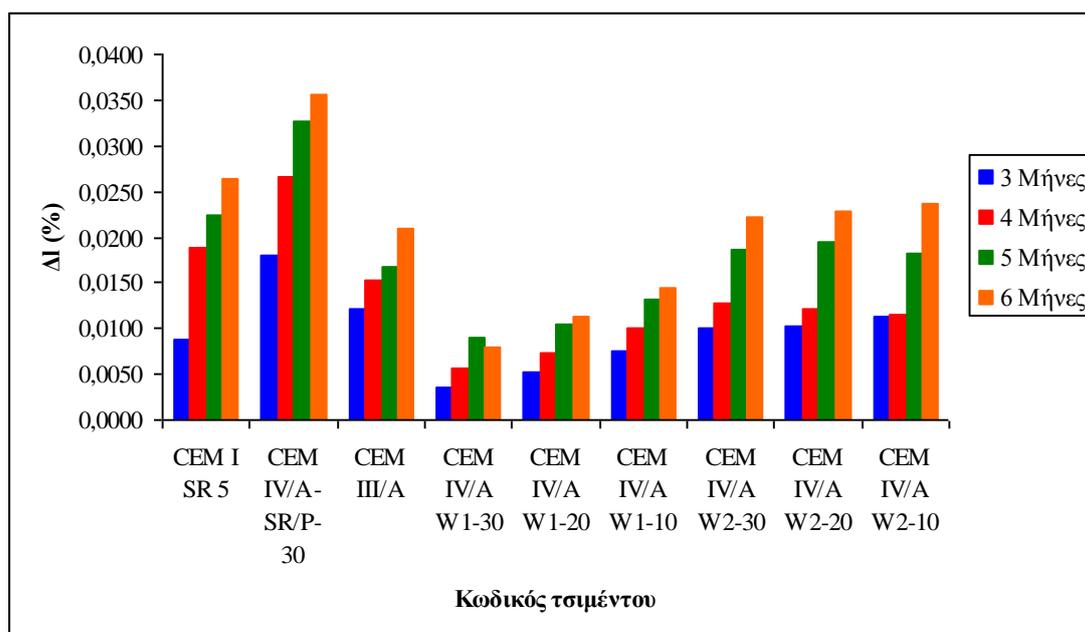
Σχήμα 4. Μέσος όρος μεταβολών μήκους έξι (6) πρισμάτων ανά σύνθεση τσιμέντου, στο χρόνο (εβδομάδες)

Από το Σχήμα 5, όπου αποδίδεται διαγραμματικά για κάθε σύνθεση η ποσοστιαία αύξηση του μήκους, στο χρόνο (μήνες), γίνεται σαφής η διαφορετική συμπεριφορά των τσιμέντων ανάλογα με τη σύστασή τους. Σημαντική διαφοροποίηση παρατηρείται για τα ποζολανικά τσιμέντα με I.T. W_1 , στα οποία καταγράφεται η μικρότερη αύξηση μήκους σε σχέση με όλα τα τσιμέντα. Αύξηση της επιμήκυνσης των πρισματικών δοκιμίων επίσης καταγράφεται, όσο αυξάνεται το ποσοστό της φυσικής ποζολάνης εις βάρος του ποσοστού της I.T. W_1 .

Τα ποζολανικά τσιμέντα με ιπτάμενη τέφρα W_2 επίσης φαίνεται να έχουν καλύτερη αντίσταση στο περιβάλλον θειικών σε σχέση με τα τσιμέντα αναφοράς CEM I και CEM IV/A P-30. Μάλιστα η προσθήκη I.T. W_2 δείχνει να επιδρά θετικά μετά τους τέσσερις (4) μήνες. Τέλος και για την I.T. W_2 παρατηρείται ότι η θετική της δράση μειώνεται όσο αυξάνεται εις βάρος της, το ποσοστό της φυσικής ποζολάνης.

Τέλος από τα τσιμέντα αναφοράς, την καλύτερη συμπεριφορά φαίνεται να έχουν τα τσιμέντα τύπου CEM III/A, παρά το γεγονός ότι κανονιστικά δεν εντάσσονται στα τσιμέντα τύπου SR. Το ποζολανικό τσιμέντο CEM IV/A P-30, παρόλο που πληροί τις απαιτήσεις ενός τσιμέντου CEM IV/A-SR, δεν εμφάνισε ικανοποιητική συμπεριφορά, συγκριτικά με τα υπόλοιπα.

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να επισημανθεί ότι κανένα από τα τσιμέντα δεν εμφάνισε ποσοστιαία αύξηση μήκους μεγαλύτερη από 0.100 %, μεταβολή που τίθεται σαν όριο αστοχίας κατά το πρότυπο ASTM C 1012.



Σχήμα 5. Μέσος όρος μεταβολών μήκους μετά τους 3 μήνες έκθεσης, ανά τσιμέντο.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία είναι τα εξής:

- Με την προτεινόμενη σύνθεσή τους, τα ποζολανικά τσιμέντα είναι δυνατόν να ενταχθούν στα τσιμέντα SR, διότι ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου ως προς τη θλιπτική αντοχή, τον αρχικό χρόνο πήξης, το τεστ ποζολανικότητας
- Αποδεικνύεται ικανοποιητική η αντίσταση των ποζολανικών τσιμέντων έναντι της προσβολής θειικών. Συγκεκριμένα, στα αποτελέσματα των έξι (6) μηνών παρουσιάζεται αύξηση μήκους έως και 0.025% η οποία είναι πολύ μικρότερη από το 0.100% που θέτει ως όριο το σχετικό πρότυπο.
- Παρατηρείται ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας βελτιώνει την αντίσταση έναντι θειικών. Ανεξαρτήτως του είδους της χρησιμοποιούμενης τέφρας (W_1 ή W_2), τα ποζολανικά τσιμέντα με I.T. παρουσιάζουν διόγκωση πολύ μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες εργαστηριακές συνθέσεις οι οποίες δεν περιέχουν ιπτάμενη τέφρα
- Αναφορικά με τις δύο χρησιμοποιούμενες ιπτάμενες τέφρες, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών τσιμέντων έδειξαν ότι η ιπτάμενη τέφρα W_1 έχει πιο ευεργετική δράση σε σύγκριση με την ιπτάμενη τέφρα W_2

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς οφείλουν να ευχαριστήσουν τον κ. Αγαθή Αθανάσιο, για την πολύτιμη συνδρομή του στην παρασκευή και το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των εργαστηριακών τσιμέντων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM C1012-04 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
 ASTM C109/C109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)

ASTM C305-99 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
ASTM C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete
ASTM C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements
EN 197-1, «Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα», 2000
EN 196 Part-1 Determination of Strength
EN 196 Part-2 Chemical Analysis of Cement
EN 196 Part-3 Determination of Setting Time and Soundness
EN 196 Part-5 Pozzolanicity Test for Pozzolanic Cements
EN 196 Part-6 Determination of Fineness
EN 450 Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria
Gollop, R.S., Taylor, H.F.W. (1996). Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack IV. Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement Concrete Research*, Vol. 26, No. 7, pp 1013–1028.
Mehta, P.K., Monteiro, P.J. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. (3rd Edition), New York, The McGraw - Hill Companies, pp 159-162
Menéndez, E., Matschei, T., Glasser F.P., (2013). Sulfate Attack of Concrete, *Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments*, Edited by Alexander, M. Bertron, A., De Belie, N., RILEM State-of-the-Art Reports 10, 2013, pp 7-74.

Σύνθεση γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας για χρήση σε πολυλειτουργικά πάνελ προσόψεων

Δ. Κιούπης, Σ. Τσιβιλής, Γ. Κακάλη

Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773 Ζωγράφου Αθήνα.

Λέξεις κλειδιά: γεωπολυμερή, ιπτάμενη τέφρα, διογκωμένη πολυστερίνη, PCMs, αντοχές, θερμικές ιδιότητες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα ανόργανα πολυμερή ή γεωπολυμερή αποτελούν μια νέα κατηγορία δομικών υλικών τα οποία παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες, συγκρινόμενα με τα συμβατικά δομικά υλικά, όπως ταχεία ανάπτυξη αντοχών και ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η διεργασία του γεωπολυμερισμού περιλαμβάνει την αντίδραση μιας αργιλοπυριτικής πρώτης ύλης και ενός πυριτικού διαλύματος σε αλκαλικό περιβάλλον και την ωρίμανση του μίγματος σε θερμοκρασία 60-80°C. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η σύνθεση γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης. Αρχικά έγινε αριστοποίηση των παραμέτρων σύνθεσης με κριτήριο την αντοχή σε θλίψη των τελικών προϊόντων. Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν ελαφροβαρή γεωπολυμερή με προσθήκη διογκωμένης πολυστερίνης (σφαιρίδια) και μετρήθηκαν οι αντοχές σε θλίψη και κάμψη, η υδατοαπορροφητικότητα, η απορρόφηση υγρασίας σε περιβάλλον εργαστηρίου και η θερμική αγωγιμότητα. Τέλος εξετάστηκε η ενσωμάτωση και η λειτουργικότητα υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε δοκίμια γεωπολυμερών. Με τη χρήση διογκωμένης πολυστερίνης παρασκευάστηκαν γεωπολυμερή με πυκνότητα που κυμαίνεται από 0.97 έως 1.57 g/cm³ και αντίστοιχη θλιπτική αντοχή από 8 έως 29 MPa. Η ενσωμάτωση των PCMs στα γεωπολυμερή δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητά τους και επομένως τα γεωπολυμερή μπορούν να βρουν εφαρμογή στην παραγωγή δομικών στοιχείων με αναβαθμισμένη ενεργειακή συμπεριφορά και να χρησιμοποιηθούν σε πολυλειτουργικά πάνελ προσόψεων.

Fly ash based geopolymers for multifunctional retrofitting panels

D. Kioupis, S. Tsvivilis, G. Kakali

Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

Key words: geopolymers, fly ash, expanded polystyrene, PCMs, strength, thermal properties

ABSTRACT: Geopolymers have been extensively investigated in recent years due to their improved mechanical properties and resistance in corrosive environment. Geopolymerization involves the reaction of an aluminosilicate mineral and a silicate solution in a highly alkaline environment. The subject of this paper is the synthesis of fly ash based geopolymers. The synthesis parameters were optimized on the basis of compressive strength and expanded polystyrene (spheres) was used for the preparation of lightweight specimens. The incorporation of phase changing materials (PCMs) in geopolymer matrix was also tested. Lightweight geopolymers with density in the range 0.97-1.57 g/cm³ and compressive strength 8-29 MPa were prepared. The functionality of PCMs was not affected by the geopolymer, indicating that geopolymers can be used for the development of energy storage structural elements and multifunctional retrofitting panels.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωπολυμερική σύνθεση περιλαμβάνει την χημική αντίδραση ανάμεσα σε ένα αργιλοπυριτικό υλικό και ένα διάλυμα που περιέχει Si, σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον. Θεωρητικά, κάθε άμορφη αργιλοπυριτική πρώτη ύλη μπορεί να υποστεί γεωπολυμερισμό κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Σε προγενέστερες μελέτες έχει αναφερθεί η σύνθεση γεωπολυμερών από φυσικά ή θερμικά κατεργασμένα ορυκτά, βιομηχανικά παραπροϊόντα ή συνδυασμό αυτών (Kani κ.α, 2012, Kumar κ.α, 2010, Fernandez-Jimenez κ.α, 2005). Παράγοντες όπως οι συνθήκες παρασκευής και η σύσταση των πρώτων υλών επηρεάζουν σημαντικά την δομή και τις ιδιότητες των παραγόμενων γεωπολυμερών. Πέραν της φύσης και της σύστασης των πρώτων υλών, η περιεκτικότητα σε διαλυτό Si, το είδος του αλκαλίου και η αλκαλικότητα του διαλύματος ενεργοποίησης διαδραματίζουν, επίσης, σημαντικό ρόλο στην επιτυχή σύνθεση των γεωπολυμερών (Panagiotopoulou κ.α, 2009, Komnitsas κ.α, 2009, Rowles κ.α, 2003). Ανάλογα με την επιλογή της πρώτης ύλης και των συνθηκών σύνθεσης, τα παραγόμενα γεωπολυμερή αποκτούν μια μεγάλη γκάμα ιδιοτήτων όπως υψηλές θλιπτικές αντοχές, χαμηλές τιμές συρρίκνωσης, αντίσταση σε προσβολή από οξέα ή φωτιά καθώς και χαμηλές τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των γεωπολυμερών είναι η αξιοποίηση αποβλήτων ή παραπροϊόντων ως πρώτων υλών, η χαμηλή ενεργειακή απαίτηση και οι σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγική διαδικασία. Όμως, το σημαντικότερο πλεονέκτημα των γεωπολυμερών είναι ότι αποτελούν υλικά, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν, εύκολα, στις ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών. Αυτή η «προσαρμοστικότητα» των γεωπολυμερών είναι πολύ σημαντική όταν απαιτούνται προϊόντα με εξειδικευμένες ιδιότητες.

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί βιομηχανικό παραπροϊόν της καύσης του λιγνίτη σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η απόθεση της οδηγεί σε σημαντική ρύπανση του περιβάλλοντος. Εκτιμάται ότι 9500000 t ιπτάμενης τέφρας παράγονται κάθε χρόνο στην Ελλάδα και μόνο το 10% αξιοποιείται στην τεχνολογία τσιμέντου ή σκυροδέματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις οδηγίες της Ε.Ε., είναι σημαντικό να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες εκμετάλλευσης και ανακύκλωσης της ιπτάμενης τέφρας προς παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας.

Τα ελαφροβαρή γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία τα οποία διαθέτουν βελτιωμένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες. Η παρασκευή ελαφροβαρών γεωπολυμερών μπορεί να πραγματοποιηθεί με εισαγωγή διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) εντός της γεωπολυμερικής μήτρας. Το EPS αποτελεί υλικό με πολύ χαμηλές τιμές ειδικού βάρους (της τάξης των 0.016-0.064) με αποτέλεσμα η διάλυση του εντός του γεωπολυμερικού πολτού να οδηγεί σε προϊόντα με μειωμένες τιμές πυκνότητας. Βέβαια, αν και η εισαγωγή EPS στα γεωπολυμερή ευνοεί τις τιμές πυκνότητας των παραγόμενων προϊόντων, ταυτόχρονα, μειώνει δραστικά τις τιμές θλιπτικών αντοχών. Έτσι, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι πρέπει να υπάρχει ένα ανώτατο όριο προσθήκης EPS, ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός συνδυασμός ιδιοτήτων.

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) αποτελούν υλικά τα οποία μπορούν να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης στη μοριακή τους δομή. Τα PCMs, που αποτελούνται συνήθως από ανόργανα άλατα και παραφίνες, αυξάνουν την θερμική αποθήκευση των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής με αποτέλεσμα να την αναβαθμίζουν ενεργειακά.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εκμετάλλευση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας ως πρώτης ύλης για την παρασκευή γεωπολυμερικών δομικών στοιχείων με αναβαθμισμένη ενεργειακή συμπεριφορά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολυλειτουργικά πάνελ προσόψεων. Αρχικά, έγινε προσπάθεια αριστοποίησης της γεωπολυμερικής σύνθεσης με την

εξέταση της επίδρασης των μοριακών λόγων Si/Al και Na/Al στις θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων. Στη συνέχεια, παρασκευάστηκαν ελαφροβαρή γεωπολυμερή με την χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), έχοντας ως στόχο την παραλαβή υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες (αντοχές σε θλίψη $\geq 10\text{MPa}$ και πυκνότητα της τάξης του 1.0g/cm^3). Τέλος εξετάστηκε η ενσωμάτωση και η λειτουργικότητα υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε δοκίμια γεωπολυμερών.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί προϊόν της καύσης λιγνίτη στην μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγαλόπολης. Η χημική της σύσταση παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Η υψηλή της περιεκτικότητα σε πυρίτιο και αργίλιο, την καθιστά κατάλληλη πρώτη ύλη για την σύνθεση γεωπολυμερών υλικών. Πριν την εφαρμογή της, η ιπτάμενη τέφρα αλέστηκε ώστε το μέσο μέγεθος κόκκων (d_{50}) να είναι της τάξης των 20 μm . Η προαναφερθείσα κοκκομετρία αποτελεί τυπική τιμή στην χρήση της ιπτάμενης τέφρας στον κατασκευαστικό τομέα.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση της Ιπτάμενης τέφρας (% κ.β.).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	L.O.I.
46.96	21.00	9.83	13.74	2.20	1.36	0.16	2.42	1.94

Η σύνθεση των γεωπολυμερών περιλαμβάνει, αρχικά, την παρασκευή ενός διαλύματος ενεργοποίησης το οποίο περιέχει διαλυτό Si (υπό την μορφή υδρούλου) και υδροξείδιο του νατρίου. Στη συνέχεια, η ιπτάμενη τέφρα (πρώτη ύλη) αναμειγνύεται μηχανικά με το διάλυμα ενεργοποίησης για περίπου 3 min ως ότου δημιουργηθεί ένας πολτός, ο οποίος μεταφέρεται και δονείται σε ανοξείδωτες μήτρες (50x50x50 mm). Τα δοκίμια παραμένουν, αρχικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 2h και στην συνέχεια τοποθετούνται σε πυριατήριο στους 70°C για 48h (Panagiotopoulou Ch κ.α, 2008). Οι θλιπτικές και καμπτικές αντοχές των δοκιμίων μετρήθηκαν ύστερα από 7 ημέρες.

Το πρώτο στάδιο των πειραματικών μετρήσεων σχετίζεται με την βελτιστοποίηση της γεωπολυμερικής σύνθεσης που έχει ως βάση την ιπτάμενη τέφρα, έχοντας ως κριτήριο τις τιμές θλιπτικών αντοχών των τελικών προϊόντων. Το πολυπαραγοντικό μοντέλο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi (M.W. Weiser κ.α, 1993) περιλάμβανε την εξέταση δύο παραμέτρων σε τέσσερα ξεχωριστά επίπεδα τιμών. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι οι εξής: α) ο μοριακός λόγος Si/Al που συνδέει την ποσότητα του Si και Al που υπάρχει στο αρχικό μείγμα (Si/Al = 2.20 – 2.50) και β) ο μοριακός λόγος Na/Al που συσχετίζει την ποσότητα αλκαλίου (Na) που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης με την ποσότητα Al της πρώτης ύλης (Na/Al = 0.65 – 0.95). Τα επίπεδα τιμών των παραμέτρων επιλέχθηκαν σύμφωνα με φυσικούς και χημικούς περιορισμούς. Ο λόγος μαζών $m_{\text{στερεων}} / m_{\text{υγρών}}$ διατηρήθηκε στην τιμή 2.8.

Το δεύτερο στάδιο των πειραματικών μετρήσεων περιλάμβανε την παρασκευή ελαφροβαρών γεωπολυμερών από διογκωμένη πολυστερίνη. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι EPS του εμπορίου σε ποσοστά 0.5 – 3.0%: α) ανακυκλούμενο ή τρίμμα (com1), β) σφαίρα διαμέτρου 1-3 mm (com2) και γ) σφαίρα διαμέτρου 3-5 mm (com3). Επίσης, παρασκευάστηκαν δοκίμια με την χρήση τριών τροποποιημένων τύπων EPS: α) EPS με 1% polywex και 6% πεντάνιο (fr1), β) EPS με 1% γραφένιο και 6% πεντάνιο (fr2) και γ) EPS με την εμπορική ονομασία corepion (fr3).

Ακόμη, εξετάστηκε η ενσωμάτωση και η λειτουργικότητα υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) 6 και 10% επί της τέφρας - σε δοκίμια γεωπολυμερών ενώ τέλος μετρήθηκαν η θερμική αγωγιμότητα, η υδατοαπορροφητικότητα και η σταθερότητα σε συνθήκες περιβάλλοντος των δοκιμίων.

Η μορφολογία επιλεγμένων δειγμάτων μελετήθηκε με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης σε μικροσκόπιο JEOL6380LV εξοπλισμένο με φασματομέτρο ακτίνων Χ διασπαρμένης ενέργειας (EDX). Η προετοιμασία των δειγμάτων περιελάμβανε την επικάλυψη με γραφίτη.

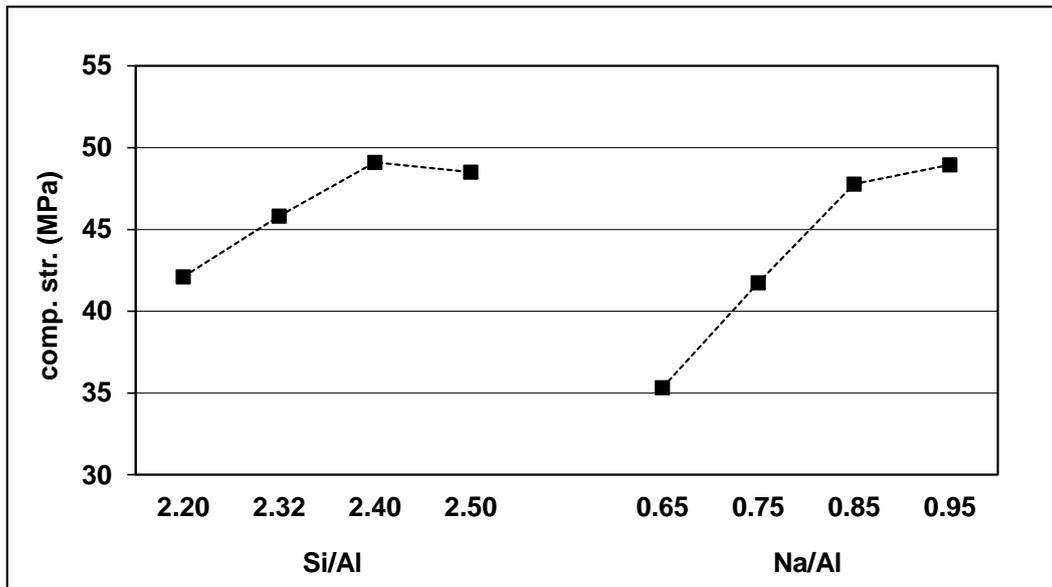
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την βελτιστοποίηση της σύνθεσης των γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας χρησιμοποιήθηκε το πολυπαραγοντικό μοντέλο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi. Ο Πίνακας 2 συσχετίζει τις τιμές θλιπτικών αντοχών και πυκνότητας με τους μοριακούς λόγους Si/Al και Na/Al. Από τη στατιστική επεξεργασία (ANOVA) των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η παράμετρος με την μεγαλύτερη επίδραση στις θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων είναι ο μοριακός λόγος Na/Al (88.4%) με τον λόγο Si/Al να έπεται με 11.6%. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2, η αύξηση του λόγου Na/Al προκαλεί αισθητή αύξηση τόσο στις τιμές θλιπτικών αντοχών όσο και πυκνοτήτων. Ανάλογη δράση φαίνεται να παρουσιάζει η μεταβολή του λόγου Si/Al, σε μικρότερη όμως έκταση. Η συνεργιστική επίδραση των παραμέτρων σύνθεσης στις θλιπτικές αντοχές των γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 1.

Πίνακας 2. Τιμές θλιπτικών αντοχών και πυκνοτήτων των παραγόμενων γεωπολυμερών.

Δείγμα	Si/Al	Na/Al	Θλιπτικές Αντοχές (MPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)
Ref1	2.20	0.65	31.7	1.53
Ref2	2.20	0.75	40.3	1.60
Ref3	2.20	0.85	45.2	1.66
Ref4	2.20	0.95	51.2	1.70
Ref5	2.32	0.65	34.3	1.55
Ref6	2.32	0.75	41.5	1.61
Ref7	2.32	0.85	54.9	1.72
Ref8	2.32	0.95	52.6	1.74
Ref9	2.40	0.65	37.6	1.61
Ref10	2.40	0.75	44.1	1.69
Ref11	2.40	0.85	55.8	1.73
Ref12	2.40	0.95	58.9	1.78
Ref13	2.50	0.65	37.7	1.59
Ref14	2.50	0.75	47.5	1.68
Ref15	2.50	0.85	53.7	1.77
Ref16	2.50	0.95	55.1	1.80

Το δείγμα Ref12 (Si/Al = 2.4 και Na/Al = 0.95) παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές θλιπτικών αντοχών (58.9 MPa). Όμως, ως βέλτιστη σύνθεση επιλέγεται το δείγμα Ref11 επειδή κατέχει χαμηλότερη αλκαλικότητα και παραπλήσια τιμή θλιπτικών αντοχών (55.8 MPa) σε σύγκριση με το δείγμα Ref12. Οι αντοχές σε κάμψη για το δείγμα αναφοράς Ref11 μετρήθηκαν στα 6 MPa.

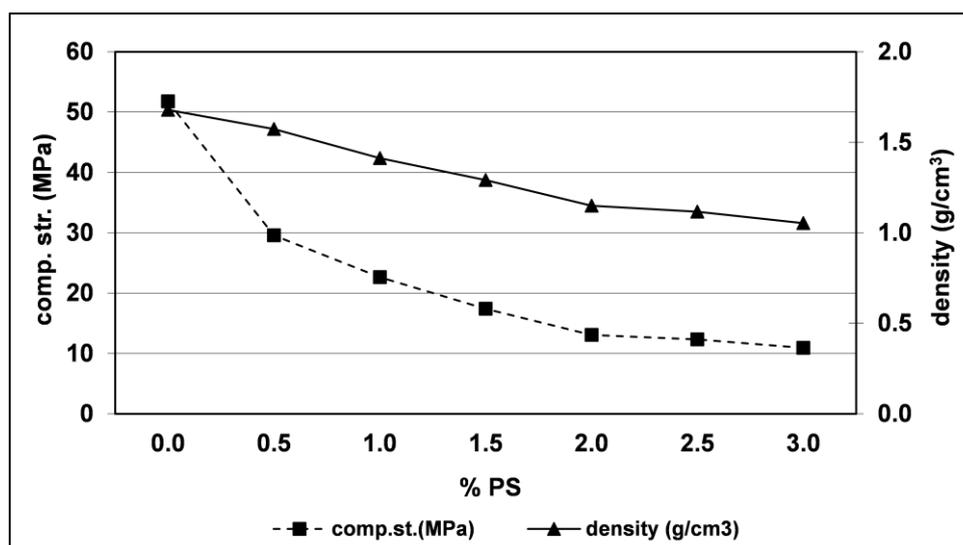


Σχήμα 1. Επίδραση των παραμέτρων σύνθεσης στις θλιπτικές αντοχές των γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας.

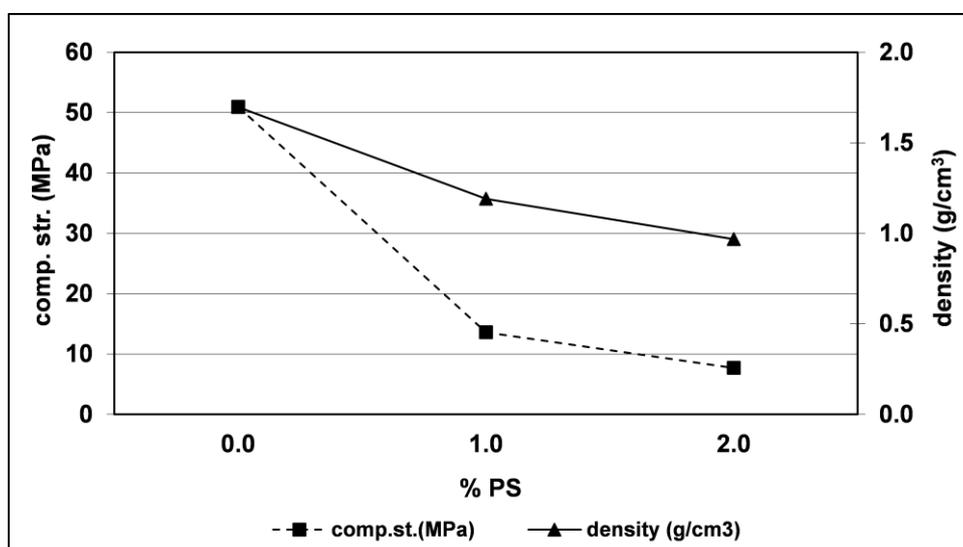
Για την παρασκευή ελαφροβαρών γεωπολυμερών χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι εμπορικού (com1, com2, com3) και τροποποιημένου EPS (fr1, fr2, fr3). Τα ποσοστά προσθήκης εκτείνονται από 0.5-3.0 % για το εμπορικό και 1.0-2.0% για το εργαστηριακό EPS. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται, ενδεικτικά, η επίδραση της διογκωμένης πολυστερίνης στις θλιπτικές αντοχές και την φαινόμενη πυκνότητα των γεωπολυμερών com2 (α) και fr1 (β). Όλα τα εξεταζόμενα δείγματα παρουσιάζουν παρόμοιες καμπύλες, καθώς η προσθήκη EPS έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της πυκνότητας (25-45%), η οποία όμως συνοδεύεται από δραστική μείωση των θλιπτικών αντοχών της τάξης 65-85%. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με το μεγάλο ποσοστό όγκου που καταλαμβάνει η διογκωμένη πολυστερίνη εντός του γεωπολυμερούς (ως και 80% του όγκου για τα δείγματα με 3% w/w EPS), με αποτέλεσμα να επιδρά αρνητικά στη συνοχή της γεωπολυμερικής μήτρας.

Στο Σχήμα 3 γίνεται μία σύγκριση ανάμεσα στα προϊόντα με (α) 3% w/w εμπορικό EPS (com1, com2 και com3) και (β) 2% w/w εργαστηριακό EPS (fr1, fr2 και fr3). Τα τελικά προϊόντα των com1, com2, com3, fr1 και fr3 εμφανίζουν παραπλήσιες ιδιότητες, με τις μηχανικές αντοχές να είναι περίπου 10 MPa και τη φαινόμενη πυκνότητα περίπου 1g/cm³. Οι τιμές αυτές θεωρούνται ικανοποιητικές για ένα δομικό στοιχείο το οποίο χρησιμοποιείται ως ηχομονωτικό ή θερμομονωτικό υλικό. Εξάιρεση αποτελεί το fr2, το οποίο για 2% w/w προσθήκη παρουσιάζει αρκετά υψηλές τιμές μηχανικών αντοχών και πυκνότητας (19.43 MPa και 1.33 g/cm³). Για τον συγκεκριμένο τύπο EPS χρειάζεται να διερευνηθεί η δυνατότητα αυξημένου ποσοστού προσθήκης EPS.

(α)

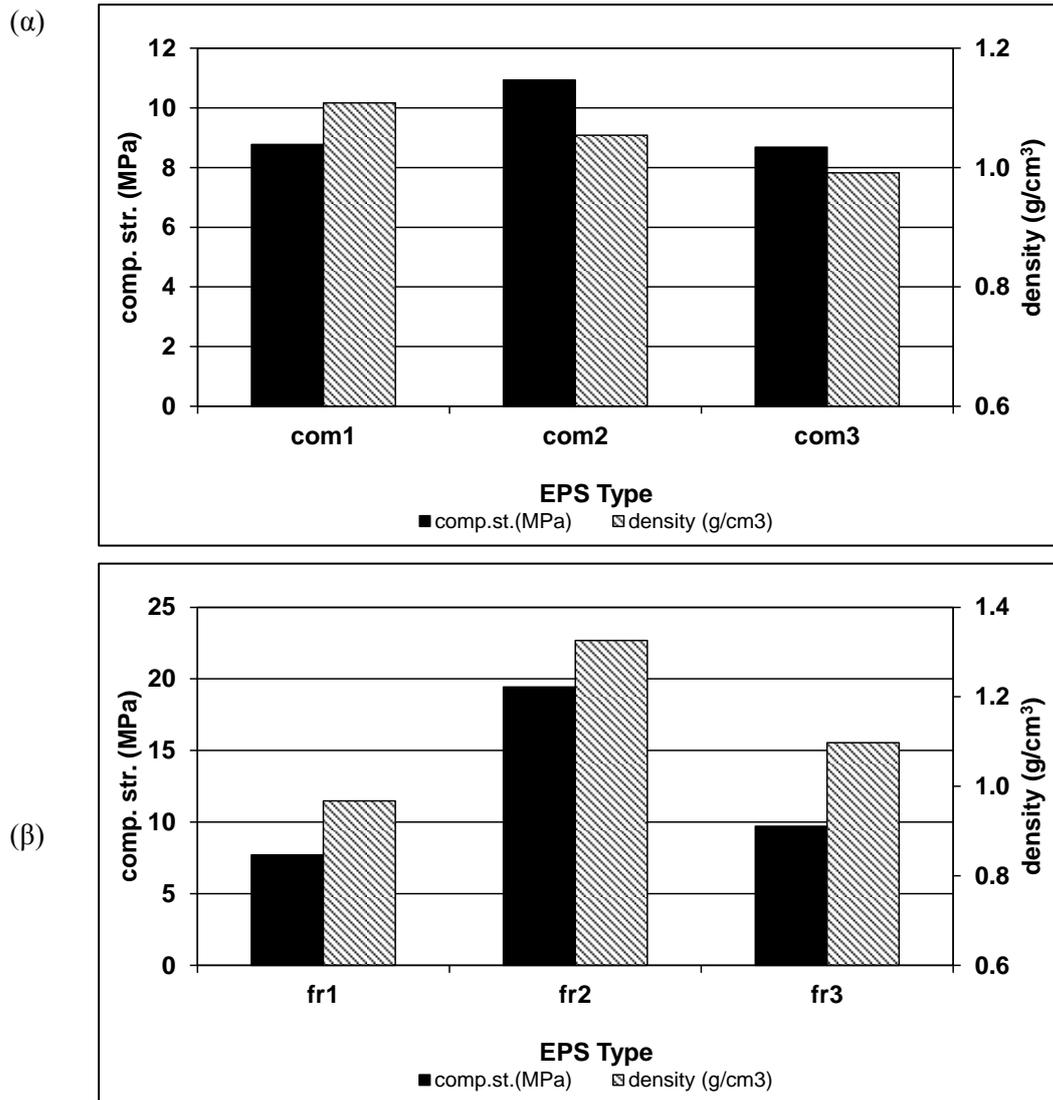


(β)



Σχήμα 2. Τιμές θλιπτικών αντοχών και φαινόμενης πυκνότητας για γεωπολυμερή με προσθήκη εμπορικής com2 (α) και τροποποιημένης fr1 (β) διογκωμένης πολυστερίνης.

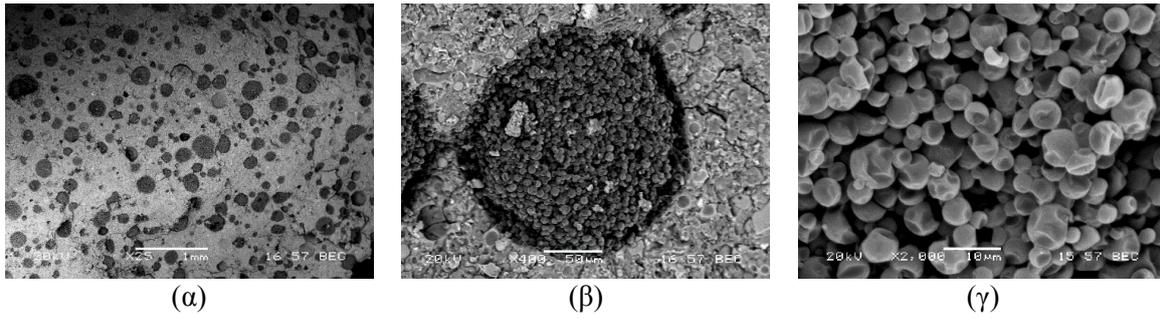
Από το Σχήμα 3 είναι εμφανές πως για προσθήκη 2% w/w fr1 ή fr3 τροποποιημένου EPS επιτυγχάνονται μηχανικές αντοχές και πυκνότητες παραπλήσιες με αυτές των γεωπολυμερών με 3% εμπορικό EPS, υποδηλώνοντας ότι τα fr1 και fr3 είναι πυκνότερα υλικά. Από την σύγκριση των υλικών, το γεωπολυμερές με προσθήκη 3% w/w com2 (com2_3%PS) προσεγγίζει καλύτερα τον ιδανικό συνδυασμό ιδιοτήτων παρουσιάζοντας 10.93 MPa αντοχές σε θλίψη και 1.05 g/cm³ φαινόμενη πυκνότητα. Οι αντοχές σε κάμψη του παραπάνω γεωπολυμερούς μετρήθηκαν στα 2 MPa. Φαίνεται πως η εισαγωγή EPS επιδρά αρνητικά και στις καμπτικές αντοχές των γεωπολυμερών. Γενικά, στην συγκεκριμένη εργασία επιτεύχθηκε η παραγωγή ελαφροβαρών γεωπολυμερών με τιμές φαινόμενης πυκνότητας που κυμαίνονται από 0.97 έως 1.57 g/cm³ και αντίστοιχες τιμές θλιπτικής αντοχής από 8 έως 29 MPa.



Σχήμα 3. Σύγκριση μηχανικών αντοχών και φαινόμενης πυκνότητας για εμπορικούς (α) και εργαστηριακούς (β) τύπους διογκωμένης πολυστερίνης (EPS).

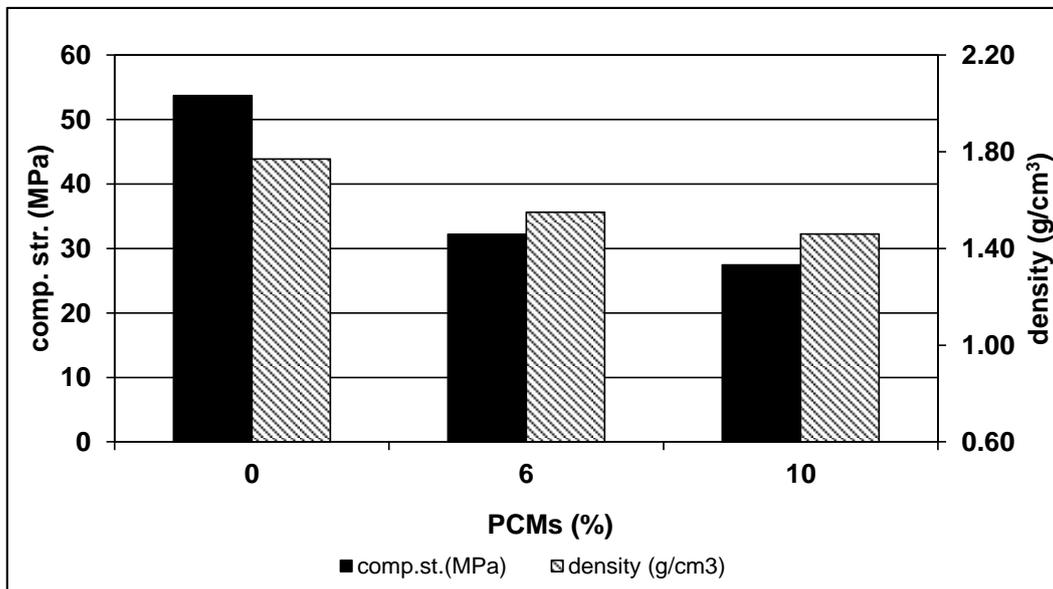
Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τόσο του δείγματος αναφοράς Ref11 όσο και του com2_3%PS μετρήθηκε, με τις τιμές να είναι 0.31 και 0.16 W/mK, αντιστοίχως.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας εξετάστηκε η ενσωμάτωση και η λειτουργικότητα υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) εντός της γεωπολυμερικής μήτρας. Παρασκευάστηκαν δείγματα με δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις PCMs (6 και 10% w/w ως προς την ποσότητα της ιπτάμενης τέφρας). Με σκοπό να αποφευχθεί η παραμόρφωση των PCMs κατά την ανάμιξη τους με τον γεωπολυμερικό πολτό, σχεδιάστηκε και ακολουθήθηκε μια συγκεκριμένη διαδικασία εισαγωγής. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται φωτογραφίες SEM του γεωπολυμερούς με 10% w/w σε PCMs. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4β, τα PCMs δημιουργούν συστάδες οι οποίες είναι ομοιόμορφα κατανομημένες εντός της γεωπολυμερικής μήτρας (Σχήμα 4α). Υπάρχει μία παραμόρφωση των θυλάκων αλλά σε καμία περίπτωση δεν παρατηρείται καταστροφή ή διαρροή της παραφίνης των PCMs (Σχήμα 4γ).



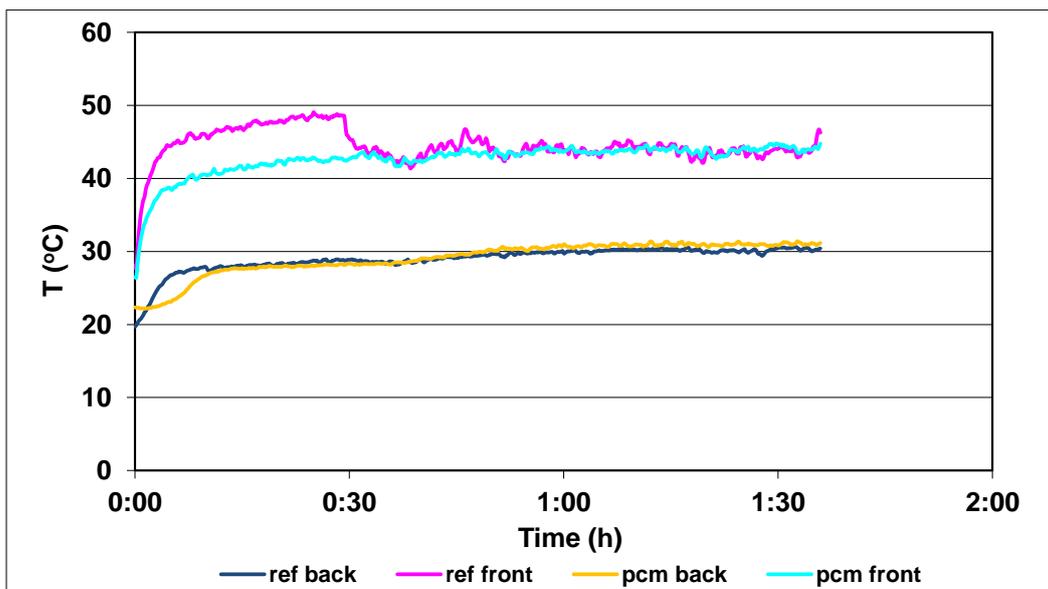
Σχήμα 4. Φωτογραφίες SEM του γεωπολυμερούς με 10% w/w PCMs.

Το Σχήμα 5 δείχνει την επίδραση των PCMs στην πυκνότητα και τις μηχανικές αντοχές των γεωπολυμερών. Όπως φαίνεται, η ενσωμάτωση των PCMs επιδρά αρνητικά στις θλιπτικές αντοχές (~ 50% μείωση) με την φαινόμενη πυκνότητα να μειώνεται κατά ~ 20%.



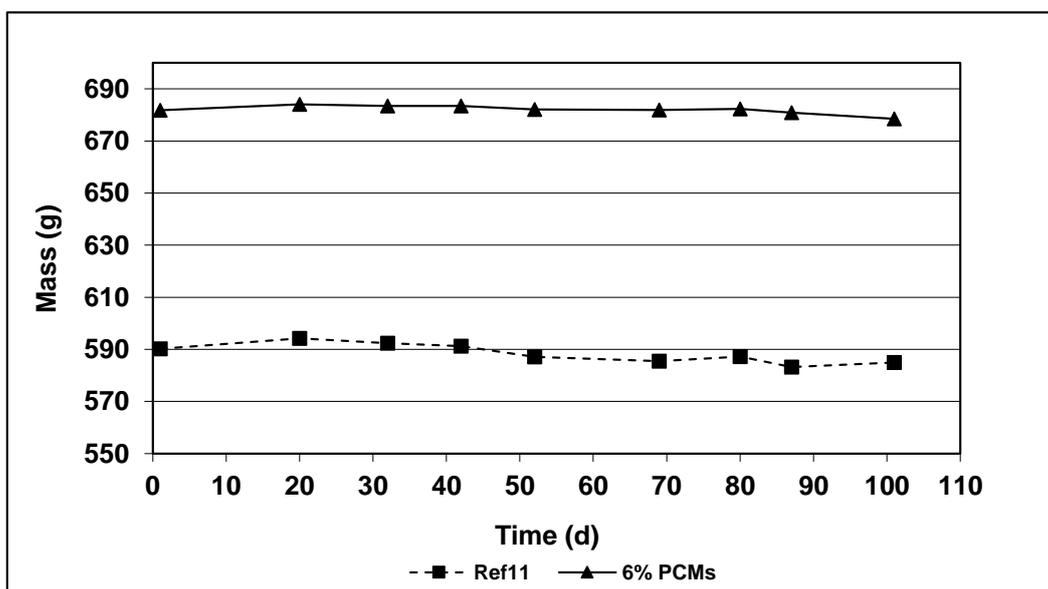
Σχήμα 5. Επίδραση των PCMs στις τιμές θλιπτικών αντοχών και φαινόμενης πυκνότητας.

Για να ελεγχθεί η λειτουργικότητα των PCMs, εφαρμόστηκε τεχνική όπου τετράγωνα πλακίδια γεωπολυμερών (250x250mm) ακτινοβολούνται, στη μία πλευρά, με λάμπες υψηλής ισχύος και παράλληλα καταγράφεται η θερμοκρασία και στις δύο πλευρές των δειγμάτων (εμπρός και πίσω επιφάνεια). Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δείγμα αναφοράς Ref11 και αυτό με προσθήκη 10% w/w PCMs. Η υστέρηση στην αύξηση της θερμοκρασίας στην πίσω πλευρά του δείγματος με PCMs, υποδεικνύει την λειτουργία των PCMs ως συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.



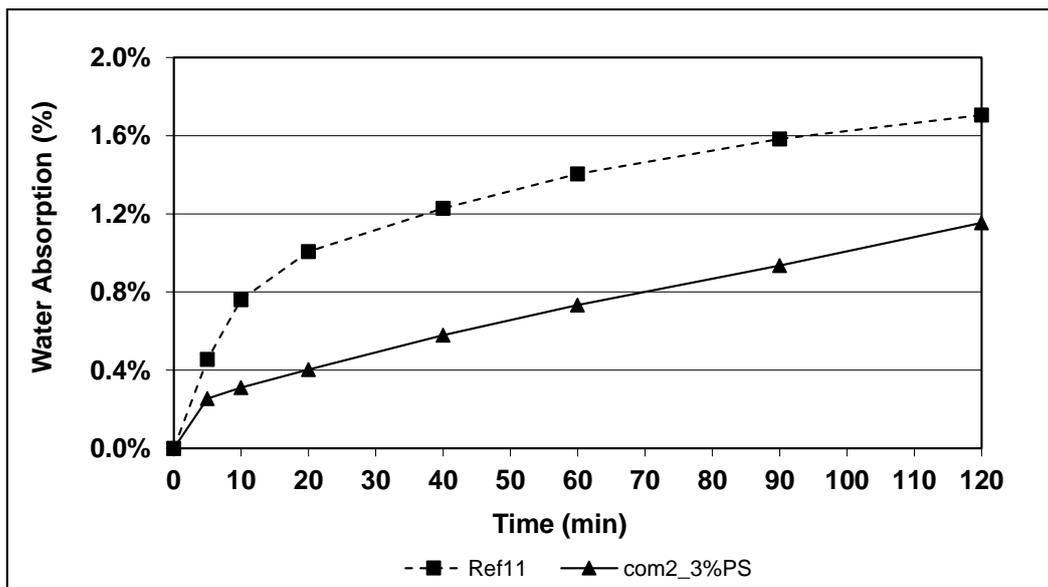
Σχήμα 6. Θερμοκρασία σε σχέση με τον χρόνο ακτινοβολήσης δειγμάτων με ή χωρίς την παρουσία PCMs.

Επιλεγμένα δείγματα γεωπολυμερών υποβλήθηκαν σε πειράματα απορρόφησης υγρασίας σε περιβάλλον εργαστηρίου. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή μάζας του δείγματος Ref11 καθώς και του δείγματος που περιέχει 6% w/w PCMs κατά την έκθεσή τους σε περιβάλλον εργαστηρίου. Ύστερα από 100 ημέρες έκθεσης, τα δύο δείγματα έχουν σχεδόν σταθερή μάζα με την απόκλιση να είναι της τάξης του $\pm 0.6\%$ για το Ref11 και $\pm 0.25\%$ για το δείγμα που περιέχει 6% w/w PCMs.



Σχήμα 7. Μεταβολή μάζας των δειγμάτων Ref11 και 6% w/w PCMs σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας για τα δείγματα Ref11 και com2_3%PS. Συγκεκριμένα, τα εξεταζόμενα δοκίμια καλύπτονται με μονωτική ταινία στην κάτω πλευρική επιφάνεια τους, βυθίζονται στο νερό σε βάθος 5mm και μετρείται η μάζα του νερού που απορροφάται σε χρόνους 5, 10, 20, 40, 60, 90 και 120 min από την έναρξη της δοκιμής. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της % απορρόφησης νερού των δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου για τα εξεταζόμενα δείγματα.



Σχήμα 8. % απορρόφηση νερού των δοκιμών συναρτήσει του χρόνου για τα δείγματα Ref11 και com2_3%PS.

Από το Σχήμα 8 είναι φανερό ότι το γεωπολυμερές με την διογκωμένη πολυστερίνη (com2_3%PS) παρουσιάζει πολύ μικρότερη προσρόφηση νερού σε σχέση με την αμιγή γεωπολυμερική μήτρα (Ref11) λόγω της φύσης του EPS. Η συμμετοχή του στη σύνθεση του γεωπολυμερούς κατά 3% w/w οδηγεί στην κατάληψη μεγάλου ποσοστού του όγκου (~80%) των δοκιμών με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως εμπόδιο στην απορρόφηση περαιτέρω νερού από την γεωπολυμερική μήτρα. Τα πειράματα πλήρους εμβάπτισης δοκιμών των δυο συνθέσεων σε νερό, επιβεβαιώνουν τα παραπάνω αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το δείγμα Ref11 έδωσε 12.6% απορρόφηση ενώ το com2_3%PS 11.8%. Τέλος, εξήχθησαν οι τιμές υδατοαπορροφητικότητας για τα δύο δείγματα, με το Ref11 να παρουσιάζει $0.150 \text{ mm/min}^{0.5}$ ενώ το com2_3%PS $0.051 \text{ mm/min}^{0.5}$. Οι τιμές αυτές θεωρούνται άκρως ικανοποιητικές, μιας και βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων ($<0.65 \text{ mm/min}^{0.5}$) που έχουν τεθεί για την υδατοαπορροφητικότητα των εργαστηριακών κονιαμάτων (Pitroda J. κ.α, 2013).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στην σύνθεση γεωπολυμερών. Η θλιπτική αντοχή των παραγόμενων προϊόντων εξαρτάται από τους μοριακούς λόγους Si/Al και Na/Al, με την μέγιστη τιμή των περίπου 60 MPa να επιτυγχάνεται για Si/Al = 2.4 και Na/Al = 0.95. Ο λόγος μαζών στερεά/υγρά διατηρήθηκε στην τιμή 2.8. Η εισαγωγή κοινής ή τροποποιημένης διογκωμένης πολυστερίνης εντός της γεωπολυμερικής μήτρας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φαινόμενης πυκνότητας των τελικών προϊόντων έως και 45%, η οποία συνοδεύεται, όμως, από δραστική μείωση των θλιπτικών αντοχών ($\leq 80\%$). Το γεωπολυμερές με προσθήκη 3% w/w εμπορικής διογκωμένης πολυστερίνης με κοκκομετρία 1-3 mm, αποτελεί κατάλληλο δομικό υλικό για την κατασκευή πολυλειτουργικών πάνελ προσόψεων (θλιπτικές αντοχές: 11 MPa και φαινόμενη πυκνότητα: 1.05 g/cm^3).

Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης στην σύνθεση των γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας έδειξε πως λειτουργούν ως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Σύμφωνα με τις μετρήσεις απορρόφησης υγρασίας σε περιβάλλον εργαστηρίου, τόσο το αμιγές γεωπολυμερές όσο και αυτό με 6% w/w PCMs δεν παρουσιάζουν μεταβολή μάζας ύστερα από 100 ημέρες έκθεσης. Τέλος, οι μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας έδειξαν πως το γεωπολυμερές με την

διογκωμένη πολυστερίνη παρουσιάζει πολύ μικρότερη προσρόφηση νερού σε σχέση με την αμιγή γεωπολυμερική μήτρα

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτείται από το 7^ο Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (FP7-2013-NMPENV- EeB, “Multifunctional facades of reduced thickness for fast and cost-effective retrofitting, MF-Retrofit”).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Fernandez-Jimenez, A.M., Palomo, A. & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp 1204-1209
- Kani, E. N., Allahverdi, A. & Provis, J. L. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 1, pp 25-33
- Komnitsas, K., Zaharaki, D. & Perdikatsis V. (2009). Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low calcium ferronickel slag inorganic polymers. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 161, pp 760-768
- Kumar, S., Kumar, R. & Mehrotra, S.P. (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 3, pp 607-615
- Panagiotopoulou, Ch., Kakali, G., Perraki, Th., Skordaki, N. & Mitsopoulou, Ch., (2008). Comparative study of the geopolymerisation of aluminosilicate minerals and by-products. *Proceedings of the International Conference ICC 2008*, 29th June – 4th July 2008, Verona, Italy, pp 6
- Panagiotopoulou, Ch., Perraki, T., Tsivilis, S., Skordaki, N. & Kakali G. (2009). A study on alkaline dissolution and geopolymerisation of hellenic fly ash. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol. 29, No. 10, pp 165-174
- Pitroda, J. & Umrigar F.S. (2013). Evaluation of Sorptivity and Water Absorption of Concrete with Partial Replacement of Cement by Thermal Industry Waste (Fly Ash). *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Vol. 2, No. 1, pp 245-249
- Rowles M., O’ Connor B. 2003. Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite, *J Mater Chem* 13(5): 1161-1165.
- Weiser, M.W. & Fong, K.B. (1993). Experimental design for improved ceramic processing, emphasizing the Taguchi Method. *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 72, No. 12, pp 87-92

Αντοχή και υδατοαπορροφητικότητα σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή

A.E. Σάββα

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Λέξεις κλειδιά: ανακυκλωμένα αδρανή, ανακυκλωμένα σκυροδέματα, θλιπτική αντοχή, έμμεσες μέθοδοι, υδατοαπορροφητικότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία, στα πλαίσια της αιφορίας και της βιώσιμης ανάπτυξης όσον αφορά τον κατασκευαστικό κλάδο, μελετήθηκαν σκυροδέματα παρασκευασθέντα από ανακυκλωμένα αδρανή. Παρασκευάστηκαν μείγματα με αντικατάσταση των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών με ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA), σε ποσοστά 5, 10, 25 50 και 100%. Έγιναν 3 σειρές δοκιμών. Στην 1η σειρά έγινε αντικατάσταση μόνο του γαρμπιλιού, στη 2η σειρά έγινε αντικατάσταση μόνο των σκύρων στα ανωτέρω ποσοστά, ενώ στην 3η σειρά έγινε αντικατάσταση τόσο του γαρμπιλιού όσο και των σκύρων. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προέκυψαν από συμβατικά δοκίμια με τα οποία ελέγχει την παραγωγή της τοπική βιομηχανία σκυροδέματος. Σε όλα τα μείγματα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Π 42.5 N σε ποσότητα 350 kg/m^3 , με λόγο $N/T=0,54$. Μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή στις 7, 28 και 90 ημέρες με άμεσες και έμμεσες (κρουσίμετρο - ηχώμετρο) μεθόδους καθώς και η υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων στις 90 ημέρες. Έγινε σύγκριση με σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή καθώς και με σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα όλα τα χονδρόκοκκα αδρανή (γαρμπίλι και σκύρα). Δίνονται καμπύλες αναφοράς της αντοχής με τις έμμεσες μεθόδους (f-R και f-V).

Compressive strength and capillary water absorption of recycled coarse aggregate concretes

A.E. Savva

Laboratory of Building Materials, Democritus University of Thrace

Keywords: recycled concrete aggregate, recycled aggregate concretes, compressive strength, non destructive tests, capillary water absorption

ABSTRACT: In this experimental work, concretes, prepared with recycled concrete aggregates, are examined. Mixtures were made by replacing natural coarse aggregates with recycled concrete aggregates at levels of 5, 10, 25 50 and 100% (w/w). Two fractions of recycled coarse concrete aggregates were used, 8-16 mm and 16-32 mm and three series of concrete mixtures were prepared. In the first series, aggregates of grading of 8-16mm were used as a replacement of natural aggregates, in the second series coarse aggregates (16-32 mm) were used as a replacement, while in the third series, coarse aggregate of both grading were replaced. The recycled aggregates were obtained from rubbles of conventional cube strength tests with which a local concrete industry controls the quality of its production. In all mixtures CEM II 42.5 N (350 kg / m^3) and $W/C=0.54$ were used. The compressive strength was measured at the ages of 7, 28 and 90 days, using direct and indirect (Rebound Hammer - Pulse Velocity) methods. Capillary water absorption of mixtures was determined at 90 days.

A comparison with a normal concrete and a concrete which has all coarse aggregate recycled was made and curves of compressive strength versus non-destructive tests are given.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και μερικά χρόνια ο όρος "αιφορία" έχει μεγάλη επιρροή στην επιστημονική κοινότητα. Οι πολυάριθμες δημοσιεύσεις που ασχολούνται με την «αιφόρο ανάπτυξη» συνήθως ξεκινούν από τη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το περιβάλλον και την ανάπτυξη στο Ρίο ντε Τζανέιρο το 1992 και την «Ατζέντα 21» που εγκρίθηκε εκεί.

Μια ανάπτυξη είναι βιώσιμη αν "οι παρούσες γενιές καλύπτουν τις ανάγκες τους χωρίς όμως να θέτουν σε κίνδυνο τις ανάγκες των μελλοντικών γενεών». Αν και υπάρχει ευρεία κοινωνική συναίνεση σε σχέση με την αιφορία, τη χρήση δηλ. των φυσικών οικοσυστημάτων και των πηγών ενέργειας, ώστε να εξασφαλίζεται η μελλοντική ποιότητα και η ισορροπία, η βαρύτητα μπορεί να δοθεί σε τρεις κατευθύνσεις: την οικονομία, την οικολογία και τις κοινωνικές ανάγκες. Έτσι παραμένει αναπάντητο το κατά πόσον η έννοια αποτελεί έναν ηθικολογικό προσανατολισμό ή ένα στρατηγικό σχεδιασμό και σε ποιο βαθμό μπορεί να εφαρμοστεί.

Όσον αφορά την αιφορία στον κατασκευαστικό κλάδο, το πιο διαδεδομένο υλικό στα τεχνικά έργα είναι το σκυρόδεμα, με ετήσια παγκόσμια παραγωγή που υπολογίζεται σε περίπου 12 δισεκατομμύρια τόνους, ποσότητα που αντιστοιχεί σε 1,7 δισεκατομμύρια τόνους σκυροδέματος/ έτος /άτομο (Mehta,1999; Mehta, 2002). Επόμενο είναι αυτή η τεράστια ποσότητα να επηρεάζει το περιβάλλον, διότι αφενός απαιτεί τεράστιες ποσότητες φυσικών πόρων, αφετέρου η παραγωγή του τσιμέντου και είναι πολύ ενεργοβόρα και αποβάλλει στην ατμόσφαιρα το 7% της παγκόσμιας εκπομπής CO₂ (Kanellopoulos κ.α. 2014). Επιπλέον, η βιομηχανική ανάπτυξη των αναδυόμενων οικονομιών, όπως της Ρωσίας, Ινδίας, Κίνας κλπ, δείχνουν ότι η παγκόσμια ζήτηση για πρώτες ύλες θα αυξηθεί πολύ στο εγγύς μέλλον και η κατανάλωση φυσικών πόρων θα επηρεάσει τις φυσικές ισορροπίες και τους γήινους πόρους (Pepe κ.α., 2014).

Ο κατασκευαστικός τομέας χρησιμοποιεί περισσότερο από το 50% όλων των υλικών που εξάγονται από τη γη και παράγει πάνω από 850 εκατομμύρια τόνους / έτος αποβλήτων στην ΕΕ, το μεγαλύτερο μερίδιο των οποίων (31%) προέρχεται από κατασκευαστικές δραστηριότητες και κατεδαφίσεις, ενώ τα αστικά απόβλητα, αντιπροσωπεύουν μόνο περίπου το 12% της συνολικής παραγωγής αποβλήτων (European Environment Agency (EEA), 2007). Η κατεδάφιση και η διάθεση των μπαζών του σκυροδέματος δημιουργεί μια επιπλέον σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση, καθώς, αν και υπάρχει η δυνατότητα ανακύκλωσης, περίπου το 75% από αυτά διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ορισμένα κράτη μέλη (κυρίως η Δανία, οι Κάτω Χώρες και το Βέλγιο) διερεύνησαν σε βάθος την τεχνική και οικονομική σκοπιμότητα της ανακύκλωσης, επιτυγχάνοντας ποσοστά ανακύκλωσης πάνω από το 80%. Από την άλλη πλευρά, οι χώρες της Νότιας Ευρώπης ανακυκλώνουν πολύ λίγο των αποβλήτων των κατασκευών τους (Corinaldesi & Moriconi, 2009).

Με στόχο τη μείωση της χρήσης φυσικών υλικών στην κατασκευή και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευαστική βιομηχανία, η Ευρώπη υιοθέτησε μια πολιτική προώθησης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος. Η Ευρωπαϊκή οδηγία n.98 της 19/11/2008 (European directive 2008/98/CE) καλεί τα κράτη μέλη να λάβουν "τα αναγκαία μέτρα για την προώθηση ανακυκλωμένων προϊόντων και δραστηριοτήτων επαναχρησιμοποίησης" και ορίζει ότι οι προετοιμασίες για την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και τα άλλα είδη ανάκτησης υλικών, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων από κατασκευές και κατεδαφίσεις, θα πρέπει να αυξηθούν μέχρι τουλάχιστον το 70% (κβ) το 2020.

Τα υλικά της κατεδάφισης αποτελούνται από σκυρόδεμα (50-55%) και τοιχοποιία (30-40%) με μικρά μόνο ποσοστά άλλων υλικών όπως μέταλλα, γυαλί και ξυλεία (Tam, 2008). Έτσι, τα απόβλητα υλικά που παράγονται ή από κατεδαφίσεις κατασκευών από σκυρόδεμα ή από βιομηχανίες σκυροδέματος ή προκατασκευής αποτελούν πηγές για ανακυκλωμένα

αδρανή σκυροδέματος (RCA) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο, όπως οικολογικά σκυροδέματα ή κονιάματα (Toledo κ.α., 2013).

Οι προκύπτουσες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αυτών των σκυροδεμάτων, αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας από διάφορους ερευνητές (Lima κ.α. 2013; Corinaldesi, 2010; Belen κ.α., 2011; Berndt, 2009; Cabral κ.α. 2010; Dilbas κ.α. 2014). Επισημάνθηκε ότι οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RAC) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα (φύση, μέγεθος και κοκκομετρία) των ανακυκλωμένων αδρανών (McNeil & Kang, 2013) καθώς τα RCA χαρακτηρίζονται από σημαντικά υψηλότερη υδατοαπορροφητικότητα και χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα " φυσικά " αδρανή (Yong & Teo, 2009).

Τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος συντίθενται από δύο φάσεις (Abbas κ.α., 2009; Belin κ.α., 2013): τα παλαιά αδρανή και την παλιά τσιμεντοκονία Έτσι, ενώ το σύνθετο σκυροδέμα θεωρείται γενικά ως ένα υλικό τριών φάσεων (Etse κ.α., 2012; Caggiano κ.α., 2012) ήτοι των φυσικών αδρανών υλικών, της τσιμεντόπαστας και της διεπιφάνειας αδρανών-τσιμεντόπαστας (ITZ), το σκυροδέμα από ανακυκλωμένα αδρανή είναι ένα υλικό όπου υπάρχουν περισσότερες από 3 φάσεις: φυσικά αδρανή (εφόσον το συνολικό ποσοστό αντικατάστασης είναι κάτω από 100%), παλιά φυσικά αδρανή, παλιά τσιμεντόπαστα, νέα τσιμεντόπαστα και διάφορες διεπιφάνειες (μεταξύ των " παλιών" και 'νέων' 'ενώσεων'). Επομένως οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων εξαρτώνται από διάφορους κρίσιμους παράγοντες, μεταξύ των οποίων τα διάφορα είδη της ITZs που μπορούν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην εσωτερική μικροδομή ενός σκυροδέματος (Lee & Choi, 2013; Xiao κ.α., 2013).

Στην εργασία αυτή μελετάται η εργασιμότητα, η χαρακτηριστική αντοχή, η θλιπτική αντοχή με άμεσες και έμμεσες μεθόδους και η υδατοαπορροφητικότητα σκυροδεμάτων παρασκευασμένων με διάφορα ποσοστά ανακυκλωμένων αδρανών σκυροδέματος.

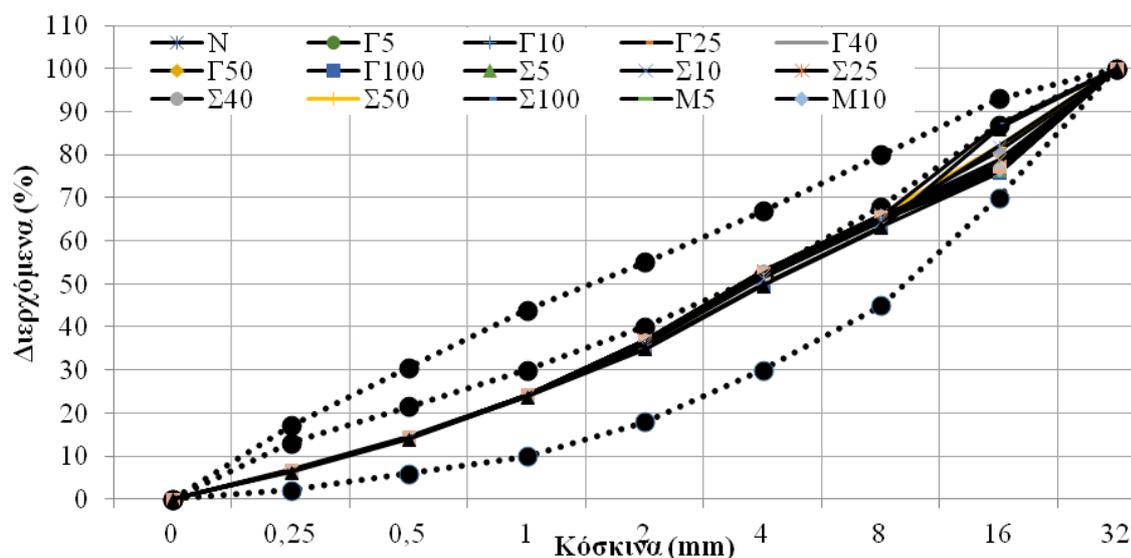
2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Παρασκευάστηκαν 5 σειρές δοκιμών, με την ίδια ποσότητα τσιμέντου CEM II42.5N = 350 kg/m³ και την ίδια ποσότητα νερού W=189 kg/m³ (w=0,54).

Τα μείγματα της 1ης σειράς παρασκευάστηκαν με αντικατάσταση του φυσικού γαρμπιλιού με ανακυκλωμένο γαρμπίλι σε ποσοστά 5, 10, 25, 50 και 100% κβ (μείγματα Γ5, Γ10, Γ25, Γ50 και Γ100 αντίστοιχα). Τα μείγματα της 2ης σειράς παρασκευάστηκαν με αντικατάσταση των φυσικών σκύρων με ανακυκλωμένα σκύρα στα ανωτέρω (κ.β) ποσοστά, (μείγματα Σ5, Σ10, Σ25, Σ50 και Σ100), ενώ τα μείγματα της 3ης σειράς παρασκευάστηκαν με αντικατάσταση των χονδρόκοκκων συμβατικών αδρανών (γαρμπίλι και σκύρα) με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα (μείγματα M5, M10, M25, M50 και M100). Σε αυτή την 3η σειρά, ποσοστό αντικατάστασης πχ 10% σημαίνει ότι αντικαταστάθηκε το 5% του φυσικού γαρμπιλιού και το 5% των φυσικών σκύρων με ανακυκλωμένα. Τέλος παρασκευάστηκαν δύο σειρές ως μείγματα αναφοράς, η μία με συμβατικά αδρανή (μείγμα N) και η άλλη με όλα τα χονδρόκοκκα αδρανή ανακυκλωμένα (μείγμα R).

Τα ανακυκλωμένα αδρανή προήλθαν από θραύση κυβικών συμβατικών δοκιμών σκυροδέματος C20/25, για τον έλεγχο της παραγωγής της βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος ΤΕΚΤΩΝ της Ξάνθης. Τα θραυσμένα δοκίμια συλλέχτηκαν κατά τη διάρκεια ενός έτους περίπου, επομένως τα ανακυκλωμένα αδρανή προέρχονταν από σκυροδέματα που είχαν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή (fck=20 MPa), αλλά διαφορετική μέση αντοχή, ηλικία και αναλογίες μείξης. Επιπλέον ήταν καθαρά, χωρίς ξένες προσμείξεις, όπως πχ θειικά ιόντα, χλωριόντα κλπ.

Σε όλα τα μείγματα η άμμος ήταν πυριτική (θραυστή και φυσική), ενώ ο μέγιστος κόκκος των αδρανών ήταν 32 mm. Οι κοκκομετρικές καμπύλες των μειγμάτων που δίνονται στο Σχήμα 1, ήταν παρόμοιες και όλες μέσα στην υποζώνη Δ του ΚΤΣ-97.



Σχήμα 1. Κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών των μειγμάτων

Στον Πίνακα 1, δίνονται οι αναλογίες μείξης των σκυροδεμάτων, ενώ στον Πίνακα 2 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών. Πριν την ανάμειξη, τα ανακυκλωμένα αδρανή, λόγω της υψηλής απορροφητικότητάς τους και με στόχο τον κορεσμό τους, παρέμειναν στον αναμεικτήρα για 15 min βυθισμένα σε νερό ίσο με το νερό απορρόφησής τους αυξημένο με το 20% περίπου του νερού μείξης.

Πίνακας 1. Αναλογίες σύνθεσης των μειγμάτων

Μείγματα	C (kg)	W (kg)	Συμβατικά αδρανή (kg)				Ανακυκλωμένα (kg)	
			Άμμος		Γαρμπίλι	Σκύρα	Γαρμπίλι	Σκύρα
			Φυσική	Θραυστή				
N					372,34	508,31	-	-
Γ5					352,12	508,31	18,53	-
Γ10					332,09	508,31	36,90	-
Γ25					273,05	508,31	91,02	-
Γ40					215,57	508,31	143,71	-
Γ50					178,08	508,31	178,08	-
Γ100					0,00	508,31	341,31	-
Σ5					372,34	481,04	-	25,32
Σ10					372,34	453,97	-	50,44
Σ25	350	189	291,94	614,08	372,34	374,01	-	124,67
Σ40					372,34	295,85	-	197,23
Σ50					372,34	244,71	-	244,71
Σ100					372,34	0,00	-	471,87
M5					332,78	494,65	8,53	12,68
M10					324,25	481,04	17,07	25,32
M25					298,65	440,52	42,66	62,93
M40					273,05	400,46	68,26	100,12
M50					255,98	374,01	85,33	124,67
M100					170,66	244,71	170,66	244,71

R	-	-	341,3	471,85
---	---	---	-------	--------

Πίνακας 2. Φυσικές ιδιότητες των αδρανών

Ιδιότητες	Συμβατικά αδρανή				Ανακυκλωμένα	
	Άμμος συλλεκτή	Άμμος θραυστή	Γαρυπίλι	Σκύρα	Γαρυπίλι	Σκύρα
Πυκνότητα ((kg/dm ³))	2,66	2,65	2,64	2,65	2,42	2,46
Απορροφητικότητα (%)	-	-	-	-	4,10	3,34
Επιφαν.Υγρασία (%)	4,50	3,00	0,20	-	-	-

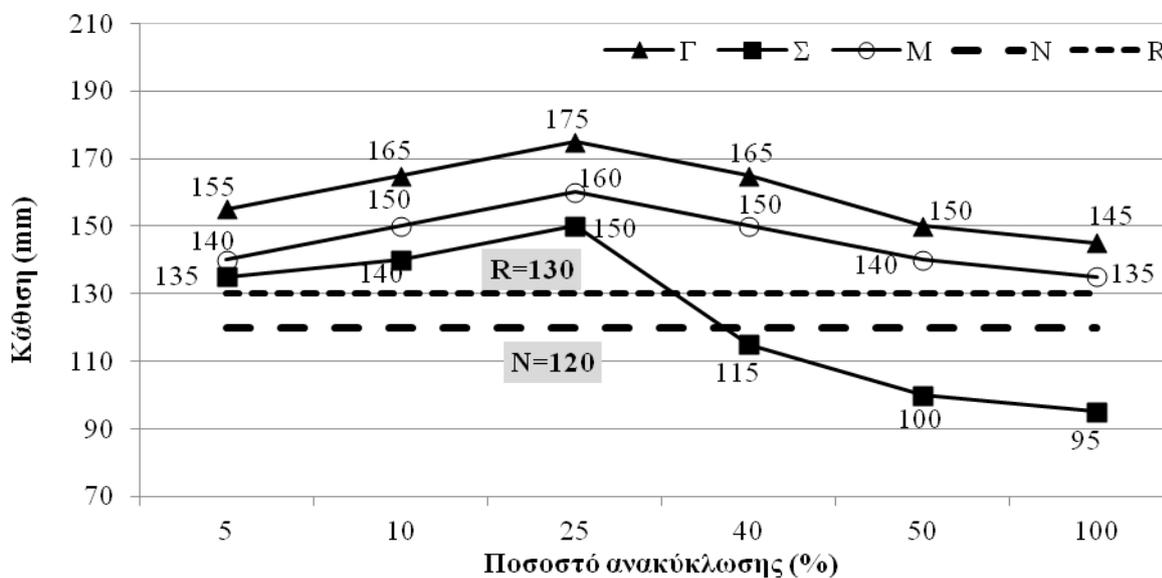
2.1 Δοκιμές ελέγχου

Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm, τα οποία συντηρήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης (20 ± 2 °C και $R > 95$ %) μέχρι τις 28 ημέρες και μετά αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου. Μετρήθηκε η εργασιμότητα των μειγμάτων, η χαρακτηριστική τους αντοχή, η θλιπτική αντοχή στις 7, 28 και 90 ημέρες με άμεσες μεθόδους και η θλιπτική αντοχή στις 28 και 90 ημέρες με έμμεσες μεθόδους (κρουσίμετρο και ηχώμετρο). Στους 3 μήνες μετρήθηκε και η υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 Εργασιμότητα

Η εργασιμότητα μετρήθηκε με την κάθιση και δίνεται στο Σχήμα 2. Παρατηρείται ότι οι τιμές κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα μεταξύ 95 και 175 mm.



Σχήμα 2. Κάθιση (mm) των μειγμάτων

Για ποσοστό ανακύκλωσης μέχρι 25%, όλα τα ανακυκλωμένα μείγματα παρουσιάζουν υψηλότερη του συμβατικού εργασιμότητα (10-50%), η οποία μάλιστα αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης. Η περαιτέρω, όμως, αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης μειώνει την εργασιμότητα των μειγμάτων, παρόλα αυτά τα μείγματα στα οποία υπάρχει ανακυκλωμένο γαρυπίλι (μείγματα Γ, Μ και R) παρουσιάζουν υψηλότερη του συμβατικού εργασιμότητες (10-30%).

Τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν υψηλή απορροφητικότητα λόγω της προσκολλημένης σε αυτά παλιάς τσιμεντοκονίας. Θα αναμενόταν, συνεπώς, μικρότερη του συμβατικού εργασιμότητα. Παρόλα αυτά, η τιμή της απορροφητικότητάς τους προσδιορίζεται με δοκιμές που απαιτούν 24ωρη παραμονή σε νερό. Επομένως στη μικρή διάρκεια της προύγρανσης και της ανάμειξης, αδυνατούν να απορροφήσουν τόσο μεγάλη ποσότητα νερού και έτσι το επιπλέον νερό οδηγεί σε αύξηση της εργασιμότητας. Από ένα σημείο και μετά όμως, η αδρή και γωνιώδης υφή της επιφανείας τους (εσωτερική τριβή των κόκκων) και η αύξηση του ποσοστού της προσκολλημένης παλιάς τσιμεντόπαστας, απαιτεί περισσότερο νερό και ενέργεια για πλήρη συμπύκνωση, συνεπώς η εργασιμότητα μειώνεται. Αυτός μάλλον είναι και ο λόγος που τα μείγματα Γ παρουσιάζουν υψηλότερη εργασιμότητα, ενώ το μείγμα με ολικώς ανακυκλωμένα αδρανή την μικρότερη. Βέλτιστο ποσοστό ανακύκλωσης, όσον αφορά την εργασιμότητα, για όλα τα μείγματα είναι το 25%.

3.2 Χαρακτηριστική αντοχή των μειγμάτων

Στον πίνακα 3, δίνεται η κατηγορία αντοχής των μειγμάτων, όπως προέκυψε από τη θραύση 6 κύβων ακμής 15 cm, σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN206-1 για μη πιστοποιημένο σκυροδέμα.

Πίνακας 3. Κατηγορίες αντοχής των μειγμάτων

Μείγματα	Ποσοστό (%) ανακύκλωσης						
		5	10	25	40	50	100
Γ	-	C26/32	C26/32	C26/32	C25/30	C20/25	C20/25
Σ	-	C26/32	C26/32	C28/35	C26/32	C25/30	C26/32
Μ	-	C25/30	C25/30	C26/32	C25/30	C25/30	C25/30
N	C30/37	-	-	-	-	-	-
R	C20/25	-	-	-	-	-	-

Όλα τα μείγματα εμφανίζουν χαρακτηριστική αντοχή μικρότερη από τη χαρακτηριστική αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος και ίση ή μεγαλύτερη από την αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης. Η ολική αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών με ανακυκλωμένα (R) δίνει την μικρότερη κατηγορία αντοχής. Τα μείγματα με αντικατάσταση των σκύρων τους με ανακυκλωμένα (Σ) παρουσιάζουν τις υψηλότερες χαρακτηριστικές αντοχές, ενώ η χαρακτηριστική αντοχή των μειγμάτων με ανακυκλωμένο γαρμπίλι (Γ) είναι η χαμηλότερη, αλλά μόνο όταν το ποσοστό αντικατάστασης είναι πάνω από 40%. Φαίνεται πάντως ότι για όλα τα μείγματα, βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης είναι το 25%.

3.3 Θλιπτική αντοχή

Στον Πίνακα 4 δίνεται η θλιπτική αντοχή των μειγμάτων ως μέσος όρος τριών κυβικών δοκιμίων στις 7 και 90 ημέρες και ως μέσος όρος 6 κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες.

Πίνακας 4. Θλιπτική αντοχή (MPa) των μειγμάτων

Μείγματα	7 Ημέρες			28 ημέρες			90 ημέρες		
	N	R		N	R		N	R	
N	38,0			46,7			50		
R	23,3			36,0			37		
Ανακύκλωση (%)	Γ	Σ	Μ	Γ	Σ	Μ	Γ	Σ	Μ
5	35,8	36,8	35,4	41,1	43,0	41,7	41,5	45,9	42,2
10	35,4	36,3	35,3	40,4	43,1	40,9	40,9	45,3	41,3
25	34,1	35,4	34,6	39,3	40,8	40,0	40,4	42,8	41,3
40	33,4	35,2	33,6	37,7	40,0	39,1	39,0	42,1	40,8
50	33,4	34,2	33,0	37,6	39,6	38,7	38,8	41,4	40,5

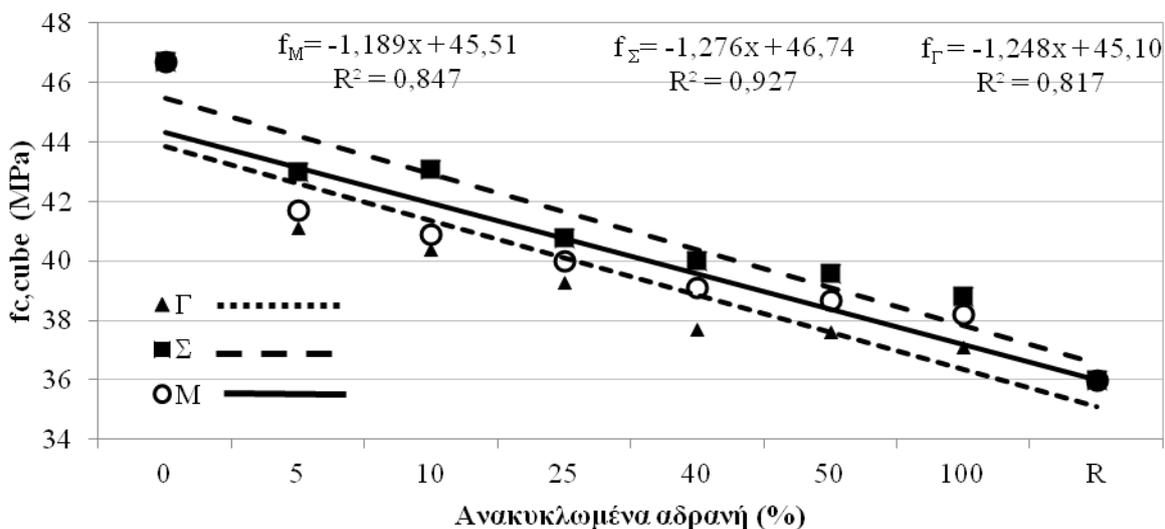
Οι αντοχές των μειγμάτων με ανακυκλωμένο γαρμπίλι (Γ) κυμάνθηκαν από 35,8 έως 41,5 ΜΡα, των μειγμάτων με ανακυκλωμένα σκύρα (Σ) από 36,8 έως 45,9 ΜΡα, ενώ τα μείγματα με μεικτή ανακύκλωση (Μ) παρουσίασαν αντοχές από 35,4 έως 42,2 ΜΡα. Το συμβατικό σκυρόδεμα (Ν) παρουσίασε τις υψηλότερες αντοχές από 38 έως 50 ΜΡα και το ολικώς ανακυκλωμένο (R) τις μικρότερες από 23,3 έως 37 ΜΡα.

Πίνακας 5. Απώλειες (%) της θλιπτικής αντοχής των ανακυκλωμένων μειγμάτων σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα

% Ανακύκλωση	7 Ημέρες			28 ημέρες			90 ημέρες		
	Γ	Σ	Μ	Γ	Σ	Μ	Γ	Σ	Μ
5	6	3	7	12	8	11	16	7	15
10	7	4	7	13	8	12	17	8	17
25	10	7	9	16	13	14	18	14	17
40	12	7	12	19	14	16	21	15	18
50	12	10	13	19	15	17	22	16	18
100	38	31	32	21	17	18	23	18	21
R	39	39	39	23	23	23	25	25	25

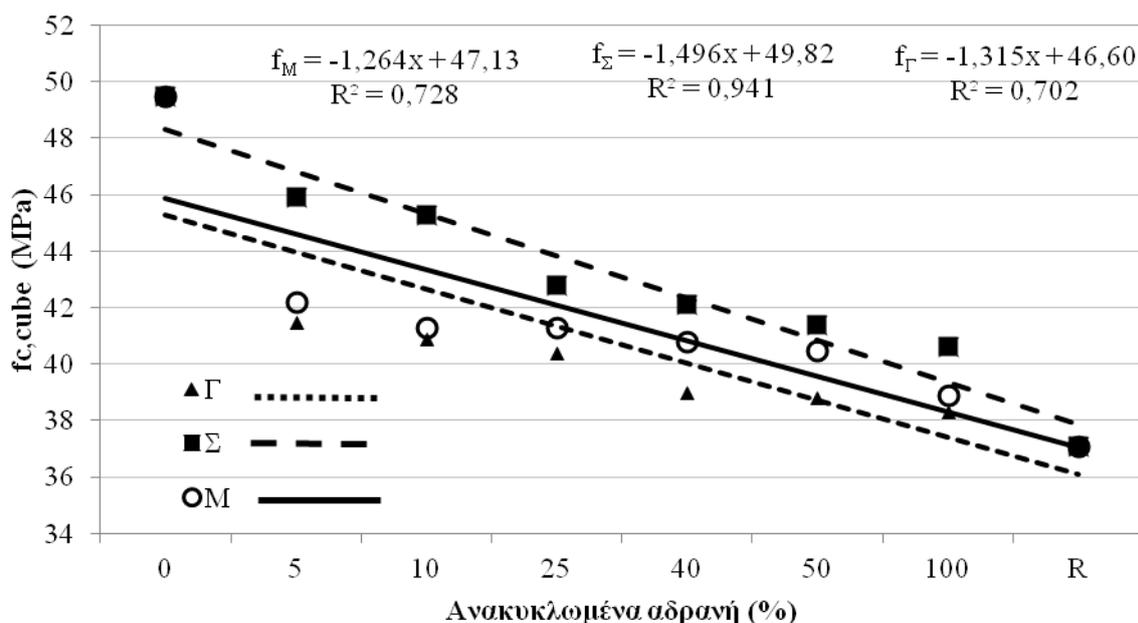
Η θλιπτική αντοχή θεωρείται ως μια πολύ σημαντική ιδιότητα, επειδή συνήθως δίνει μια εικόνα της ποιότητας του σκυροδέματος και συνδέεται άμεσα με όλες σχεδόν τις υπόλοιπες ιδιότητες. Παρατηρείται ότι τα μείγματα Γ, Σ και Μ παρουσιάζουν αντοχές από 3 έως 38% μικρότερες του συμβατικού σκυροδέματος (Πίνακας 5), ενώ το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα όλα τα χονδρόκοκκα αδρανή (R) παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απώλειες, από 23 έως 39%. Φαίνεται δε, ότι για ποσοστά αντικατάστασης έως 50%, οι διαφοροποιήσεις με το συμβατικό σκυρόδεμα είναι μικρότερες στις 7 ημέρες (3-13%), αλλά αυξάνονται στις μεγαλύτερες ηλικίες (7-22%). Για μεγαλύτερα του 50% ποσοστά αντικατάστασης, οι απώλειες αντοχών, σε σχέση με το συμβατικό, μικραίνουν με το χρόνο.

Μεταξύ των ανακυκλωμένων μειγμάτων, το μείγμα με ανακυκλωμένα μόνο τα σκύρα (Σ) παρουσιάζει τις μικρότερες απώλειες σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Για ποσοστό δε αντικατάστασης έως 10%, η μείωση είναι μόνο έως 8%, ενώ για ποσοστό αντικατάστασης μέχρι 50%, η μείωση είναι έως 16%. Τα άλλα μείγματα δεν διαφοροποιούνται πολύ μεταξύ τους, με το μείγμα Μ να υπερέρχει ελαφρώς.



Σχήμα 3. Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων σε σχέση με το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών. Ηλικία 28 ημερών

Όσον αφορά το βέλτιστο ποσοστό ανακύκλωσης, όσο αυτό αυξάνεται, οι αντοχές μειώνονται, ανεξάρτητα από το ποιό κλάσμα των χονδρόκοκκων συμβατικών αδρανών αντικαθίσταται. Στα Σχήματα 3 και 4 φαίνεται η τάση μείωσης με την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης και δίνεται η σχέση που συνδέει το ποσοστό ανακύκλωσης με τη θλιπτική αντοχή στις 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα. Ο συντελεστής συσχέτισης $R^2 > 0,7$ είναι αρκετά υψηλός.



Σχήμα 4. Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων σε σχέση με το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών. Ηλικία 90 ημερών

Η θλιπτική αντοχή εξαρτάται από την αντοχή των αδρανών, την αντοχή της τσιμεντόπαστας και από την διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντόπαστας. Η ρηγμάτωση - και επομένως η αστοχία- θα ξεκινήσει από το ασθενέστερο σημείο, που στα συμβατικά σκυροδέματα συνήθως είναι η διεπιφάνεια. Η δομή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων είναι πιο σύνθετη. Καταρχάς υπάρχουν δύο διεπιφάνειες: α) μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της νέας τσιμεντόπαστας και β) μεταξύ ανακυκλωμένων αδρανών και της παλιάς προσκολλημένης τσιμεντόπαστας. Αυτές οι διεπιφάνειες, ως ασθενέστερες καθορίζουν και την αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον όμως, τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν και υψηλό πορώδες αλλά και ρηγματώσεις που οφείλονται στη διαδικασία θραύσης τους. Συνεπώς και τα ίδια τα ανακυκλωμένα αδρανή αποτελούν ασθενή σημεία στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα και έτσι είναι φυσικό η θλιπτική αντοχή να μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού τους στο μείγμα.

3.4 Έμμεσες μέθοδοι

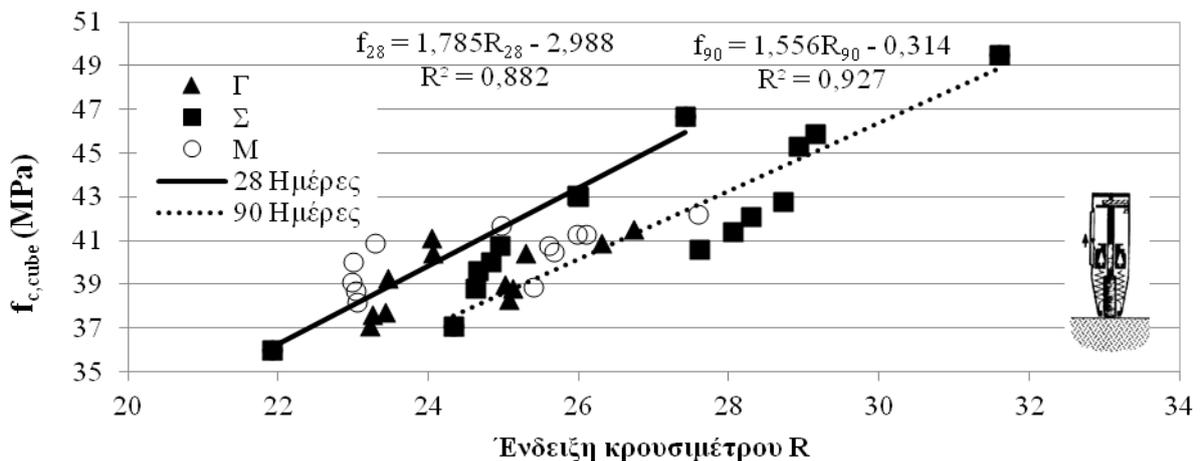
Στον Πίνακα 6 δίνονται τα αποτελέσματα των έμμεσων μεθόδων στις 28 και 90 ημέρες.

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των έμμεσων δίνουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα με αυτά από τη θραύση των δοκιμίων. Με γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θραύση των δοκιμίων και των αποτελεσμάτων των έμμεσων, προκύπτουν καμπύλες συσχέτισης της αντοχής με τις έμμεσες, που δίνονται στα σχήματα 5 και 6. Η

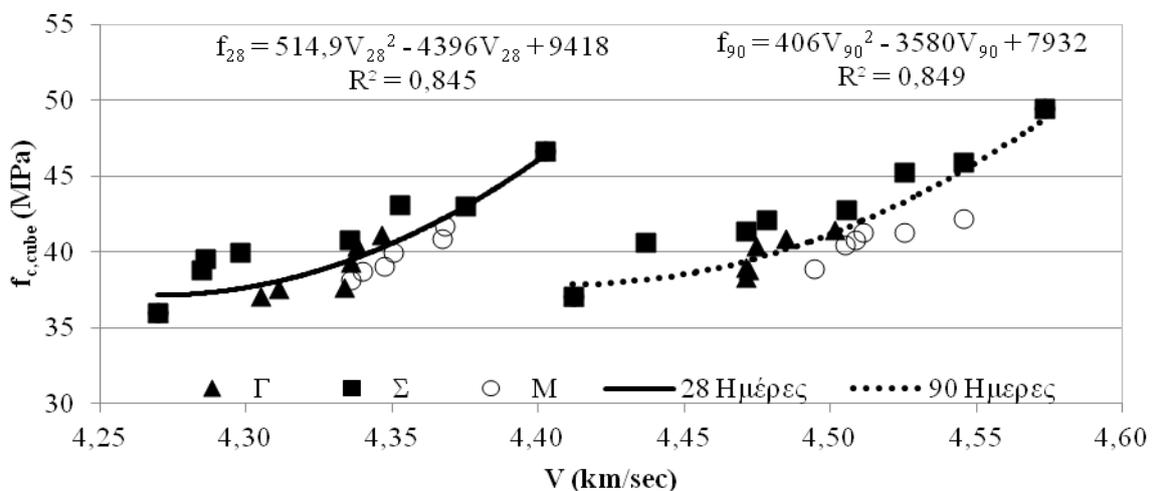
συσχέτιση μεταξύ θλιπτικής αντοχής και αναπήδησης κρουσιμέτρου είναι γραμμική με συντελεστή συσχέτισης $R^2 > 0,88$, ενώ η συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και ταχύτητας υπερήχων είναι πολυωνυμική με $R^2 > 0,84$.

Πίνακας 6. Αναπήδηση κρουσιμέτρου και ταχύτητα υπερήχων (km.sec) των μειγμάτων

Μείγματα	Αναπήδηση R						V (km/sec)					
	28 ημέρες			90 ημέρες			28 ημέρες			90 ημέρες		
	Γ	Σ	M	Γ	Σ	M	Γ	Σ	M	Γ	Σ	M
N	27,4			31,6			4,40			4,57		
R	21,9			24,3			4,27			4,41		
5	24,0	26,0	25,0	26,7	29,1	27,6	4,35	4,38	4,37	4,50	4,55	4,55
10	24,1	26,0	23,3	26,3	28,9	26,1	4,34	4,35	4,37	4,48	4,53	4,52
25	23,5	24,9	23,0	25,3	28,7	26,0	4,34	4,34	4,35	4,47	4,51	4,51
40	23,4	24,8	23,0	25,0	28,3	25,6	4,33	4,30	4,35	4,47	4,48	4,51
50	23,3	24,7	23,0	25,1	28,0	25,7	4,31	4,29	4,34	4,47	4,47	4,50
100	23,2	24,6	23,1	25,1	27,6	25,4	4,30	4,28	4,34	4,47	4,44	4,49



Σχήμα 5. Σχέση αντοχής - ένδειξης R του κρουσιμέτρου όλων των μειγμάτων στις 28 και 90 ημέρες

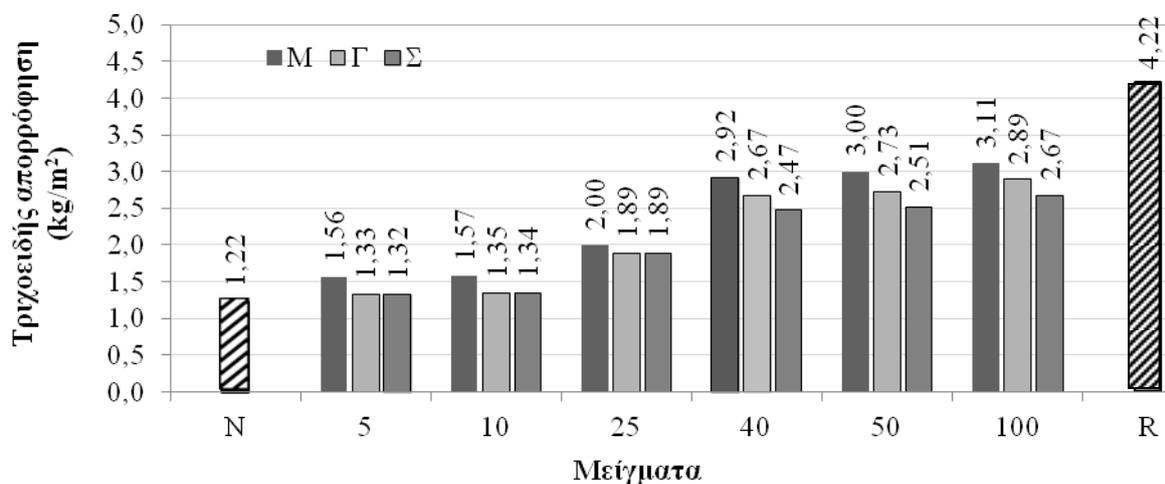


Σχήμα 6 Σχέση αντοχής - ταχύτητας υπερήχων των μειγμάτων

3.5 Τριχοειδής απορρόφηση

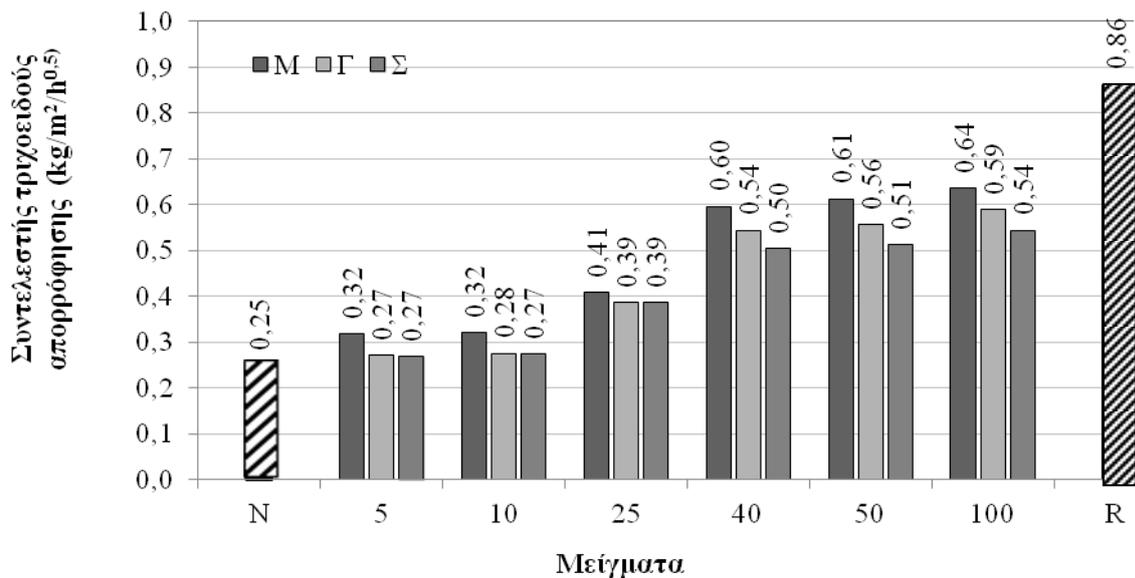
Ο ρυθμός μεταφοράς του νερού καθώς και η ποσότητα απορρόφησης καθορίζονται από το πορώδες, το μέγεθος των πόρων και τη συνδεσιμότητά τους. Μια ένδειξη για τις παραπάνω παραμέτρους λαμβάνεται με την μέτρηση της τριχοειδούς απορρόφησης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην ηλικία των 90 ημερών, με βάση τον κανονισμό RILEM TC 116.

Στο σχήμα 7 δίνεται η τριχοειδής απορρόφηση των μειγμάτων, που αντιστοιχεί σε mm ανύψωσης του νερού μέσα στη μάζα των μειγμάτων, ενώ στο σχήμα 8 δίνεται ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης, που αντιστοιχεί στο μέσο ρυθμό απορρόφησης του νερού στη διάρκεια ενός 24ώρου.

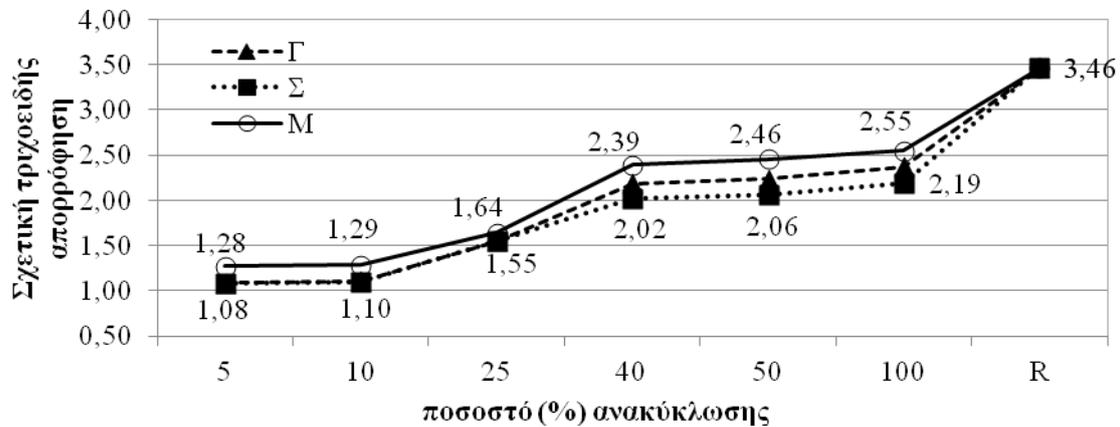


Σχήμα 7. Τριχοειδής απορρόφηση (kg/m^2) των μειγμάτων

Όπως είναι αναμενόμενο, η τριχοειδής απορρόφηση των ανακυκλωμένων μειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερη του συμβατικού σκυροδέματος και αποδίδεται στην υψηλότερη απορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών σε σχέση με τα συμβατικά. Το υψηλό πορώδες της παλιάς προσκολλημένης τσιμεντόπαστας έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο ρυθμό απορρόφησης και προκαλεί την υψηλότερη υδατοαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων μειγμάτων. Επομένως η ύπαρξη ανακυκλωμένων αδρανών κάνει το σκυρόδεμα περισσότερο απορροφητικό. Η απορροφητικότητα εξάλλου απαιτεί συνδεδεμένες και ανοικτές ρωγμές και τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν τέτοιες ρωγμές εξ αιτίας της διαδικασίας θραύσης τους.

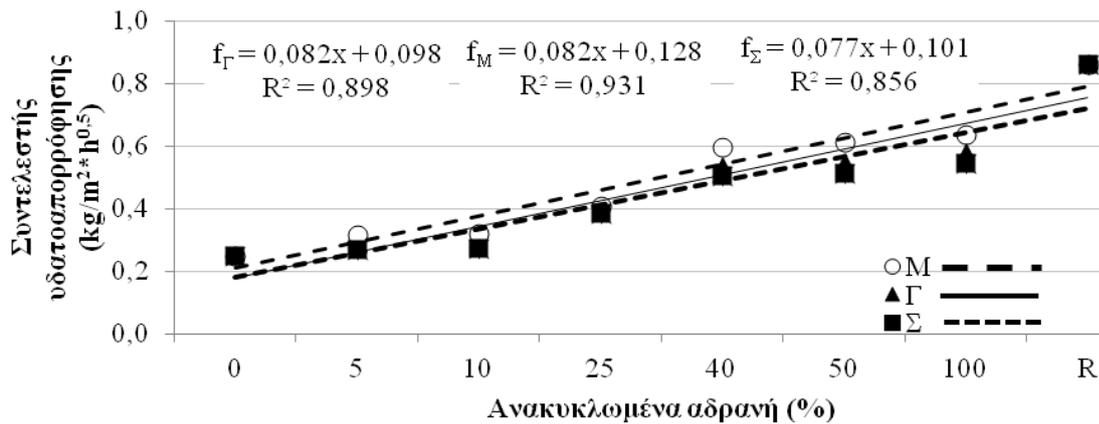


Σχήμα 8. Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}^{0,5}$) των μειγμάτων



Σχήμα 9. Υδατοαπορροφητικότητα σε σχέση με την απορροφητικότητα του συμβατικού

Παρατηρείται επομένως αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης όσο αυξάνεται το ποσοστό ανακύκλωσης. Την μεγαλύτερη απορροφητικότητα παρουσιάζουν τα μείγματα M, που είναι έως και 2,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του συμβατικού (Σχήμα 9), ενώ την μικρότερη τα μείγματα Σ (έως και διπλάσια από αυτή του συμβατικού), τα οποία παρουσίασαν και τις υψηλότερες θλιπτικές αντοχές. Πάντως, για ποσοστό αντικατάστασης μέχρι 10%, η υδατοαπορροφητικότητα είναι από 10 έως 29% μεγαλύτερη του συμβατικού, ενώ για ποσοστό αντικατάστασης έως 25%, η αντίστοιχη αύξηση είναι μέχρι 64%. Το ολικώς ανακυκλωμένο μείγμα παρουσίασε 3,5 φορές μεγαλύτερη απορροφητικότητα.



Σχήμα 10. Συσχέτιση του συντελεστή υδατοαπορρόφησης με το ποσοστό ανακύκλωσης

Στο σχήμα 10, δίνεται ο συσχετισμός του ποσοστού ανακύκλωσης με το συντελεστή υδατοαπορρόφησης, συσχέτιση που θεωρείται ικανοποιητική, αφού ο συντελεστής $R^2 > 0,85$

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Όλα τα μείγματα εμφανίζουν χαρακτηριστική αντοχή μικρότερη από την χαρακτηριστική αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος και ίση ή μεγαλύτερη από την αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης.
- Η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των συμβατικών με ανακυκλωμένα αδρανή αυξάνει τις απώλειες της θλιπτικής αντοχής και αυξάνει την τριχοειδή απορρόφηση.
- Η ολική αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών (μείγματα R) είναι η δυσμενέστερη, μειώνοντας την θλιπτική αντοχή 25 έως 39% και αυξάνοντας την τριχοειδή απορρόφηση έως 3,5 φορές.
- Ευνοϊκότερα μείγματα αυτά με αντικατάσταση μόνο των σκύρων με ανακυκλωμένα (μείγματα Σ). Η χρήση έως 10% ανακυκλωμένων σκύρων μειώνει τη θλιπτική αντοχή μόνο έως 7% και αυξάνει την υδατοαπορροφητικότητα μόνο έως 10%. Στα ίδια μείγματα, η αντικατάσταση μέχρι 25% μειώνει την αντοχή έως 14%, αυξάνει την τριχοειδή απορρόφηση κατά 55% και επιδρά πολύ θετικά στην εργασιμότητα.
- Τα μείγματα M και Γ δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα.
- Δίνονται σχέσεις βαθμονόμησης των έμμεσων μεθόδων και σχέσεις που συνδέουν την θλιπτική αντοχή ή την υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων με το ποσοστό ανακύκλωσης, με ικανοποιητικούς συντελεστές συσχέτισης ($R^2 = 0,70 \div 0,93$).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbas A., Fathifazl, G., Fournier, B., Isgor, O.B., Zavadil, R. & Razaqpur, A.G. (2009). Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. *Mater Charact*, Vol. 60, No 7, pp 716–728.
- Belen, G.F., Fernando, M.A., Diego, C.L., & Sindy, S.P. (2011). Stress–strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Constr Build Mater*, Vol. 25, No 5, pp 2335–2342.
- Belin P., Habert, G., Thiery, M. & Roussel, N. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. (2013). *Mater Struct*, pp 1–15.

- Berndt, M.L. (2009). Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Constr Build Mater*, Vol. 23, No 7, pp 2606–2613.
- Cabral, A.E.B., Schalch, V., Molin, D.C.C.D. & Ribeiro, J.L.D. (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater*, Vol. 24, No 4, pp 421–430.
- Caggiano, A., Etse, G. & Martinelli, E. (2012). Zero-thickness interface model formulation for failure behavior of fiber-reinforced cementitious composites. *Comput Struct* Vol. pp 23–32.
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled concrete coarse aggregates. *Constr Build Mater*, Vol. 24, No 9, pp 1616–1620.
- Corinaldesi, V. & Moriconi, G. (2009). Behavior of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Constr Build Mater*, Vol. 23, pp 289–294.
- Dilbas, H., Simsek, M & Cakır O. (2014). An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Constr Build Mater*. Vol. 61, pp 50–59.
- Etse, G., Caggiano, A. & Vrech, S.(2012). Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. *Int J Fract*, Vol. 178, No 1–2, pp 131–146.
- European Council (2008). *EC Directive 2008/98/CE on waste and repealing certain Directives*. Offic J Eur Union.
- European Environment Agency. 2007. Europe’s environment-The fourth assessment. *OPOCE (Office for Official Publications of the European Communitie)*. Ανακτήθηκε τον Απρίλιο του 2014 από: <http://www.eea.europa.eu/>.
- Kanellopoulos, A., Nicolaidis, D. & Petrou, F.M. (2014). Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol.53, pp 253–259
- Lee, G.C & Choi, H.B. (2013). Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. *Constr Build Mater*, Vol. 40, pp 455–460
- Lima, C., Caggiano, A., Faella, C., Martinelli, E., Pepe, M. & Realfonzo, R. (2013). Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. *Constr Build Mater*, Vol.47, pp 547–559.
- McNeil, K. & Kang, T.H.-K.(2013). Recycled concrete aggregates: a review. *Int J Concr Struct Mater*, Vol. 7, No 1, pp 61–69.
- Mehta, P.K. (1999). Concrete technology for sustainable development. *Concrete International*, Vol. 1, pp 47–53.
- Mehta, P.K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, Vol.24, pp 23–28.
- Pepe M., Filho, R.D.T., Koenders, E.A.B. & Martinelli E. (2014). Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, Vol.69, pp 124–132.
- Tam, V.W.Y. (2008). Economic comparison of concrete recycling: a case study approach. *Resour Conserv Recy*, Vol.52, pp. 821–828.
- Toledo, F.R.D., Koenders, E.A.B, Pepe, M., Cordeiro, G.C., Fairbairn, E.M.R. & Martinelli, E. (2013). Rio 2016 sustainable construction commitments lead to new developments in recycled aggregate concrete. *Civil Eng Spec Issue*, pp 166(CE6).
- Xiao J., Li, W., Corr, D.J. & Shah, S.P. (2013). Effects of interfacial transition zones on the stress–strain behaviour of modelled recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res*, Vol. 52, pp 82–99.
- Yong, P.C. & Teo, D.C.L. (2009). Utilisation of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete. *UNIMAS E-J Civ Eng*, Vol. 1, pp 1.

Πόσο δύσκολη είναι η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας

Z. Ρίζου, Δ. Σιδηρόπουλος

ΑΝΦΛΩ

Λέξεις κλειδιά: πολύπλευρο εγχείρημα, ολοκληρωτική διαχείριση, κρατική παρέμβαση, οργανωτική καινοτομία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας είναι ένα ζήτημα με πολλές πτυχές: τεχνικές, οργανωτικές, διοικητικές, οικονομικές, κοινωνικές, οργανωτικές κλπ. Τα τεχνικά προβλήματα έχουν βασικά επιλυθεί κυρίως με την Υπουργική Απόφαση που εγκρίνει την Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή «ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΙΠΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΦΡΕΣ» και δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 651B/18-4-2007, Τα υπόλοιπα ζητήματα απαιτούν στιβαρή κρατική παρέμβαση και αποφασιστική βοήθεια από αυτούς που ξέρουν και μπορούν να βοηθήσουν.

How difficult is the utilization of fly ash

Z. Rizos, D.. Sidiropoulos

ANFLO

Keywords: multi-faceted project, complete management, State intervention, organizational innovation

ABSTRACT: The use of fly ash is an issue with many aspects: technical, organizational, administrative, economic, social, organizational etc. The technical problems have basically resolved primarily by the Ministerial Decision approving the National Technical Specification 'GREEK FLYING ASH "and published in Gov. 651V / 18.04.2007, The other issues require strong government intervention and decisive help from those who know and can help.

Ότι φαίνεται σχεδόν αδύνατο συνήθως χρειάζεται πιο μεγάλη προσπάθεια

Κάποιοι που γνωρίζαμε τις δυνατότητες της Ιπτάμενης Τέφρας μετά την δημοσίευση της Υπουργικής Απόφασης που ενέκρινε την Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή «ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΠΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΦΡΕΣ» στο ΦΕΚ πιστεύαμε ότι θα γίνει μαζική χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας σε γνωστούς και νέους τομείς αλλά μετά από οκτώ χρόνια λίγα πράγματα άλλαξαν. Τι φταίει γι' αυτό;

Ένα ζήτημα είναι ότι πρόκειται για πολύπλευρο εγχείρημα που οι σημαντικότερες πλευρές του είναι:

A) Τεχνικές: Είναι εφικτή με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις (και αυτές που μπορούμε να κατασκευάσουμε), τις προδιαγραφές και τεχνικές μελέτες η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας;

B) Διοικητικές: Είναι εφικτή η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας με την υπάρχουσα νομοθεσία, τους κανονισμούς και τη γνώση των μηχανικών ;

Γ) Οικονομικές: Πόσο δύσκολη είναι η εξασφάλιση των πόρων για τις απαιτούμενες επενδύσεις;

Δ) Κοινωνικές: Ποιοί ωφελούνται, ποιοι χάνουν, τα προβλήματα και οι κοινωνικές πλευρές της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας.

E) Οργανωτικές. Η δομή του τομέα των κατασκευών στην Ελλάδα και η δομή του τομέα των οικοδομικών υλικών πως επηρεάζουν την χρήση της ιπτάμενης τέφρας;

Αν οι παραπάνω πλευρές δεν εμφανίζουν σοβαρά προβλήματα γιατί δεν αξιοποιείται η ιπτάμενη τέφρα στην Ελλάδα όσο αλλού ; Στις ΗΠΑ, τις βιομηχανικές χώρες ακόμα και στις αναδυόμενες οικονομίες η ΙΤ αξιοποιείται σε ποσοστά πολλαπλάσια του βαθμού αξιοποίησης στην Ελλάδα. Στις ΗΠΑ υπάρχει ένας δραστήριος φορέας που συσπειρώνει παραγωγούς και χρήστες ΙΤ και συνεργάζεται και με Πανεπιστήμια και με κρατικούς φορείς αλλά και αντίστοιχους φορείς στο εξωτερικό. Υπάρχουν εταιρείες που χρησιμοποιούν την ΙΤ σαν βασικό υλικό σε προκατασκευές και ετοιμάζονται σχετικές προδιαγραφές. Στην Ευρώπη (και όχι μόνο στην ΕΕ) υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια δραστήριοι φορείς και Πανεπιστήμια. Στην Ινδία υπάρχει αυστηρή νομοθεσία που υποχρεώνει τους παραγωγούς ΙΤ να διαθέτουν ένα ποσοστό για χρήση με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή τούβλων σε συνδυασμό με ασβέστη. Η Κίνα που δεν αφήνει τίποτα να πέσει κάτω όχι μόνο αξιοποιεί την δική της ΙΤ αλλά και παράγει πολλά μηχανήματα απαραίτητα για την αξιοποίηση της ΙΤ. Στην Ελλάδα, που η ιδιομορφία της Ελληνικής τέφρας (ασβεστούχα) την κάνει ακόμα πιο χρήσιμη από τις άλλες Ευρωπαϊκές (πυριτική) η ΙΤ χρησιμοποιείται μόνο από τις τσιμεντοβιομηχανίες για της συνάλεση με το κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ. Τι άλλο μπορεί να γίνει;

Ας ξεκινήσουμε με μία ενδεικτική καταγραφή των πιθανών χρήσεων της.

Εύλογος λογικός και νόμιμος στόχος είναι η ολοκληρωτική διαχείριση της Ι.Τ. Ενδεικτικά:

- Αποθήκευση για μελλοντική χρήση
- Χρήση σε κατασκευή επιχωμάτων
- Χρήση σε υποκατάσταση αδρανών υλικών στην κατασκευή υπόβασης και βάσης έργων οδοποιίας.
- Χρήση σαν υλικό επανεπίχωσης σκαμμάτων σωληνώσεων (π.χ. στον ΤΑΠ)
- Χρήση σαν υλικό επίχωσης
- Χρήση σε εξυγίανση εδαφών
- Χρήση σε εξουδετέρωση όξινων εδαφών
- Χρήση σε εμπλουτισμό εδαφών
- Χρήση για λήψη χρήσιμων στοιχείων
- Χρήση για διαχείριση ενεργού ιλύος

- Χρήση σε οδοστρωσία
- Χρήση σε υποστήριξη και αποκατάσταση ορυχείων
- Χρήση σε υποκατάσταση τσιμέντου
- Σε ενέματα
- Σε κατασκευή φραγμάτων RCC
- Σε τοίχους αντιστήριξης
- Σε προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία (για κατασκευές κτιρίων, για αρχιτεκτονική τοπίου, σταθεροποίηση εδαφών, προστασία πρανών, συστήματα προστασίας καναλιών, επιφανειακή προστασία απορροών, για δημιουργία τεχνικών έργων, κυβόλιθοι, έργα διαχείρισης νερού, κλπ)
- Διαμόρφωση-ανάδειξη-διαχείριση τοπίων
- Κατασκευή έργων παραγωγής ενέργειας
- Μνημειακά έργα
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Αφροπετόν (AAC)
- Alfa Block, YTONG
- Προκατασκευασμένα στοιχεία
- Τσιμεντοσωλήνες
- Τούβλα από σκυρόδεμα
- Τούβλα από IT
- Τούβλα από αφροπετόν (AAC)
- Μονωτικά στοιχεία από αφροπετόν και παραπροϊόντα της πρωτογενούς οικονομίας
- Χρηστικά αντικείμενα
- Πλάκες πεζοδρομίων
- Κυβόλιθους
- Άκαμπα οδοστρώματα
- Έτοιμο μίγμα για σοβάδες και άλλες χρήσεις

Οι τεχνικές πλευρές της αξιοποίησης της IT αφορούν:

- Την ύπαρξη εγκαταστάσεων μετατροπής της IT σε τεφροκονία (εργαστηριακός έλεγχος, λειοτρίβηση και ομογενοποίηση του προϊόντος). Τέτοιες εγκαταστάσεις στην χώρα μας έχουν οι τσιμεντοβιομηχανίες και η POWDER Ltd που βρίσκεται στην Οινόη Κοζάνης.
- Την ύπαρξη και πλατιά γνώση της σχετικής τεχνογνωσίας (καθοριστικό ρόλο παίζουν τα εκπαιδευτικά ιδρύματα, το ΤΕΕ κλπ)
- Την ύπαρξη εγκαταστάσεων αξιοποίησης της IT.
- Την ύπαρξη τεχνικών προδιαγραφών
- Την ύπαρξη τεχνικών μελετών.
- Την δημιουργία νέων ή βελτιωμένων σχεδίων κατασκευής έργων ή αντικειμένων με βάση την IT. Έμφαση δίνεται στο σχεδιασμό χρηστικών αντικειμένων ή έργων προστιθέμενης αξίας με αξιοποίηση του μοντέρνου σχεδιασμού (design).
- Τις βελτιωμένες ιδιότητες του σκυροδέματος με χρήση IT όσον αφορά την ενυδάτωση, τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, τις παραμορφώσεις στα ογκώδη έργα σκυροδέματος κλπ

Οι διοικητικές πλευρές της αξιοποίησης της IT αφορούν την υπάρχουσα νομοθεσία, τους κανονισμούς και τη γνώση των μηχανικών. Υπάρχουν σοβαρά κενά σ' αυτό τον τομέα και υπάρχει πολλή δουλειά να γίνει από το κράτος και ειδικότερα την τριτοβάθμια εκπαίδευση, το ΤΕΕ και τους φορείς των κατασκευαστών.

Οι Οικονομικές πλευρές της αξιοποίησης της IT αφορούν την εξασφάλιση των πόρων για τις απαιτούμενες επενδύσεις. Είναι απαραίτητη μια λεπτομερής ανάλυση των αναγκών της Ελληνικής οικονομίας σε έργα υποδομής και παραγωγικές μονάδες που χρειάζονται την IT. Εμείς στην ΑΝΦΛΩ το συζητάμε συχνά και έχουμε μια εικόνα αλλά σε προκαταρκτικό επίπεδο (διαχείριση του νερού με φράγματα (RCC ή συμβατικά από μπετό), άκαμπτα οδοστρώματα, οικοδομικά υλικά, εξυγίανση ή εμπλουτισμός εδαφών, λήψη χρήσιμων στοιχείων κλπ)

Οι κοινωνικές πλευρές της αξιοποίησης της IT αφορούν το ποιοί ωφελούνται, ποιοι χάνουν, τα προβλήματα και τις κοινωνικές πλευρές της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας. Σε περίοδο βαθείας και παρατεταμένης οικονομικής κρίσης φαίνεται ότι μια ενιαία, επιστημονικά σχεδιασμένη και με βάση τις ανάγκες του Ελληνικού λαού και της Ελληνικής οικονομίας αξιοποίηση της IT θα έχει μόνο κερδισμένους. Θα κερδίσει η ΔΕΗ η οποία σήμερα πληρώνει για την διάθεση της IT και απειλείται με πρόστιμα από τον φόρο του διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης θα εξοικονομήσει εκτάσεις που σήμερα είναι απαραίτητες για την διάθεση της IT. Θα κερδίσουν οι τσιμεντοβιομηχανίες οι οποίες θα δουν τον κύκλο εργασιών τους να ανεβαίνει με την πλατύτερη χρήση της IT και άρα μείωση της τιμής του τσιμέντου. Θα κερδίσει ο κατασκευαστικός κλάδος με τα καινούργια έργα και τις παραγωγικές μονάδες που θα κατασκευαστούν. Θα ανέβει η απασχόληση. Με τη χρήση του αφρομπετόν (AAC) θα υπάρξει εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Με την κατασκευή άκαμπτων οδοστρωμάτων θα εξοικονομηθεί συνάλλαγμα γιατί δεν θα εισάγεται άσφαλτος αλλά θα χρησιμοποιείται ένα τοπικό υλικό με μεγάλη προστιθέμενη αξία. Με τα προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία θα αναπτυχθεί ο τομέας «φτιάξτο μόνος σου». Όλα τα παραπάνω θα έχουν θετικές συνέπειες στην Ελληνική οικονομία και θα δημιουργηθεί ένας κλάδος εξαγωγών με υψηλή εγχώρια προστιθέμενη αξία.

Οι οργανωτικές πλευρές της αξιοποίησης της IT αφορούν τη δομή του τομέα των κατασκευών στην Ελλάδα και τη δομή του τομέα των οικοδομικών υλικών. Ο κατασκευαστικός τομέας των δημόσιων και ιδιωτικών έργων αποτελείται από μικρές και λίγες μεσαίες επιχειρήσεις. Αντίστοιχη είναι η δομή του τομέα των οικοδομικών υλικών. Αυτή η κατάσταση επηρεάζει αρνητικά την δυνατότητα χρήσης της ιπτάμενης τέφρας.

Τι μπορεί να γίνει;

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει είναι η βαθιά ολόπλευρη και λεπτομερής μελέτη της υπάρχουσας κατάστασης που θα αναδείξει τις πραγματικές δυνατότητες αξιοποίησης της IT και τις κατακλυσμαίες αλλαγές που θα φέρει στις κατασκευές και στην οικονομία γενικότερα η αξιοποίηση της IT. Είμαστε σίγουροι ότι αυτή η μελέτη θα αναδείξει την ανάγκη **συσπειρώσεων** και **μακροχρόνιου σχεδιασμού**. Η τεχνολογική και οργανωτική καινοτομία είναι απαραίτητα στοιχεία. Η τεχνολογική καινοτομία είναι αυτονόητα γνωστή γι' αυτό θα γίνει σύντομη αναφορά στην οργανωτική καινοτομία και σε κάποια στοιχεία της.

Σύμφωνα με τον ορισμό του ΟΟΣΑ (Oslo Manual), η **οργανωτική καινοτομία** έγκειται στην εφαρμογή νέων μεθόδων και πρακτικών στις επιχειρησιακές πρακτικές (π.χ. διαχείριση γνώσης), στις διαδικασίες εσωτερικής οργάνωσης και διοίκησης (π.χ. διατομεακές ομάδες) και στον σχεδιασμό των εξωτερικών σχέσεων με πελάτες και προμηθευτές (π.χ. στρατηγική συνεργασία με τους προμηθευτές). Η **Βιομηχανική Συμβίωση** είναι ένα εργαλείο για την προώθηση της περιβαλλοντικής αειφορίας στη διασταύρωση της μηχανικής, της οικολογίας και της οικονομίας. Συγκεκριμένα αποσκοπεί στη συστηματική αύξηση της αποδοτικότητας της ενέργειας και των υλικών που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές διεργασίες με τη δημιουργία ρευμάτων σύνδεσης μεταξύ των διαφορετικών βιομηχανικών μονάδων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών βιομηχανιών για τις οποίες η ύπαρξη της μιας αυξάνει τη βιωσιμότητα των συνεργαζόμενων υπολοίπων και στην οποία η

απαίτηση για εξοικονόμηση πρώτων υλών, ενέργειας και προστασία του περιβάλλοντος είναι ζωτικής σημασίας.

Τα **Συμβιωτικά Δίκτυα** είναι η πρακτική μέσω της οποίας οι εταιρείες συγκεντρώνονται προκειμένου να ανταλλάξουν υλικά, ενέργεια, νερό και υποπροϊόντα. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο μειώνεται το κόστος παραγωγής αλλά προωθείται παράλληλα και η προστασία του περιβάλλοντος. Κλειδί για τη λειτουργία ενός Συμβιωτικού Δικτύου αποτελούν οι δυνατότητες συνεργειών οι οποίες προσφέρονται βάσει της γεωγραφικής εγγύτητας. Κύριοι τύποι συνεργειών σε **Συμβιωτικά Δίκτυα** είναι:

- Συνέργειες σε μια ενιαία αλυσίδα εφοδιασμού.
- Συνέργειες από την κοινή χρήση των υπηρεσιών κοινής ωφελείας,
- Συνέργειες από την τοπική χρήση των υποπροϊόντων (ενέργεια ή/και απόβλητα).

Υπαρκτό παράδειγμα συνεργασίας για την προώθηση της καινοτομίας που ταυτόχρονα ωφελεί τους συμμετέχοντες είναι το σωματείο **"ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ"** με έδρα τη Θεσσαλονίκη. Σκοποί του σωματείου είναι:

α. Η υποστήριξη της ποιότητας των κατασκευών, με μελέτες και κατάθεση προτάσεων ενίσχυσης της θέσης των ποιοτικών εταιρειών και επαγγελματιών του κλάδου.

β. Η υποστήριξη της υγιούς ανάπτυξης του κλάδου των κατασκευών, με μελέτες και κατάθεση προτάσεων διευκόλυνσης των δραστηριοτήτων του.

γ. Η συνεργασία και η ανάπτυξη κοινών δράσεων μεταξύ των μελών του, για την ενίσχυση της νεανικής επιχειρηματικότητας.

Μέσα:

α. Για την επίτευξη των σκοπών και των στόχων του, το σωματείο βασίζεται στην αμοιβαία και αρμονική συνεργασία μεταξύ των μελών του, μέσω τακτικών επαφών, συγκεντρώσεων και ενημερώσεων για την ανταλλαγή ιδεών, απόψεων και πληροφοριών.

β. Το σωματείο μπορεί να διοργανώνει παρουσιάσεις, εκδηλώσεις, σεμινάρια, συνέδρια, ημερίδες και άλλες δράσεις σχετικά με τη βελτίωση των συνθηκών ανάπτυξης του κλάδου, σχετικά με την υποστήριξη των παραγόντων που συντελούν στην ποιότητα των έργων καθώς και για κάθε θέμα που είναι ίδιο η συναφές με τα αναφερόμενα στο άρθρο 2. του παρόντος

γ. Το σωματείο, με γνώμονα την ποιότητα των κατασκευών και συνεκτιμώντας το ιστορικό και φυσικό περιβάλλον της χώρας, θα μελετά και αναζητά τις βέλτιστες λύσεις στα σχετικά προβλήματα του κλάδου. Στη συνέχεια θα προωθεί έγγραφα και προφορικά τις απόψεις και θέσεις του προς την επίσημη Πολιτεία, τους φορείς και την κοινή γνώμη.

δ. Το σωματείο, δύναται να συνάπτει συνεργασίες με ειδικούς επιστήμονες, ειδικές εκτελεστικές, επιστημονικές ή άλλες ομάδες, όπως αυτές θα καθορίζονται από το Δ.Σ. ή τη Γενική Συνέλευση του σωματείου.

ε. Το σωματείο θα αξιοποιεί τις δυνατότητες δημοσιότητας και τις τεχνικές επικοινωνίας με κάθε πρόσφορο τρόπο. Η υλοποίηση, η ποιότητα και η επιτυχία των εκδηλώσεων θα ελέγχεται από την Γ.Σ του σωματείου.

στ. Για την επίτευξη των στόχων του το σωματείο μπορεί να συνεργάζεται με άλλα Σωματεία, ενώσεις προσώπων και Φορείς (Οργανισμούς, Επιμελητήρια, κτλ), στην Ελλάδα και το εξωτερικό.

Εξασφάλιση εξόδων δράσης:

Βασική και απαρέγκλιτη αρχή του σωματείου είναι ότι η έναρξη υλοποίησης κάθε δραστηριότητάς του θα γίνεται μετά από τον πλήρη σχεδιασμό της και την εκ των προτέρων εξασφάλιση των εξόδων της δράσης.

Μέλη του σωματείου είναι μηχανικοί, εταιρείες συμβούλων, μελετητικές και κατασκευαστικές εταιρείες, εταιρείες οικοδομικών κατασκευαστικών και διακοσμητικών υλικών εταιρίες διαχείρισης ακινήτων, και επίτιμα μέλη είναι το ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ

ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΚΑΠΕ) το ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ (Ε.Ι.Α.) και ο ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΚΙΝΗΤΩΝ(Σ.Ε.Α.ΑΚ.)

Υπόθεση εργασίας: Ξεκινάμε μια συγκροτημένη προσπάθεια αξιοποίησης της IT.

Ο καίριος ρόλος του κράτους:

1. Νομοθετικός
 - Σύνταξη προδιαγραφών χρήσης της IT
 - Νομοθέτηση υποχρέωσης των παραγωγών IT να αξιοποιείται ένα ποσοστό
2. Στη σύνταξη μελετών
 - Για κατασκευή δημοσίων έργων (υποκατάσταση τσιμέντου)
 - Χρήση IT σαν υλικό επίχωσης
 - Για βελτίωση όξινων εδαφών
3. Στη χρηματοδότηση των κατασκευών

Ο καίριος ρόλος μας:

Ανάδειξη και αξιοποίηση των καινοτόμων πλευρών της χρήσης της IT π.χ. Σύμφωνα με την Βικιπαίδεια παραδείγματα καινοτομιών είναι:

- Νέες μέθοδοι στην παρασκευή τελικών και άλλων προϊόντων / υπηρεσιών με νέες πρώτες ύλες
- Χρήση νέων φιλικών προς το περιβάλλον υλικών
- Συστήματα ολικής διαχείρισης απορριμμάτων ή αποβλήτων
- Αξιοποίηση απορριμμάτων / αποβλήτων
- Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα προϊόντος / υπηρεσίας
- Υπηρεσίες βιομηχανικού σχεδιασμού πρωτότυπου προϊόντος / διεργασίας / παροχής υπηρεσίας.
- Εφαρμογές εκπαίδευσης εξ αποστάσεως

Ανακάλυψη και προώθηση νέων χρήσεων π.χ.

- Σύνθετα υλικά με ιπτάμενη τέφρα ως πληρωτικό υλικό και μήτρα πολυαιθυλενίου (Μάρτιος 2009, Πολυτεχνείο Κρήτης)
- Αξιοποίηση οργανωτικής καινοτομίας.
- Crowdsourcing
- Crowdfunding
- Time sharing
- Συμβιωτικά δίκτυα
- Φτιάξτο μόνος σου (Do It Yourself)
- Αξιοποίηση της συλλογικής νοημοσύνης.
- Χρήση της IT για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος. Η Apple ανακοίνωσε ένα μακροπρόθεσμο πρόγραμμα σε συνεργασία με το Παγκόσμιο Ταμείο για τη Φύση για την προστασία 250.000 στρεμμάτων κινεζικού δάσους, σε μία προσπάθεια να μειώσει το ενεργειακό της αποτύπωμα. Τους τελευταίους 12 μήνες η Apple έχει εντείνει τις περιβαλλοντικές της πρωτοβουλίες και την προώθηση αυτών, μέσω του τμήματος δημοσίων σχέσεων καθώς δεν είναι μία από τις πιο «πράσινες» επιχειρήσεις και αυτό στον κόσμο των social media, μπορεί να αποδειχθεί πολύ επικίνδυνο... Μέχρι στιγμής, έχει ανακοινώσει σχέδια για την ανάπτυξη 80 μεγαβάτ ηλιακής ενέργειας στην Κίνα, έχει αγοράσει ένα μικρό υδροηλεκτρικό φράγμα στο Όρεγκον και ένα δάσος 8.100 στρεμμάτων στο Μέιν
- Εντατική χρήση της γνώσης. Συνεργασία επιχειρήσεων με Πανεπιστήμια και ΤΕΙ(ΑΠΘ , ΤΕΙ Δυτ. Μακεδονίας

Προσπαθούμε να διατυπώσουμε τον «οδικό χάρτη» της προσπάθειας.

Βήμα 1^ο: Αποφασίζουμε ποιοι συμμετέχουν. Αν η προσπάθεια γίνει σε επίπεδο Δυτικής Μακεδονίας πρέπει να συμμετέχουν:

Η ΔΕΗ

Η Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας

Η ΔΙΑΔΥΜΑ

Οι ενεργειακοί Δήμοι (Κοζάνης, Εορδαίας, Φλώρινας, Αμυνταίου)

Το ΤΕΕ

Το Α.Π.Θ.

Το ΤΕΙ Δ.Μ.

Φορείς κατασκευαστών και μελετητών δημοσίων έργων.

Το ΕΒΕ ως φορέας κατασκευαστών και εμπόρων οικοδομικών υλικών

Θα εξεταστεί αν είναι χρήσιμο να συμμετέχουν ξεχωριστές επιχειρήσεις

(τσιμεντοβιομηχανίες, κλπ)

Αν προσπάθεια γίνει σε πανελλαδικό επίπεδο πρέπει να συμμετέχουν οι αντίστοιχοι φορείς της Αρκαδίας και της Εύβοιας.

Βήμα 2ο. Αρχίζουν οι συζητήσεις για να ξεκαθαρίσει ποιοι θέλουν να συμμετέχουν. Όσοι συμφωνούν υπογράφουν ένα πρωτόκολλο όπου καταγράφονται οι προθέσεις τους και τα επόμενα βήματα στα οποία συμφωνούν.

Βήμα 3^ο. Συντάσσεται μία ολόπλευρη και λεπτομερής αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης και μια οικονομοτεχνική που εκτός που θα αναδείξει τις πραγματικές δυνατότητες αξιοποίησης της ΙΤ και τις μεγάλες αλλαγές που θα φέρει στις κατασκευές και στην οικονομία γενικότερα η αξιοποίηση της ΙΤ θα κάνει συγκεκριμένες προτάσεις κοστολογημένες. Είμαστε σίγουροι ότι αυτή η μελέτη θα αναδείξει την ανάγκη δημιουργίας ενιαίου φορέα αξιοποίησης της ΙΤ **συσπειρώσεων και μακροχρόνιου σχεδιασμού**

Βήμα 4^ο. Δημιουργία του φορέα διαχείρισης της ΙΤ

Βήμα 5^ο. Συγκρότηση μιας ισχυρής επιτελικής ομάδας σκέψης (think tank) η οποία θα επεξεργάζεται και θα κάνει προτάσεις εναλλακτικές σε βιομηχανίες και υπουργεία οι οποίες θα δείχνουν τι έχουν να κερδίσουν με την χρήση της τεφροκονίας.

Βήμα 6^ο Η αξιοποίηση της ΙΤ θα αποδώσει μεγάλα κέρδη αλλά απαιτούνται σοβαρές επενδύσεις. Ένα στιβαρό project plan είναι απαραίτητο σαν ξεκίνημα. Είναι απαραίτητη η εμπλοκή του φορέα αξιοποίησης της ΙΤ σε γιγάντια έργα υποδομής

Βήμα 7^ο. Θα ήταν θετικό αν προκηρυσσόταν υποτροφίες για Μεταπτυχιακές Σπουδές με την υποστήριξη του φορέα διαχείρισης της ΙΤ. Οι υποτροφίες θα απευθύνονται σε νέους και νέες έως και 35 ετών, Οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να επιλέξουν να υποβάλουν αίτηση για ένα από τα προσφερόμενα προγράμματα

Βήμα 8^ο. Συνεργασία με βιομηχανίες και κατασκευαστικές εταιρείες για την εισαγωγή στην αγορά καινοτόμων προϊόντων με βάση την ΙΤ.

Τα επόμενα βήματα φαίνονται προφανή.

Οι παλαιστές του Σούμο όταν θέλουν να βάλουν δύναμη σκύβουν.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δεν είναι αδύνατη η αξιοποίηση της ΙΤ στην Ελλάδα παρόλο που έχουμε μείνει πίσω από ολόκληρη την ανθρωπότητα. Είναι δύσκολη επειδή πρέπει να συνδυαστούν πολλά διαφορετικά συμφέροντα και να πεισθούν διαφορετικές ομάδες ότι είναι κοινό συμφέρον η συνεργασία και ότι τα θετικά αποτελέσματα είναι πολλαπλάσια της συλλογικής προσπάθειας.

Τσιμέντο χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος με χρήση παραπροϊόντος της τεχνολογίας Calcium Looping για δέσμευση CO₂

Σ. Κ. Αντίοχος¹, Π. Γραμμέλης², Κ. Ατσόνιος², Η. Deiter³, F. Montagnaro⁴, Σ. Κ. Γεωργουλέα⁵, Δ. Φραγκούλης¹

¹Τμήμα Έρευνας και Ανάπτυξης Προϊόντων, Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ TITAN, Καμάρι Βοιωτίας Τ.Θ. 18, 19200 Ελευσίνα

²Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 4ο χλμ Εθνικής Οδού Πτολεμαΐδα-Κοζάνη, 50200, Πτολεμαΐδα

³Institute of Combustion and Power Plant Technology (IFK), University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

⁴Department of Chemical Sciences, Università degli Studi di Napoli Federico II, Monte Sant'Angelo, 80126 Naples, Italy

⁵Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, 15780 Αθήνα

Λέξειςκλειδιά: Calcium Looping, δέσμευση CO₂, ανθρακικό αποτύπωμα, purged CaO, εησιμότητα, κλίνκερ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η τεχνολογία Calcium Looping (CaL) είναι από τις πιο ελπιδοφόρες για την δέσμευση του CO₂ που περιέχεται στα καυσαέρια των βιομηχανικών μονάδων. Παρότι ακόμη σε στάδιο εξιολόγησης, έχει διαπιστωθεί πως ανάμεσα στα πλεονεκτήματα της είναι η δυνατότητα χρήσης του εξαντλημένου (purged) CaO - που αποτελεί το προσροφητικό μέσο - στην παραγωγή τσιμέντου. Αυτό μπορεί να επιτρέψει σημαντική μείωση της εκπομπής CO₂ στην τσιμεντοβιομηχανία. Με δείγματα που προέκυψαν από μονάδα 200 KWt με δύο συζυγείς κλίνες (DFB), διαπιστώθηκε πως από χημικής άποψης το CaO μπορεί να υποκαταστήσει πλήρως τον ασβεστόλιθο, χωρίς να αλλοιώνονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κλίνκερ. Επιπλέον διαπιστώθηκε βελτίωση της εησιμότητας της φαρίνας που ενδέχεται να επιτρέψει μείωση θερμιδικής κατανάλωσης κατά περίπου 15 Kcal/kg κλίνκερ. Εκτιμήθηκε πως κάθε 1% προσθήκης purged CaO στην φαρίνα, επιφέρει μείωση περίπου 3,6 kg εκπεμπόμενου CO₂/t φαρίνας. Πρακτικά αυτό μεταφράζεται σε μείωση 300.000 tCO₂ ετησίως για ένα εργοστάσιο δυναμικότητας 1 εκ. τον. κλίνκερ. Από λειτουργικής άποψης ωστόσο, για να είναι εφικτή η ολική υποκατάσταση ασβεστολίθου η περιεκτικότητα του παραπροϊόντος σε SO₃ δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,3%.

Low carbon-footprint cement utilizing purged sorbent from Calcium Looping

S. K. Antiohos¹, P. Grammelis², K. Atsonios², H. Deiter³, F. Montagnaro⁴, S.K. Georgouleas⁵, D. Fragoulis¹

¹Titan Cement Company S.A., Group R&D and Quality Department, Kamari Plant, Elefsina, Greece

²Chemical Process and Energy Resources Institute Centre for Research and Technology Hellas, 4th km N.R. Ptolemais-Kozani, 50200 Ptolemais, Greece

³Institute of Combustion and Power Plant Technology (IFK), University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

⁴Department of Chemical Sciences, Università degli Studi di Napoli Federico II, Monte Sant'Angelo, 80126 Naples, Italy

⁵School of Civil Engineering, NTUA Zografos Campus, 9 Heroon Polytechniou, Zografos 15780 Athens, Greece

Keywords: Calcium Looping, CO₂ capture, carbon footprint, purged CaO, burnability, clinker

ABSTRACT: Calcium Looping (CaL) is among the currently examined technologies for end-of-pipe CO₂ abatement. Even though still at pilot stage, it has been claimed that among its advantages is the potential re-use of the spent sorbent (CaO) in cement making. This may lead to the significant decrease of the carbon footprint of the cement industry. Current study contains findings from the investigation of using purged CaO – coming from a 200 KWt DFB facility – in cement raw meal. Quality-wise, purged CaO can fully replace limestone in raw meal without affecting clinker characteristics. Raw meal burnability was improved with an anticipated saving of approx. 15 Kcal/kg of clinker. It was estimated that for every 1% of purged CaO usage, a saving of 3,6 kg CO₂ emitted/tn of raw meal can be achieved. This means that for a plant producing 1 mil. tons of clinker per annum, the equivalent CO₂ saving is estimated to approx. 300.000 tons. From the operational point of view however, it should be highlighted that for completely replacing limestone in the mix, SO₃ content of the purged sorbent must not exceed 0.3%.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι - μετά την καύση - τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ αποτελούν λύση για τις νέες (greenfield) αλλά και τις παλαιότερες αλλά αναβαθμισμένες εγκαταστάσεις που εκλύουν. Η τεχνολογία Calcium Looping, εφεξής CaL, είναι μια τέτοια διαδικασία, η οποία χρησιμοποιεί ένα σύστημα διπλής ρευστοποιημένης κλίνης (DFB) όπου το CaO - ως το μέσο δέσμευσης του CO₂ - ανακυκλοφορεί μεταξύ των δύο κλινών. Οι δύο κλίνες είναι η συσκευή ενανθράκωσης (carbonator), όπου το περιεχόμενο στα καυσαέρια CO₂ προσροφάται, και ο αναγεννητής (regenerator), όπου απελευθερώνεται το δεσμευμένο CO₂. Η έξοδος του αναγεννητή είναι ένα ρεύμα καυσαερίων πλούσιων σε CO₂, το οποίο μέσω κατάλληλης πεξεργασίας και συμπίεσης μπορεί να αποθηκευτεί (Charitos et al, 2010).

Εκτός από την οικονομική βιωσιμότητά της (Abanades et al, 2007), (Romeo 2008) και την μειωμένη ενεργειακή επιβάρυνση (Charitos et al, 2010) έναντι των ανταγωνιστικών τεχνολογιών (π.χ. καύσης με οξυγόνο, έκπλυσης με αμίνες, κτλ), η τεχνολογία CaL έχει προταθεί και λόγω της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης του εξαντλημένου CaO στη βιομηχανία τσιμέντου. Η δυνατότητα του εξαντλημένου CaO να υποκαταστήσει μέρος ή ακόμη και εξ' ολοκλήρου τον ασβεστόλιθο αντιμετωπίζεται ως μία ευκαιρία για τη βιομηχανία τσιμέντου στην προσπάθεια μείωσης του ανθρακικού της αποτυπώματος. Είναι ευρέως γνωστό (ECRA, 2007) ότι εκλύονται περίπου 0.61 τόνοι CO₂/tn παραγόμενου τσιμέντου, η μεγαλύτερη ποσότητα εκ των οποίων οφείλεται στην προ-ασβεστοποίηση. Αυτό είναι αρκετό για να συνειδητοποιήσει κανείς τις πιθανές επιπτώσεις της αντικατάστασης ενός υλικού πλούσιου σε CO₂ (ασβεστόλιθος) με ένα υλικό χωρίς εκπεμπόμενο CO₂ (purged CaO). Εντούτοις, η αξιολόγηση του δυναμικού αξιοποίησης προϋποθέτει την διερεύνηση μιας σειράς ιδιοτήτων οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τόσο τη διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ όσο και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Επί του παρόντος, λίγες ερευνητικές ομάδες έχουν ασχοληθεί με αυτή τη δυνατότητα για τη βιομηχανία τσιμέντου. Ωστόσο, η μελέτη τους επικεντρώνεται περισσότερο στον αντίκτυπο μίας πιθανής ένταξης της τεχνολογίας CaL στα εργοστάσια τσιμέντου ή στα ειδικά χαρακτηριστικά του κλίνκερ και υιοθετούν την προσέγγιση της πλήρους αντικατάστασης του ασβεστόλιθου. Η εν λόγω προσέγγιση δεν συνυπολογίζει τον παράγοντα της συγκέντρωσης του εξαντληθέντος CaO σε SO₃ που μπορεί να αναστείλει την υψηλή εισαγωγή του για λειτουργικούς λόγους. Οι Dean et al. (Dean et al, 2011), (Dean et al, 2013) υπογράμμισαν το γεγονός αυτό. Επιπλέον, απέδειξαν ότι η επίδραση των προερχόμενων από το προσροφητικό μέσοιχοστοιχείων στην ποιότητα των C₃S είναι ασήμαντη, ακόμη και μετά την αύξηση των αρχικών επιπέδων των στοιχείων αυτών λόγω επαναλαμβανόμενων κύκλων. Ωστόσο, στην μελέτη τους δεν περιλαμβάνεται κάποια αξιολόγηση της συνολικής ποιότητας του κλίνκερ και της εψησιμότητας της φαρίνας. Ομοίως, οι Romano et al. (Romano et al, 2013), πηγαίνοντας ένα βήμα παραπέρα, απέδειξαν ότι η αντικατάσταση της πρώτης ύλης με το εξαντληθέν CaO, το οποίο προκύπτει από τη διαδικασία CaL, επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO₂ έως και 75% και 85% αντίστοιχα, χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις σε μία ενδεχόμενη ενσωμάτωση της διαδικασίας σε εργοστάσιο. Και στην μελέτη αυτή ωστόσο οι υπολογισμοί ήταν κυρίως θεωρητικοί.

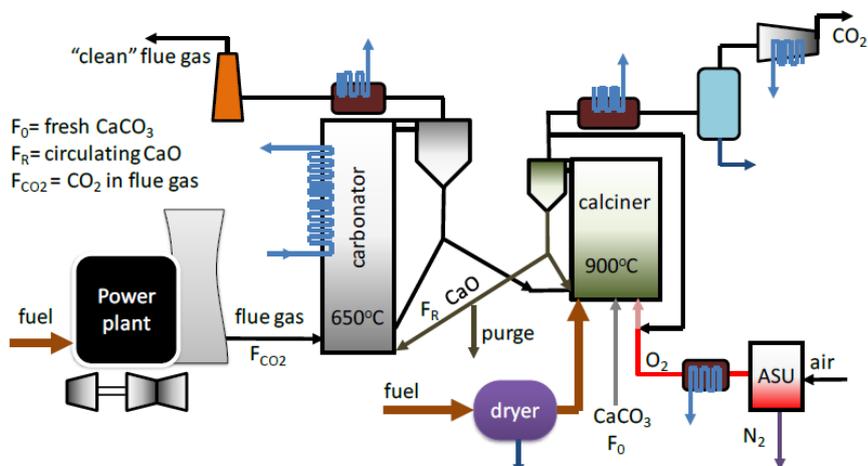
Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί δείγμα purged CaO που πρόεκυψε σε μία πιλοτική εγκατάσταση DFB των 200 kWth στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να καλυφθεί το κενό όσον αφορά στην επίδραση της τεχνολογίας CaL σε παράγοντες όπως οι εκπομπές, η εψησιμότητα της φαρίνας, τα χαρακτηριστικά και τη μικροδομή του κλίνκερ. Επιπλέον, για πρώτη φορά προσδιορίζεται η απαιτούμενη περιεκτικότητα του αναλωμένου προσροφητικού σε SO₃, η οποία επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή αξιοποίησή του για την παρασκευή κλίνκερ χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων λειτουργικότητας ή αποτυχιών ως προς την ποιότητα του τελικού

προϊόντος. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, διατυπώνεται μία ρεαλιστική εκτίμηση της αναμενόμενης εξοικονόμησής του CO₂ για έναν τυπικό (χωρίς by-pass) κλιβάνο με προθερμαντή πέντε σταδίων.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Υλικά

Ένα δείγμα εξαντληθέντος CaO (CaO_{reg}), από την εγκατάσταση DFB των 200 kWth στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, εξετάστηκε. Το δείγμα CaO είναι προϊόν εξαγωγής του αναγεννητή, (βλ. Σχήμα 1). Ως προσροφητικό χρησιμοποιήθηκε ασβεστόλιθος μεγέθους 300-600 μm, ενώ τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στον αναγεννητή ήταν άνθρακας από το El Cerrejon (0.51% θείο, 26280 J / g, 8.8% τέφρα). Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η διαδικασία ανακύκλωσης του ασβεστίου για τη δέσμευση του CO₂.



Σχήμα 1 - Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας CaL.

Η χημική ανάλυση διεξήχθη σε ένα SRS 3400 XRF της Bruker. Τηγμένες πέρλες παρασκευάστηκαν για την χημική ανάλυση. Η ανάλυση των ιχνοστοιχείων πραγματοποιήθηκε σε ένα φασματομέτρο διασποράς ενέργειας XRF της PANalytical. Ειδικά για τον Hg, χρησιμοποιήθηκε ένας αναλυτής υδραργύρου DM-80 της Milestone. Η ορυκτολογική ανάλυση του CaO_{reg} διεξήχθη σε ένα XRDD5000 της Siemens με μήκος κύματος 1.54 Å, λυχνία χαλκού, τάση λειτουργίας 40 KV και ένταση 35 mA, εφοδιασμένο με λογισμικό ανάλυσης DiffraPlusTopas. Για την παρασκευή του δείγματος αναφοράς, χρησιμοποιήθηκαν τυπικές πρώτες ύλες δηλαδή ασβεστόλιθος, άργιλος, ιπτάμενη τέφρα και σιδηροπυρίτης. Η ανάλυσή τους παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 - Χημική ανάλυση πρώτων υλών

	CaOreg	Limestone	Clay	Fly Ash	Iron Silicate
LOI	6.94	42.94	8.55	6.33	-6.10
SiO ₂	9.56	0.97	62.00	54.17	27.80
Al ₂ O ₃	1.52	0.32	12.90	26.98	4.04
Fe ₂ O ₃	1.28	0.24	5.01	5.04	66.23
CaO	76.54	52.54	4.86	2.50	2.68
MgO	0.86	2.99	0.71	0.98	0.40
K ₂ O	0.16	0.02	1.70	1.92	1.46
Na ₂ O	0.09	0.02	0.24	0.30	0.01
SO ₃	1.91	0.01	0.00	0.00	1.84

2.2 Φαρίνα

Η συμβατότητα του CaOreg στη φαρίνα εξετάστηκε. Το ποσοστό του προσροφητικού που χρησιμοποιήθηκε ήταν το μέγιστο επιτρεπόμενο ώστε να ικανοποιηθούν ποιοτικοί στόχοι της φαρίνας (LSF, SIM και AM) για την παραγωγή κλίνκερ χαμηλών αλκαλίων. Επιλέχτηκε η ακραία αυτή περίπτωση περιεκτικότητας προσροφητικού ώστε να εντοπιστούν περιοριστικοί παράγοντες σχετικά με την αξιοποίηση του CaOreg. Βάσει του ανωτέρω σεναρίου, παρασκευάστηκαν εργαστηριακά δυο φαρίνες (με και χωρίς CaOreg) με συν-άλεση των υλικών (αφού πρώτα έσπασαν σε <4 mm) σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Χρησιμοποιήθηκαν παρτίδες των 3 κιλών και ο χρόνος άλεσης ρυθμίστηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί παρόμοια λεπτότητα φαρίνας (R90 14-16%) προκειμένου να εξουδετερωθεί η επίδραση της στην εψησιμότητα. Η απαιτούμενη ενέργεια άλεσης καταγράφηκε (ως KWh/t). Αυτό μπορεί να επιτρέψει μία πρώτη εκτίμηση σχετικά με την αλεσιμότητα. Η εψησιμότητα αξιολογήθηκε με μία τυπική δοκιμή δείκτη εψησιμότητας, κατά την οποία σφαιρίδια από κάθε φαρίνα θερμαίνονται σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες, από 1350 έως 1500°C.



α. Προετοιμασία σφαιριδίων φαρίνας.



β. Ξήρανση στους 100°C.



γ. Πυρήνες μετά την καύση στους 1500°C.

Σχήμα 2 – Στάδια δοκιμής δείκτη εψησιμότητας.

Για την παραγωγή των σφαιριδίων, αναμιγνύεται το μίγμα φαρίνας με νερό για τον σχηματισμό μίας πάστας, από την οποία παράγονται σφαιρίδια διαμέτρου 12-16 cm και 1.5-2

cm (Σχήμα 2α). Η επίδραση της τέφρας του καυσίμου δεν εξετάστηκε. Τα σφαιρίδια τοποθετούνται σε ένα φούρνο σε θερμοκρασία 100°C για μία νύκτα για ξήρανση (Σχήμα 2β) και μετά την ψύξη τους, χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες, και η κάθε ομάδα θερμαίνεται σε διαφορετική θερμοκρασία, συγκεκριμένα 1350, 1400, 1450 και 1500°C. Για κάθε θερμοκρασία, τα σφαιρίδια παραμένουν στον κλίβανο για 15 λεπτά και μετά την ολοκλήρωση της καύσης, τα πυροσυσσωματωμένα δείγματα (Σχήμα 2γ) λειοτριβήθηκαν σε κατάλληλη για ανάλυση λεπτότητα σε μύλο δόνησης και αναλύθηκαν για ελεύθερο CaO σύμφωνα με το EN 451. Οι τέσσερις τιμές ελεύθερου CaO εισήχθησαν στην ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό του δείκτη εψησιμότητας (BI) της φαρίνας:

$$BI = \frac{(CaO_{1350} + CaO_{1400} + 2 \cdot CaO_{1450} + 3 \cdot CaO_{1500}) \cdot 3.74}{(CaO_{1350} - CaO_{1500})^{1/4}} \quad (1)$$

2.3 Κλίνκερ

Λειοτριβημένα δείγματα που προέκυψαν μετά την έψηση σε θερμοκρασία 1500°C χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ορυκτολογίας του παραγόμενου κλίνκερ με τη βοήθεια του Q-XRD όπως περιγράφεται παραπάνω. Τα δείγματα των 1450°C και 1500°C υποβλήθηκαν σε εξέταση με μικροσκόπιο ώστε να αξιολογηθεί ο σχηματισμός των κύριων φάσεων.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Εξαντληθέν CaO

Η χημεία του δείγματος του CaO_{reg} φαίνεται στον Πίνακα 1. Η παρουσία του πυριτίου οφείλεται στην τέφρα του άνθρακα, ενώ το ίδιο ισχύει και για το περιεχόμενο SO₃ με ποσοστό που φθάνει το 2.0%. Συγκριτικά με τα καθαρά ασβεστολιθικά που χρησιμοποιούνται στο μείγμα της πρώτης ύλης, το ποσοστό τόσο του SiO₂ όσο και του SO₃ είναι αισθητά υψηλότερο. Οι τιμές των ιχνοστοιχείων μετρήθηκαν χαμηλές για το CaO_{reg}. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές του Hg, αλλά και των άλλων πτητικών υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας λόγω της παρουσίας του CaO_{reg}. Ο προσδιορισμός του περιεχομένου των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τσιμέντου δε συμμορφώνεται σε κάποιο κανονιστικό όριο. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες οριακές τιμές οι οποίες εκδίδονται σε διάφορες χώρες. Ωστόσο, υπήρξαν ορισμένες οριακές τιμές που εκδίδονται σε διαφορετικές χώρες. Οι εν λόγω οριακές τιμές για επιλεγμένα ιχνοστοιχεία μαζί με τις αντίστοιχες τιμές του αντίστοιχου δείγματος καθαρού CaO παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2 – Ενδεικτικά όρια ιχνοστοιχείων σε διαφορετικές χώρες.

Parame	Unit	Spain	Switzerland	CaO _{reg}
TOC	%	2	-	-
Hg	mg/kg	10	0.5	(ppb) 8
Cd	mg/kg	100	0.8	1
Tl	mg/kg	100	1	2
Sb	mg/kg	-	1	2
As	mg/kg	-	20	2
Cr	mg/kg	-	100	42
Co	mg/kg	-	30	3
Zn	mg/kg	-	400	132
V	mg/kg	-	200	43
Sr	mg/kg	-	-	169

Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τον ποσοτικό προσδιορισμό των κρυσταλλικών φάσεων του δείγματος CaO_{reg} σε σύγκριση με τα ασβεστολιθικά που χρησιμοποιούνται στη φαρίνα. Παρατηρείται ότι οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις είναι το οξείδιο του ασβεστίου (CaO), ο ασβεστίτης, ο χαλαζίας, ο πορτλαντίτης και ο ανυδρίτης. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το προσροφητικό έχει σημαντικά αλλά όχι εντελώς απασβεστοποιηθεί. Το περιεχόμενο CaO συμπληρώνεται από την παρουσία κάποιου ποσοστού υδρασβέστου, πιθανώς λόγω πρόσληψης υγρασίας και CaSO₄. Η παρουσία του SiO₂ είναι κυρίως στη μορφή χαλαζία, ενώ οι άστριοι και ο ιλλίτης αποτελούν μόνο ένα μικρό μέρος του συνολικού διοξειδίου του πυριτίου. Η παρουσία του χαλαζία είναι γενικά ανεπιθύμητη, δεδομένου ότι είναι ένα σκληρό ορυκτό (~7-7.5 σύμφωνα με την κλίμακα Mohs) και συνεπώς, ενδέχεται να προκαλέσει δυσκολία στην άλεση του ακατέργαστου μίγματος κατά την αντικατάσταση των ασβεστολιθικών (μόνο 0.3 SiO₂) με το δείγμα καθαρού CaO. Ως εκ τούτου, λόγω της παρουσίας του χαλαζία, αναμένεται μία αρνητική επίπτωση στην ικανότητα άλεσης του μύλου.

Πίνακας 3 - Ορυκτολογική ανάλυση του δείγματος καθαρού CaO.

Mineral	Chemical Formula	CaO _{reg}	Limestone
Quartz	SiO ₂	5.2	0.3
Calcite	CaCO ₃	6.9	99.2
Anhydrite	CaSO ₄	1.5	-
Lime	CaO	64.2	-
Portlandite	Ca(OH) ₂	13.0	-
Periclase	MgO	0.9	-
Sandinite	KAlSi ₃ O ₈	1.8	-
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0.7	-
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	2.3	0.5
Hematite	Fe ₂ O ₃	1.9	-
Illite	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]	1.6	-

Το γεγονός ότι το θείο είναι σε μορφή CaSO₄ μπορεί να ερμηνευτεί από την ισχυρή συγγένεια του CaO προς το SO₂. Υπό αυτή την έννοια, είναι λογικό ότι ένα μέρος του CaO

συναντάται υπό μορφή ανυδρίτη, το ποσοστό του οποίου εξαρτάται από το λόγο Ca προς C(Ca/C) που χρησιμοποιείται στη διαδικασία Ca, τη σύνθεση του καυσίμου και τον ρυθμό ανακύκλωσης/ καθαρισμού. Ευτυχώς, το θείο υπό τη μορφή CaSO₄ δεν θα επηρεάσει τις εκπομπές SO_x, δεδομένου ότι αποσυντίθεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 1000°C και εισάγεται στον κλίβανο. Η συγκέντρωση του δυνητικά διογκώσιμουπυριτικού(MgO) βρέθηκε σε χαμηλά επίπεδα.

2.2 Παραγωγή φαρίνας

Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα αποτελέσματα της εργαστηριακής παραγωγής της φαρίνας. Είναι προφανές ότι το CaO από την διαδικασία CaL μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τον ασβεστόλιθο, ικανοποιώντας τους ποιοτικούς στόχους. Η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε με την παρουσία του CaOreg για την ίδια λεπτότητα (R90%), ως αποτέλεσμα της αυξημένης παρουσίας χαλαζία. Είναι πιθανόν, όταν τα ασβεστολιθικά αντικατασταθούν από το εξαντληθέν CaO, να σημειωθεί μείωση της παραγωγής ικανότητας του μύλου χώματος.

Πίνακας 4 - Αποτελέσματα της παραγωγής και της εησιμότητας της φαρίνας.

	Target	Baseline	CaOreg
Limestone		78.16	0.00
Clay		18.70	13.23
CaOreg		0.00	78.88
Fly ash		1.99	6.54
Iron Silicate		1.15	1.35
Kwh/tn		28.7	33.7
R90%	14-16	15.5	15.0
R200%		3.7	1.9
LSF	98.5	98.1	99.0
SIM	2.35	2.32	2.30
ALM	1.3	1.34	1.49
LOI		35.14	6.61
SiO ₂		13.72	19.38
Al ₂ O ₃		3.39	5.05
Fe ₂ O ₃		2.53	3.39
CaO		43.25	61.81
MgO		0.99	0.91
K ₂ O		0.43	0.54
Na ₂ O		0.06	0.14
SO ₃		0.10	1.76
BI (in LSF=99)		78	59

Όπως ήταν αναμενόμενο, παρότι πληρούνται οι δείκτες ποιότητας, υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στην ανάλυση των οξειδίων των φαρινών. Ειδικότερα, όσο αφορά στα δείγματα με CaOreg, η απώλεια πύρωσης είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτή της φαρίνας αναφοράς. Αυτό είναι λογικό δεδομένου του βαθμού ασβεστοποίησης του CaOreg. Αντίθετα, η φαρίνα με CaOreg είναι εμπλουτισμένη σε SiO₂ και SO₃ λόγω της τέφρας του καυσίμου που

τροφοδοτείται στον ασβεστοποιητή του CaL. Η εψησιμότητα της φαρίνας με εξαντληθέν CaO βελτιώθηκε. Αναλυτικότερα, με την ταξινόμηση BI, οι δύο φαρίνες κατατάσσονται ως πολύ εύκολο-έως εύκολο να καούν. Με βάση τον δείκτη BI, η ενσωμάτωση του CaOreg αναμένεται να επιφέρει μία μείωση της θερμιδικής κατανάλωσης της τάξης των 10-20 Kcal/kg κλίνκερ.

4 ΚΛΙΝΚΕΡ

4.1 Δραστηκότητα

Το κλίνκερ με CaOreg, το οποίο παράχθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής εψησιμότητας (1500°C), αξιολογήθηκε με ποσοτικό Q-XRD και με οπτική μικροσκοπία σε σύγκριση με το κλίνκερ αναφοράς. Η ορυκτολογική ανάλυση των δύο κλίνκερ συνοψίζεται στον Πίνακα 5.

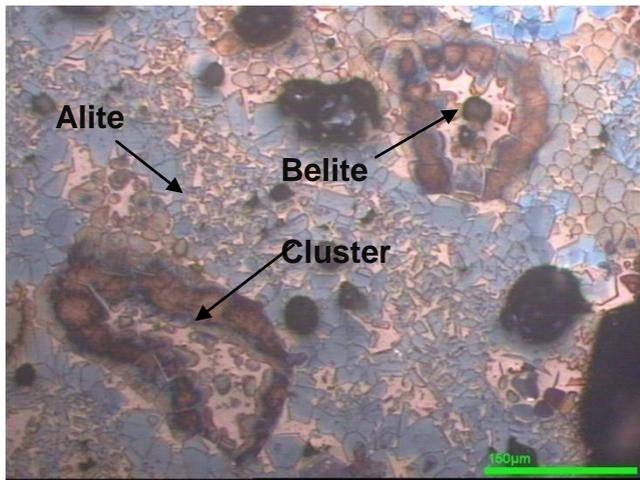
Πίνακας 5 – Ορυκτές φάσεις στο κλίνκερ

Mineral phase	Baseline	CaOreg
C ₃ S	56.3	55.0
C ₂ S	16.8	22.3
C ₃ A	7.6	8.1
C ₄ AF	15.2	11.7
fCaO	1.5	0.6
Ca(OH) ₂	2.6	2.4

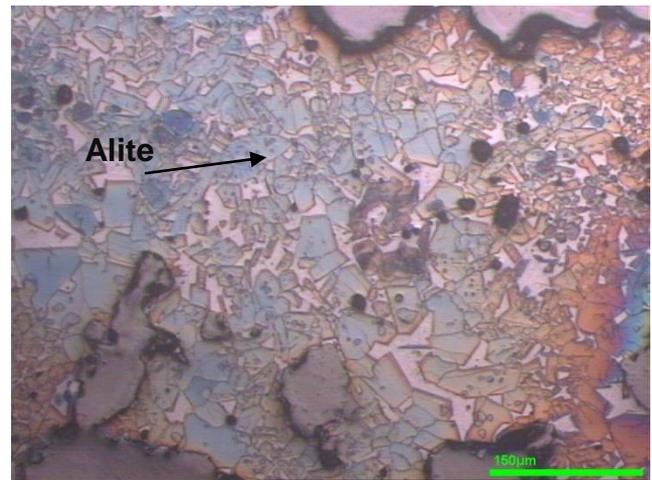
Διαπιστώνεται πως η περιεκτικότητα σε αλίτη (C₃S) ήταν παρόμοια και στα δύο κλίνκερ, ενώ του βελίτη (C₂S) ήταν υψηλότερη στο κλίνκερ με CaOreg. Έχει αποδειχθεί (Bhatty, Miller, Kosmatka, 2004) ότι, ανεξάρτητα από τον πυριτικό δείκτη, υψηλότερη παρουσία θείου στο μίγμα ευνοεί το σχηματισμό κρυστάλλων βελίτη. Το κλίνκερ αναφοράς εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό υγρής φάσης, το οποίο ως επί το πλείστον αποδίδεται στην υψηλότερη περιεκτικότητα σε φερρίτη (C₄AF), υποδεικνύοντας ότι ορισμένη ποσότητα ασβεστίου καταναλώθηκε για το σχηματισμό φερρίτη αντί βελίτη. Όσο αφορά στο ελεύθερο CaO, δεν παρατηρήθηκε κάποια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των δύο κλίνκερ, ενώ και στις δυο περιπτώσεις το ποσοστό του ελεύθερου CaO ήταν κάτω από τα ανησυχητικά επίπεδα.

4.2 Μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία επί των δύο δειγμάτων του κλίνκερ έδειξε ότι και τα δύο δείγματα χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ανομοιογένειας με κρυστάλλους C₃S και C₂S, οι οποίοι εκτείνονται σε μεγάλες περιοχές και είναι ευδιάκριτοι.

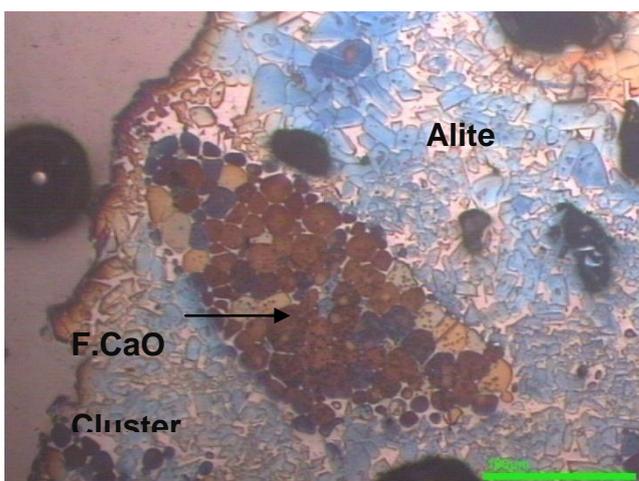


Σχήμα 3 – Μεγάλοι και μικροί κρύσταλλοι C_3S με συστάδες C_2S στο κλίνκερ αναφοράς.

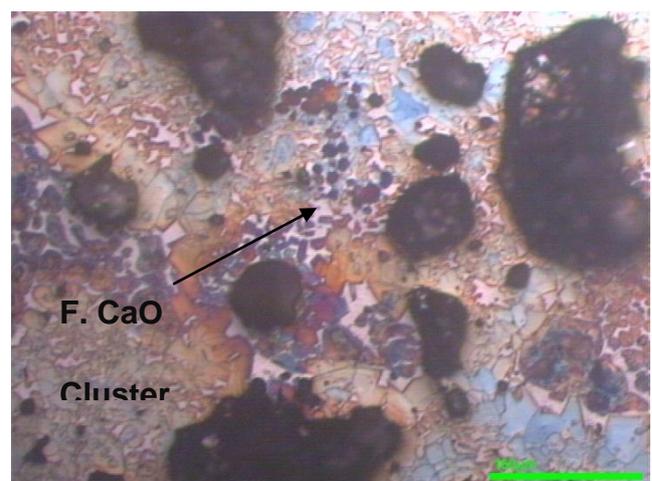


Σχήμα 4 – Μεγάλοι και μικροί κρύσταλλοι C_3S στο κλίνκερ με CaO_{reg} .

Τόσο το κλίνκερ αναφοράς όσο και το κλίνκερ με CaO_{reg} χαρακτηρίζονται από τον σχηματισμό ιδιόμορφου C_3S με κρυστάλλους οι οποίοι παρουσιάζουν ευθύγραμμες, κρυσταλλογραφικές οριακές γραμμές οι οποίες οφείλονται πιθανώς στον σύντομο χρόνο καύσης. Το μέγεθος του C_3S κυμαινόταν από πολύ μικρούς κρυστάλλους ($<10 \mu m$) έως πολύ μεγάλους ($>60 \mu m$) οι οποίοι εκτείνονται σε μεγάλες περιοχές και στα δυο δείγματα (Σχήματα 3-4). Ομοίως, το μέγεθος του C_2S ποικίλει και οι κρύσταλλοι ήταν ως επί το πλείστον σφαιρικοί, αλλά σε μεγάλες ομάδες συστάδες, οι οποίες ήταν είτε πυκνές είτε περιείχαν κάποια ποσότητα υγρής φάσης. Συσσωματώματα C_2S παρατηρήθηκαν επίσης γύρω από πόρους λόγω της παρουσίας μεγάλων κόκκων SiO_2 οι οποίοι καταναλώθηκαν κατά τη διάρκεια της θέρμανσης αφήνοντας ένα κενό. Η παρουσία μεγάλων συσσωματωμάτων C_2S είναι ανεπιθύμητη δεδομένου ότι δυσχεραίνει την άλεση του κλίνκερ και αποδίδει χαμηλότερη αντοχή. Παρόλο που και στα δύο δείγματα κλίνκερ παρατηρήθηκε εκτεταμένη συσσωμάτωση, το φαινόμενο ήταν πιο εμφανές στο κλίνκερ με CaO_{reg} . Αυτό αποδίδεται στην υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο το οποίο ενεργεί ως σταθεροποιητικός παράγοντας για το C_2S .



Σχήμα 5 – Συσσωματώματα (clusters) CaO_f περιβαλλόμενης από C_3S στο κλίνκερ αναφοράς.



Σχήμα 6 – Συσσωμάτωμα CaO_f στο κλίνκερ με καθαρό CaO .

Ελεύθερη άσβεστος παρατηρήθηκε και στα δύο δείγματα κλίνκερ. Ωστόσο, στην περίπτωση του κλίνκερ αναφοράς, ως επί το πλείστον απαντάται υπό τη μορφή πυκνών συστάδων (Σχήμα 5), οι οποίες προέρχονται από μεγάλους κόκκους ασβεστίτη στο μείγμα της πρώτης ύλης. Από την άλλη πλευρά, σποραδικοί κρύσταλλοι και διαχεόμενα συμπλέγματα ελευθέρως ασβέστου παρατηρήθηκαν στο κλίνκερ με CaO_{reg} (Σχήμα 6). Αυτό είναι πιθανώς το αποτέλεσμα των περιορισμένων κόκκων ασβεστίτη που έχουν σχεδόν εξ ολοκλήρου διασπαστεί κατά τη διάρκεια της κύκλων ανακυκλοφορίας στο CaL. Κρύσταλλοι περικλάστου (MgO) δεν παρατηρήθηκαν, πιθανότατα λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο στο ακατέργαστο μίγμα.

Σε κάθε περίπτωση, η ποιότητα του κλίνκερ με καθαρόCaO αποδείχτηκε μέτρια και παρόμοια με εκείνη του κλίνκερ αναφοράς. Η ποιότητα αυτή πιθανώς να οφείλεται στην ανομοιογένεια και τον ανεπαρκή χρόνο θέρμανσης. Ωστόσο, το μικρό μέγεθος του C₃S που αποτελούσε ένα μεγάλο τμήμα του συνολικού C₃S μπορεί σε κάποιο βαθμό να επιδρά θετικά στις ιδιότητες του εκάστοτε τσιμέντου.

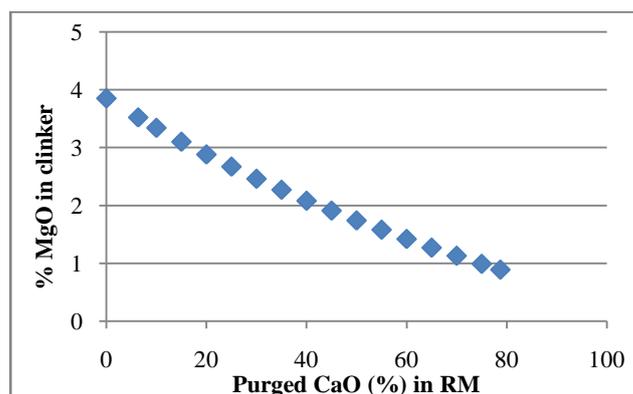
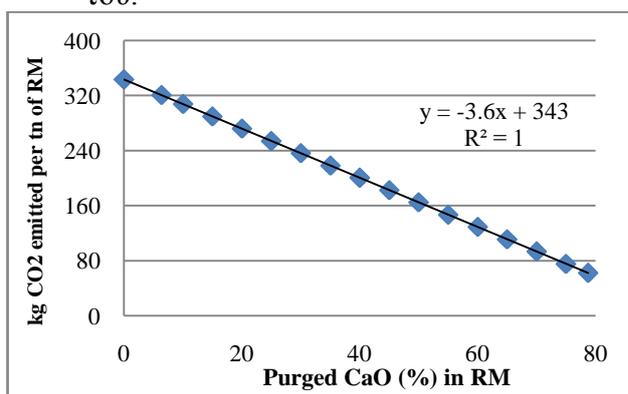
5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στο δυναμικό αξιοποίησης του εξαντληθέντος CaO στη φαρίνα του κλίνκερ, μία σειρά παραμέτρων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

5.1 Χημική συμβατότητα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το CaO_{reg} μπορεί να ικανοποιήσει τους στόχους ποιότητας ακόμη και όταν αντικαθιστά όλα τα ασβεστολιθικά στο μίγμα. Η επιρροή της ενσωμάτωσης του καθαρού CaO στη φαρίνα παρουσιάζεται στα Σχήματα 7-10. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς μας, η ένταξη του CaO_{reg} στο μίγμα προς πλήρη αντικατάσταση των ασβεστολιθικών, οδηγεί σε:

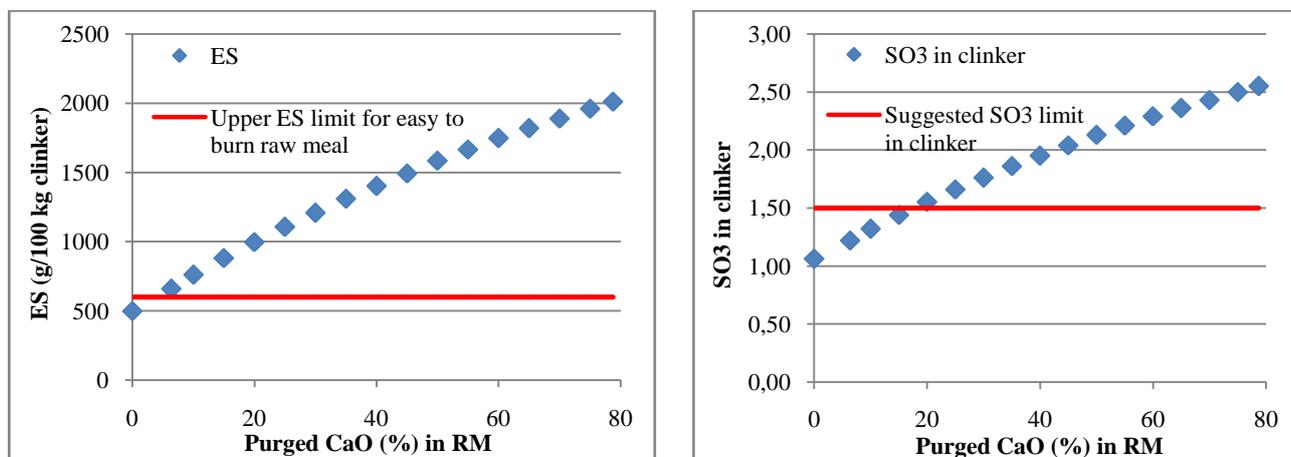
- Χαμηλότερες εκπομπές CO₂ κατά 281 kg ανά τόνο φαρίνας, ή περίπου 3.6 kg λιγότερο CO₂ ανά τόνο φαρίνας για κάθε 1% καθαρού CaO που χρησιμοποιείται.
- Χαμηλότερο MgO στο κλίνκερ κατά περίπου 76%. Η μείωση του MgO αποτελεί ευνοϊκή εξέλιξη στο βαθμό που όταν απαντάται σε μορφή περικλάστου πιθανώς να αυξήσει την πιθανότητα διόγκωσης του τσιμέντου κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του.



Σχήμα 7 - CO₂ που εκπέμπεται από την φαρίνα vs. % CaO_{reg} Σχήμα 8 - MgO στην φαρίνα vs. % CaO_{reg}

5.2 Λειτουργικά προβλήματα στον κλίβανο

Είναι γνωστό πως ενδεχόμενη περίσσεια πτητικών (K_2O , Na_2O , S ή Cl) στον κλίβανο λόγω φαρίνας τροφοδοσίας ή του καυσίμου δημιουργούν λειτουργικά προβλήματα αφού θα εξατμιστούν στη ζώνη καύσης και θα συμπυκνωθούν στον προθερμαντή, Αυτό προκαλεί συσσώρευση υλικού στους κυκλώνες και φράξιαματα στον προθερμαντή, επιφέροντας σημαντικά λειτουργικά προβλήματα και δαπανηρές καθυστερήσεις στην διαδικασία έψησης. Στην περίπτωση του CaO_{reg} , η αυξημένη παρουσία του θείου (~ 2,0%) θέτει δυνητικά σε κίνδυνο την ενσωμάτωσή του στη φαρίνα. Υποθέτοντας σταδιακή αύξηση του ποσοστού του CaO_{reg} στη φαρίνα, και εφαρμόζοντας περιοριστικούς παράγοντες όπως ο λόγος SO_3/Alk και η περίσσεια του θείου (excess sulphur, ES), πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της ποσότητας του CaO_{reg} που μπορεί με ασφάλεια να χρησιμοποιηθεί αντί του ασβεστόλιθου.



Σχήμα 9 - ES συναρτήσει συμμετοχής του CaO_{reg} στην φαρίνα

Figure 10 - $SO_3\%$ στο κλίνκερ συναρτήσει συμμετοχής του CaO_{reg} στην φαρίνα

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 9, όταν το περιεχόμενο του CaO_{reg} υπερβαίνει το 10%, οι τιμές του ES είναι υψηλότερες από το ανώτερο όριο των 600 g/100 kg κλίνκερ, δημιουργώντας προϋποθέσεις για τα λειτουργικά προβλήματα που αναφέρθηκαν. Παρομοίως, από το Σχήμα 10 προκύπτει ότι για περιεκτικότητες φαρίνας σε καθαρό CaO μικρότερες του 20%, το συνιστώμενο όριο $SO_3\%$ στο κλίνκερ δεν υπερβαίνεται και επομένως, οι περιεκτικότητες αυτές είναι αποδεκτές για το μίγμα. Ως εκ τούτου, από πλευράς ομαλής λειτουργίας κλιβάνου, ένα ποσοστό CaO_{reg} έως 10% με περιεκτικότητα σε SO_3 της τάξης του 2% είναι επιτρεπτό στη φαρίνα.

5.3 Ποιότητα

Σύμφωνα με ASTM C150, η μέγιστη περιεκτικότητα του OPC σε SO_3 ορίζεται στο 2.5% και αντιστοιχεί στο OPC US, διότι για υψηλότερες περιεκτικότητες κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του τσιμέντου, το SO_3 οδηγεί στον σχηματισμό προϊόντων όπως ο ετρινγκίτης, τα οποία είναι υπεύθυνα για διόγκωση και τις ρωγμές του τσιμέντου. Η αντίστοιχη τιμή σύμφωνα με το EN 197-1 για τα τσιμέντα είναι 3.5% , ενώ για ανώτερες κατηγορίες αντοχής ανέρχεται στο 4%. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα του καθαρού CaO, τόσο αυξάνεται η αναμενόμενη ποσότητα SO_3 στο παραχθέν κλίνκερ. Ωστόσο,

ακόμη και στην ακραία περίπτωση της πλήρους αντικατάστασης του ασβεστόλιθου με CaOreg, το ποσοστό SO₃ στο κλίνκερ παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων SO₃.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το Calcium Looping (CaL) είναι από τις ανερχόμενες τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών του CO₂. Η εν λόγω τεχνολογία μπορεί να παρέχει τη δυνατότητα στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας ή τσιμέντου όχι μόνο να μειώσει το ανθρακικό της αποτύπωμα, αλλά και να αποκομίσει, με τη χρήση των αναλωμένων αποβλήτων της, πρόσθετα οφέλη όσον αφορά την ενσωματωμένη ενέργεια του τελικού προϊόντος. Στην παρούσα μελέτη, διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης του εξαντληθέντος στο κύκλωμα του CaL CaO, στη φαρίνα του τσιμέντου. Ενώ μέχρι τώρα ανάλογες προσεγγίσεις ήταν αμιγώς θεωρητικές, η συγκεκριμένη βασίστηκε σε δείγματα από πιλοτική εγκατάσταση DFB των 200 kWth στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης. Προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το εξαντληθέν CaO είναι χημικώς συμβατό με τη φαρίνα του τσιμέντου. Είναι σε θέση να αντικαταστήσει όλα τα ασβεστολιθικά στο μίγμα, ικανοποιώντας τους ποιοτικούς στόχους. Τα ιχνοστοιχεία, τα οποία μετρήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα, δεν δημιουργούν ανησυχία για την ποιότητα του κλίνκερ και τις εκπομπές. Δεν αναμένεται αύξηση των SO_x στο βαθμό που το θείο στο εξαντληθέν CaO απαντήθηκε σε μορφή ανυδρίτη.
- Το εξαντληθέν CaO βελτιώνει την εμψιμότητα της φαρίνας, γεγονός που μεταφράζεται σε μία εξοικονόμηση της τάξης των 20 Kcal/kg κλίνκερ. Το κλίνκερ με CaOreg αποδείχτηκε παρόμοιο με το κλίνκερ αναφοράς. Η υψηλότερη περιεκτικότητα C₂S που καταγράφηκε δεν ήταν σε βάρος του C₃S και επομένως, δεν αναμένονται αρνητικές επιπτώσεις στην πρώιμη αντοχή του τσιμέντου. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε μπελίτη αποδόθηκε στην παρουσία υψηλότερου ποσοστού θείου στη φαρίνα, το οποίο συνήθως σταθεροποιεί τα συσσωματώματα του C₂S στο κλίνκερ.
- Η συμμετοχή του CaO στο μίγμα σε φυσιολογικά επίπεδα οδηγεί σε σημαντική μείωση του εκπεμπόμενου CO₂ κατά την έψηση. Προσδιορίστηκε πως για την πλήρη αντικατάσταση των ασβεστολιθικών, η εξοικονόμηση του CO₂ μπορεί να ανέλθει περίπου στα 285 kg/tn φαρίνας. Εναλλακτικά, για κάθε 1% CaO που αντικαθιστά ασβεστολιθικά, μπορεί να επιτευχθεί μία εξοικονόμηση CO₂ της τάξης των 3.6 kg/tn φαρίνας.
- Το υψηλό περιεχόμενο του CaO του CaL σε θείο αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την ενσωμάτωση υψηλών ποσοτήτων στην φαρίνα. Θεωρώντας έναν τυπικό - χωρίς by-pass - κλίβανο με προασβεστοποιητή, εκτιμήθηκε ότι προκειμένου να αποφευχθούν λειτουργικά προβλήματα (π.χ. φραξίματα στον προθερμαντή), το ποσοστό του καθαρού CaO με 2.0% SO₃ στο μίγμα της φαρίνας/πρώτης ύλης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abanades, J.C., Grasa, G., Alonso, M., Rodriguez, N., Anthony, E.J., Romeo, L.M., “Cost structure of a postcombustion CO₂ capture system using CaO”, *Environmental Science and Technology* 41 (15), 2007, 5523–5527.
- Bhatty, J.I., Miller, F.M., Kosmatka, S.H., 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Portland Cement, Association, IL, USA.

Charitos, A., Hawthorne, C., Bidwe, A.R., Sivalingam, S., Schuster, A., “Parametric investigation of the calcium looping process for CO₂ capture in a 10 kWth dual fluidized bed”, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (5), 2010b, 776–784.

Charitos, A., Hawthorne, C., Bidwe, A.R., Korovesis, L., Schuster A., Scheffknecht, G., “Hydrodynamic analysis of a 10kWth calcium looping dual fluidized bed for post-combustion CO₂ capture”, *Powder Technology* 200 (3), 2010, 117–127.

Dean, C.C., Blamey, J., Florin, N.H., Al-Jeboori, M.J., Fenell, P.S., “The calcium looping cycle for CO₂ capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production”, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 2011, 836-855.

Dean C., Hills T., Florin N., Dugwell D., Fenell P., “Integrating calcium looping CO₂ capture with the manufacture of cement”, *Energy Procedia*, 37, 2013, 7078-7090.

ECRA, 2007. Carbon capture technology—options and potentials for the cement industry. Technical Report TR 044/2007.

Romano M., Spinelli M., Campanari S., Consonni S., Cinti G., Marchi M., Borgarello E., The calcium looping process for low CO₂ emission cement and power, *Energy Procedia*, 37, 2013, 7091-7099.

Romeo, L.M., Abanades, J.C., Escosa, J.M., Pano, J., Gimenez, A., Sanchez-Biezma, A., Ballesteros, J.C., “Oxyfuel carbonation/calcination cycle for low cost CO₂ capture in existing power plants”, *Energy Conversion and Management* 49(10), 2008, 2809–2814.