

# **ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ - ΑΜΜΟΥ - ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΖΕΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ**

**Δημήτριος Βογιατζής**

*Γεωλόγος MSc, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη*

**Βασίλειος Χρηστάρας**

*Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη*

**Ανέστης Φιλιππίδης**

*Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη*

**Άννα Κασώλη-Φουρναράκη**

*Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη*

**Νικόλαος Καντηράνης**

*Δρ Γεωλόγος, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη*

**Αντωνία Μοροπούλου**

*Καθηγήτρια, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15780 Αθήνα*

**Αστέριος Μπακόλας**

*Δρ Χημικός Μηχανικός, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15780 Αθήνα*

*Λέξεις κλειδιά: Κονιάματα, Φυσικός Ζεόλιθος, Υπέρηχοι.*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Μίγματα με συγκεκριμένες ποσότητες τσιμέντου, αδρανών υλικών και νερού χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία κονιαμάτων. Ως αδρανή υλικά χρησιμοποιήθηκαν άμμος και Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος (ΕΛΦΥΖΕ) σε επί τοις (%) αναλογίες μεταξύ τους 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 και 0:100. Στα δοκίμια προσδιορίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων (P) κυμάτων για διάρκεια συμπαγοποίησης 3, 7, 28 και 90 ημερών με σκοπό την αξιολόγηση της συμπαγοποίησής τους και την πιθανή επίδραση του ΕΛΦΥΖΕ. Η ορυκτολογική σύσταση του ΕΛΦΥΖΕ είναι: 89% κ.β. κλινοπιλόλιθο, 3% κ.β. Μαρμαρυγία + αργιλικά ορυκτά, 6% κ.β. αστρίους και 2% κ.β. χαλαζία. Η παρουσία του φυσικού ζεόλιθου στη θέση της άμμου δεν επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια της συμπαγοποίησης. Όλα τα μίγματα των κονιαμάτων κυρίως συμπαγοποιήθηκαν στις πρώτες 7 ημέρες. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής του φυσικού ζεόλιθου (ΕΛΦΥΖΕ) στο μίγμα του κονιαματος τόσο μικρότερη είναι η μέση ταχύτητα διέλευσης των P-κυμάτων. Η τάση αυτή αποδίδεται στη μικροπορώδη δομή του ζεόλιθου (κλινοπιλόλιθου), στους μέσο- και μακρο- πόρους του ΕΛΦΥΖΕ αλλά και στην δυνατότητα του υλικού αυτού να προσλαμβάνει νερό.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κονιάματα είναι μίγματα μίας ή περισσοτέρων συνδετικών υλών (κονιών), νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (<4mm) και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά, αποκτούν δε μετά την πήξη και σκλήρυνση της συνδετικής ύλης, μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης (Παπαγιάννη κ.α., 2000).

Είναι προφανές ότι το κονίαμα που προορίζεται να συνδέσει τα διάφορα στοιχεία μεταξύ τους για δημιουργία μιας ενιαίας μονολιθικής μάζας που να αντέχει σε υψηλά φορτία, είναι απαραίτητο να αναπτύσσει ικανοποιητικές αντοχές με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας. Παράλληλα με τις αντοχές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλες σημαντικές τους ιδιότητες οι οποίες καθορίζουν την ποιότητα του κονιάματος και τα πεδία εφαρμογής του και σχετίζονται με τις πρώτες ύλες και τον τρόπο παρασκευής των κονιαμάτων και μπορούν να μετρηθούν με διάφορες καταστρεπτικές και μη μεθόδους.

Πρόσφατες έρευνες (Moropoulou et al. 2005) έδειξαν ότι η ανάπτυξη των αντοχών των κονιαμάτων αποκατάστασης, συνδέεται με τις αντιδράσεις της υδρασβέστου με τα ενεργά πρόσθετα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετακαολίνες (Bakolas et al. 2006) και το θραυσμένο κεραμικό (Aggelakopoulou et al. 2008). Οι περιπτώσεις αυτές εκπληρούν επίσης το κριτήριο της συμβατότητας που τίθεται ως προαπαίτηση για τα κονιάματα αποκατάστασης (Moropoulou et al. 2000) και συνδέεται με τον έλεγχο της μικροδομής. Η χρήση πρόσθετων που συμβάλλουν στην παραγωγή κονιαμάτων αποκατάστασης ελαφρότερων, με πιο συμβατή μικροδομή, απασχολεί ιδιαίτερα την σύγχρονη έρευνα (Katsioti et al. 2007). Για την εξυπηρέτηση αυτών των στόχων, εξετάζεται στην παρούσα εργασία η προσθήκη φυσικών ζεολίθων.

Τα συμβατικά κονιάματα αποτελούνται από τσιμέντο, άμμο και νερό. Με τον όρο "φυσικός ζεόλιθος" χαρακτηρίζεται το πέτρωμα που περιέχει ορυκτά της ομάδας των ζεολίθων. Οι ζεόλιθοι αποτελούν μια ιδιαίτερη τάξη στερεών κρυσταλλικών μικροπορωδών υλικών. Χαρακτηρίζονται από την ικανότητα να αποβάλλουν και να προσλαμβάνουν νερό, αλλά και να ανταλλάσσουν τα συστατικά κατιόντα τους. Η ποσότητα του απορροφημένου νερού κυμαίνεται από 10-20% του αφυδατωμένου μέλους. Η δομή των ζεολίθων είναι αξιόσημείωτα «ανοικτή» με όγκους κενών που φτάνουν το 50%

του αφυδατωμένου μέλους και ειδικό βάρος που κυμαίνεται από 2,0-2,2 g/cm<sup>3</sup>, ανάλογο με τον τύπο του ζεόλιθου (Bish & Ming 2001). Ο ζεόλιθος τύπου HEU, περιέχει μικροπόρους σε πλέγμα 10-μελών και 8-μελών δακτυλίων, διαστάσεων 7,5x3,1 Å, 4,6x3,6 Å και 4,7x2,8 Å (Baerlocher et al. 2001). Ορισμένοι φυσικοί ζεόλιθοι που περιέχουν υψηλά ποσοστά ζεόλιθου τύπου-HEU, παρουσιάζουν μοναδικές φυσικοχημικές ιδιότητες και βρίσκουν ευρεία πεδία εφαρμογής στη βιομηχανική, αγροτική, κτηνοτροφική και περιβαλλοντική τεχνολογία (Φιλιππίδης 2007). Αντίθετα, η άμμος αποτελείται κυρίως από χαλαζία και αστρίους των οποίων η δομή είναι «πυκνή» και τα ειδικά τους βάρη κυμαίνονται μεταξύ 2,6-2,7 g/cm<sup>3</sup>. Η παρούσα εργασία αποτελεί πρόδρομη ανακοίνωση μικρού μέρους των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής του πρώτου συγγραφέα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται κονιάματα από μίγματα τσιμέντου και διαφορετικών αναλογιών άμμου - Ελληνικού Φυσικού Ζεόλιθου (ΕΛΦΥΖΕ) τύπου-HEU της εταιρίας GEO-VET N. Αλεξανδρίδης & Σια Ο.Ε., συγκεκριμένης περιοχής των Πετρωτών Έβρου, με τη μέθοδο των υπερήχων, με στόχο την αξιολόγηση της εξέλιξης της συμπαγοποίησης των κονιαμάτων και την διερεύνηση της πιθανής επίδρασης του ΕΛΦΥΖΕ σε αυτή.

Η μεθοδολογία εξέτασης της συμπαγοποίησης είναι η MKM της υπερηχοσκόπησης. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον για την χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων γιατί επιτρέπουν την εκτενέστερη μελέτη κάποιων ιδιαίτερων υλικών, όπως είναι για παράδειγμα τα δομικά υλικά μνημείων, που στο παρελθόν ήταν πολύ περιορισμένη αν όχι αδύνατη. Δεδομένης της κατάστασης αυτής η συσκευή υπερήχων άρχισε να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο αφού παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σε θέματα που αφορούν π.χ. τη δομή, την υφή, την ποιότητα και την αντοχή των υλικών αυτών (Moropoulou et al. 1998a, Moropoulou et al. 1998b, Christaras 1997, & Christaras et al. 1994). Η μικροδομή εξετάζεται με ποροσιμετρία υδραργύρου (Moropoulou et al. 2000).

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Συγκεκριμένες ποσότητες αδρανών, τσιμέντου και νερού χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία των κονιαμάτων. Η αναλογία των παραπάνω συστατικών (τσιμέντο:αδρανές υλικό:νερό είναι 1:2,75:0,485 κατά βάρος), αλλά και η διαδικασία της ανάμιξής τους πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ASTM C109/109M (1995) και ASTM C618 (1996). Ως αδρανή υλικά χρησιμοποιήθηκαν άμμος και Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος (ΕΛΦΥΖΕ) σε επί τοις εκατό αναλογίες μεταξύ τους 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 και 0:100. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: πουζολανικό τσιμέντο Portland τύπου IV, άμμος ποτάμια από την κοίτη του Αξιού ποτα-

μού και ΕΛΦΥΖΕ που περιέχει 89% κ.β. κλινοπιλόλιθο, 3% κ.β. Μαρμαρυγία + αργιλικά ορυκτά, 6% κ.β. αστρίους και 2% κ.β. χαλαζία (Φιλιππίδης κ.α. 2007). Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ο ΕΛΦΥΖΕ θραύστηκε σε μέγεθος κόκκων άμμου.

Το κάθε παραγόμενο κονίαμα μορφοποιήθηκε συνολικά σε 12 κυβικά δοκίμια ακμής 50 mm (ASTM C109/109M-95) τα οποία αφέθηκαν να συμπαγοποιηθούν για χρονικό διάστημα έως 90 ημέρες. Οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας στις οποίες διατηρήθηκαν όλα τα δοκίμια ήταν 23-25°C και 65% αντίστοιχα και βρίσκονται εντός των ορίων που περιγράφονται στο πρότυπο ASTM C109/109M (1995) για τη θερμοκρασία: 20-27,5°C και για την υγρασία >50%.

Στα δοκίμια προσδιορίστηκε η ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων (P) κυμάτων για διάρκεια συμπαγοποίησης 3, 7, 28 και 90 ημέρες. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των κονιαμάτων είναι η σταδιακή συμπαγοποίησή τους που οδηγεί σε μεταβολή των χαρακτηριστικών τους (π.χ. μεταβολή αντοχής, πορώδους κ.α.). Η ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων μέσα από ένα υλικό εξαρτάται από τη συνεκτικότητα του υλικού, το μέγεθος των κόκκων, τα κενά μεταξύ των κόκκων και το υλικό με το οποίο είναι πληρωμένα αυτά τα κενά (αέρας, νερό κ.α.). Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι η μελέτη της διάδοσης των P-κυμάτων στα μίγματα τσιμέντου-άμμου-ΕΛΦΥΖΕ μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη της συμπαγοποίησης των κονιαμάτων. Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των επιμήκων (P) κυμάτων διαμέσου των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με το γαλλικό πρότυπο AFNOR NF B 10505. Η μέθοδος δεν καταστρέφει το δοκίμιο και χρησιμοποιεί ψηφιακή συσκευή υπερήχων. Ειδικοί μεταγωγείς των 54 kHz προσαρμόζονται αντιδιαμετρικά στα άκρα του δοκιμίου για τη μέτρηση των χρόνων διαδρομής των P κυμάτων. Μετρήσεις λήφθηκαν ως προς όλες τις διαστάσεις (X,Y,Z) των κυβικών δοκιμίων. Από τη διαίρεση του μήκους της ακμής των δοκιμίων (απόσταση διέλευσης των P κυμάτων) με το χρόνο διέλευσης αυτών βρίσκουμε την ταχύτητα διέλευσής τους διαμέσου των κυβικών δοκιμίων (ASTM C597-91). Στα πρότυπα δείγματα (REF1 και REF2) έγιναν μετρήσεις του ολικού πορώδους σε ποροσίμετρο υδραργύρου, τύπου Porosimeter 2000 fisons instruments στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στους Πίνακες 1-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ταχύτητας των P-κυμάτων των εξεταζόμενων κυβικών δοκιμίων. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα δοκίμια με μηδενική συμμετοχή ΕΛΦΥΖΕ ως αδρανές υλικό στη θέση της άμμου, ενώ στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα

δοκίμια με μηδενική συμμετοχή άμμου ως αδρανές υλικό. Στους πίνακες 2-4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των μιγμάτων με ενδιάμεσες αναλογίες άμμου-ΕΛΦΥΖΕ.

Πίνακας 1. Ταχύτητες διέλευσης Ρ-κυμάτων (m/sec) από τα κυβικά δοκίμια κονιαμάτων με αντικατάσταση (%) άμμου από ΕΛΦΥΖΕ\* = 100-0.

Δοκίμιο	Διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες)	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
REF1.1	3	3785	4237	4701	4209	187
REF1.2		4268	4304	4274		
REF1.3		4176	4089	4084		
REF1.4	7	2863	2673	2720	2752	65
REF1.5		2823	2749	2811		
REF1.6		2812	2660	2667		
REF1.7	28	2890	2865	2749	2831	85
REF1.8		2955	2783	2867		
REF1.9		2799	2775	2819		
REF1.10	90	2684	2595	2617	2662	30
REF1.11		2714	2740	2758		
REF1.12		2622	2636	2603		

\* ΕΛΦΥΖΕ: Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος

Πίνακας 2. Ταχύτητες διέλευσης Ρ-κυμάτων (m/sec) από τα κυβικά δοκίμια κονιαμάτων με αντικατάσταση (%) άμμου από ΕΛΦΥΖΕ\* = 75-25.

Δοκίμιο	Διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες)	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
M1.1	3	3626	4016	4364	4040	187
M1.2		3814	4205	4385		
M1.3		3801	4097	4016		
M1.4	7	2667	2828	2788	2754	65
M1.5		2720	2849	2886		
M1.6		2595	2682	2755		
M1.7	28	2595	2660	2753	2736	85
M1.8		2726	2851	2870		
M1.9		2572	2739	2839		
M1.10	90	2514	2524	2564	2551	30
M1.11		2519	2546	2598		
M1.12		2493	2571	2648		

\* ΕΛΦΥΖΕ: Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος

Πίνακας 3. Ταχύτητες διέλευσης P-κυμάτων (m/sec) από τα κυβικά δοκίμια κονιαμάτων με αντικατάσταση (%) άμμου από ΕΛΦΥΖΕ\* = 50-50.

Δοκίμιο	Διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες)	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
M2.1		3327	3395	3798		
M2.2	3	3293	3684	3535	3504	136
M2.3		3333	3585	3630		
M2.4		2468	2465	2447		
M2.5	7	2545	2518	2535	2489	34
M2.6		2418	2463	2532		
M2.7		2302	2374	2440		
M2.8	28	2493	2728	2634	2525	93
M2.9		2512	2616	2619		
M2.10		2299	2304	1811		
M2.11	90	2012	2366	2469	2276	136
M2.12		2319	2327	2442		

\* ΕΛΦΥΖΕ: Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος

Πίνακας 4. Ταχύτητες διέλευσης P-κυμάτων (m/sec) από τα κυβικά δοκίμια κονιαμάτων με αντικατάσταση (%) άμμου από ΕΛΦΥΖΕ\* = 25-75.

Δοκίμιο	Διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες)	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
M3.1		2835	3118	3222		
M3.2	3	2808	2911	3258	3013	145
M3.3		2853	3160	2970		
M3.4		2234	2240	2326		
M3.5	7	2237	2304	2235	2271	48
M3.6		2242	2290	2362		
M3.7		2213	2295	2230		
M3.8	28	2295	2340	2395	2299	55
M3.9		2293	2307	2330		
M3.10		2037	2024	2083		
M3.11	90	2168	2139	2200	2126	68
M3.12		2194	2090	2188		

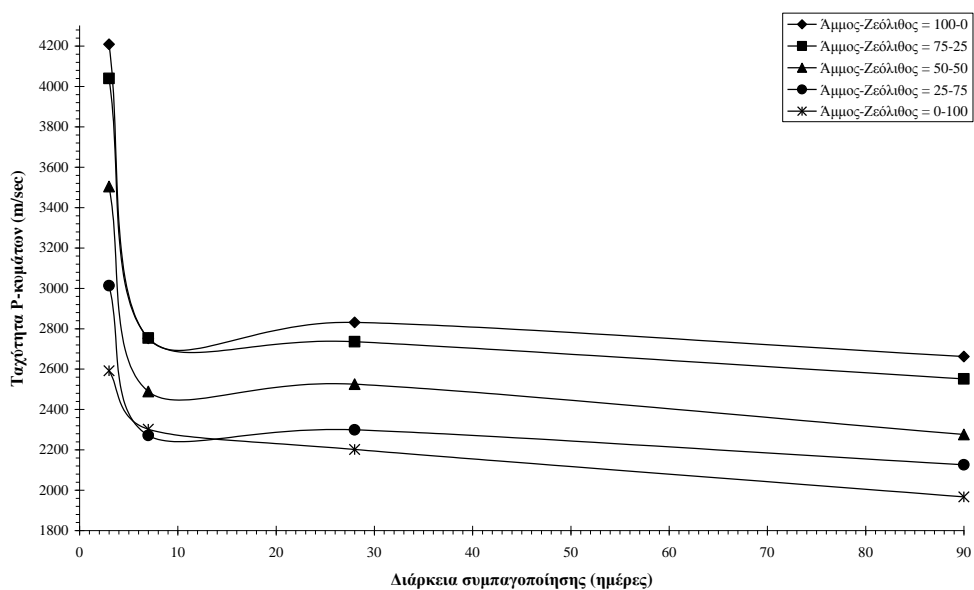
\* ΕΛΦΥΖΕ: Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος

Πίνακας 5. Ταχύτητες διέλευσης P-κυμάτων (m/sec) από τα κυβικά δοκίμια κονιαμάτων με αντικατάσταση (%) άμμου από ΕΛΦΥΖΕ\* = 0-100.

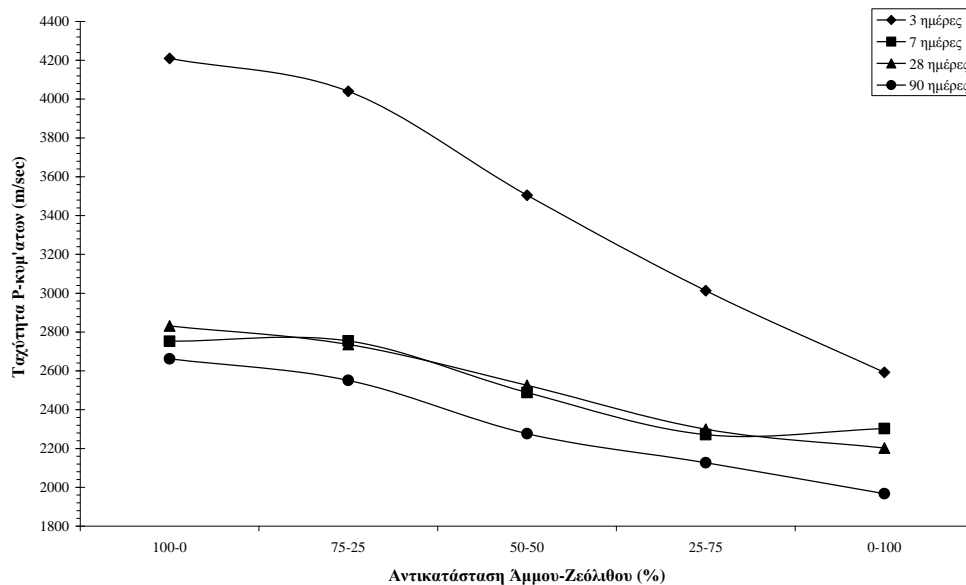
Δοκίμιο	Διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες)	V <sub>X</sub>	V <sub>Y</sub>	V <sub>Z</sub>	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
REF2.1		2507	2701	2711		
REF2.2	3	2488	2493	2421	2592	90
REF2.3		2623	2637	2725		
REF2.4		2292	2208	2198		
REF2.5	7	2352	2377	2483	2302	59
REF2.6		2335	2275	2240		
REF2.7		2156	2175	2050		
REF2.8	28	2302	2262	2335	2202	52
REF2.9		2176	2196	2161		
REF2.10		2008	2023	2041		
REF2.11	90	1989	1898	2064	1967	57
REF2.12		1846	1892	1927		

\*ΕΛΦΥΖΕ: Ελληνικός Φυσικός Ζεόλιθος

Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας των P-κυμάτων σε σύγκριση με τη διάρκεια της συμπαγοποίησης και το ποσοστό (%) αντικατάστασης της άμμου από φυσικό ζεόλιθο (ΕΛΦΥΖΕ), αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Μεταβολή της ταχύτητας των P-κυμάτων με τη διάρκεια συμπαγοποίησης.



Σχήμα 2. Μεταβολή της ταχύτητας των P-κυμάτων με το ποσοστό αντικατάστασης άμμου-φυσικού ζεόλιθου (ΕΛΦΥΖΕ).

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 1, σε δοκίμια που περιέχουν μόνο τσιμέντο και άμμο, η μέση τιμή της ταχύτητας των P-κυμάτων μεταβάλλεται από 4209 m/sec στις 3 ημέρες συμπαγοποίησης σε 2662 m/sec για τις 90 ημέρες συμπαγοποίησης. Οι Reinhardt & Grosse (2004) σε μίγματα τσιμέντου:άμμου:νερού 1:3:0,5 μέτρησαν ταχύτητα διέλευσης P-κυμάτων 4200 m/sec για διάρκεια συμπαγοποίησης 24 ώρες, ενώ οι Hernandez et al. (2006) σε μίγματα τσιμέντου:άμμου:νερού 1:3:0,45 για διάρκεια συμπαγοποίησης μικρότερη των 24 ωρών μέτρησαν ταχύτητα 4521 m/sec. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2 η μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας των P-κυμάτων παρατηρείται στο διάστημα μεταξύ 3 και 7 ημερών συμπαγοποίησης, ενώ μετά τις 7 ημέρες συμπαγοποίησης η μεταβολή είναι σαφώς μικρότερη και πιο ομαλή.

Σε δοκίμια μόνο με τσιμέντο και φυσικό ζεόλιθο (πίνακας 5) οι μέσες τιμές της ταχύτητας των P-κυμάτων είναι σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με αυτές των δοκιμίων μόνο με τσιμέντο και άμμο και κυμαίνονται από 2592 m/sec για διάρκεια συμπαγοποίησης 3 ημέρες μέχρι 1967 m/sec για διάρκεια συμπαγοποίησης 90 ημέρες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1 τα δοκίμια με αναλογία άμμου:φυσικού ζεόλιθου 0:100 εμφανίζουν τις μικρότερες μέσες ταχύτητες διέλευσης των P-κυμάτων. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι ακόμη και στις πρώτες ημέρες συμπαγοποίησης (3 ημέρες) η



προσθήκη φυσικού ζεόλιθου στη θέση του αδρανούς μειώνει δραστικά την ταχύτητα διέλευσης των P-κυμάτων με την απόλυτη μείωση της μέσης τιμής της να φθάνει τα 1617 m/sec (REF1-REF2).

Για δοκίμια με ενδιάμεσες αναλογίες μιγμάτων άμμου-φυσικού ζεόλιθου (M1 75:25, M2 50:50 και M3 25:75) για όλες τις ημέρες συμπαγοποίησης οι μέσες ταχύτητες των P-κυμάτων κυμαίνονται μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων μιγμάτων (REF1 και REF2) και εμφανίζουν τιμές μεταξύ 4040 m/sec (πίνακας 2, δοκίμιο M1) και 2126 m/sec (πίνακας 4, δοκίμιο M3). Στο σχήμα 1 επιβεβαιώνεται η παρατήρηση αυτή, ενώ στο σχήμα 2 παρατηρούμε ότι στο δοκίμιο REF1 η διάφορα της πρώτης (3 ημέρες συμπαγοποίησης) από τη δεύτερη (7 ημέρες συμπαγοποίησης) μέτρηση της ταχύτητας διέλευσης των P-κυμάτων είναι εμφανώς μεγαλύτερη από κάθε άλλου δοκιμίου και σε απόλυτη τιμή ισούται με 1457m/sec. Αντίθετα από το ίδιο σχήμα, παρατηρούμε ότι η διάφορα της πρώτης από την δεύτερη μέτρηση της ταχύτητας διέλευσης των P-κυμάτων, για το δοκίμιο REF2 είναι σαφώς η μικρότερη όλων των υπολοίπων και ισούται με 625m/sec, δηλαδή περισσότερο από 2 φορές μικρότερη μέση τιμή μείωσης.

Η παρουσία του φυσικού ζεόλιθου (ΕΛΦΥΖΕ) στη θέση της άμμου δεν επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια της συμπαγοποίησης και φαίνεται από το Σχ. 1 ότι όλα τα μίγματα των εξεταζόμενων κονιαμάτων συμπαγοποιούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους στις πρώτες 7 ημέρες. Από το Σχ. 2 προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής του φυσικού ζεόλιθου στο μίγμα του κονιάματος τόσο μικρότερη είναι η μέση ταχύτητα διέλευσης των P-κυμάτων. Η τάση αυτή αποδίδεται στη μικροπορώδη δομή του ζεόλιθου (κλινοπτιλόλιθου), στους μέσο- και μακρο- πόρους του ΕΛΦΥΖΕ αλλά και στην δυνατότητα του υλικού αυτού να προσλαμβάνει νερό. Οι τιμές του ολικού πορώδους στα δείγματα REF1 και REF2 είναι 29 και 33%, αντίστοιχα και βρίσκονται σε καλή συμφωνία με την ταχύτητα διέλευσης των P-κυμάτων στα ίδια δείγματα. Μικρές ταχύτητες διέλευσης P-κυμάτων είναι γνωστό ότι συνδέονται με μεγάλο πορώδες (Wyllie et al. 1958). Σύμφωνα με τους Janotka και Mojumdar (2003) η προσθήκη ζεόλιθου σε μίγματα με τσιμέντο οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού των μικρο-πόρων, και επαληθεύεται ενώ σύμφωνα με τον Janotka (1999) η παρουσία ζεόλιθου σε κονιάματα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ικανότητα απορροφήσεως νερού και μεγαλύτερο ολικό πορώδες. Οι δύο αυτές παράμετροι είναι ικανές να μειώσουν σημαντικά την ταχύτητα των P-κυμάτων που διέρχονται από ένα δοκίμιο εφόσον η ταχύτητα διέλευσης των P-κυμάτων στον αέρα είναι 330 m/sec, ενώ στο νερό 1450 m/sec (Parasnis 1997).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα δοκίμια REF1 (κονιάματα μόνο με τσιμέντο και άμμο), η μέση τιμή της ταχύτητας των P-κυμάτων μεταβάλλεται από 4209 m/sec στις 3 ημέρες συμπαγοποίησης σε 2662 m/sec για τις 90 ημέρες συμπαγοποίησης. Η με-

γαλύτερη μείωση της ταχύτητας των Ρ-κυμάτων παρατηρείται στο διάστημα μεταξύ 3 και 7 ημερών συμπαγοποίησης, ενώ μετά τις 7 ημέρες συμπαγοποίησης η μεταβολή είναι σαφώς μικρότερη και πιο ομαλή.

Σε δοκίμια μόνο με τσιμέντο και Ελληνικό Φυσικό Ζεόλιθο (ΕΛΦΥΖΕ) οι μέσες τιμές της ταχύτητας των Ρ-κυμάτων είναι σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με αυτές των δοκιμίων μόνο με τσιμέντο και άμμο και κυμαίνονται από 2592 m/sec για διάρκεια συμπαγοποίησης 3 ημέρες μέχρι 1967 m/sec για διάρκεια συμπαγοποίησης 90 ημέρες. Τα δοκίμια με αναλογία άμμου:ΕΛΦΥΖΕ 0:100 εμφανίζουν τις μικρότερες μέσες ταχύτητες διέλευσης των Ρ-κυμάτων.

Ακόμη και στις πρώτες ημέρες συμπαγοποίησης η προσθήκη ΕΛΦΥΖΕ στη θέση του αδρανούς μειώνει δραστικά την ταχύτητα διέλευσης των Ρ-κυμάτων με την απόλυτη μείωση της μέσης τιμής της να φθάνει τα 1617 m/sec. Για δοκίμια με ενδιάμεσες αναλογίες άμμου-ΕΛΦΥΖΕ για όλες τις ημέρες συμπαγοποίησης οι μέσες ταχύτητες των Ρ-κυμάτων κυμαίνονται μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων μιγμάτων.

Η παρουσία του φυσικού ζεόλιθου (ΕΛΦΥΖΕ) στη θέση της άμμου δεν επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια της συμπαγοποίησης. Όλα τα μίγματα των εξεταζόμενων κονιαμάτων συμπαγοποιούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους στις πρώτες 7 ημέρες. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής του ΕΛΦΥΖΕ στο μίγμα του κονιάματος τόσο μικρότερη είναι η μέση ταχύτητα διέλευσης των Ρ-κυμάτων. Η τάση αυτή αποδίδεται στη μικροπορώδη δομή του ζεόλιθου (κλινοπτιλόλιθου), στους μέσο- και μακρο- πόρους του ΕΛΦΥΖΕ αλλά και στην δυνατότητα του υλικού αυτού να προσλαμβάνει νερό. Οι παράμετροι αυτοί (κενά πληρωμένα με αέρα και/ή νερό) είναι ικανές να ταπεινώσουν σημαντικά την ταχύτητα των Ρ-κυμάτων που διέρχονται από ένα υλικό.

## 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες εκφράζονται στην εταιρεία GEO-VET Ν. Αλεξανδρίδης & Σια Ο.Ε. για την προμήθεια και επεξεργασία του Ελληνικού Φυσικού Ζεόλιθου, καθώς και για την οικονομική στήριξη της έρευνας.

## 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Κατσιώτη, Μ., Γκάνης, Δ., Πιπλικάκη, Π., Σακελλαρίου, Α., Παπαθανασίου, Α., Τέας, Χ., Χανιωτάκης, Ε., Μούνδουλας, Π., Μοροπούλου, Α. «Μελέτη υποκατάστασης ασβεστολιθικών αδρανών με ποζολανικά πρόσθετα σε κονιάματα». 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Θερμικής Ανάλυσης – ΘΕΡΜΑ 2007 (7-9 Δεκεμβρίου 2007, Αθήνα)

Παπαγιάννη, Ι., Τσίμα, Σ., Μοίρα, Π., Μαλαμή, Χ., Παπαγιαννάκη, Σ., Ζήση, Σ., & Σακελλάρη, Ι. Οδηγός Δομικών Υλικών που αφορά τα Κονιάματα Τ.Ε.Ε. (2000).

Φιλίππιδης, Α., Ζεόλιθοι Δήμου Τριγώνου του Νομού Έβρου στη βιομηχανική, αγροτική, κτηνοτροφική και περιβαλλοντική τεχνολογία. Ημερίδα: Δυνατότητες ανάπτυξης στο Βόρειο Έβρο. Πετρωτά Έβρου, 4 Αυγούστου 2007, Πρακτ., (2007) 89-107.

Φιλίππιδης, Α., Αποστολίδης, Ν., Φιλίππιδης, Σ. & Παραγιός, Ι., Καθαρισμός αστικών λυμάτων και παραγωγή άοσμης λυματολάσπης με τη χρήση πορώδους Ελληνικού φυσικού ζεόλιθου των Πετρωτών Έβρου. 3ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Πορώδων Υλικών. Θεσσαλονίκη, 1-2 Νοεμβρίου 2007, Εκτ. Περίλ., (2007) 23-25.

AFNOR NF B 10505. Produits de carrières-Pierres calcaires- Mesure de la vitesse de propagation du son (ondes longitudinales), 2p. (1973).

Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A., "Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes" Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2008), in Press

ASTM C109/109M. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in or [50-mm] cube specimens). Cement, Lime, Gypsum, vol. 04.01, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 5p. (1995).

ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and row or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. Concrete and Aggregates, vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 3p (1996).

ASTM C597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, 286-288. (1991)

Baerlocher, C., Meier, W.M. & Olson, D.H., Atlas of Zeolite Framework Types. Elsevier, Amsterdam, (2001) 301p.

Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., Moropoulou, A., Anagnostopoulou, S., "Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin-lime pastes" Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 84 (2006) pp. 157-163

Bish, D.L. and Ming, D.W. (Eds) Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 45, (2001) 654p.

Christaras, B., Auger, F., & Mosse, E., Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. Materials and Structures 27, (1994) 222-228.

Christaras, B., Estimation of damage at the surface of stones using non-destructive techniques. 5<sup>th</sup> Int. Congr. On structural studies, repairs and maintenance of historical buildings, STREMA V, San Sebastian, in: Ad-

vances in Arhitectural Series of Computational Mechanics Publications, Southampon. (1997) 121-128.

Hernandez , M.G., Anaya, J.J., Sanchez, T. & Segura, I. Porosity estimation of aged mortar using a micromechanical model Ultrasonics 44 (2006) e1007–e1011.

Janotka, I., & Mojumdar, S., Hydration of Portland cement-natural zeolite mortar in water and sulphate solution Solid State phenomena Vols. 90-91 (2003) pp. 309-316.

Janotka, I., The influence of zeolitic cement and sand on resistance of mortar subjected to hydrochloric acid solution attack, CERAMICS – Silikaty, Vol. 43, No. 2, (1999) pp. 61 – 66.

Katsioti, M., Gkanis, D., Pipilikaki, P., Sakellariou, A., Papathanasiou, A., Teas, Ch., Chaniotakis, E. «Study of the substitution of limestone filler with pozzolanic additives in mortars». International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Hellas, July 1st - 6th, 2007.

Moropoulou, A., Kouli, M., Chararas, B., Tsiourva, Th., Non-destructive evaluation of the performance of mortars on historic masonries. PACT 55, (1998a) 243-266.

Moropoulou, A., Tsiourva, Th., Theoulakis, P., Chararas, B., Kouli, M., Non-destructive evaluation of pilot scale treatments for porous stone consolidation in the medieval city of Rhodes. PACT 56, (1998b) 259-273.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Michailidis, P., “Evaluation of compatibility between repair mortars and building materials in historic structures by the control of the microstructure of cement-based systems”, Concrete Science and Engineering, 2 (2000) pp. 191-195

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S., “Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries”, Cement and Concrete Composites, 27 (2005) pp.289-294

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Avdelidis, N.P., «Evaluation of compatibility between restoration mortars and traditional building materials by the control of the microstructure», in Proc. «Conoscenze e Sviluppo di Criteri per la Definizione e Valutazione della Compatibilita nelle Malte per il Restauro», Scienza e Beni Culturali, Bressanone (2000) p. 71-78

Parasnis S.D. Principles of applied geophysics. Chapman & Hall, London, (1997) 429p.

Reinhardt, H.W. & Grosse C.U. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. Construction and Building Materials 18 (2004)145–154.

Wyllie, M.J.R., Gregory, A. R., Gardner, G. H. F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. Geophysics 23, (1958) 459.