

ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΟΖΟΛΑΝΗΣ ΤΗΣ ΝΙΣΥΡΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Καντηράνης Ν.¹, Φιλιππίδης Α.¹, Βογιατζής Δ.², Δρακούλης Α.¹ και Καρατάσιος Γ.³

¹ Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, kantira@geo.auth.gr, anestis@geo.auth.gr, alexdr@geo.auth.gr

² Τομέας Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, dvoqias@geo.auth.gr

³ Μαθηματικός, Δρ. Πολυτεχνικής Σχολής Α.Π.Θ., Ολυμπιάδος 14, Ν.751, 552 36 Πανόραμα, kar1@enman.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εμπορική ποιότητα της ποζολάνης (πούδρα <1 mm) από την περιοχή Γυαλί της Νισύρου μελετήθηκε όσον αφορά την καταλληλότητά της για χρήση στην παρασκευή ιστορικών κονιαμάτων. Προσδιορίστηκε η ορυκτολογική της σύσταση με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ, έγιναν κοκκομετρικές αναλύσεις και μελετήθηκαν η μοναξονική αντοχή στη θλίψη και το φαινόμενο ειδικό βάρος σε κονιάματα της ποζολάνης και σε πρότυπα δείγματα. Επίσης, προσδιορίστηκε η ποζολανικότητα του υλικού με την εύρεση του δείκτη δραστηριότητας αντοχής 7 και 28 ημερών. Ορυκτολογικά η εξεταζόμενη ποζολάνη αποτελείται κυρίως από άμορφο υλικό (93% κ.β.) και σε μικρότερες ποσότητες από ασβεστίτη (3% κ.β.), χαλαζία (2% κ.β.) και αστρίους (2% κ.β.). Από την κοκκομετρική ανάλυση προέκυψε ότι η εξεταζόμενη ποζολάνη είναι πολύ ανομοιομορφη, ενώ σύμφωνα με το ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών έχει καλή διαβάθμιση και χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος. Μεταξύ της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη και της διάρκειας συμπαγοποίησης υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση με την υπερβολική κατανομή. Οι δοκιμές ποζολανικότητας έδωσαν δείκτη δραστηριότητας αντοχής 7 ημερών 93,43% και 28 ημερών 99,16% και είναι πολύ μεγαλύτερες από το 75% που απαιτείται. Η μοναξονική αντοχή στη θλίψη των 90 ημερών βρέθηκε $11,46 \pm 1,33$ N/mm² και είναι σχεδόν διπλάσια από την απαίτηση των 6 N/mm². Σύμφωνα με αυτά τα χαρακτηριστικά η εξεταζόμενη ποζολάνη είναι κατάλληλη για χρήση ως προσθετικό υλικό σε παραδοσιακά κονιάματα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με το ΠΔ 244/1980 οι ποζολάνες είναι φυσικά ή τεχνητά πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά, η χαρακτηριστική ιδιότητα των οποίων είναι ότι σε λεπτότατο καταμερισμό και με παρουσία υγρασίας, ενώνονται χημικά με την υδράσβεστο, στη συνήθη θερμοκρασία και σχηματίζουν ενώσεις υδραυλικές. Στις φυσικές ποζολάνες περιλαμβάνονται διάφορες ηφαιστειακές γαίες, ενώ στις τεχνητές υπάγονται και οι ιπτάμενες τέφρες εφόσον έχουν ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες. Υδραυλική ιδιότητα είναι η ικανότητα που έχει ένα υλικό όταν σε λεπτόκοκκο διαμερισμό μετά από ανάμιξη με νερό πήζει και σκληρύνεται στον αέρα ή εντός νερού.

Η φυσική ποζολάνη είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ιστορικών κονιαμάτων μαζί με την άσβεστο και το κεραμάλευρο. Χρησιμοποιήθηκε σε μνημεία της αρχαίας Ελλάδας, στο Πάνθεον της Ρώμης, σε Βυζαντινά μνημεία, αλλά και σε νεοκλασικά κτίρια του 19^{ου} αιώνα τα οποία έδειξαν αξιόσημειωτη αντοχή στη φθορά από το χρόνο και τους σεισμούς και διατηρήθηκαν από το πέρασμα των αιώνων μέχρι σήμερα (π.χ. Moropoulou et al. 1995, Penelis 1997, Karaveziroglou et al. 1998, Moropoulou et al. 1998a,b, Parayianni 1998, Moropoulou et al. 2004).

Σήμερα, η φυσική ποζολάνη χρησιμοποιείται στον ελληνικό χώρο για την αναπαλαίωση σημαντικών κατασκευών του παρελθόντος όπως είναι ο Αρχαιολογικός χώρος της Νικόπολης, η Εθνική Βιβλιοθήκη Αθηνών, πολλές Μονές του Αγίου Όρους, το Μουσείο Μπενάκη, η Παλαιά Πόλη της Ρόδου, η Παλαιά Πόλη του Ρεθύμνου, οι Παλαιές φυλακές της Αίγινας, το αρχαίο θέατρο της Δω-

δώνης, το Παναθηναϊκό Στάδιο κ.α. (π.χ. Karaveziroglou et al. 1997a,b, Penelis 1997, Moγorouλου et al. 1998b, Moγorouλου 2000, Moγorouλου et al. 2000, Toumbakari et al. 2000, Maravelaki-Kalaitzaki et al. 2004). Επίσης, χρησιμοποιείται στον εξωτερικό και εσωτερικό διάκοσμο σύγχρονων κατασκευών, αλλά και ως υλικό τοιχοποιίας παρέχοντας στις κατασκευές ανθεκτικότητα στο χρόνο κι' ένα αισθητικό αποτέλεσμα ιδιαίτερα αρμονικό με το φυσικό περιβάλλον.

Η καταλληλότητα μιας φυσικής ποζολάνης για χρήση της στην παρασκευή παραδοσιακών κονιαμάτων αξιολογείται από τα αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμών (Penelis 1997, Παπαγιαννί 1998, Moγorouλου 2000) που πρέπει κάθε φορά να εκτελούνται. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης της ποζολάνης με έμφαση στην περιεκτικότητα του άμορφου υλικού, κοκκομετρικές αναλύσεις, μετρήσεις ειδικού βάρους και ειδικής επιφάνειας, την περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά αλκάλια, καθώς και δοκιμές ποζολανικότητας. Αυτή αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο για την αξιολόγηση ενός υλικού για χρήση στην παρασκευή κονιαμάτων.

Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η ποζολάνη της Νισύρου όσον αφορά την καταλληλότητά της στην παραγωγή συμβατών υλικών για την παρασκευή παραδοσιακών κονιαμάτων. Μελετήθηκε η ορυκτολογική σύσταση και προσδιορίστηκε το άμορφο υλικό, έγιναν κοκκομετρικές αναλύσεις και μετρήθηκε το φαινόμενο ειδικό βάρος, ενώ πραγματοποιήθηκαν πλήρεις δοκιμές ποζολανικότητας σύμφωνα με τα ελληνικά και διεθνή πρότυπα.

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αντιπροσωπευτικό υλικό της εμπορικής ποιότητας της εξεταζόμενης ποζολάνης (σκόνη <1 mm) συλλέχθηκε από την περιοχή Γυαλί της Νισύρου, όπου βρίσκεται και το ομώνυμο ορυχείο της εταιρείας ΛΑΒΑ Μεταλλευτική και Λατομική Α.Ε. θυγατρικής του ομίλου εταιρειών ΗΡΑΚΛΗΣ που είναι μέλος του ομίλου LAFARGE. Από τη μακροσκοπική παρατήρηση προκύπτει ότι το εξεταζόμενο υλικό έχει τεφρόλευκο χρώμα και χαρακτηρίζεται από την παρουσία εκτεταμένου συστήματος πόρων διάφορων μεγεθών που καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνειά του. Ένα μέρος του υλικού κονιοποιήθηκε επιπλέον σε αχάτινο γουδί για τη μελέτη της ορυκτολογικής του σύστασης με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ κόνεως (PXRD), ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιήθηκε ως έχει για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής του σύστασης και τις δοκιμές ποζολανικότητας.

Για την ορυκτολογική μελέτη με τη μέθοδο PXRD χρησιμοποιήθηκε ακτινοβολία Cu με φίλτρο Ni για την παραγωγή ακτινοβολίας CuK_{α} σε περιθλασίμετρο τύπου Philips PW1710 του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ., με συνθήκες λειτουργίας 35 kV και 25 mA, ταχύτητα γωνιομέτρου $1,2^{\circ}/\text{min}$ και περιοχή σάρωσης $3-63^{\circ} 2\theta$. Ο ημιποσοτικός προσδιορισμός των ορυκτών φάσεων έγινε με βάση τις απαριθμήσεις (counts) συγκεκριμένων ανακλάσεων που δεν επηρεάζονται από καμιά άλλη ανάκλαση και λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα και το συντελεστή απορρόφησης μάζας για ακτινοβολία CuK_{α} των ορυκτών που προσδιορίστηκαν. Το άμορφο υλικό υπολογίστηκε με δύο μεθόδους. Κατά την πρώτη μέθοδο με τη βοήθεια του λογισμικού PC-APD (1994), προσδιορίζονται τα όρια της γωνίας 2θ στα οποία εμφανίζονται οι πλατύκυρτες ανακλάσεις του άμορφου υλικού (Guinier 1963), υπολογίζεται το εμβαδόν της οριοθετημένης περιοχής και αφαιρείται από αυτό το εμβαδόν των εμπεριεχομένων ανακλάσεων των κρυσταλλικών φάσεων. Το καθαρό εμβαδόν που απομένει συγκρίνεται με το εμβαδόν πρότυπου δείγματος με 100% άμορφο υλικό (Καντηράνης 1998,2001, Kantiranis et al. 1998,1999, Drakoulis et al. 2004, Καντηράνης κ.ά. 2004). Κατά τη δεύτερη μέθοδο έγινε προσδιορισμός της κρυσταλλικότητας του εξεταζόμενου υλικού με τη χρήση λογισμικού (CRYST, Stergiou 1995) που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό του βαθμού κρυσταλλικότητας ενός δείγματος. Με τη βοήθεια αυτού αναλύεται το περιθλασιόγραμμα σε επί μέρους ανακλάσεις, που περιγράφονται με γνωστές εκθετικές συναρτήσεις μορφής. Η συνισταμένη όλων των ανακλάσεων (και του άμορφου) ταυτοποιείται με το περιθλασιόγραμμα με τη μέθοδο των διαδοχικών προσαρμογών. Τελικά, αφού επιτευχθεί ικανοποιητική ταύτιση, δίνεται ο βαθμός κρυσταλλικότητας του δείγματος (σε κλίμακα από 0 έως 1) και από αυτόν το ποσοστό της άμορφης φάσης που περιέχεται στο δείγμα. Οι δύο μέθοδοι έχουν επαληθευτεί με πρότυπα μίγματα άμορφων και κρυσταλλικών φάσεων και βρέθηκε ότι η τυπική τους απόκλιση είναι 2% κ.β. (Καντηράνης κ.ά. 2004, Δρακούλης 2005).

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα AASHTO T-27 (1993) και ASTM C123 (1994) με τη χρήση κόσκινων τετραγωνικών οπών. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C123 (1994) 200 g από το εξεταζόμενο υλικό τοποθετήθηκε σε διάταξη κόσκινων με σειρά

μεγέθους βροχίδας (σε mm) αυξανόμενη από κάτω προς τα πάνω ως εξής: 0,075-0,15-0,30-0,425-2,0. Το κάτω από 0,075 mm κλάσμα αναλύθηκε περαιτέρω με αραιόμετρο (ASTM D422-63, 1994).

Συγκεκριμένες ποσότητες ποζολάνης, τσιμέντου (τύπου πόρτλαντ) και νερού χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία του κονιάματος. Οι αναλογίες των παραπάνω συστατικών, αλλά και η διαδικασία της ανάμιξής τους πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ASTM C109/109M (1995) και ASTM C618 (1996). Το παραγόμενο κονίαμα μορφοποιήθηκε συνολικά σε 16 κυβικά δοκίμια ακμής 50 mm (ASTM C109/109M 1995) τα οποία αφέθηκαν να συμπαγοποιηθούν για χρονικό διάστημα έως 90 ημέρες. Επιπλέον προετοιμάστηκαν 8 πρότυπα δοκίμια αναφοράς με τσιμέντο (τύπου πόρτλαντ) και άμμο, όπως περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C311 (1996a). Οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας στις οποίες διατηρήθηκαν όλα τα δοκίμια ήταν 22,2-23,4° C και 55% 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 της ποζολάνης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της μοναξονικής αντοχής σε θλίψη μετά από 3, 7, 28 και 90 ημέρες (ΠΔ244 1980 και ASTM C109/109M 1995). Για κάθε ημέρα μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά δοκίμια και η τιμή της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη προέκυψε ως το αποτέλεσμα της μέσης τιμής των τεσσάρων διαφορετικών μετρήσεων. Επίσης προσδιορίστηκε ο δείκτης δραστηριότητας αντοχής (strength activity index) 7 και 28 ημερών. Ο δείκτης αυτός προκύπτει από τη σύγκριση της μέσης μοναξονικής αντοχής στη θλίψη των δοκιμίων της εξεταζόμενης ποζολάνης στις 7 και 28 ημέρες με τις αντίστοιχες τιμές των πρότυπων δοκιμίων. Εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό και δείχνει πόσο πλησιάζουν οι τιμές της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη των εξεταζόμενων δοκιμίων με τις αντίστοιχες τιμές των πρότυπων δοκιμίων. Αποτελεί σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C618 (1996) βασικό παράγοντα εκτίμησης της ποζολανικότητας ενός υλικού.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ημιποσοτικού προσδιορισμού της ορυκτολογικής σύστασης της εξεταζόμενης ποζολάνης.

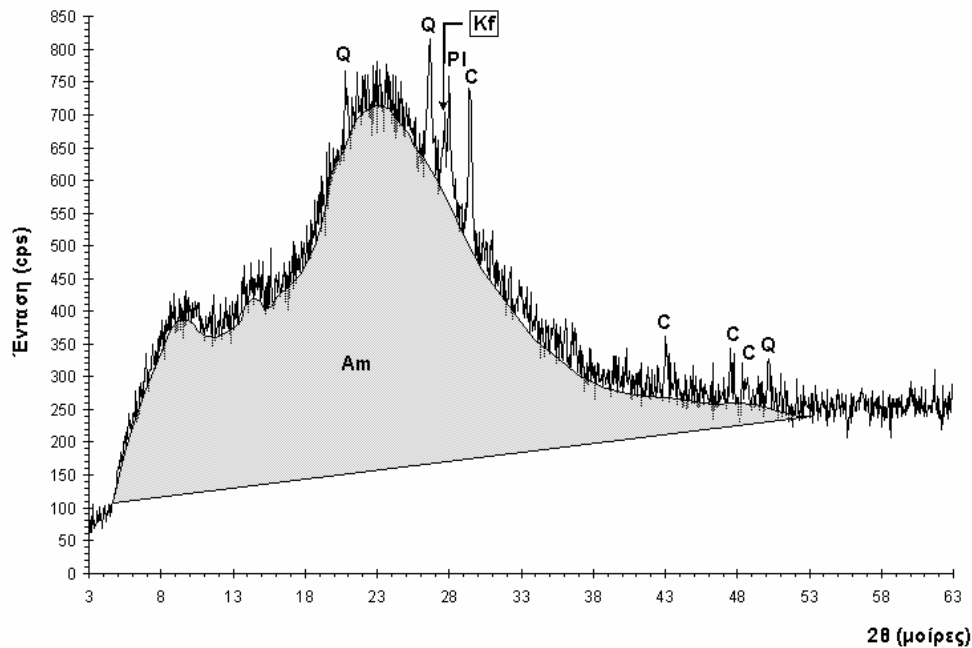
Πίνακας 1. Ημιποσοτική ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) της εξεταζόμενης ποζολάνης.

Δείγμα	Χαλαζίας	Αστριοί	Ασβεστίτης	Άμορφο	Σύνολο
PUZ	2	2	3	93	100

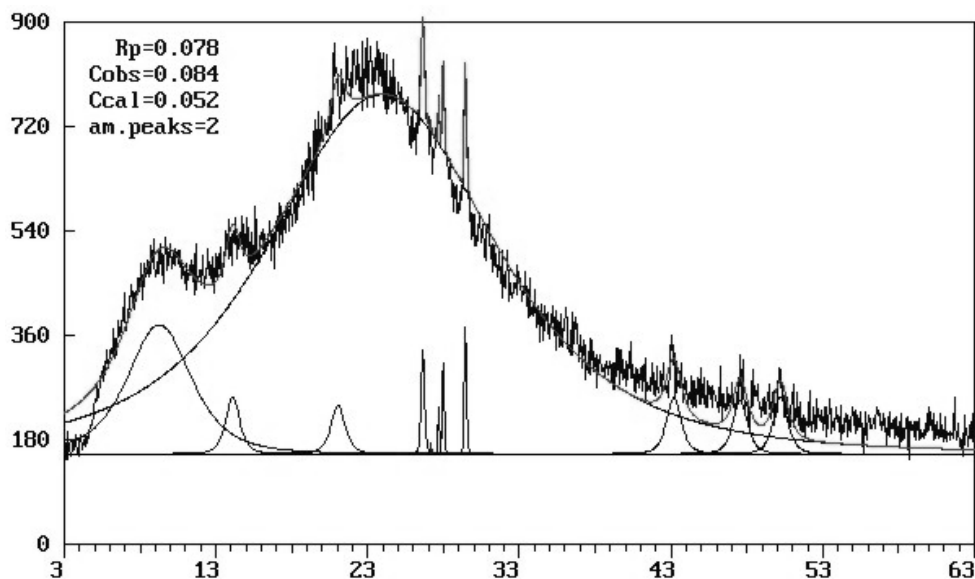
Στο σχήμα 1 δίνεται το περιθλασιόγραμμα του εξεταζόμενου δείγματος και οριοθετείται η καμπύλη του άμορφου υλικού, ενώ στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ο προσδιορισμός της κρυσταλλικότητας της εξεταζόμενης ποζολάνης για την επαλήθευση του ποσοστού του άμορφου υλικού.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 1 και το σχήμα 1 η εξεταζόμενη ποζολάνη αποτελείται κυρίως από άμορφο υλικό (93% κ.β.) και σε μικρές ποσότητες από ασβεστίτη (3% κ.β.), χαλαζία (2% κ.β.) και αστρίους (2% κ.β.). Ο υπολογισμός της κρυσταλλικότητας (Σχ. 2) της εξεταζόμενης ποζολάνης έδωσε τιμές μεταξύ 5,2 (Ccal) και 8,4% (Cobs) με μέση τιμή 6,8%. Επομένως, το άμορφο υλικό κυμαίνεται μεταξύ 94,8 και 91,6% με μέση τιμή 93,2%. Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα της ημιποσοτικής ορυκτολογικής σύστασης (Πίν. 1). Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C618 (1996) η εξεταζόμενη ποζολάνη κατατάσσεται ως τύπου-N (class-N). Κονιάματα που παράγονται από την ανάμιξη τσιμέντου τύπου πόρτλαντ με φυσικές ποζολάνες εμφανίζουν ιδιαίτερα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά που οφείλονται στην ποζολανική δράση του τσιμέντου με το άμορφο υλικό της ποζολάνης (Toumbakari et al. 1998, Moropoulou et al. 2005).

Η καμπύλη συχνότητας και η αθροιστική καμπύλη συχνότητας των κόκκων της εξεταζόμενης ποζολάνης παρουσιάζονται στο σχήμα 3. Από την μορφολογική εξέταση της καμπύλης συχνότητας προκύπτει ότι η κατανομή των κόκκων της ποζολάνης παρουσιάζει ένα μέγιστο, είναι επομένως μονοπληθυσμιακή, η τιμή mode είναι ίση με 0,150 mm και βρίσκεται στα όρια μεταξύ λεπτόκοκκης και μεσόκοκκης άμμου.



Σχήμα 1. Περιθλασιογράμμα ακτίνων-Χ της εξεταζόμενης ποζολάνης.
Q: χαλαζίας, Kf: καλιούχος άστριος, Pl: πλαγιόκλαστο, C: ασβεστίτης, Am: άμορφο.



Σχήμα 2. Προσδιορισμός της κρυσταλλικότητας της εξεταζόμενης ποζολάνης.

Από την κλίση της αθροιστικής καμπύλης συχνότητας μεταξύ των διαμέτρων d_{60} και d_{10} διαπιστώνεται η ομοιομορφία ενός υλικού. Αριθμητικά εκφράζεται με τον συντελεστή ομοιομορφίας U ο οποίος προκύπτει από την αναλογία d_{60}/d_{10} , όπου d_{60} και d_{10} είναι οι διάμετροι των κόκκων σε ποσοστά διερχομένων αντίστοιχα 60% και 10% του βάρους πάνω στην αθροιστική καμπύλη συχνότητας. Όπως προκύπτει από την εξέταση του σχήματος 3 η εξεταζόμενη ποζολάνη εμφανίζει τιμές $d_{60} = 0,17$ mm και $d_{10} = 0,0088$ mm. Επομένως, ο συντελεστής ομοιομορφίας U λαμβάνει τιμή ίση με 19,32 βάση της οποίας η εξεταζόμενη ποζολάνη χαρακτηρίζεται ως πολύ ανομοιόρφη. Σύμφωνα με τους Μογορούλιου et al. (1998a) η κοκκομετρική ανομοιομορφία μιας ποζολάνης επηρεάζει σημα-

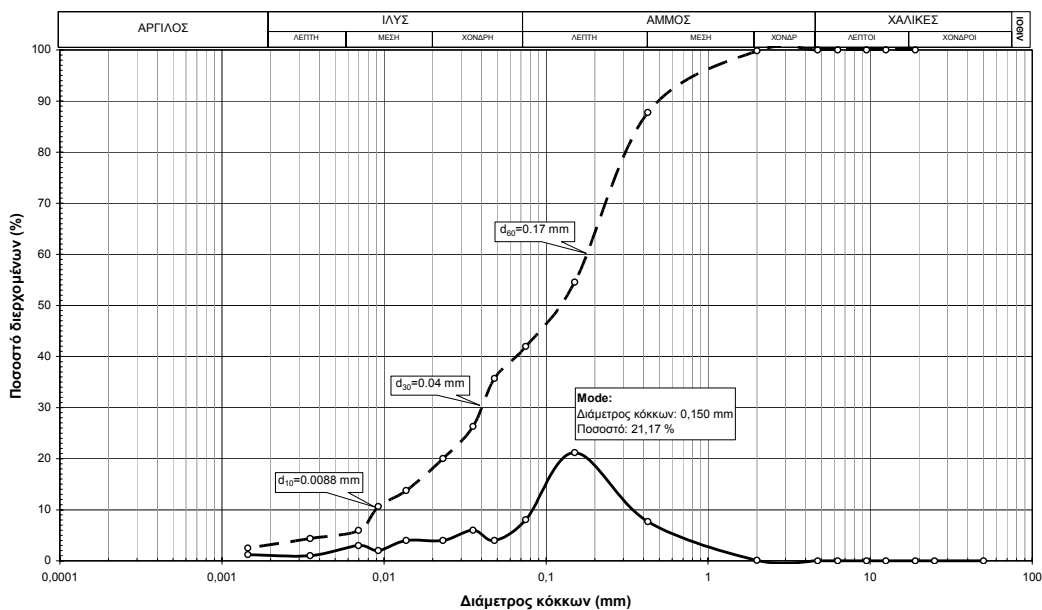
ντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων της. Ανομοιόμορφα υλικά οδηγούν σε πιο συμπαγείς δομές.

Επίσης, από την αθροιστική καμπύλη συχνότητας μπορούμε να υπολογίσουμε το βαθμό διαβάθμισης του εξεταζόμενου υλικού σύμφωνα με τον τύπο:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

όπου d_{60} και d_{10} όπως παραπάνω και d_{30} είναι η διάμετρος των κόκκων σε ποσοστό διερχομένων 30%. Η τιμή d_{30} βρέθηκε ίση με 0,04 mm.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι $C_c = 1,07$. Σύμφωνα με το ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών ASTM D2487 (2000) το εξεταζόμενο υλικό χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος. Η καλή διαβάθμιση ενός υλικού οδηγεί σε κατασκευές υψηλής αντοχής στη φθορά και τη διάβρωση, υψηλής πυκνότητας και μεγάλης διατμητικής αντοχής (Χρηστάρας 2002).



Σχήμα 3. Καμπύλη συχνότητας και αθροιστική καμπύλη συχνότητας των κόκκων της εξεταζόμενης ποζολάνης.

Στον πίνακα 2 δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη και του φαινόμενου ειδικού βάρους. Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής των μετρήσεων της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη και του φαινόμενου ειδικού βάρους με τη διάρκεια συμπαγοποίησης. Η συσχέτιση των μέσων τιμών της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη με τη διάρκεια συμπαγοποίησης έγινε με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και συγκεκριμένα της υπερβολικής κατανομής κατά την ακόλουθη συνάρτηση:

$$y = \frac{x}{T_1x + T_2}$$

όπου y η μοναξονική αντοχή στη θλίψη (N/mm^2), x η διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες) και T_1 , T_2 σταθερές συσχέτισης οι οποίες λαμβάνουν τιμές 0,08631 και 0,34239, αντίστοιχα. Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 λαμβάνει τιμή 0,94836.

Για τη δοκιμή των τριών ημερών η μοναξονική αντοχή στη θλίψη κυμαίνεται μεταξύ 4,02 N/mm^2 και 4,98 N/mm^2 με μέση τιμή 4,58±0,45 N/mm^2 . Με την πάροδο 7 ημερών από την ημέρα προετοιμασίας των δοκιμίων η μοναξονική αντοχή στη θλίψη σχεδόν διπλασιάστηκε με τις τιμές της να κυμαίνονται μεταξύ 8,01 N/mm^2 και 8,21 N/mm^2 . Η μέση τιμή υπολογίστηκε σε 8,10±0,10 N/mm^2 και είναι αυξημένη σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή των 3 ημερών κατά 76,86%. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, μετά τις 7 ημέρες η μοναξονική αντοχή στη θλίψη εξακολουθεί να αυξάνεται, όμως με

λιγότερο έντονο ρυθμό, κάτι που υποδηλώνει σταδιακή ολοκλήρωση της διαδικασίας συμπαγοποίησης του κονιάματος. Στις 28 ημέρες μετρήθηκε μοναξονική αντοχή στη θλίψη από 8,82 N/mm² έως 10,17 N/mm² με μέση τιμή 9,44±0,46 N/mm² αυξημένη σε σύγκριση με την τιμή των 7 ημερών κατά 16,59%, ενώ για τις 90 ημέρες οι μετρήσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 9,93 N/mm² και 13,15 N/mm² με μέση τιμή 11,46±1,33 N/mm², αυξημένη σε σύγκριση με την τιμή των 28 ημερών κατά 21,40%. Σύμφωνα με τους Μογορούλιου et al. (1998a) για να είναι κατάλληλη μια ποζολάνη για χρήση ως προσθετικό σε κονιάματα πρέπει τα αποτελέσματα της ποζολανικότητας 90 ημερών να δίνουν τιμές μοναξονικής αντοχής στη θλίψη μεγαλύτερες από 5 N/mm², ενώ σύμφωνα με τους Τουμβακαρί & Van Gemert (1997) πρέπει να είναι το ελάχιστο 6 N/mm².

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C311 (1996a) ο δείκτης αντοχής δραστηριότητας (strength activity index) στις 7 και 28 ημέρες αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της καταλληλότητας μιας ποζολάνης για χρήση μαζί με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ στην παραγωγή ειδικών κονιαμάτων. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2 η εξεταζόμενη ποζολάνη έδωσε δείκτη 7 ημερών 93,43% και δείκτη 28 ημερών 99,16%. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C618 (1996) ο δείκτης αντοχής δραστηριότητας για τις 7 και 28 ημέρες, για να είναι κατάλληλη μια ποζολάνη για χρήση ως προσθετικό στο σκυρόδεμα, πρέπει να είναι το ελάχιστο 75%.

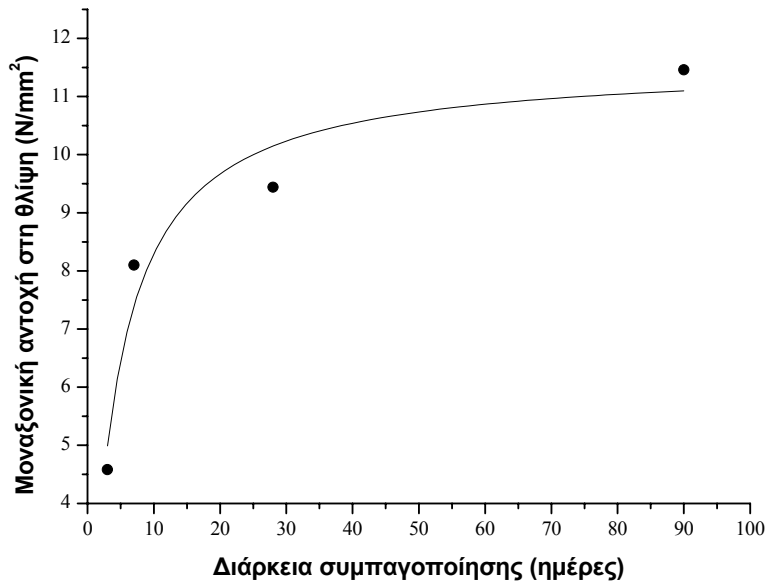
Πίνακας 2. Μοναξονική αντοχή στη θλίψη (N/mm²) και φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm³) των πρότυπων δοκιμίων και της εξεταζόμενης ποζολάνης.

Δοκίμιο	Διάρκεια συμπαγοποίησης (ημέρες)							
	3		7		28		90	
	UCs	ΦΕΒ	UCs	ΦΕΒ	UCs	ΦΕΒ	UCs	ΦΕΒ
Δ1	4,98	1,419	-	-	-	-	-	-
Δ2	4,89	1,415	-	-	-	-	-	-
Δ3	4,42	1,401	-	-	-	-	-	-
Δ4	4,02	1,438	-	-	-	-	-	-
Δ5	-	-	8,01	1,174	-	-	-	-
Δ6	-	-	8,17	1,167	-	-	-	-
Δ7	-	-	8,21	1,165	-	-	-	-
Δ8	-	-	8,02	1,216	-	-	-	-
Δ9	-	-	-	-	9,81	1,227	-	-
Δ10	-	-	-	-	8,95	1,232	-	-
Δ11	-	-	-	-	10,17	1,256	-	-
Δ12	-	-	-	-	8,82	1,179	-	-
Δ13	-	-	-	-	-	-	9,93	1,243
Δ14	-	-	-	-	-	-	13,15	1,238
Δ15	-	-	-	-	-	-	11,58	1,209
Δ16	-	-	-	-	-	-	11,16	1,219
<i>Μέση τιμή</i>	<i>4,58</i>	<i>1,418</i>	<i>8,10</i>	<i>1,181</i>	<i>9,44</i>	<i>1,224</i>	<i>11,46</i>	<i>1,227</i>
<i>Τυπική απόκλιση</i>	<i>0,45</i>	<i>0,015</i>	<i>0,10</i>	<i>0,024</i>	<i>0,46</i>	<i>0,032</i>	<i>1,33</i>	<i>0,016</i>
<i>Πρότυπο*</i>			<i>8,67</i>		<i>9,52</i>			
<i>Δείκτης δραστηριότητας αντοχής</i>			<i>93,43 %</i>		<i>99,16 %</i>			

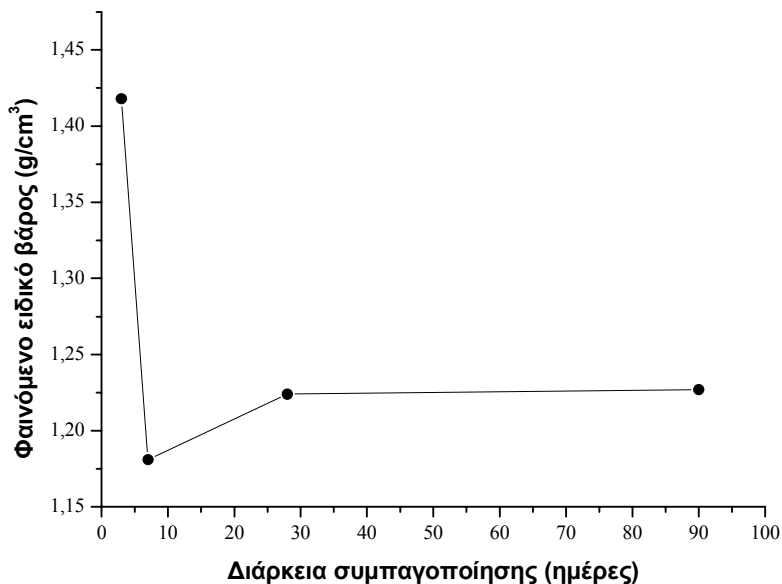
*Μέση τιμή τεσσάρων δοκιμίων ανά ημέρα μέτρησης, UCs: Μοναξονική αντοχή στη θλίψη, ΦΕΒ: Φαινόμενο ειδικό βάρος.

Το φαινόμενο ειδικό βάρος των δοκιμίων της εξεταζόμενης ποζολάνης μετρήθηκε στις 3 ημέρες μεταξύ 1,401 g/cm³ και 1,438 g/cm³ με μέση τιμή 1,418±0,015 g/cm³. Στις 7 ημέρες το φαινόμενο ειδικό βάρος μειώνεται έντονα και λαμβάνει τιμές από 1,165 g/cm³ έως 1,216 g/cm³ με μέση τιμή 1,181±0,024 g/cm³. Στις 28 και 90 ημέρες το φαινόμενο ειδικό βάρος παρουσιάζει περίπου την ίδια μέση τιμή (~1,22 g/cm³) γεγονός που φανερώνει την ολοκλήρωση της συμπαγοποίησης. Συγκεκριμένα στις 28 ημέρες το φαινόμενο ειδικό βάρος κυμαίνεται μεταξύ 1,179 g/cm³ και 1,256 g/cm³ με μέση τιμή 1,224±0,032 g/cm³, ενώ στις 90 ημέρες κυμαίνεται μεταξύ 1,209 g/cm³ και 1,243 g/cm³ με

μέση τιμή $1,227 \pm 0,016 \text{ g/cm}^3$. Το ιδιαίτερα υψηλό φαινόμενο ειδικό βάρος που μετρήθηκε στις 3 ημέρες αποδίδεται πιθανόν στην παρουσία του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία του κονιάματος και καθιστά τα δοκίμια βαρύτερα. Με την πάροδο του χρόνου τα δοκίμια στεγνώνουν, σχηματίζονται οι ασβεστοπυριτικές νέες φάσεις με τη δράση του τσιμέντου και συμπαγοποιούνται.



Σχήμα 4. Μεταβολή της μοναξονικής αντοχής στη θλίψη με τη διάρκεια συμπαγοποίησης.



Σχήμα 5. Μεταβολή του φαινόμενου ειδικού βάρους με τη διάρκεια συμπαγοποίησης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ποζολάνη από το ορυχείο Γυαλί της Νισύρου αποτελείται από άμορφο υλικό σε ποσοστό 93% κ.β. Σε μικρότερα ποσοστά προσδιορίστηκαν ασβεστίτης (3% κ.β.), χαλαζίας (2% κ.β.) και άστριοι (2% κ.β.).

Από τον υπολογισμό του συντελεστή ομοιομορφίας προέκυψε ότι η εξεταζόμενη ποζολάνη είναι πολύ ανομοιομορφη, ενώ σύμφωνα με το ενιαίο σύστημα ταξινόμησης των εδαφών έχει καλή διαβάθμιση και χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα επηρεάσουν σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων της και θα οδηγήσουν σε πιο συμπαγείς δομές.

Μεταξύ των τιμών της μοναξονικής αντοχής σε θλίψη (y) και της διάρκειας συμπαγοποίησης (x), υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση ($R^2 = 0,94836$) κατά τον τύπο: $y = x / (0,08631x + 0,34239)$, όπου y σε N/mm^2 και x σε ημέρες.

Οι δοκιμές ποζολανικότητας έδωσαν δείκτη δραστηκότητας αντοχής 7 και 28 ημερών πολύ μεγαλύτερο του 75% και συγκεκριμένα 93,43% και 99,16%, αντίστοιχα. Η μοναξονική αντοχή στη θλίψη των 90 ημερών βρέθηκε $11,46 \pm 1,33 N/mm^2$ και είναι σχεδόν διπλάσια από την απαίτηση των $6 N/mm^2$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά η εξεταζόμενη ποζολάνη είναι κατάλληλη για χρήση ως προσθετικό υλικό σε παραδοσιακά κονιάματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Δρακούλης Α. 2005. Ο ρόλος του ηφαιστειακού γυαλιού στη δεσμευτική ικανότητα βιομηχανικών πετρωμάτων της Μήλου. Διατριβή Ειδικεύσεως. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη, 45σ.
- Καντηράνης Ν. 1998. Πετρολογική, γεωχημική και τεχνολογική μελέτη των Ιουρασικών ανθρακικών πετρωμάτων Αγίου Παντελεήμονα Φλώρινας. Διατριβή Ειδικεύσεως. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη, 69σ.
- Καντηράνης Ν. 2001. Μελέτη ασβεστοποίησης των κρυσταλλικών ασβεστόλιθων Αγίου Παντελεήμονα Φλώρινας. Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη, 196σ.
- Καντηράνης Ν., Στεργίου Α., Φιλίππιδης Α. & Δρακούλης Α. 2004. Υπολογισμός του ποσοστού του άμορφου υλικού με τη χρήση περιθλασιογραμμάτων ακτίνων-Χ. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ., 36(1), 446-453.
- ΠΔ 244 1980. Περί κανονισμού τιμέντων για έργα από σκυρόδεμα. ΦΕΚ Α/69, 809-835.
- Χρηστάρας Β. 2002. Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές εδαφομηχανικής. Τεχνικός Επιμελητήριο Ελλάδας, Press Line, Αθήνα, 144σ.
- AASHTO DESIGNATION: T-27 1993. Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Seventeenth Edition, 1995, Part II Tests, 4p.
- ASTM C109/109M 1995. 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.
- ASTM C123 1994. Standard test method for lightweight pieces in aggregate. Concrete and Aggregates, vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 3p.
- ASTM C311 1996a. Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in Portland-Cement concrete. Concrete and Aggregates, vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 7p.
- ASTM C618 1996. 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.
- ASTM D2487 2000. Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Soil and Rock (I), vol. 04.08, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 12p.
- ASTM D422-63 1994. Standard test method for particle size analysis of soils. Soil and Rock (I), vol. 04.08, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 7p.
- Drakoulis A., Kantiranis N., Filippidis A., Stergiou A., Zorba T., Paraskevopoulos K.M. & Squires C. 2004. The estimation of volcanic glass content in natural materials using PXRD and FTIR techniques. 5th European Conference on Mineralogy and Spectroscopy, Wien, September 4-8, 2004, Mitteilungen der Osterreichischen Mineralogischen Gesellschaft, Book of Ext. Abstracts, p. 26.
- Guinier A. 1963. X-Ray diffraction in crystals, imperfect crystals and amorphous bodies. Freeman H.W. and Company, San Francisco, 378p.
- Kantiranis N., Tsirambides A., Filippidis A. & Christaras B. 1999. Technological characteristics of the calcined limestone from Agios Panteleimonas, Macedonia, Greece. Materials & Structures, 32, 546-551.
- Kantiranis N., Filippidis A., Tsirambides A., Christaras V. & Kassoli-Fournaraki A. 1998. Volatilization of arsenic during calcination of crystalline limestone from Agios Panteleimonas, Florina, Macedonia, Greece. Proc. 4th Int. Conf. Environ. Pollution, Thessaloniki, 73-78.
- Karaveziroglou M., Papayianni J. & Penelis G. 1998. Mortars and grouts in restoration of Roman Byzantine monuments. PACT, 56, 219-245.

- Karaveziroglou M., Zombou A. & Magoulas Th. 1997a. In situ investigations of mortars for repairing masonry in historical buildings. Proc. 4th Intern. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes, Vol. 3, 149-156.
- Karaveziroglou M., Koulikas P., Makarios T., Koniordos V. & Rebythiadou F. 1997b. Mortars for repairing masonry in Eptapyrgion fortress. Proc. 4th Intern. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes, Vol. 3, 157-166.
- Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Karatasios I. & Kilikoglou V. 2004. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. Cement and concrete research (in press).
- Moropoulou A. 2000. Reverse engineering to discover traditional technologies: A proper approach for compatible restoration mortars. PACT, 58, 81-107.
- Moropoulou A., Bakolas A. & Bisbikou K. 1995. Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *Thermochimica Acta*, 269/270, 779-795.
- Moropoulou A., Bakolas A. & Bisbikou K. 2000. Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 45-58.
- Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P. & Cakmak A.S. 1998b. Compatible restoration mortars, preparation, and evaluation for Hagia Sophia earthquake protection. PACT, 56, 79-118.
- Moropoulou A., Cakmak A., Labropoulos K.C., Van Grieken R. & Torfs K. 2004. Accelerated microstructural evolution of a calcium-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars. *Cement and Concrete Research*, 34, 1-6.
- Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Aggelakopoulou E. & Anagnostopoulou S. 2005. Strength development and lime reactions in mortars for repairing historic masonries. *Cement and Concrete Composites*, 27, 289-294.
- Moropoulou A., Maravelaki-Kalaitzaki P., Borboudakis M., Bakolas A., Michailidis P. & Chronopoulos M. 1998a. Historic mortars technologies in Crete and guidelines for compatible restoration mortars. PACT, 55, 55-72.
- Papayianni J. 1998. Criteria and methodology for manufacturing compatible repair mortars and bricks. PACT, 56, 179-190.
- Penelis G. 1997. Techniques, materials & design in structural restoration. Proc. 4th Intern. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes, Vol. 3, 281-294.
- Stergiou A. 1995. "CRYST". Program for crystallinity determination by XRD profile fitting. Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki.
- Toumbakari E-E. & Van Gemert D. 1997. Lime-Pozzolana-Cement injection grouts for the repair and strengthening of three-leaf masonry structures. Proc. 4th Intern. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes, Vol. 3, 385-394.
- Toumbakari E-E., Van Gemert D. & Tenontasse N. 1998. Injection grouts for ancient masonry: Strength properties and microstructural evidence. PACT, 56, 191-200.
- Toumbakari E-E., Georgoli B., Papadopoulos Ch. & Vachliotis Ch. 2000. Characterization of the in-situ materials as condition for the design of repair materials-Application on the mortars of the fortification walls of Kos. PACT, 59, 191-200.

ABSTRACT

SUITABILITY OF NISSIROS POZZOLAN FOR USE IN TRADITIONAL MORTARS

Kantiranis N.¹, Filippidis A.¹, Vogiatzis D.², Drakoulis A.¹ and Karatasios G.³

¹ *Department of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, kantira@geo.auth.gr, anestis@geo.auth.gr, alexdr@geo.auth.gr*

² *Department of Geology, Lab. of Eng. Geology and Hydrogeology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, dvogias@geo.auth.gr*

³ *Dr. of Mathematics, Aristotle University of Thessaloniki, Olympiados 14, N.751, 55236 Panorama, kar1@enman.auth.gr*

The commercial quality (powder <1 mm) of Nissiros pozzolan was studied in order to find its suitability for use in traditional mortars. The mineralogical composition was determined using the Powder X-Ray Diffraction method, while sieve analysis was also performed. The uniaxial compressive

strength and the apparent specific weight were studied in pozzolan mortar specimens and compared with standard specimens. The pozzolanic activity of the studied material was determined using the strength activity index of 7 and 28 days. Amorphous material was the main component (93 wt %) of the studied sample, while calcite (3 wt %), quartz (2 wt %) and feldspars (2 wt %) were contained in minor quantities. The examined pozzolan has low degree of sorting, while according to the Unified Soil Classification System it has good gradation and it is characterized as silty sand. Between the uniaxial compressive strength and the duration of compaction a very good correlation was observed with the hyperbolic distribution. The pozzolanicity tests showed strength activity index of 7 days 93.43% and of 28 days 99.16%. These values are higher than the ASTM specification of 75%. The uniaxial compressive strength measured at 90 days was found $11.46 \pm 1.33 \text{ N/mm}^2$ and it is almost double than the requirement of 6 N/mm^2 . According to these characteristics the examined pozzolan is suitable for use as additive material in traditional mortars.