



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**Η συμβολή του ΕΜΠ στην αναστήλωση
του Γεφυριού της Πλάκας**

**Χαρακτηρισμός Αυθεντικού Κονιάματος Γεφυριού
Πλάκας και πρόταση για κονίαμα αποκατάστασης**

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου,
Επικ. Καθ. ΕΜΠ, Α. Καραγιάννης Μπακόλας,
Αικ. Δελέγκου, Δρ. ΕΜΠ, ΕΔΙΠ ΕΜΠ,
Π. Μούνδουλας, Δρ. ΕΜΠ, ΕΔΙΠ ΕΜΠ,

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

Σε συνεργασία με:
Το Οριζόντιο Εργαστήριο της Σχολής Χημικών Μηχανικών,
Δ/ντης Καθ. ΕΜΠ, Σ. Τσίμας,
Ν. Παναγιώτου, Δρ. ΕΜΠ, ΕΔΙΠ ΕΜΠ,
Π. Σχοινάς Δρ. ΕΜΠ, ΕΔΙΠ ΕΜΠ,

Το Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυρδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Δ/ντρια Καθ. ΕΜΠ Ε. Βιντζηλαίου
Χ. Αδάμη, Δρ. Πολ. Μηχ. ΕΜΠ
Χ. Γιαννέλος, Υ.Δ. ΕΜΠ, Msc.

Τις ερευνητικές ομάδες της Σχολής Αρχιτεκτόνων (Καθ. Ε. Εφesiού, Λεκ. Ε. Τσακανίκα) και της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών για τη δειγματοληψία

Συνεργασία σε εξέλιξη με Επικ. Καθ. ΕΜΠ, Μ. Περράκη,
Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας,
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Συντονισμός:

- Στο πλαίσιο της Διεπιστημονικής Ομάδας του ΔΠΜΣ
 - Προστασίας Μνημείων (Δ/ντής Μ. Κορρές) και της ευρύτερης διεπιστημονικής ομάδας που συγκροτήθηκε
 - Πρύτανης ΕΜΠ Καθ. Ι. Γκόλιας, με επιστημονικό συντονισμό από την Κοσμήτορα Σχ. Αρχ. Καθ. Ε. Μαϊστρου και ολοκληρωμένη διαχείριση από τον Καθ. Δ. Καλιαμπάκο Σχ. ΜΜΜ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

- Κατάρρευση του γεφυριού μετά τις σφοδρές βροχοπτώσεις που είχε ως επακόλουθο την αύξηση του όγκου και της ορμής των υδάτων
- Διάβρωση και αστοχία ολόκληρων συνδετικών τμημάτων τοιχοποιίας στις συνθήκες αυτές

ΣΤΟΧΟΣ

Χαρακτηρισμός αυθεντικών κονιαμάτων και πρόταση κονιάματος αποκατάστασης με κριτήρια τις ορυκτολογικές – φυσικοχημικές – φυσικομηχανικές τους ιδιότητες και τη συμβατότητα με τα αυθεντικά υλικά καθώς και την επιτελεστικότητα τους στην κατασκευή

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΑΥΘΕΝΤΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΒΑΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ [ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ]

(Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ)

- 1. Χαρακτηρισμός και αποτίμηση ιστορικών κονιαμάτων – επιλογή πρώτων υλών – επιλογή συνθέσεων.**
2. Προετοιμασία συνθέσεων κονιαμάτων αποκατάστασης. Συντήρηση σε ελεγχόμενες συνθήκες κατά την πήξη και σκλήρυνση
3. Αποτίμηση ιδιοτήτων κονιαμάτων αποκατάστασης
4. Αριστοποίηση – Τυποποίηση βάσει χαρακτηριστικών
5. Πιλοτική επί τόπου εφαρμογή για την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης στην κλίμακα της τοιχοποιίας

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ. Η ΕΜΠΕΙΡΙΑ
ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

(A. Moropoulou, G. Biscontin, A. Bakolas)

Η μελέτη δειγμάτων ιστορικών κονιαμάτων από μνημεία διαφόρων ιστορικών περιόδων και διαφόρων περιοχών της λεκάνης της Μεσογείου δίνει:

Τα όρια αποδοχής για τα κονιάματα αποκατάστασης με:

- *έλεγχο των χαρακτηριστικών της μικροδομής (Ποροσιμετρία υδραργύρου), των ιστορικών κονιαμάτων*
- *έλεγχο υδραυλικότητας, ποσοτικό και ποιοτικό προσδιορισμό (Θερμικές Μέθοδοι Ανάλυσης)*
- *Κοκκοδιαβάθμιση, ορυκτολογικό και πετρογραφικό χαρακτηρισμό των ιστορικών κονιαμάτων*
- *και προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών*

Όρια αποδοχής με βάση τα χαρακτηριστικά της μικροδομής

Είδος κονιαμάτων	Ολικός ειδικός όγκος (mm ³ /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	Ολικό πορώδες (%)
Ασβεστοτικά	170-320	1,5-1,8	0,8-3,3	1,3-3,3	30-45
Θραυσ Κεραμικό	170-290	1,5-1,9	0,1-0,8	3,5-15	32-43
Επί τόπου έσβεσης	110-180	1,7-1,9	0,3-0,8	2,5-4,7	20-30
Υδραυλικά	90-230	1,7-2,1	0,1-3,5	2,5-13,5	18-40
Ασβέστη-Ποζολάνα	160-265	1,6-1,9	0,1-1,5	3-14	30-42
Διπλής τοιχοποιίας	117-220	1,8-2,1	0,2-20,6	1,2-4,7	25-39

Ταξινόμηση με βάση τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης

Είδος κονιαμάτων	Υγροσκοπικό Νερό (%)	Υδραυλικό Νερό (%)	Περιεχόμενο CO ₂ (%)	Λόγος CO ₂ /H ₂ O	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Ασβεστοτικά	<1	2-4	>30	>8,5	<0,35
Θραυσ Κεραμικό	1,5-4,5	2,3-5,3	<20	3,2-6,5	0,5-1,2
Επί τόπου έσβεσης	0,7-1,5	2-4,6	>25	6-15	0,85-1,5
Υδραυλικά	1-2,5	4-7,2	<25	1,8-6,1	-
Ασβέστη-Ποζολάνα	2-4	3,3-5,4	<22	1,3-5,1	-
Διπλής τοιχοποιίας	-	5,6-5,9	<30	3,36-5,13	-

Κονίαμα επί τόπου έσβεσης της ασβέστου

Που ενεργοποιεί «ποζολανικές» αντιδράσεις με ενεργά πρόσμικτα (αργιλοπυριτικά, ποζολανικά κ.ά) και προσδίδει υψηλές αντοχές και συνάφεια με τους δομικούς λίθους (ιδιαίτερα για απαιτητικές κατασκευές, όπως τόξα γέφυρες κ.ά)



Μοναστήρι στο Άγιο Όρος



Μικροσκοπία οπτικών Ινών

Moropoulou, A., Tsiourva, T., Bisbikou, K., Biscontin, G., Bakolas, A., Zendri, E., "Hot lime technology imparting high strength to historic mortars", Construction and Building Materials, 10 (1996) 151-159.



Επιφάνεια Κονιάματος



Διεπιφάνεια δομικού
υλικού κονιάματος



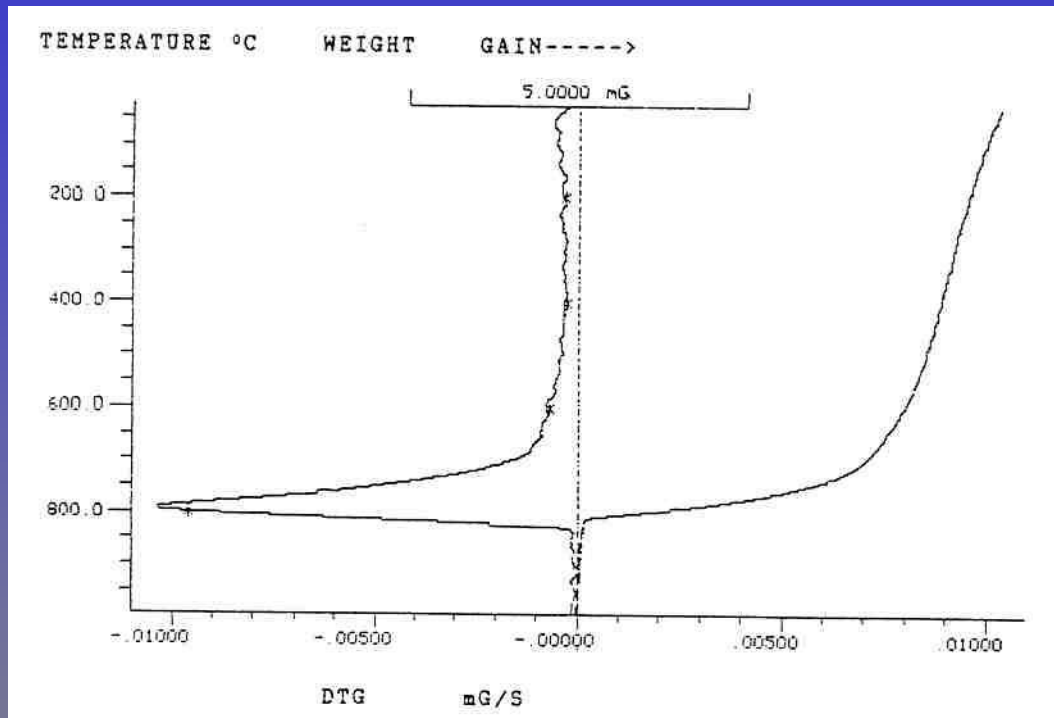
Μήτρα Κονιάματος



Αδρανή
κονιαμάτων

Μικροσκοπία Οπτικών Ινών από Κονιάματα Γεφυριών της
Ηπείρου

Moropoulou, A., Christaras, V., Bakolas, A., Moundoulas P., , "Historic mortars" of Epirus Bridges, Construction and Building Materials, in press



Τυπική καμπύλη Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης και
Θερμοβαρυμετρίας κονιάματος επί τόπου έσβεσης της
ασβέστου

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ
ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ
ΤΟΥ ΓΕΦΥΡΙΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ**

Παρουσίαση δειγμάτων



**K1 Κονίαμα
Γεμίματος**



**K2 Κονίαμα από
τύμπανο**



K3 Κονίαμα κυρίως τόξου



**K4 Κονίαμα γύρω
από οριζόντια
ξύλεια εντός
σώματος βάθρου**



**K5 Κονίαμα γύρω
από ξυλεία
εσχάρας τόξου**



K7



**KΞ1 Κονίαμα σε
επαφή με ξύλο**

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

- Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά
- Σε όλα τα δείγματα διακρίνονται συσσωματώματα ασβέστη (συνθήκες ανάμιξης)
- Δεν παρουσιάζονται προϊόντα βιοδιάβρωσης
- Φαίνεται ότι έχουν κοινά αδρανή με μεγάλα ποσοστά κονίας σε σχέση με τα αδρανή
- Όλα τα δείγματα είναι ελαφροβαρή, κάτι που σημαίνει ότι έχει γίνει χρήση ελαφροβαρών αδρανών ή πρόσθετων, πέραν της ποταμίσις πυριτικής άμμου

Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό

➤ *Οπτική μικροσκοπία, Ηλεκτρονική μικροσκοπία και χημική μικροανάλυση*



Ορυκτολογικός και πετρογραφικός χαρακτηρισμός.
Φυσικοχημική ανάλυση

➤ *Θερμικές αναλύσεις (DTA, TG)*



Ποιοτικός, ποσοτικός προσδιορισμός των συστατικών των κονιαμάτων

➤ *Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD), Ποροσιμετρία Hg*

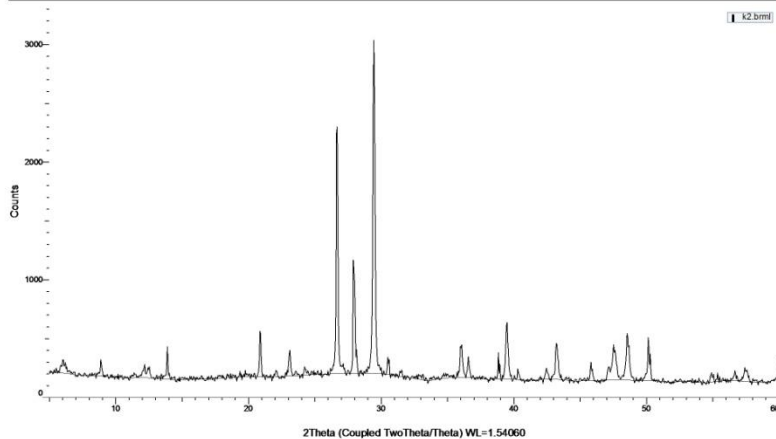


Προσδιορισμός κρυσταλλικών φάσεων.
Μελέτη μικροδομής.

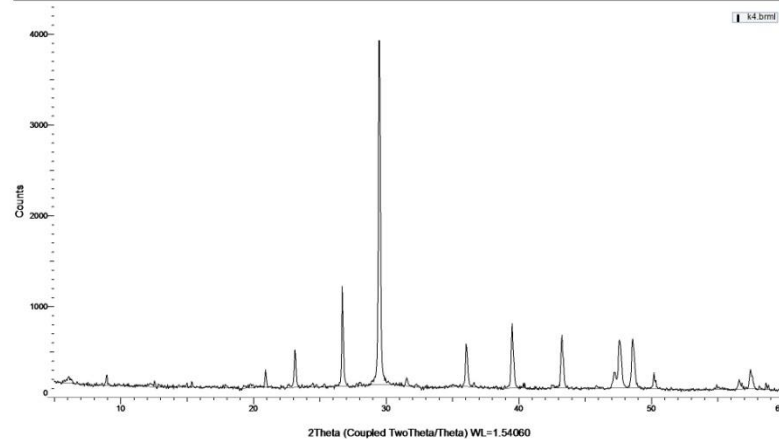
Αποτελέσματα Περίθλασης Ακτίνων Χ

Ονομασία/Κωδικός Δείγματος	Ορυκτολογική Σύσταση
Πωρόλιθος	Μαγνησιακός ασβεστίτης*, χαλαζίας
Λίθος 3 (Λ3)	Χαλαζίας, μαγνησιακός ασβεστίτης*, αλβίτης, μοντμοριλονίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης
Κονίαμα 1 (Κ1)	Ασβεστίτης, χαλαζίας, μοντμοριλονίτης, μοσχοβίτης
Κονίαμα 2 (Κ2)	Ασβεστίτης, χαλαζίας, αλβίτης, μοσχοβίτης, μοντμοριλονίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης
Κονίαμα 3 (Κ3)	Μαγνησιακός ασβεστίτης*, χαλαζίας, αλβίτης, κανκρινίτης, δολομίτης ή χουντίτης, μοντμοριλονίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης
Κονίαμα 4 (Κ4)	Ασβεστίτης, χαλαζίας, δολομίτης ή χουντίτης, μοσχοβίτης, μοντμοριλονίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης
Κονίαμα 5 (Κ5)	Ενυδατωμένο ανθρακικό υδροξείδιο των οξειδίων του ασβεστίου του αργιλίου και του σιδήρου, χριστοβαλίτης ή /και δισιλικικό οξύ, ασβεστίτης, χαλαζίας, σανιδίνης
Κονίαμα 7 (Κ7-ΚΑΣΚ)	Χαλαζίας, ασβεστίτης, αλβίτης, μοντμοριλονίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης
Κονίαμα Ξύλου 2 (ΚΞ2)	Χαλαζίας, ασβεστίτης, αλβίτης, μοντμοριλονίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης

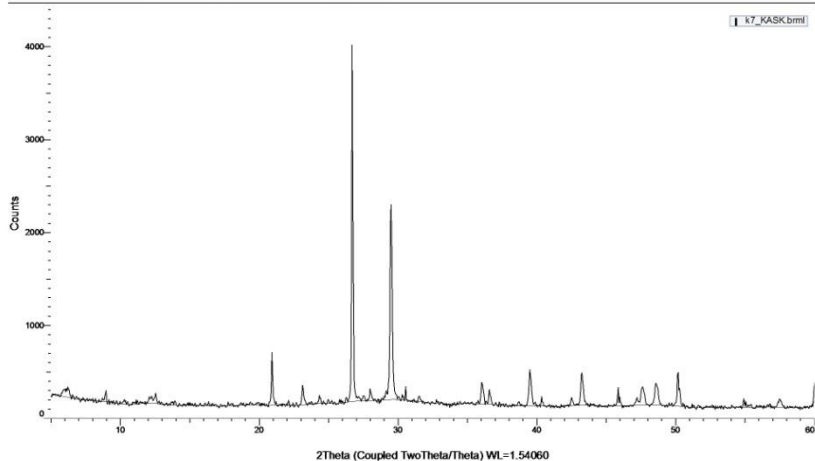
Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)



Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)



Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

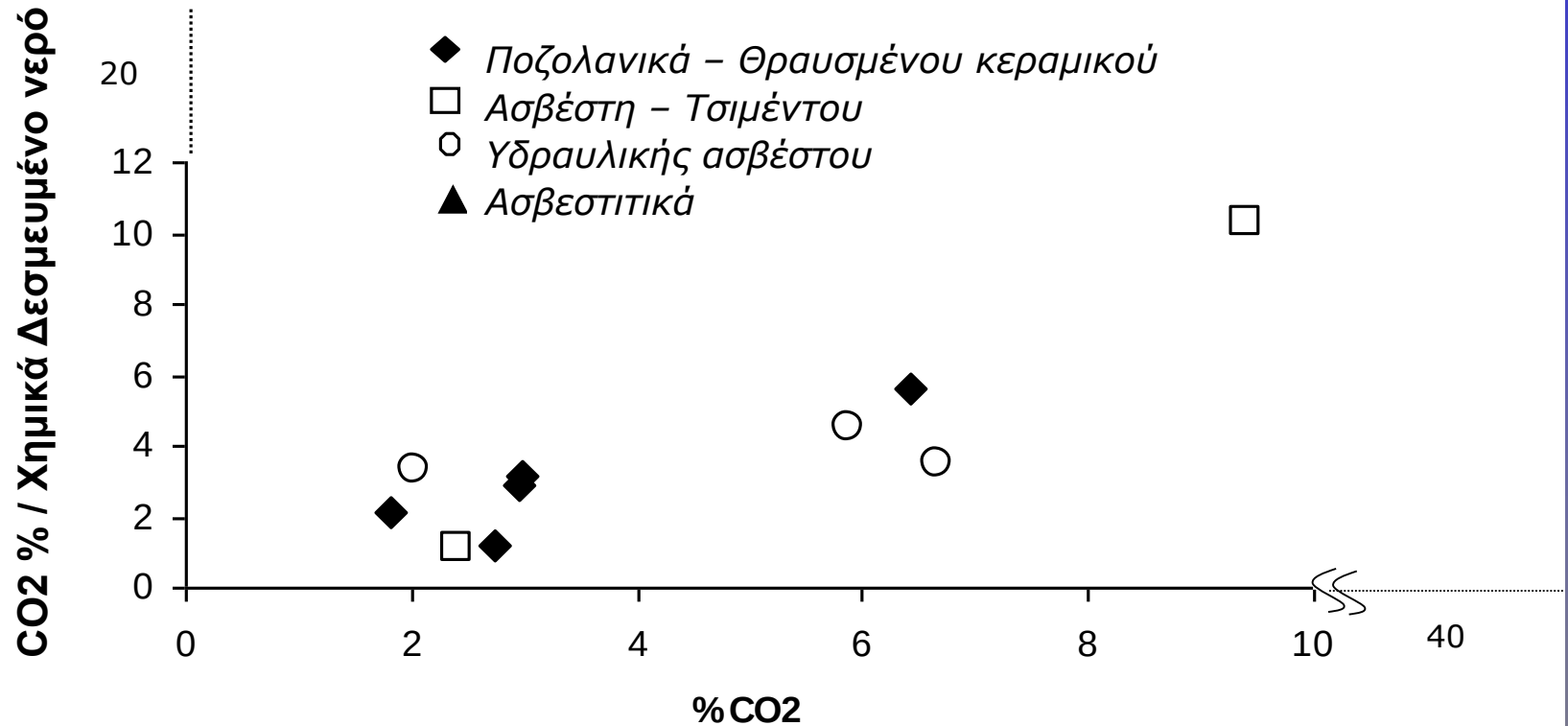


Χαρακτηριστικά
γωνιογράμματα από τα
δείγματα κονιαμάτων, όπου
φαίνεται η καλσιτική –
χαλαζιακή σύστασή τους,
με παρουσία
μοντμοριλονίτη χλωρίτη –
σερπεντίνη κ.ά

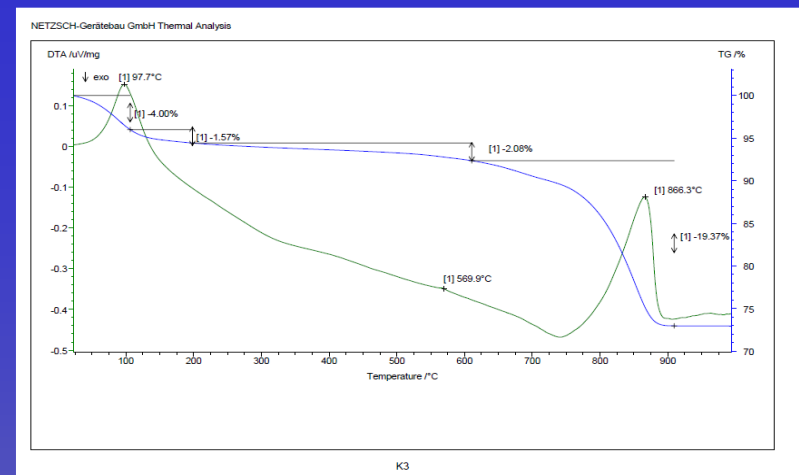
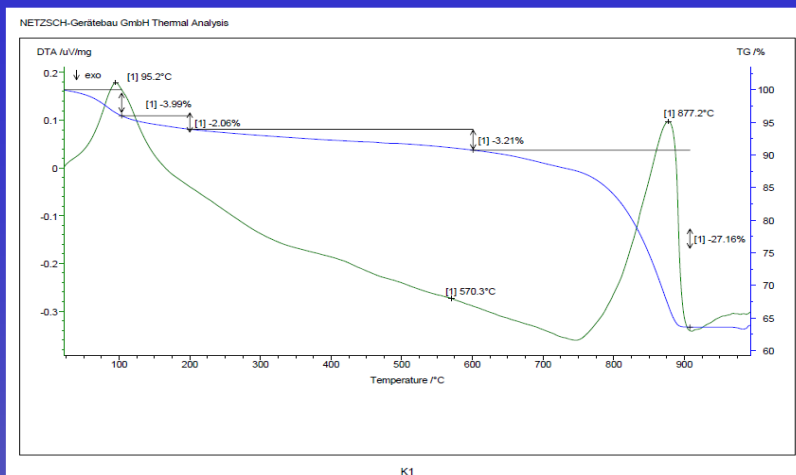
Αποτελέσματα Θερμικών Μεθόδων Ανάλυσης (Διαφορική Θερμική Ανάλυση – Θερμοβαρυμετρία)

Δείγματα	Υγροσκοπικό Νερό (%)	Χημικά Δεσμευμένο νερό (%)	Περιεχόμενο CO ₂ (%)	Λόγος CO ₂ /H ₂ O
K1	5,17	3,96	26,86	6,78
K2	1,66	4,87	15,05	3,09
K3	4,69	2,76	19,54	7,07
K4	4,75	3,98	28,07	7,05
K5	17,57	5,99	13,77	2,29
K7	4,06	4,19	13,40	3,19
Kw	1,62	3,30	16,65	5,04

ΑΠΟ ΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΑ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΕΡΙΕΧΕΤΑΙ ΣΤΙΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ



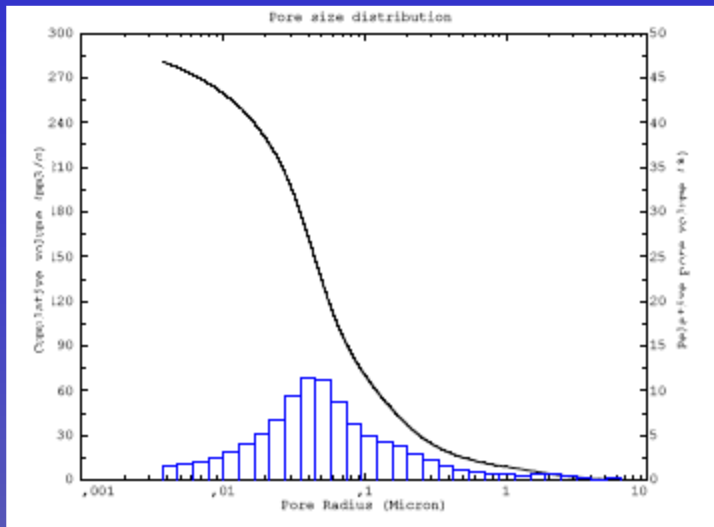
ΤΟ ΧΗΜΙΚΑ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟ ΝΕΡΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ



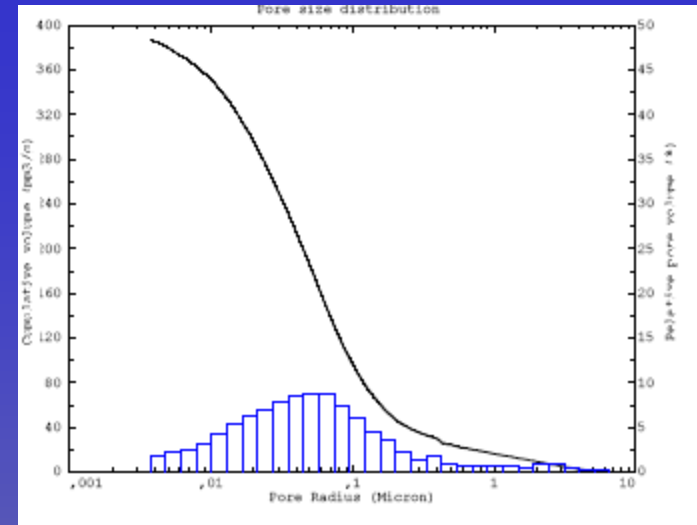
- Πολύ μεγάλο ποσοστό φυσικά ροφημένου νερού (λόγω της γειτνίασης με το νερό) το οποίο εξηγεί και τις χαμηλές μηχανικές αντοχές. Ως επιδεκτικά στη φθορά από κρυστάλλωση αλάτων έχουν υποστεί απομείωση των μηχανικών τους αντοχών με την πάροδο του χρόνου
- Υψηλά ποσοστά χημικά δεσμευμένου νερού και συσσωματώματα ασβέστη, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τεχνολογία παρασκευής ήταν η επί τόπου ανάμιξη της ασβέστου. Αδρανή πυριτικής φύσης
- Χαρακτηριστικές κορυφές της φυσικής υγρασίας και της διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου στους 100 και πάνω από του 600 βαθμούς αντίστοιχα. Από τη θερμοβαρυμετρική καμπύλη φαίνεται ο έντονος υδραυλικός χαρακτήρας των κονιαμάτων
- Σημειώνεται ότι εκτός από τον έντονο υδραυλικό χαρακτήρα υπάρχει διαφορετικός βαθμός ενανθράκωσης και ενυδάτωσης

Όρια αποδοχής με βάση τα χαρακτηριστικά της μικροδομής

Δείγμα	Ολικός ειδικός όγκος (mm ³ /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	Ολικό πορώδες (%)
K1	280.9	1.48	0.047	19.47	41.8
K2	193.8	1.63	0.013	36.01	31.6
K3	387.5	1.24	0.046	29.69	48.1
K4	389.3	1.19	0.017	49.49	46.6
K5	418.1	1.11	0.025	41.66	46.6
K7	333.8	1.32	0.017	45.05	44.0



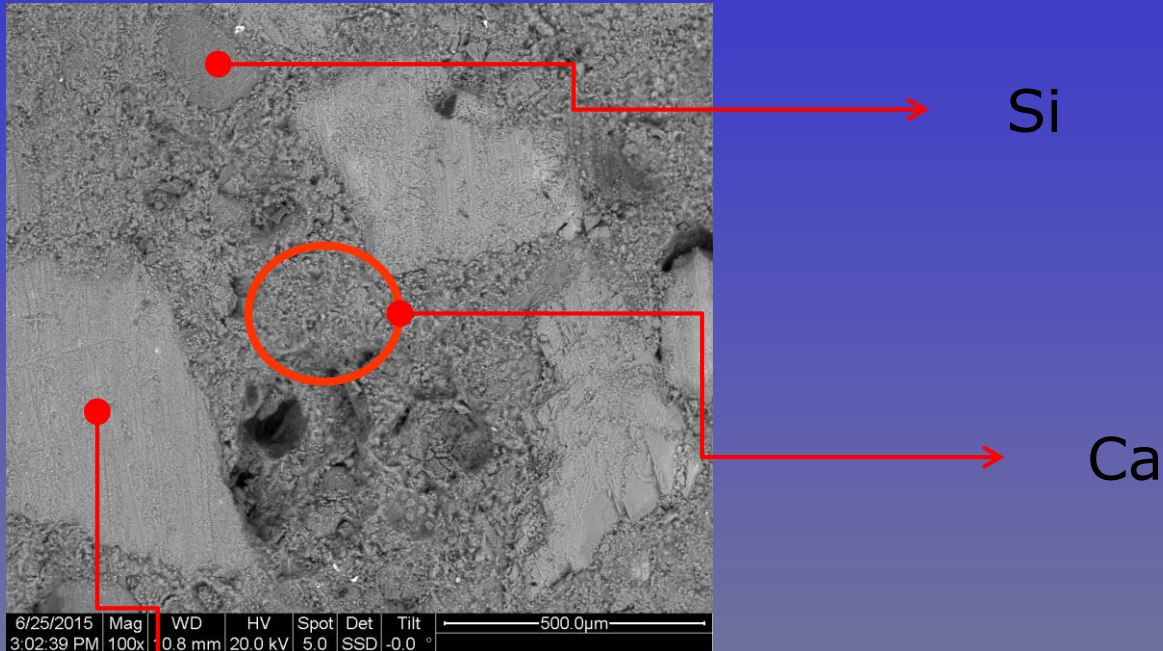
K1



K3

Τα αποτελέσματα της μελέτης μικροδομής των κονιαμάτων, συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα πλήθους δειγμάτων ιστορικών κονιαμάτων που έχουν μελετηθεί από το Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, δείχνουν ότι τα χαρακτηριστικά τους τα κατατάσσουν στην κατηγορία των κονιαμάτων επί τόπου έσβεσης της ασβέστου. Ειδικότερα τα συγκεκριμένα κονιάματα παρουσιάζονται εξαιρετικά ελαφριά, με υψηλές τιμές ειδικής επιφάνειας. Τα αποτελέσματα της ποροσιμετρίας υδραργύρου επιβεβαιώνουν ουσιαστικά και τα αποτελέσματα των Θερμικών Μεθόδων Ανάλυσης. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι μικροδομές που έχουν διαμορφωθεί τόσο από την τεχνολογία παρασκευής όσο και από τη διαβρωτική δράση του νερού και των αλάτων τα έχουν καταστήσει ακόμη πιο επιδεκτικές στη φθορά από τους διαβρωτικούς παράγοντες.

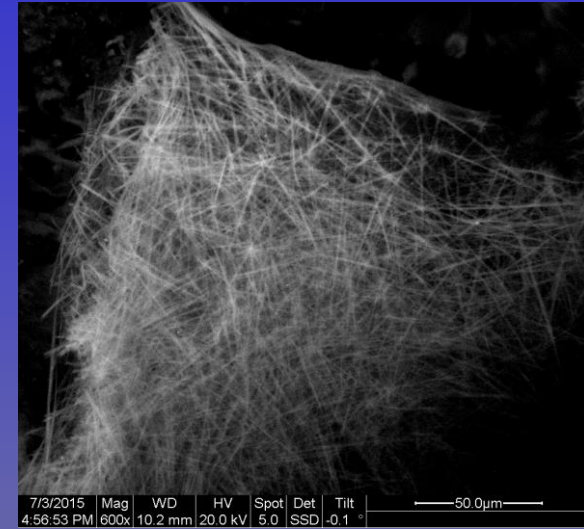
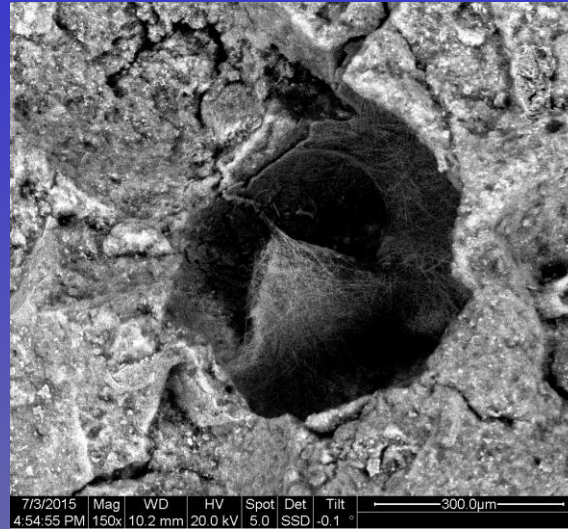
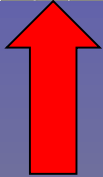
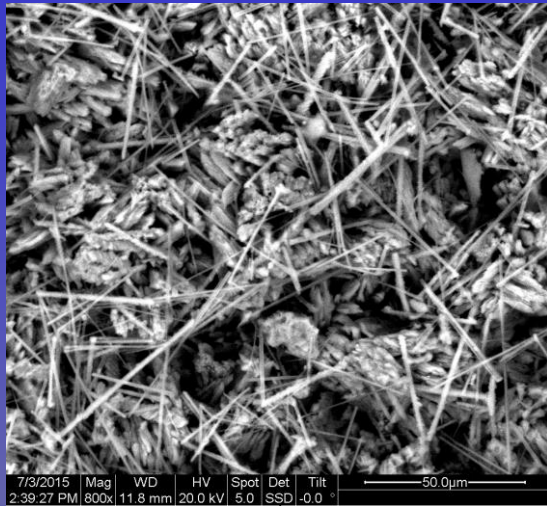
Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ



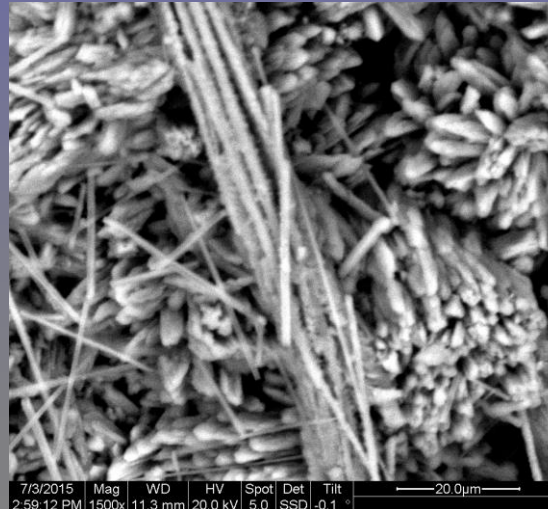
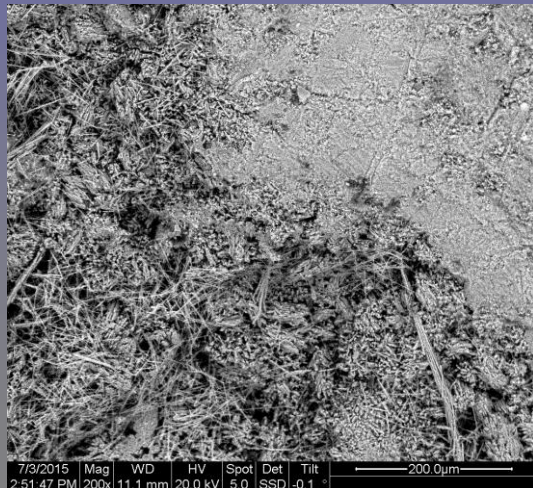
Ca

Μήτρα κονιάματος και αδρανή
ασβεστοπυριτικής σύστασης(K7)

Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

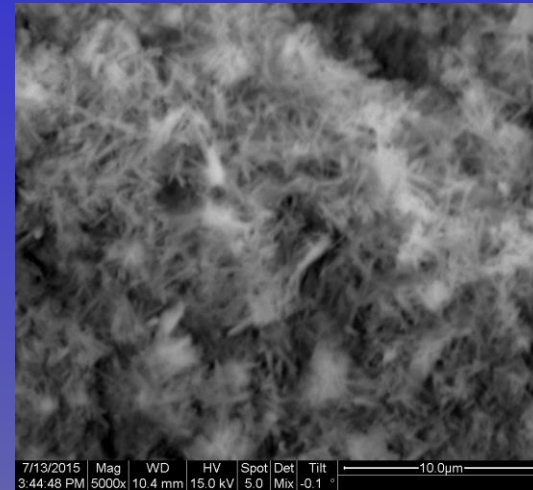
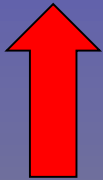
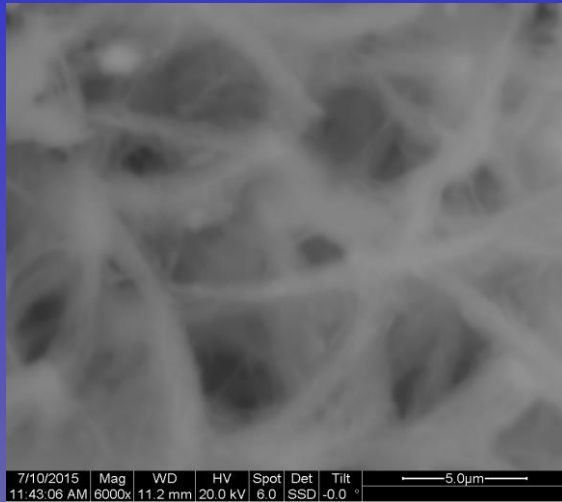


Αδρανή ινώδη ορυκτά (σερπεντίνης κ.ά) (K3)

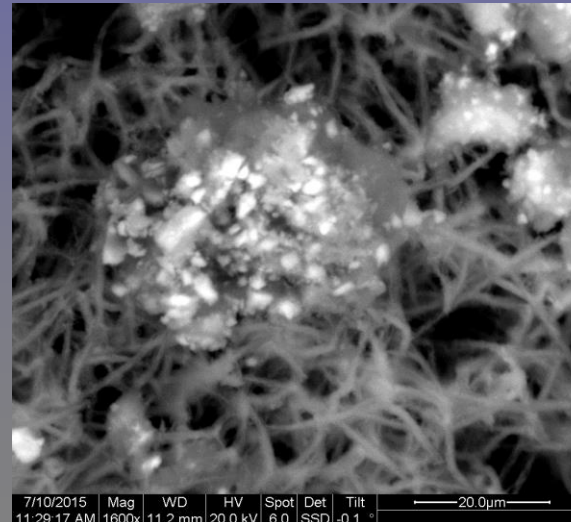
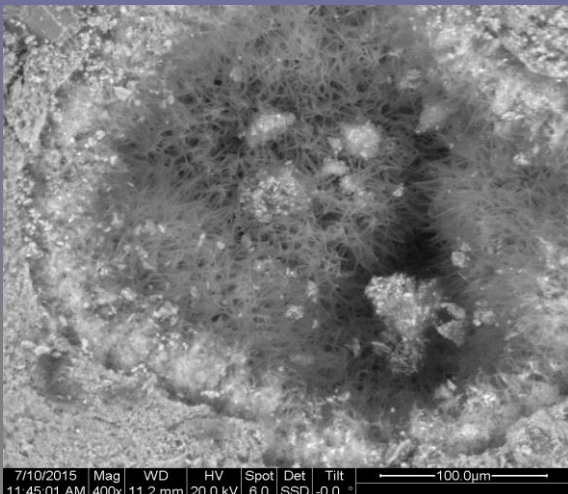


Ινώδη ορυκτά τα οποία διατρέχουν οριζόντια τη μάζα του κονιάματος (K4)

Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ



Αδρανή ινώδη
ορυκτά (KX1)



Αδρανή ινώδη
ορυκτά (K2)

ΠΡΟΤΑΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Από την μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων επιλέγεται να εξεταστεί η παρακάτω κατηγορία κονιάματος αποκατάστασης:

ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ & ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ
ΕΣΒΕΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ

Προτεινόμενη αναλογία
υδράσβεστος 15%, ποζολανικό πρόσθετο 15%, αδρανή 70%

ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Οι πρώτες ύλες, πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια βάσει των οποίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης. Τα κριτήρια αυτά έχουν προκύψει τόσο από έρευνες στα ιστορικά κονιάματα (εμπειρία του εργαστηρίου) όσο και από βιβλιογραφική αναζήτηση

Συνδετικό υλικό

υδράσβεστος, ασβέστης σε σκόνη

Πρόσμικτα

Που εισφέρουν υδραυλικότητα στο συνδετικό υλικό: μηλαϊκή γη (φυσική ποζολάνη), κεραμάλευρο (τεχνητή ποζολάνη)

Αδρανή

πυριτική άμμος

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΔΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ:

Υδράσβεστος:

- α) Χαμηλή θερμοκρασία όπτησης ($\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- β) Έσβηση και ωρίμανση της ασβέστου για την παραγωγή κατάλληλου κολλοειδούς (λόγος νερού/ κονίας, χρόνος και συνθήκες ωρίμανσης)
- γ) Καθαρότητα του ασβεστόλιθου σε ανθρακικό ασβέστιο ($>95\%$) ENV459/1
- δ) Ποσότητα ελεύθερου νερού $<50\%$

Φυσική Υδραυλική άσβεστος:

- α) Χαμηλή θερμοκρασία όπτησης ($\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- β) Ελεύθερο $\text{Ca(OH)}_2 >8\%$

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΠΟΥ ΕΙΣΦΕΡΟΥΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Τεχνητή Ποζολάνη:

1. Μεγάλη ειδική επιφάνεια
2. Υψηλή λεπτότητα $<63 \mu\text{m}$
3. Ποζολανικές ιδιότητες (τιμές σε αντοχή $>5 \text{ MPa}$ στο τεστ ποζολανικότητας και ποσοστό ενεργού πυριτίου $>20\%$)
4. Θερμοκρασία έψησης κεραμικού και πρώτες ύλες της αρχικής αργίλου (θερμοκρασία $<900 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Φυσική ποζολάνη:

1. Μεγάλη ειδική επιφάνεια
2. Υψηλή λεπτότητα $<63 \mu\text{m}$
3. Ποζολανικές ιδιότητες (τιμές σε αντοχή $>5 \text{ MPa}$ στο τεστ ποζολανικότητας και ποσοστό ενεργού πυριτίου $>20\%$)

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

Άμμος:

1. Υψηλή καθαρότητα
2. Απουσία διαλυτών αλάτων και ξένων προσμίξεων ($<1\%$)
3. Επιθυμητή κατανομή κοκκομετρίας βάσει ορίων αποδοχής
4. Φυσικής προέλευσης



Πυριτική άμμος

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (DTA-TG),

για την εξακρίβωση των προδιαγραφών των πρώτων υλών, ως προς τη σύστασή τους

Περίθλαση ακτίνων X (XRD),

για την ορυκτολογική εξέταση των πρώτων υλών

Φθορισμός ακτίνων X (XRF),

για την εξέταση των πρόσθετων ως προς την χημική σύσταση

Τεστ ποζολανικότητας,

για την εξέταση των πρόσθετων ως προς τις ποζολανικές ιδιότητες

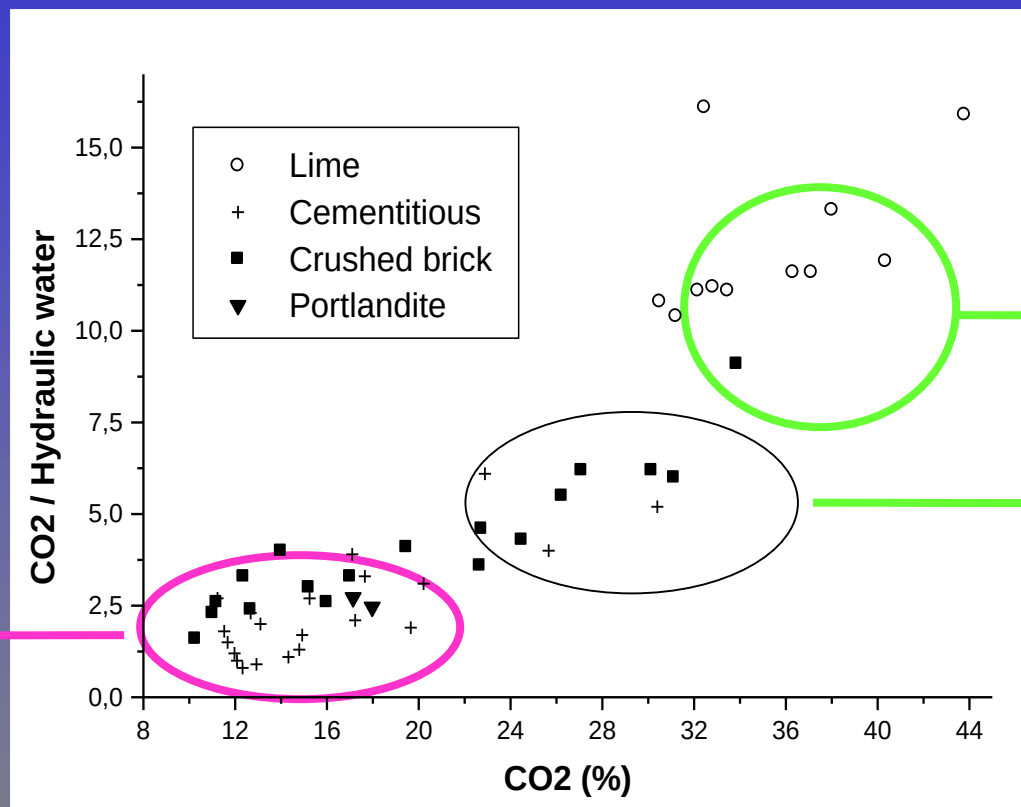
Ποροσιμετρία υδραργύρου,

για τον προσδιορισμό της μικροδομής του κεραμικού.

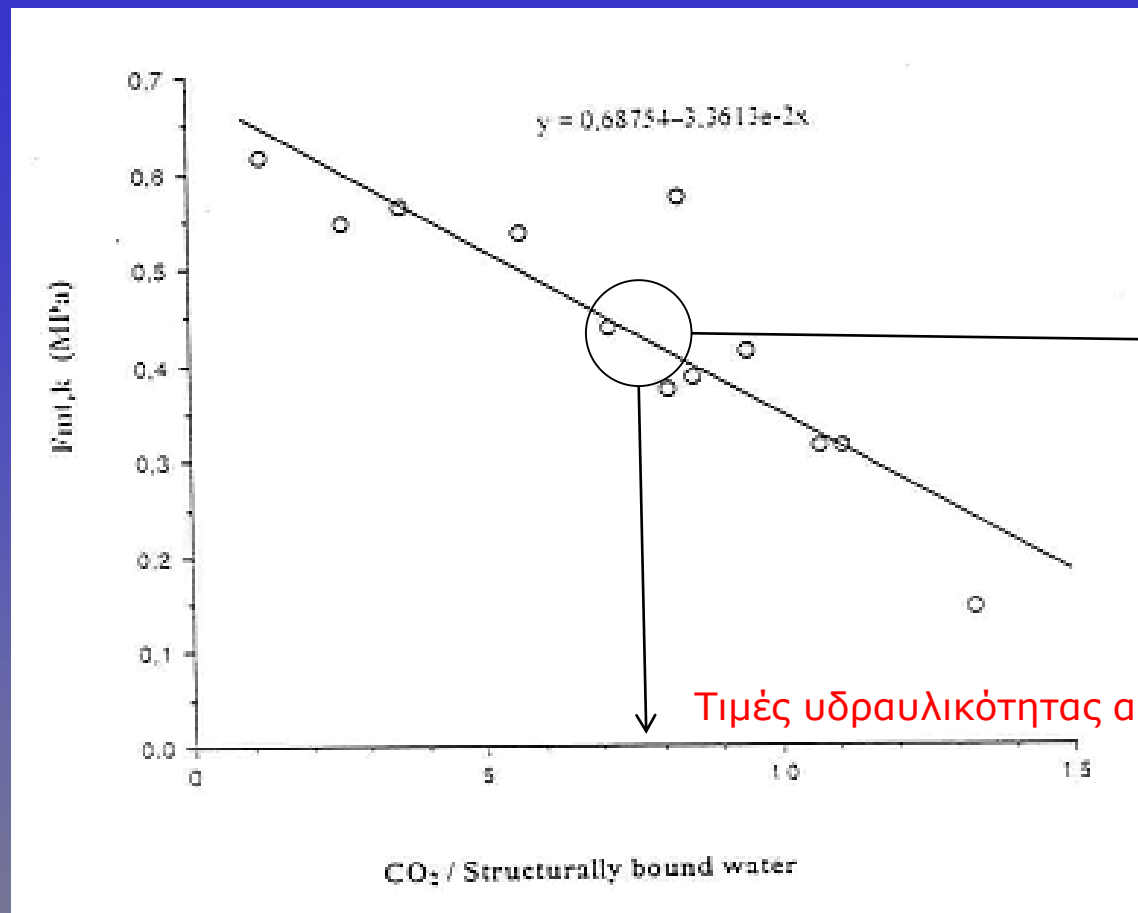
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

	Συνολικός Όγκος (mm ³ /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	Συνολικό Πορώδες (%)	Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)
Κεραμάλευρο, Άμμος	147.9	2.00	30.7	2.22	0.41
Κεραμάλευρο, Άμμος, Κεραμίδι	232.7	1.77	41.2	3.57	0.50
Μηλαϊκή Γη, Άμμος	153.6	2.06	31.6	2.02	0.43
Μηλαϊκή Γη, Άμμος, Κεραμίδι	260.1	1.71	44.5	1.85	0.58
ΟΡΙΑ ΑΠΟΔΟΧΗΣ	160-265	1.60-1.90	30-42	3.0-14.0	0.10-1.50

Διάγραμμα εξέλιξης της ενανθράκωσης σε σχέση με την ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων



Εφαρμογή κριτηρίων ανάπτυξης υδραυλικών φάσεων και εξέλιξης της ενανθράκωσης από την συσχέτιση και ταξινόμηση αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης (DTA – TG)

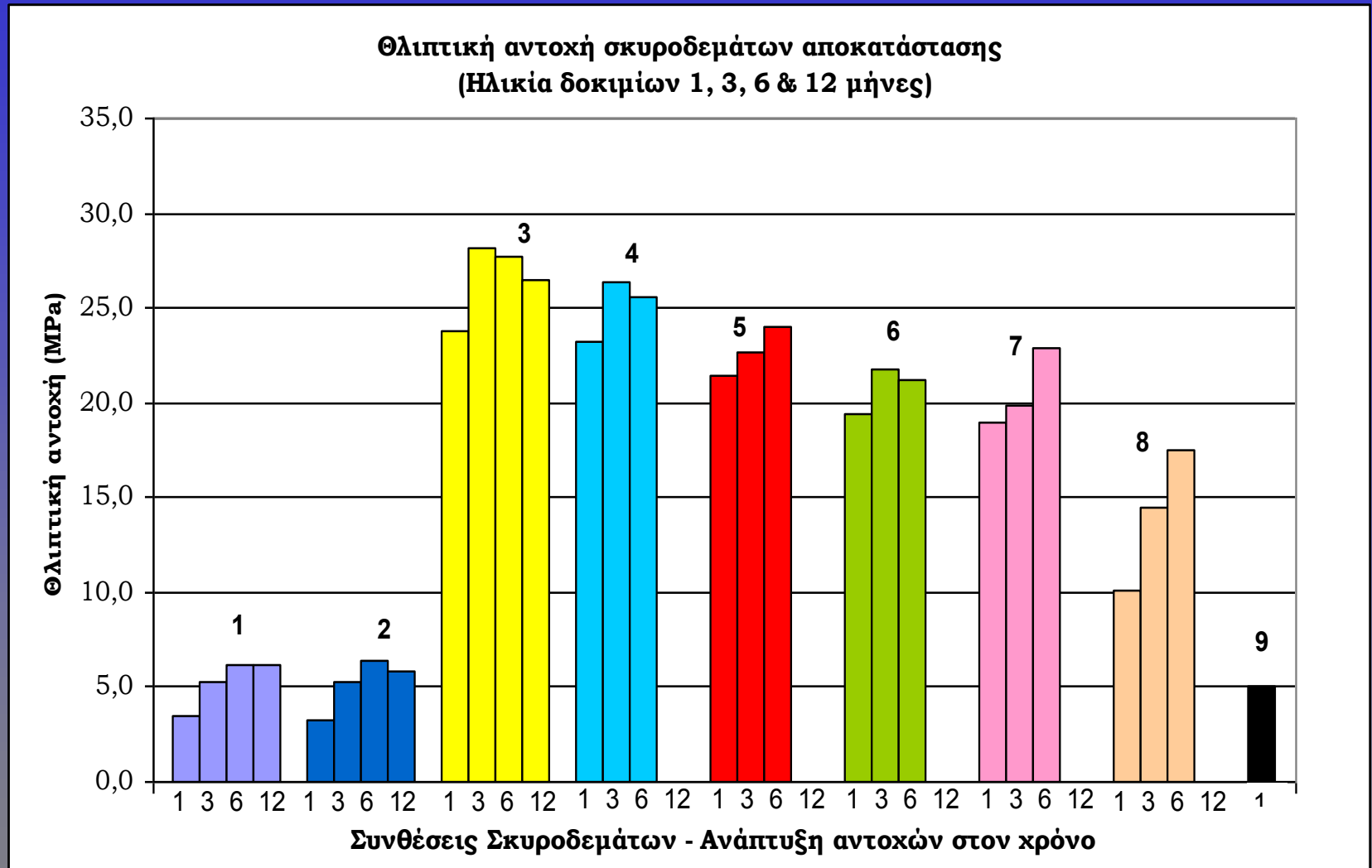


Αναμενόμενο
ύψος
εφελκυστικής
αντοχής

Τιμές υδραυλικότητας αυθεντικού κονιάματος

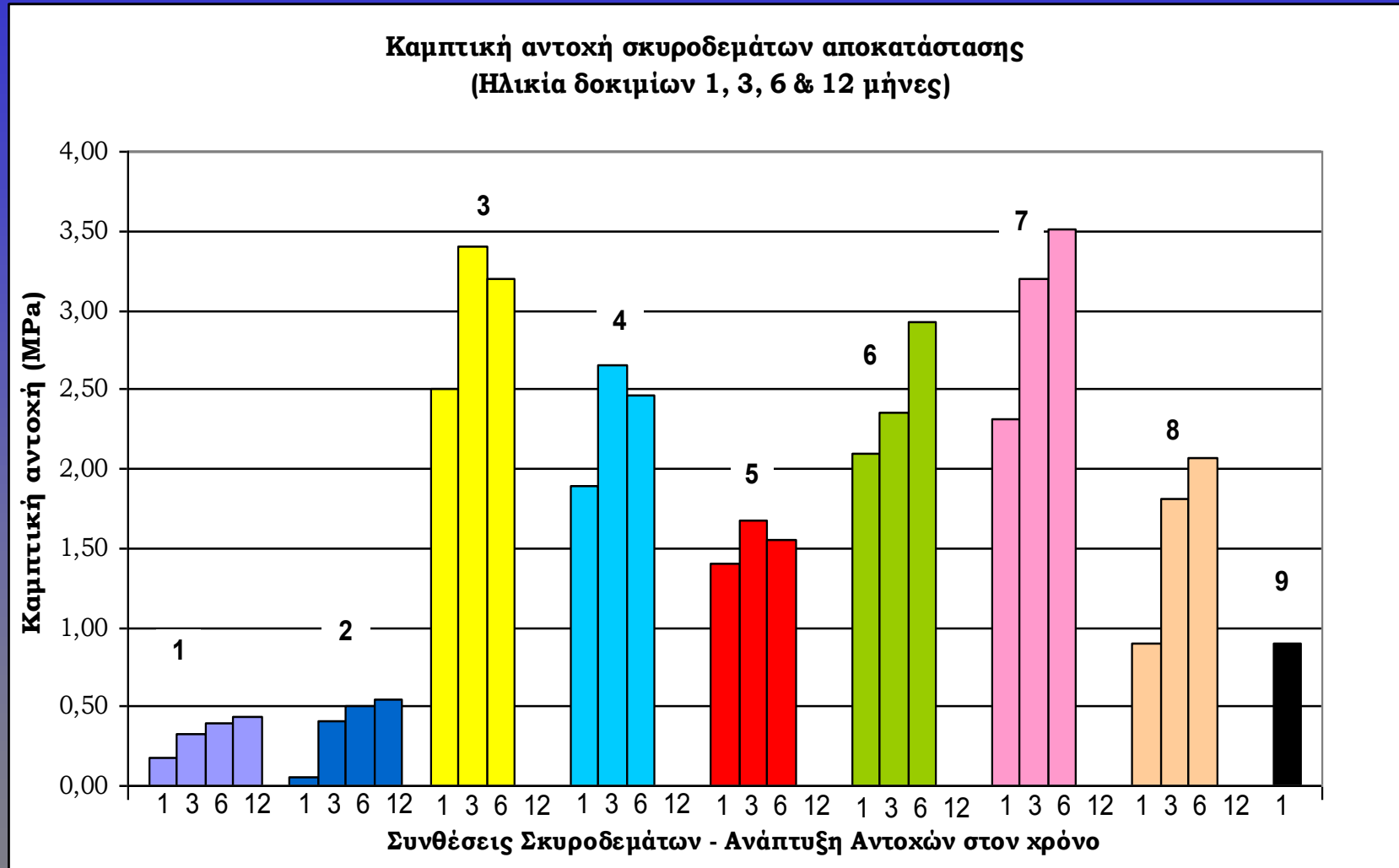
Η συσχέτιση μεταξύ αντιστρόφου υδραυλικότητας και των μηχανικών αντοχών μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την αναμενόμενη εφελκυστική αντοχή των προτεινόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης. Οι τιμές του αυθεντικού κονιάματος είναι αισθητά μειωμένες

Αποτελέσματα Αντοχή σε Θλίψη Ποζολανικών Κονιαμάτων Αποκατάστασης

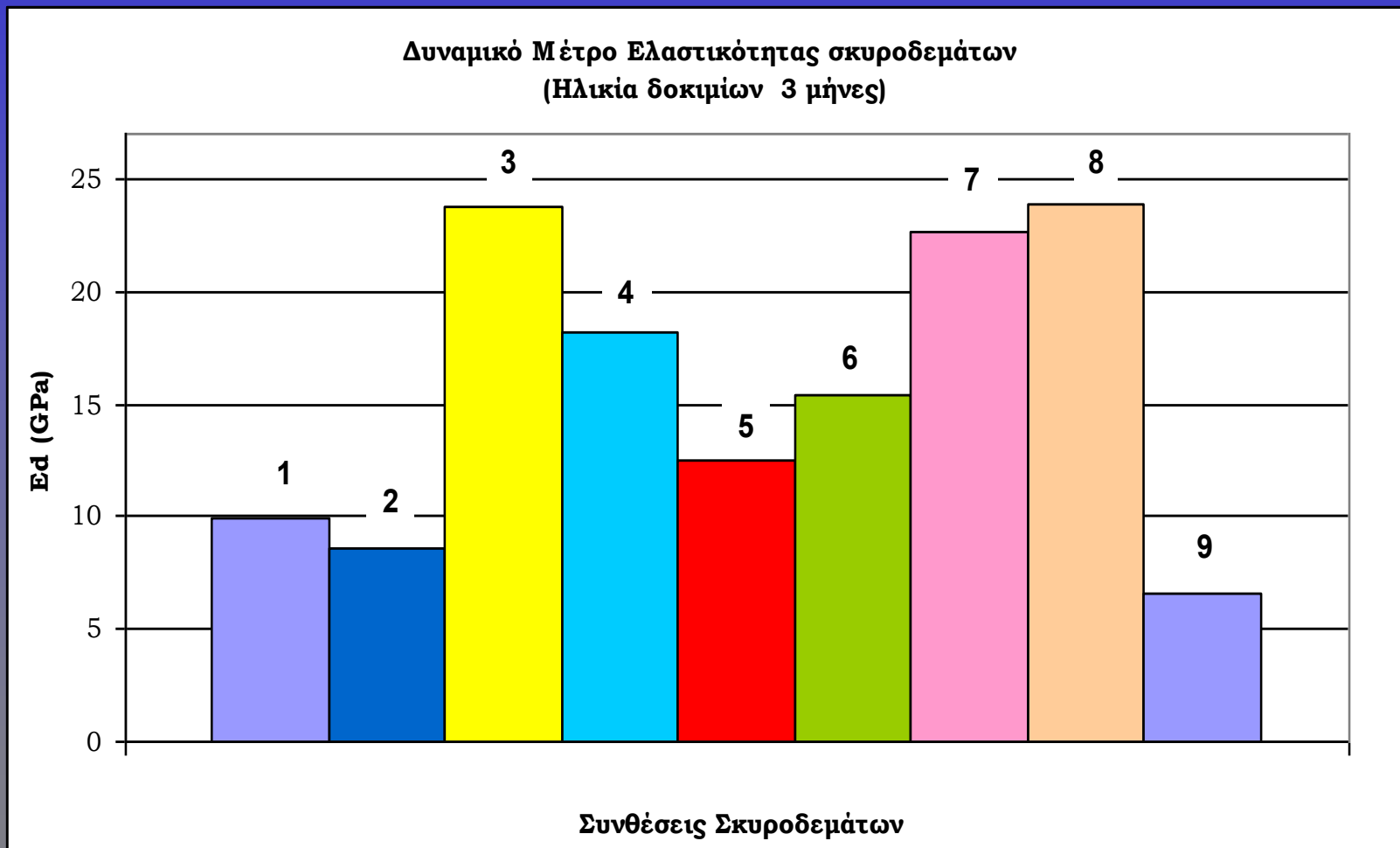


Αποτελέσματα Αντοχή σε Κάμψη Ποζολανικών Κονιαμάτων

Αποκατάστασης



Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας σε χρονικό διάστημα 3 μηνών



Η Ερευνητική πρόκληση της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης για την πρόταση των κατάλληλων συμβατών και επιτελεστικών κονιαμάτων αποκατάστασης είναι η αριστοποίησή τους, ώστε να παραχθούν λιγότερο επιδεκτικές στη φθορά από κρυστάλλωση αλάτων μικροδομές, ικανών μηχανικών αντοχών και ταυτόχρονα ελαφροβαρών

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K., "Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies", *Thermochimica Acta*, 2570 (1995) 743-753.

Biscontin G., Bakolas A., Moropoulou A., Repaci G., Zendri E., "Degradation processes of dolomitic limestones in monuments", *Science and Technology for Cultural Heritage*, 4 (1995) 43-49.

Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K., "Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal analysis and X-ray diffraction techniques", *Thermochimica Acta*, 269/270 (1995) 779-795.

Moropoulou A., Biscontin G., Bisbikou K., Bakolas A., Zendri E., "'Opus Caementicium' Mortars and Behaviour in a Heavily Polluted Marine Atmosphere", *Il Cemento*, 92 (1995) 261-278.

Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E., "Characterization of the lumps in the mortars of historic masonry", *Thermochimica Acta*, 269/270 (1995) 809-816.

Bakolas A., Biscontin G., Contardi V., Franceschi E., Moropoulou A., Palazzi D., Zendri E., "Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice", *Thermochimica Acta*, 269/270 (1995) 817-828.

Moropoulou, A., Tsiourva, T., Bisbikou, K., Biscontin, G., Bakolas, A., Zendri, E., "Hot lime technology imparting high strength to historic mortars", *Construction and Building Materials*, 10 (1996) 151-159.

Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E., "Salt impact on brickwork along the canals of Venice", *Materials and Structures*, 29 (1996) 47-55.

Moropoulou A., Biscontin G., Bakolas A., Bisbikou K., "Technology and behavior of rubble masonry mortars", *Construction and Building Materials*, 11 (1997) 119-129..

Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Cakmak A.S., "Compatible restoration mortars for Hagia Sophia earthquake protection", *Advances in Earthquake Engineering 4, Earthquake Resistant Engineering Structures*, ed. G. Oliveto, C.A. Brebbia, Publ. Wessex Institute of Technology, 1999, pp. 521-531.

Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E., "Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis", *Thermochimica Acta*, 321 (1998) 151-160.

Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K., "Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures", *Construction and Building Materials*, 14 (2000) 35-46.

Moropoulou A., Bakolas A., "Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historic mortars", *PACT, Revue du groupe européen, d'études pour les techniques physiques, chimiques, biologiques et mathématiques appliquées à l'archéologie-Conseil de l'Europe*, Athens, Vol. 56, 1998, pp. 165-178.

Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Anagnostopoulou S., Aggelakopoulou E., "Compatible restoration mortars for the earthquake protection of Hagia Sophia", *PACT, Revue du groupe européen, d'études pour les techniques physiques, chimiques, biologiques et mathématiques appliquées à l'archéologie-Conseil de l'Europe*, Athens, Vol. 59, 2000, pp. 29-51.

Moropoulou A., Athanasiadou A., Bakolas A., Moundoulas P., "Design and in situ application of repair mortars for the works of 'Restoration and strengthening of the Markos' Water Mill in Veria, Greece'", *PACT, Revue du groupe européen, d'études pour les techniques physiques, chimiques, biologiques et mathématiques appliquées à l'archéologie-Conseil de l'Europe*, Athens, Vol. 59, 2000, pp. 163-176.

Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K., "Investigation of the technology of historic mortars", *J. Cultural Heritage*, 1 (2000) 45-58.

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) 191-195.

Moropoulou A., Kouloumbi N., Bakolas A., Haralampopoulos G., "Performance evaluation of conservation interventions to porous stone facades of historic buildings in heavily polluted urban centers", *Pittura e Vernici European Coatings*, 77 (2001) 19-28.

Moropoulou A., Cakmak A.S., Biscontin G., Bakolas A., Zendri E., "Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: The crushed brick/lime of Justinian's Hagia Sophia", *Construction and Building Materials*, 16 (2002) 543-552.

Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou E., Anagnostopoulou S., "Design and evaluation of restoration mortars for historic masonry using traditional materials and production techniques", *Materials Issues in Art and Archaeology VI*, Vol. 712, eds P. Vandiver, M. Goodway, J.R. Druzik, J.L. Mass, Materials Research Society, Pittsburgh, 2002, pp. 77-82.

Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Moropoulou A., "Physico-chemical study of cretan ancient mortars", *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 651-661.

Moropoulou A., Polikreti K., Bakolas A., Michailidis P., "Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics", *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 891-898.

Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E., "Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolana by thermal analysis", *Thermochimica Acta*, 420 (2004) 135-140.

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) 295-300.

Moropoulou A., Bakolas A., Anagnostopoulou S., "Composite materials in ancient structures", *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005) 289-294.

Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Aggelakopoulou E., "Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars", *Repair Mortars in Historic Masonries*, Workshop RILEM, TC RMH, Delft, 2005.

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

Bakolas A., Aggelakopoulou E., Moropoulou A., "Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes", *J. Thermal Analysis & Calorimetry*, 92 (2008) 345-351.

Karoglou M., Bakolas A., Koloumbi N., Moropoulou A., "Reverse engineering methodology for studying historic buildings coatings: The case study of the Hellenic parliament neoclassical building", *Progress in Organic Coatings*, 72 (2011) 202-209.

Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A., Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries, *Applied Clay Science*, 53 (2011) 15-19.

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., Anagnostopoulou, S., "Composite materials in ancient structures", *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005) 295-300

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

Bakolas A., Aggelakopoulou E., Moropoulou A., "Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes", *J. Thermal Analysis & Calorimetry*, 92 [1] (2008), pp. 345-351

Moropoulou, A., Polikreti, "Principal component analysis in monument conservation: Three application examples", *Journal of Cultural Heritage*, 10 (2009) pp. 73-81

Katsioti, M., Gkanis, D., Pipilikaki, P., Sakellariou, A., Papathanasiou, A., Teas, Ch., Chaniotakis, E., Moundoulas, P., Moropoulou, A., "Study of the substitution of limestone filler with pozzolanic additives in mortars", *Construction and Building Materials*, 23, 5 (2009) 1960-1965

Moropoulou, A., Bakolas, A., Karoglou, M., Delegou, E.T., Labropoulos, K.C., Katsiotis, N.S. "Diagnostics and protection of Hagia Sophia mosaics", *Journal of Cultural Heritage*, 14S (2013) e133-e139

ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ