

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΙΟΓΕΝΩΝ ΑΒΣΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΑΙΡΕΘΙΑΝΑ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ

Μαρκόπουλος Θ., Τριανταφύλλου Γ., και Μανούτσογλου Ε.

Εργαστήριο Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης 73133 Χανιά, markopou@mred.tuc.gr, gtriant@mred.tuc.gr, emanout@mred.tuc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βιογενείς ασβεστόλιθοι από την περιοχή Χαιρεθιανά, Καστελίου Δ. Κρήτης αξιολογήθηκαν ως προς την καταλληλότητά τους για παρασκευή υδραυλικής ασβέστου. Δείγματα πετρωμάτων από τρεις διαφορετικούς ορίζοντες εξετάστηκαν ορυκτολογικά με περιθλασιμετρία ακτίνων – Χ (XRD), οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και χημικά με φασματοσκοπία ακτίνων – Χ φθορισμού (XRF) και με ασβεστιμετρία. Η ανάλυση των αρχικών δειγμάτων έδειξε ότι αυτά έχουν περιεκτικότητα σε ασβεστίτη που κυμαίνεται από 80% έως 84% και σε μικρότερες αναλογίες περιέχουν ιλλίτη, χαλαζία, αλβίτη και γκαϊτίτη. Αντιπροσωπευτικά δείγματα συγκεκριμένης κοκκομετρίας από τους διαφορετικούς ορίζοντες, χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή υδραυλικής ασβέστου μετά από έψηση για χρονικό διάστημα δώδεκα ωρών σε θερμοκρασία 900°C. Η ανάλυση των προϊόντων έψησης έδειξε ότι οι φάσεις που σχηματίστηκαν είναι κυρίως λαρνίτης, πορτλανδίτης, οξειδίο του ασβεστίου και σε μικρότερες αναλογίες απαντώνται χαλαζίας και αιματίτης. Η παρουσία της ασβεστοπυριτικής φάσης είναι σε όλα τα δείγματα σε ικανοποιητικά ποσοστά και δικαιολογείται από την ύπαρξη διατόμων και σπογγοβελονών που αποτελούνται από άμορφο διοξειδίο του πυριτίου, στο αρχικό πέτρωμα. Σύμφωνα με τα ευρωπαικά πρότυπα για τις δομικές ασβέστους, τα προϊόντα έψησης των πετρωμάτων των τριών οριζόντων χαρακτηρίζονται ως υδραυλικές άσβεστο χαμηλής, μέσης και υψηλής δραστηριότητας.

I ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση υδραυλικής ασβέστου για παρασκευή κονιαμάτων είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Οι κονίες της υδραυλικής ασβέστου έχουν το πλεονέκτημα σε σύγκριση με την αερική άσβεστο να ενυδατώνονται και να στερεοποιούνται παρουσία νερού, δημιουργώντας ασβεστοπυριτικές ενώσεις που λειτουργούν ως φυσικό τσιμέντο. Προϋπόθεση για τη δημιουργία των ασβεστοπυριτικών φάσεων κατά την έψηση σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι η ύπαρξη ασβεστίτη και άμορφου διοξειδίου του πυριτίου. Επειδή οι περισσότερες αρχαιολογικές υπηρεσίες της Ευρώπης έχουν απαγορεύσει τη χρήση βιομηχανικού τσιμέντου σε εργασίες συντήρησης – αναστήλωσης και επειδή στην Ελλάδα δεν παράγεται υδραυλική άσβεστος, διερευνούμε τα τελευταία χρόνια την καταλληλότητα των οργανογενών ασβεστολίθων της Κρήτης για παρασκευή υδραυλικής ασβέστου.

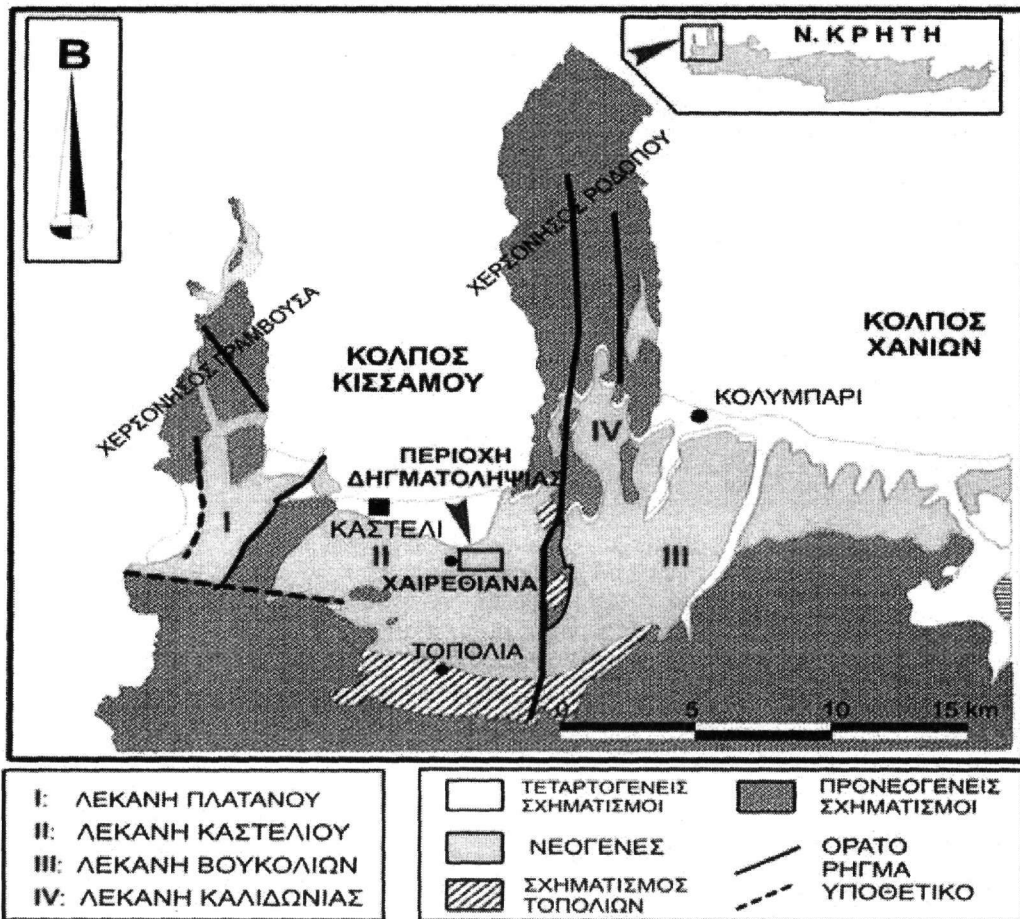
Οι πρώτες ύλες παραγωγής υδραυλικής ασβέστου και φυσικού τσιμέντου είναι ασβεστόλιθοι στους οποίους συνυπάρχουν αφενός ανθρακικό ασβέστιο και αφετέρου άργιλοι ή άμορφο διοξειδίο του πυριτίου σε ποσοστό από 15 έως 35%. Η βασική διαφορά στην παραγωγή μιας υδραυλικής ασβέστου και ενός τσιμέντου πόρτλαντ είναι η θερμοκρασία έψησης (Callebaut et al. 2001). Κατά την έψηση ενός ασβεστόλιθου που περιέχει άργιλους ή άμορφο διοξειδίο του πυριτίου, οι άργιλοι καταστρέφονται σε θερμοκρασίες έως 600°C, ενώ στο θερμοκρασιακό εύρος από 950 έως 1250°C δημιουργούνται με το οξειδίο του ασβεστίου, ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργλικές φάσεις. Στο τσιμέντο πόρτλαντ, που παράγεται από έψηση ασβεστολίθων και αργιλικών προσμίξεων σε θερμοκρασίες πάνω από 1400°C, κατά την περίπτωση δημιουργείται το κλίνκερ. Οι υδραυλικές φάσεις των ανωτέρω δυο προϊόντων διαφέρουν, γιατί ο λαρνίτης (C₂S) είναι η κύρια φάση ενός φυσικού τσιμέντου, ενώ στο βιομηχανικό τσιμέντο η κύρια φάση είναι ο αλίτης (C₃S), (Lea, 1976). Επιπλέον, σε

μια υδραυλική άσβεστο υπάρχει περίσσεια οξειδίου του ασβεστίου το οποίο μετατρέπεται σε πορτλανδίτη, $Ca(OH)_2$.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Στην περιοχή της νεογενούς λεκάνης του Καστελίου Δυτικής Κρήτης (Σχ. 1), εμφανίζονται θαλάσσια ιζηματογενή πετρώματα όπως υποκίτρινες μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και ψαμμιτικές μάργες σε εναλλαγές, τα οποία και σχηματίζουν πάγκους πάχους δεκάδων εκατοστών έως μερικών μέτρων.

Τα ιζηματογενή πετρώματα της ακολουθίας αυτής, μέγιστου πάχους 80 μέτρων, έχουν χρονολογηθεί με τη βοήθεια ναοσπολιθωμάτων. Η ηλικία που προσδιορίστηκε είναι Ανώτερο Τορτόνιο – Κατώτερο Μεσσήνιο. Παρά τη Μεσσήνια ηλικία στο μεγαλύτερο τμήμα της ακολουθίας, λείπουν εμφανίσεις γύψου. Συγκρίσεις με βιο- και λιθοστρωματογραφικές στήλες επιτρέπουν την τοποθέτηση των ασβεστολιθικών οριζόντων στο Κατώτερο Μεσσήνιο. Λιθοστρωματογραφικά εμφανίζονται ως τμήμα της «μεταβατικής φάσης απόθεσης» κλείνοντας ιζηματολογικούς κύκλους απόθεσης κρηπίδας, με περιοδική ταπείνωση της στάθμης της θάλασσας (Keupp et al. 2000). Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε μια βιοκλαστική ασβεστολιθική ακολουθία. Δείγματα βιοκλαστικών ασβεστολίθων, οι οποίοι λόγω του ποσοστού των σπογγοβελονών που περιέχουν, μπορούν να χαρακτηριστούν σαν σπογγολιθικοί βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι, συλλέχθηκαν από τρεις διαφορετικούς οριζόντες πλησίον του χωριού Χαιρεθιανά.



Σχήμα 1. Χάρτης περιοχής δειγματοληψίας κατά Keupp et al. 2000, τροποποιημένος.

3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τον ορυκτολογικό προσδιορισμό των φάσεων των πρώτων υλών αλλά και των τελικών προϊόντων, χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές τεχνικές όπως, περιθλασιμετρία ακτίνων – X (XRD) με περιθλασίμετρο κόνεως τύπου Siemens 500, οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) με μικροσκόπιο τύπου JEOL 5400 εφοδιασμένο με φασματόμετρο διασκορπιζόμενης ενέργειας (EDS). Για τον προσδιορισμό του χημισμού χρησιμοποιήθηκε μονάδα φασματοσκοπίας ακτίνων – X φθορισμού (XRF) τύπου SRS 303 της εταιρίας Siemens και αβεστίμετρο τύπου Dietrich Frühling. Για την παραγωγή της υδραυλικής ασβέστου χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακοί κλίβανοι με δυνατότητα αυτόματου προγραμματισμού και αύξησης της θερμοκρασίας έως τους 1200°C. Ο ποιοτικός προσδιορισμός των ορυκτών φάσεων έγινε με τη χρήση του λογισμικού Diffrac Plus της εταιρίας Brucker και το Powder Diffraction File, ενώ ο ποσοτικός με το λογισμικό Siroquant 2002 που βασίζεται σε αλγόριθμο ανάλυσης Rietveld.

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τους τρεις διαφορετικούς ορίζοντες (X1, X2, X3, ποσότητα 5 kg ανά δείγμα), θραύστηκαν και μετά από κοσκίνηση χρησιμοποιήθηκε, το μεν λεπτόκοκκο κλάσμα για τις αναλύσεις XRD, XRF, SEM, και αβεστιμετρίας, ενώ το κλάσμα (-19, + 13,3 mm) χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων έψησης.

3.1 Αποτελέσματα αξιολόγησης πρώτων υλών

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της περιθλασιμετρίας ακτίνων – X και τη μελέτη των λεπτών τομών στο πολωτικό μικροσκόπιο τα ορυκτά που προσδιορίστηκαν στα δείγματα των πρώτων υλών, σε φθίνουσα αναλογία είναι: ασβεσίτης, ιλλίτης, χαλαζίας, αλβίτης και γκαϊπίτης. Στο δείγμα X3 ανιχνεύθηκαν όλα τα παραπάνω πλην του γκαϊπίτη. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των ορυκτών με το λογισμικό Siroquant 2002 έδειξε ότι η περιεκτικότητα σε ασβεσίτη κυμαίνεται από 80% έως 84% στα τρία δείγματα. Οι περιεκτικότητες σε ιλλίτη κυμαίνονται από 9% έως 12%, σε χαλαζία 5% έως 7% και οι περιεκτικότητες σε αλβίτη και γκαϊπίτη βρίσκονται στα όρια ανιχνευσιμότητας (Πιν. 1). Δεν προσδιορίστηκε γύψος, ορυκτό που είναι ανεπιθύμητο για την παραγωγή υδραυλικής ασβέστου.

Πίνακας 1. Ποσοτικός (κ.β%) προσδιορισμός των ορυκτών φάσεων των πρώτων υλών, που αναλύθηκαν.

% ΟΡΥΚΤΗ ΦΑΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ		
	X1	X2	X3
Ασβεσίτης	83,70	79,20	79,80
Ιλλίτης	9,60	12,40	11,40
Χαλαζίας	5,00	5,90	6,80
Αλβίτης	1,30	1,40	2,10
Γκαϊπίτης	0,40	1,10	-

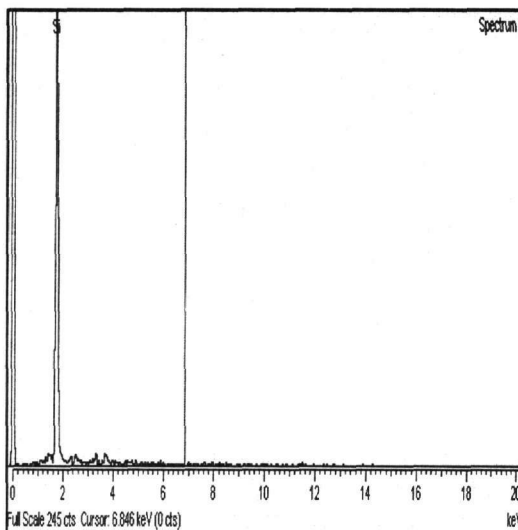
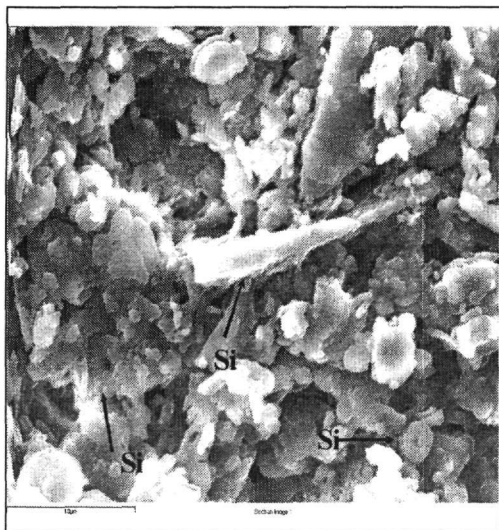
Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Το SiO₂ κυμαίνεται από 16,07% έως 22,18% κ.β. και αντίστοιχα το CaO από 42,55% έως 36,33% κ.β.. Οι παραπάνω αναλογίες πληρούν τις προϋποθέσεις καταλληλότητας ασβεστολίθων για παραγωγή υδραυλικής ασβέστου, καθώς η σωστή αναλογία CaO/SiO₂ είναι καθοριστικής σημασίας (Phillips and Muan 1959). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Μαρκόπουλος & Πεδικάτσος (2003), διατομικές γαίες που περιέχουν άμορφο διοξείδιο του πυριτίου σε ποσοστά από 40% έως 60%, κρίνονται ακατάλληλες για παραγωγή υδραυλικής ασβέστου δεδομένου ότι κατά την έψηση σε θερμοκρασίες από 800 έως 1100° C, δε δημιουργείται πυριτικό διασβέστιο (λαρνίτης), αλλά βολλαστονίτης.

Το Al₂O₃ κυμαίνεται από 3,51% έως 4,83 % κ.β., ενώ τα ποσοστά των υπόλοιπων οξειδίων είναι σε πολύ μικρότερα ποσοστά. Τα αποτελέσματα της αβεστιμετρίας έδειξαν μικρότερα ποσοστά ασβεσίτη από αυτά του ποσοτικού προσδιορισμού των ορυκτών φάσεων (65% έως 75 %). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η μέθοδος ποσοτικού προσδιορισμού λαμβάνει υπόψη μόνο τις κρυσταλλικές φάσεις και όχι τις άμορφες.

Πίνακας 2. Χημικές (κ.β%) αναλύσεις των ασβεστολιθικών πρώτων υλών.

Δείγμα	X1	X2	X3
SiO ₂	16,07	21,22	22,18
Al ₂ O ₃	3,51	4,83	4,82
Fe ₂ O ₃	1,80	2,59	0,99
MnO	0,27	0,14	0,27
MgO	1,51	2,00	1,83
CaO	42,55	37,36	36,33
Na ₂ O	0,50	0,58	0,61
K ₂ O	0,93	1,50	1,60
LOI	33,01	29,48	30,20
Σύνολο	100,15	99,70	99,93
ΑΣΒΕΣΤΙΜΕΤΡΙΑ			
CaCO ₃	75,85	69,26	65,64
CO ₂	33,37	30,47	28,83

Η μελέτη των βιοκλαστικών ασβεστολίθων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έδειξε την παρουσία σπογγοβελονών και κελυφών διατόμων (Εικ. 1), που αποτελούνται από διοξείδιο του πυριτίου (Εικ. 2).



Εικόνα 1. Φωτογραφία από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, όπου διακρίνονται βελόνα πυριτιόσπογγου και κελύφη διατόμων στο βιοκλαστικό ασβεστόλιθο.

Εικόνα 2. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση (EDS), πυριτιόσπογγου που αποτελείται μόνο από πυρίτιο.

3.2 Αποτελέσματα αξιολόγησης προϊόντων έψησης

Για τα πειράματα έψησης χρησιμοποιήθηκαν ψηφίδες του κλάσματος (-19, + 13,20) mm. Η θερμοκρασία έψησης ήταν 900°C και η διάρκεια 12 ώρες σε προθερμασμένο εργαστηριακό κλίβανο (Ashurt, 1997). Μετά την έψηση, τα δείγματα X1, X2 και X3 τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενης υγρασίας για χρονικό διάστημα σαράντα ημερών, προκειμένου να επέλθει η σβέση τους. Ήδη από τις πρώτες μέρες αέρια ενυδάτωσης (σβέσης), παρατηρήθηκε διόγκωση και θρυμματισμός των προϊόντων της έψησης.

Οι αναλύσεις των προϊόντων με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων – Χ, έδειξαν ότι σε όλα τα δείγματα επήλθε πλήρης αποσύνθεση του ασβεστίτη. Οι φάσεις που προσδιορίστηκαν είναι το οξειδίο του ασβεστίου (CaO), το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂) ή πορτλανδίτης, η ασβεστοπυριπτική φάση του λαρνίτη (C₂S) και μικρά ποσοστά χαλαζία. Στα δείγματα Χ1 και Χ2 προσδιορίστηκε ποσότητα αιματίτη. Τα αποτελέσματα της ποσοτικής ορυκτολογικής ανάλυσης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Ποσοτικός (κ.β.%) προσδιορισμός των ορυκτών φάσεων που ανιχνεύθηκαν στα προϊόντα έψησης.

% ΦΑΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ		
	Χ1	Χ2	Χ3
C ₂ S	24,70	58,30	37,50
Ca (OH) ₂	61,80	27,40	48,3
CaO	4,30	3,30	5,90
Fe ₂ O ₃	6,90	7,10	-
SiO ₂	2,30	4,00	8,20

Από την ανάλυση του πίνακα προκύπτει ότι τα ποσοστά του λαρνίτη κυμαίνονται από 24,70% έως 58,30% κ.β. και η περιεκτικότητα σε πορτλανδίτη από 27,40% έως 61,80% κ.β.. Η ασβεστοπυριπτική φάση του λαρνίτη προήλθε από την αντίδραση ποσότητας του CaO που προέκυψε από τη διάσπαση του ασβεστίτη κατά την έψηση, με το άμορφο διοξείδιο του πυριτίου που υπάρχει στους βιοκλαστικούς ασβεστόλιθους με τη μορφή πυριπιόσπογγων και διατόμων ή και τη διάσπαση του ιλλίτη. Το ποσοστό του οξειδίου του ασβεστίου που δεν μετατράπηκε σε πορτλανδίτη έπεται από τη διαδικασία της αέριας σβέσης, είναι μικρό και κυμαίνεται από 3,30 έως 5,90%κ.β.. Αξιοσημείωτη είναι και η παρουσία της φάσης του αιματίτη σε ποσοστό της τάξης του 7% στα δείγματα Χ1 και Χ2. Ο προσδιορισθείς αιματίτης είναι προϊόν μετατροπής του γκαϊίτη που υπήρχε στην πρώτη ύλη. Ο γκαϊίτης είναι σύνηθες σιδηρούχο ορυκτό σε νεογενή ιζηματογενή πετρώματα. Κατά τη διαγένεση μπορεί να μετατραπεί σε αιματίτη (Goss, 1987). Μετά την αποσύνθεση του γκαϊίτη σε θερμοκρασίες από 25 έως 800°C δημιουργείται η φάση του πρωτοαιματίτη και στη συνέχεια με την αύξηση της θερμοκρασίας ο αιματίτης (Gualtieri and Venturelli 1999).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων, που αφορούν το χαρακτηρισμό των πρώτων υλών και τη διαδικασία παραγωγής υδραυλικής ασβέστου, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο θρυμματισμός της πρώτης ύλης γίνεται σχετικά εύκολα (λόγω του πρώιμου διαγενετικού σταδίου δημιουργίας των ασβεστόλιθων), με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται να δαπανηθεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας για τη διαδικασία αυτή. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί μειώνει το κόστος παραγωγής για τη δημιουργία της υδραυλικής ασβέστου.

- Οι βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι που εξετάστηκαν περιέχουν ικανοποιητικά ποσοστά τόσο σε διοξείδιο του πυριτίου, όσο και σε οξείδιο του ασβεστίου για την παραγωγή υδραυλικής ασβέστου.

- Η αντίδραση του βιοκλαστικού ασβεστόλιθου για την παραγωγή υδραυλικής ασβέστου γίνεται σε θερμοκρασία παρόμοια με αυτή που απαιτείται για την παραγωγή άνυδρης ασβέστου και σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη της παραγωγής τσιμέντου πύρτλαντ. Επίσης, η μετατροπή του οξειδίου του ασβεστίου σε πορτλανδίτη ήταν σχεδόν ολοκληρωτική, αν και έγινε με αέρια σβέση των προϊόντων έψησης, γεγονός που φανερώνει την ενεργότητα της υδραυλικής κόνιας.

- Σύμφωνα με τις αντίστοιχες ευρωπαϊκές προδιαγραφές (EN 459 -1), τα προϊόντα έψησης των πετρωμάτων και των τριών οριζόντων χαρακτηρίζονται ως υδραυλικές άσβεστοι χαμηλής (Χ1), μέσης (Χ3) και υψηλής (Χ2) δραστηριότητας.

Επομένως και τα τρία προϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συνδετικές κονίες για παρασκευή κονιαμάτων διαφόρων χρήσεων και ιδιαίτερα σε επεμβάσεις συντήρησης μνημείων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Μαρκόπουλος Θ. & Περδικάκης Β. 2003. Ειδικά κονιάματα – σκυροδέματα με «φυσικό τσιμέντο». 14^ο Συνέδριο Σκυροδέματος. Βιβλίο Εισηγήσεων Τόμος Β', 67-77.
- Ashurt J. 1997. The Technology and Use of Hydraulic Lime. Article reproduced from the Building Conservation Directory. www.buildingconservation.com/articles/lime/hylime.html
- Callebaut K., Elsen J., Balen K., Viaene W. 2001. Nineteenth century restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement? Cement and Concrete Research, 31, 397-403.
- Goss C.J. 1987. The kinetics and reaction mechanism of the goethite to hematite transformation. Mineral. Magazine, 51, 437 – 451.
- Gualtieri A. & Venturelli P. 1999. In situ study of the goethite-hematite transformation by real time synchrotron powder diffraction. Am. Miner., 84, 895 – 904.
- Keupp H., Bellas S., Frydas D. & Bartholdy J. 2000. Neogene development of the sedimentary basins of NW Crete island, Chania Prefecture, South Aegean Arc System (Greece). Berliner geowiss. Abh., 3 – 117.
- Lea F.M. 1976. The Chemistry of Cement and Concrete. Edward Arnold, London, 750p.
- Phillips B. & Muan A.J. 1959. CaO – SiO₂ System. J. Am. Ceramic Society, 42, (9), pp. 114.

ABSTRACT

EVALUATION OF BIOGENIC LIMESTONES FROM HERETHIANA AREA IN WESTERN CRETE FOR HYDRAULIC LIME PRODUCTION

Markopoulos Th., Triantafyllou G., and Manutsoglu E.

Laboratory of Petrology and Economic Geology, Dept. of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73133, Chania, markopou@mred.tuc.gr, gtriant@mred.tuc.gr, emanout@mred.tuc.gr

Biogenic limestones from the area of Herethiana, Western Crete, have been examined in order to evaluate their properties as hydraulic lime raw materials. Samples of three different horizons, X1, X2, and X3 have been investigated using X –ray diffraction (XRD), X – ray fluorescence spectroscopy (XRF), optical and scanning electron microscopy (SEM) and calcimetry analyses. According to the XRD analyses the main component is calcite varying between 80% and 84%. Illite, quartz, albite and goethite are also present in minor amounts. Representative samples, with a particular grain size of the different horizons, were burned at 900°C for 12 hours, to produce hydraulic lime. The analysis of the calcined products showed that Iarnite, portlandite and lime appear in all samples. Quartz and hematite are also present in minor amounts. The abundance of amorphous silica in the form of silica sponges and diatoms offers the necessary active silica to form, together with an appropriate portion of free lime, the calcium-silicate phase, which is present in all samples in adequate percentages. According to the European standards of the building limes the calcined products of the materials of the three different horizons can be classified as feebly, moderate and eminently hydraulic limes.