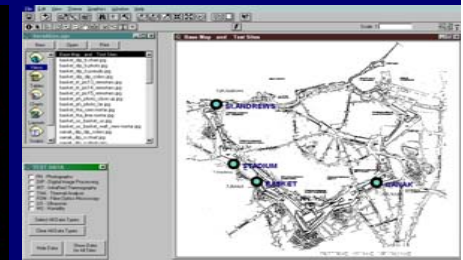
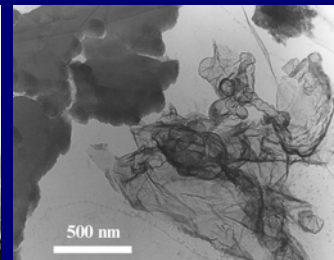
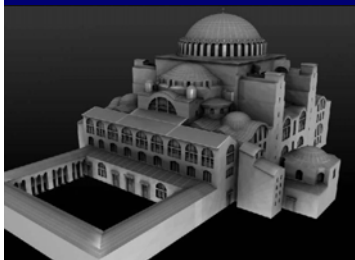


## Η Συμβολή της Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών στην Προστασία Μνημείων

### Η Διεπιστημονική Συνεργασία και τα Αποτελέσματα της για την Προστασία της Αγιά Σοφιάς

Αντωνία Μοροπούλου, Καθ. ΕΜΠ  
και ερευνητική ομάδα

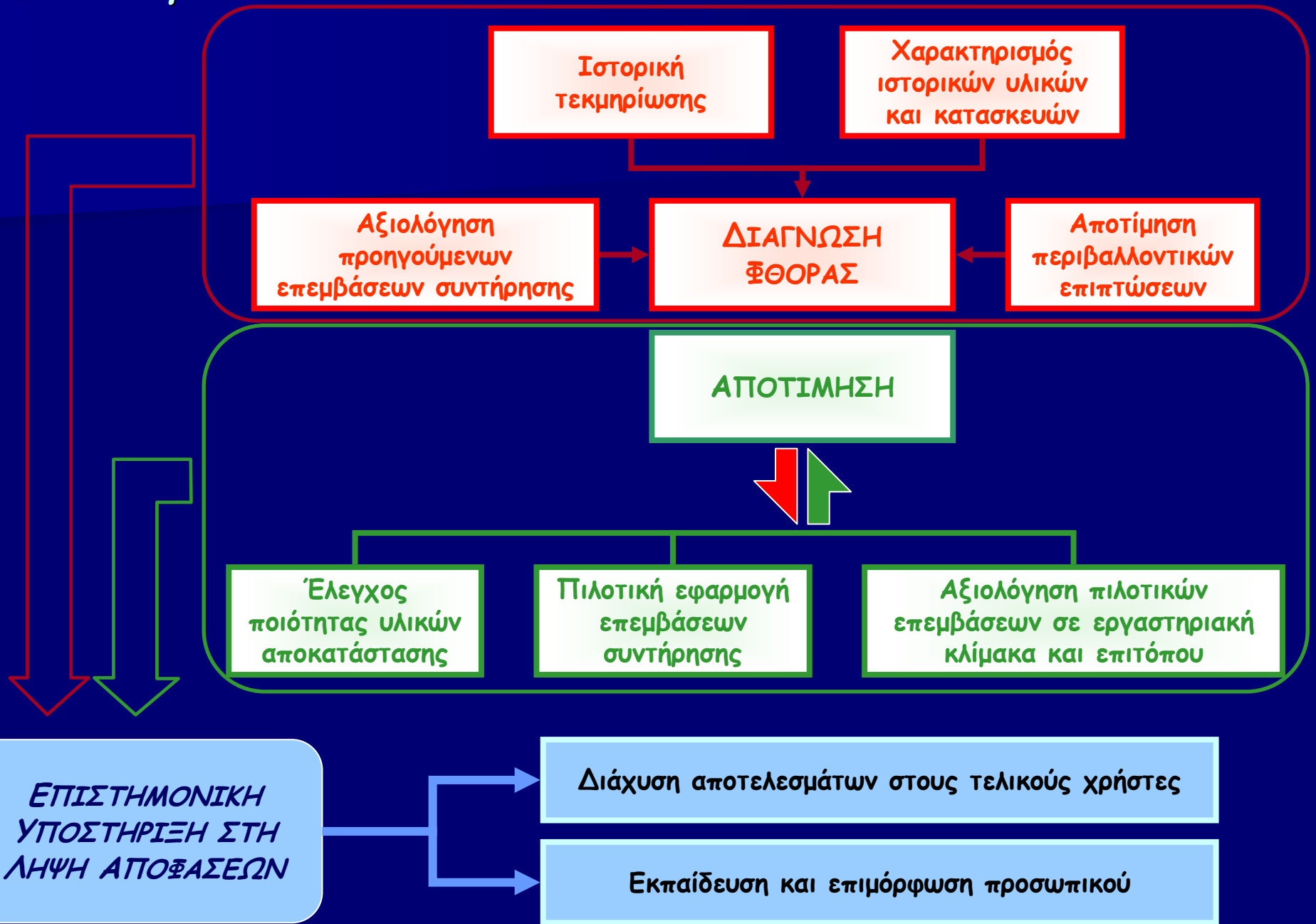


## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

Διεπιστημονική προσέγγιση για

- Προηγμένη διάγνωση της φθοράς / Χαρτογράφηση υλικών και φθοράς
- Ενσωμάτωση της επιστημονικής, αλλά και τεχνολογικής γνώσης στο σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης
- Καθιέρωση κριτηρίων και μεθοδολογίας αποτίμησης των υλικών και των επεμβάσεων συντήρησης από την ανάλυση δεδομένων που αφορούν στα υλικά και στο περιβάλλον (συμβατότητα και επιτελεστικότητα)
- Ένταξη των επεμβάσεων αυτών σε ένα γενικότερο περιβαλλοντικό σχεδιασμό οργανωμένο στη βάση του χωροταξικού ή του πολεοδομικού σχεδιασμού για την προστασία των μνημείων
- Ανάπτυξη νέων προηγμένων υλικών αποκατάστασης συμβατών με τα ιστορικά υλικά και επιτελεστικών για τις απαιτήσεις των νέων χρηστών

# Μεθοδολογία



## Διαθέσιμα εργαλεία

Μη καταστρεπτικές μέθοδοι

Ενόργανες μέθοδοι

Εργαλεία στρατηγικού σχεδιασμού

- *Έλεγχος ποιότητας υλικών, και αξιολόγηση τεχνολογίας για την παραγωγή προηγμένων υλικών*
- *Αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων - χαρτογράφηση υλικών και φθοράς*
- *Αξιολόγηση συμβατότητας υλικών συντήρησης και αποτελεσματικότητας επεμβάσεων συντήρησης στην κλίμακα αρχιτεκτονικών επιφανειών και ιστορικών τοιχοποιιών*
- *Στρατηγικός σχεδιασμός επεμβάσεων συντήρησης*
- *Ολοκληρωμένη περιβαλλοντική διαχείριση, στρατηγικός πολεοδομικός σχεδιασμός*

# ΚΡΙΣΙΜΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Εμπειρισμός και όχι επιστημονική προσέγγιση, λόγω :

- Έλλειψης διαγνωστικής μελέτης
- Αποσπασματικών επεμβάσεων συντήρησης χωρίς στρατηγικό σχεδιασμό
- Λόγω έλλειψης μελέτης των υλικών και των επεμβάσεων συντήρησης
- Άκριτης χρήσης ασύμβατων υλικών
- Προβλημάτων που επιτείνονται από την ποικιλομορφία των παραδοσιακών/ιστορικών υλικών

## ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

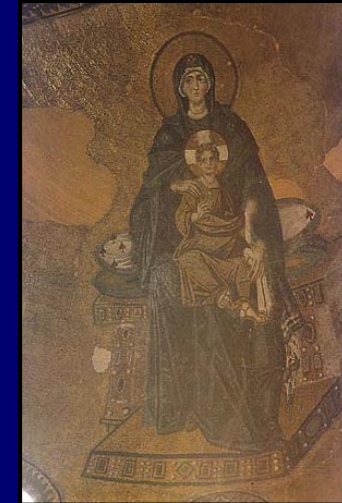
- ✓ **Γενικότερη δεοντολογία** των επεμβάσεων συντήρησης (Χάρτης Βενετίας και αναθεώρησή του βάσει νεωτέρων απόψεων)
- ✓ **Συμβατότητα** των δομικών υλικών μεταξύ τους και ως προς τα υλικά επέμβασης
- ✓ **Αντιστρεψιμότητα** της επέμβασης (στο μέτρο που αυτό είναι δυνατό - ήπιες επεμβάσεις)

## ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΜΒΑΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ & ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ

- Η αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας των υλικών στο χρόνο
- Ικανοποιητικό βάθος διείσδυσης
- Μεταβολή της κατανομής του πορώδους ώστε να:
  1. Μειώνεται η επιδεκτικότητα σε φθορά από κρυστάλλωση αλάτων
  2. Διασφαλίζεται η συμβατότητα με ισότροπη μεταφορά υγρών/ατμού (αναπνοή) στην τοιχοποιία
- Φυσικο-χημική και μηχανική συμβατότητα υγιούς και στερεωμένου λίθου (απουσία παραπροϊόντων, διαλυτών αλάτων, ανάλογο συντελεστή θερμικής διαστολής κ.α.)
- Αποφυγή χρωματικής αλλοίωσης της επιφάνειας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής



# ΤΟ ΜΝΗΜΕΙΟ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



- Ένα από τα πιο αξιοθαύμαστα κτίρια στην ιστορία της αρχιτεκτονικής
- Μνημείο της χρυσής εποχής της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας
- 3<sup>η</sup> εκκλησία με το ίδιο όνομα που ανεγέρθηκε στον ίδιο χώρο (1<sup>η</sup> = 360 μ.Χ., 2<sup>η</sup> = 415 μ.Χ., 3<sup>η</sup> = 537 μ.Χ [Ιουστινιανή])





# ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

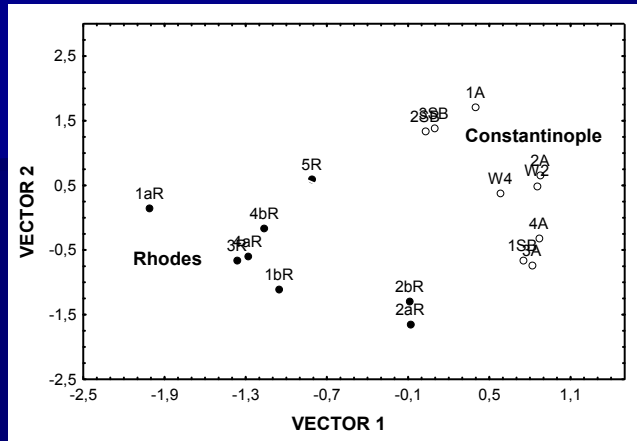
- Η Ιουστινιανή εκκλησία παραδόθηκε στις 28 / 12 / **537**
- Αρχιτέκτονες του ναού ήταν οι γεωμέτρεις **Ισίδωρος και Ανθέμιος**.
- Το δόμημα δοκιμάστηκε από μια σειρά σεισμών (**553-557**)
- Το **558** μετά από έναν ισχυρό σεισμό κατέρρευσε το ανατολικό τμήμα του τρούλου καθώς και η αψίδα και ο ημι-θόλος στην ίδια μεριά:  
→ ανακατασκευή μέχρι το **563**
- Σειρά σεισμών τον **9<sup>ο</sup>- 10<sup>ο</sup> αι.** είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών στον θόλο. Το **989**, μέρος του θόλου και της ανατολικής αψίδας καταρρέει:  
→ ανακατασκευή μέχρι το **996**
- Το εσωτερικό της εκκλησίας υπέφερε κατά την διάρκεια των λεηλασιών των Λατίνων στην Πόλη το **1204**, οπότε και αφαιρέθηκαν όλα τα ιερά λείψανα και πολύτιμα αντικείμενα.
- Ο θόλος υπέστη μερική κατάρρευση το **1346**  
→ ανακατασκευή μέχρι το **1355**
- Το **1453**, η Αγία Σοφία μετατρέπεται σε τζαμί (Ayasofya Camii), από τον Sultan Mehmet II. Το κτίριο συντηρείται ικανοποιητικά κατά την διάρκεια της Οθωμανικής περιόδου

## ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

*Συγκριτική μελέτη των υλικών με τη Μεγάλη Βασιλική της Ρόδου απέδειξε τη κοινή τεχνολογία κατασκευής και την προέλευση από εκεί των πρώτων υλών, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανακατασκευή του Τρούλου της Αγιά Σοφιάς το 557 μ.Χ. ως ελαφρότερων, μεγαλύτερης αντοχής και ανθεκτικότερων πλίνθων*

Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Polykreti, K., "Provenance and technology investigations of the Agia Sophia bricks", *J. American Ceramic Society*, 85, No 2 (2002) pp. 366-372

# ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



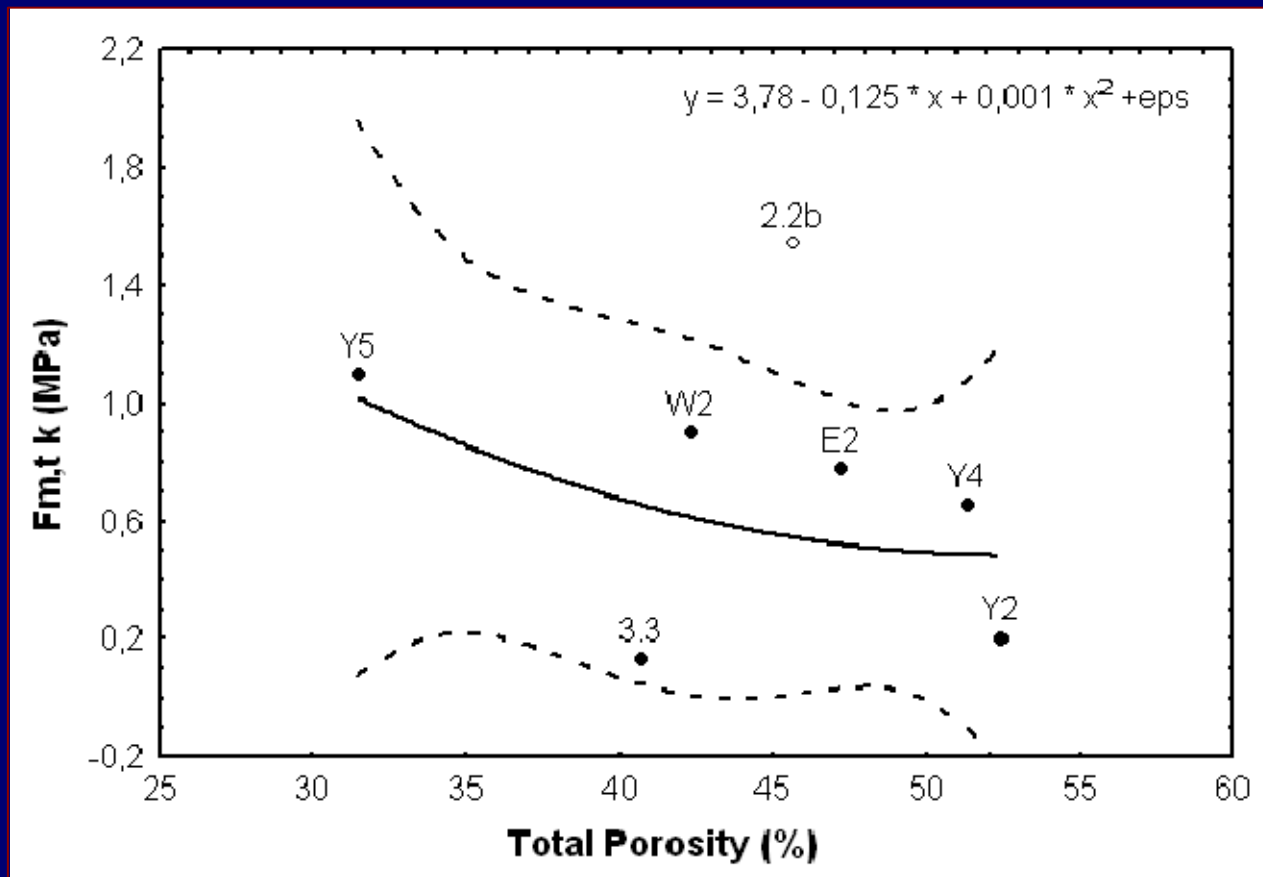
*Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι πλίνθοι της Αγίας Σοφίας εμφανίζουν μεγάλη ομοιότητα με πλίνθους από τη Μεγάλη Βασιλική της Ρόδου (6ος αι.)*

**Πιθανότητες δείγματος να ανήκει στην Κωνσταντινούπολη ή στη Ρόδο**

Δείγμα Αγία Σοφιάς	Πιθανότητα να ανήκει στην Κωνσταντινούπολη %	Πιθανότητα να ανήκει στη Ρόδο %
E2	0.5	17.7
Y1	1.1	63.1
Y2	1.1	53.7
a2.2	1.2	91.3
a2.2b	1.2	97.2
a3.2	0.8	85.2
a3.3	1.0	50.3
a3.4	1.1	75.5

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

*Εφελκυστική αντοχή - Συνολικό πορώδες  
Πλίνθοι Αγιά Σοφιάς*



Ελαφρύτεροι - Μεγαλύτερης αντοχής και ανθεκτικότητας

## ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

- Τα δείγματα του τρούλου του 6ου αιώνα εμφανίζουν πιθανότητα να προέρχονται από πηλό της Ρόδου 90%.
- Οι κεραμικοί πλίνθοι της Αγ. Σοφιάς είναι κατασκευασμένοι από μη ασβεστιούχα, ομογενοποιημένη πάστα πηλού, με μικρά εγκλείσματα χαλαζία και είναι ψημένοι σε χαμηλή θερμοκρασία. Εμφανίζουν τοπική υάλωση στο αρχικό στάδιο και υψηλό πορώδες (40-45%).
- Ίδια χαρακτηριστικά εμφανίζουν και οι μη ασβεστιούχοι πλίνθοι της Ρόδου.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους στους πλίνθους της Αγ. Σοφιάς αντιστοιχεί σε πόρους από 0.3 μέχρι 0.8μm. Αυτό σημαίνει είτε σκόπιμη επιλογή του πηλού, αποστράγγιση, κοσκίνισμα, καλούπωμα ή συμπίεση του πηλού.
- Η εφελκυστική αντοχή εμφανίζει μέγιστο για τους πλίνθους του τρούλου του 6ου αι., παρόλο το μεγάλο πορώδες τους.



# ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ 1994

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ  
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΒΥΖΑΝΤΙΝΩΝ ΚΑΙ  
ΟΘΩΜΑΝΙΚΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΤΟΥΡΚΙΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ,  
*[Κωνσταντινούπολη, 19/03/94]:*

- *Princeton University - Dept. Civil Eng. & Operations Res. (PU-CEOR)*
- *Boğaziçi University - Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (BU-KOERI)*
- *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών (ΕΜΠ)*

Εφαρμογή μέτρων πρόληψης και προστασίας βάσει της  
αποτίμησης του σεισμικού κινδύνου του μνημείου

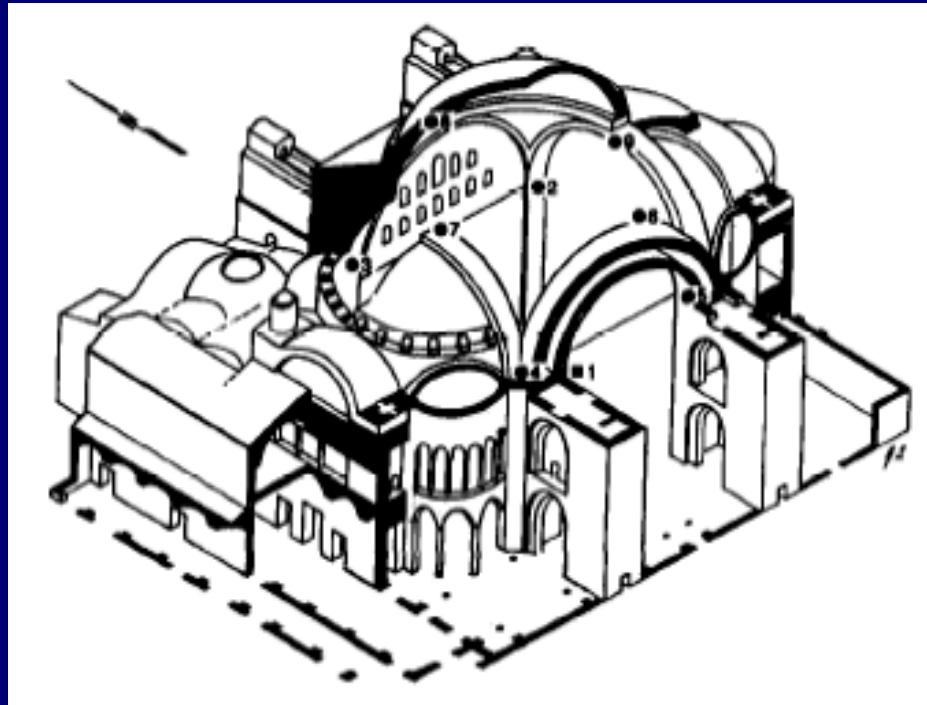
Βασικός Σκοπός:  
Έρευνα, Ανταλλαγή Εμπειρίας και Τεχνογνωσίας

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

- Τοποθέτηση αισθητήρων σεισμικής δραστηριότητας στην Αγία Σοφία για την *αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης* του μνημείου

Bogazici University: Prof. M. Erdik

Kandyli Observatory: Prof. M. Ishikara (BU-KOERI)



# ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Dept. Civil Engineering & Operations Research, Princeton University  
Prof. A. Cakmak

- *Διεπιστημονική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς και της σεισμικής απόκρισης του μνημείου της Αγιά Σοφιάς. Εφαρμόστηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τα δεδομένα των μελετών σχετικά με τα υλικά και των γεωτεχνικών μελετών για το χαρακτηρισμό της αντοχής, της ακαμψίας και της θεμελίωσης και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μνημείου σε σεισμική καταπόνηση έως 7R.*

Η συμπεριφορά του μνημείου στα  
δυναμικά και στατικά φορτία είναι  
συνάρτηση των φυσικοχημικών και  
μηχανικών χαρακτηριστικών των  
δομικών του υλικών (πλίνθοι και  
κονιάματα)

# ΣΥΜΒΑΤΑ & ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Καθ. Α. Μοροπούλου

Ερευνητική Ομάδα:

Δρ. Α. Μπακόλας,

Δρ. Κ. Λαμπρόπουλος,

Δρ. Κ. Μπισμπίκου,

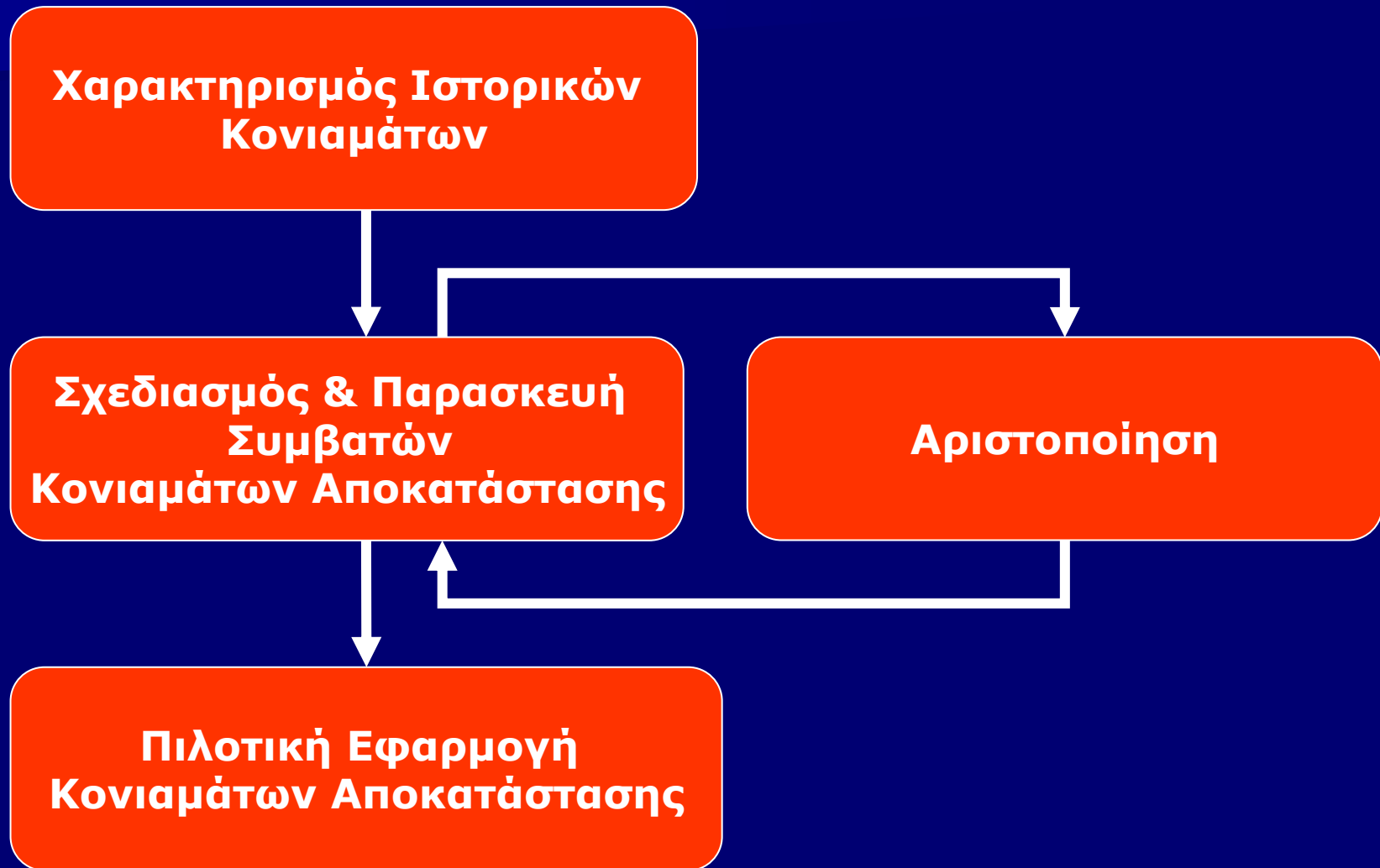
Δρ. Π. Μούνδουλας,

Δρ. Ε. Αγγελικοπούλου

Υ.Δ. Σ. Αναγνωστοπούλου



# ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΜΒΑΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ



# **ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ**

## **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

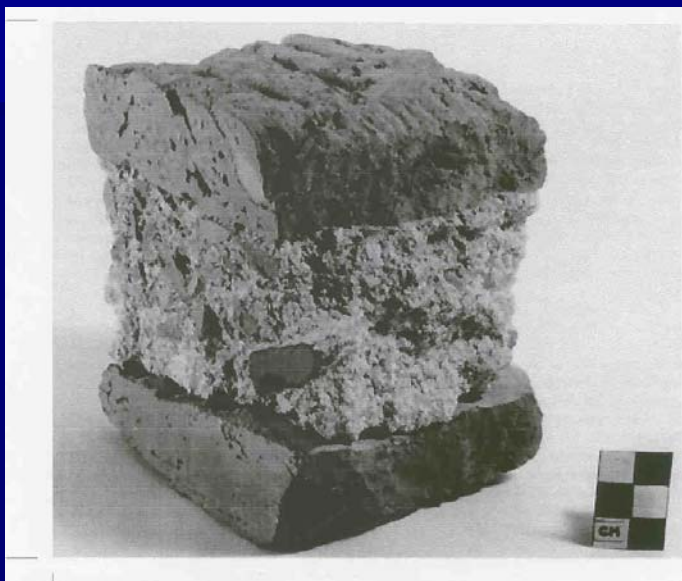
Η μελέτη δειγμάτων ιστορικών κονιαμάτων από μνημεία διαφόρων ιστορικών περιόδων και διαφόρων περιοχών της λεκάνης της Μεσογείου δίνει:

Τα όρια αποδοχής για τα κονιάματα αποκατάστασης με:

- *έλεγχο των χαρακτηριστικών της μικροδομής (Ποροσιμετρία υδραργύρου),*
- *έλεγχο υδραυλικότητας και ποιοτικό προσδιορισμό (Θερμικές Μέθοδοι Ανάλυσης)*
- *κοκκοδιαβάθμιση των ιστορικών κονιαμάτων*
- *και προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών*

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## Χαρακτηριστικά ιστορικού κονιάματος της Αγιά Σοφιάς



- Υδραυλική φύση της κονιάς
- Τα αδρανή είναι μίγμα κεραμικών θραυσμάτων μεγάλης διαμέτρου (<15mm) & άμμου
- Τα κονιάματα αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν ως πρώιμα σκυροδέματα

Υλικό	$E_d$ (GPa)	$F_m, t$ (MPa)
Κονίαμα	0.66	0.7-1.2
Κεραμικό - Κονίαμα	1.83	-
Κεραμικό	3.1	-

Χαμηλό δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και υψηλή αντοχή σε κάμψη

Με αυτό τον τρόπο τα υλικά συνεισέφεραν στην σεισμική απόκριση του μνημείου

## ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ

Συνδετική ύλη (κονία):

υδράσβεστος

Αδρανή:

συμβατικά ή κεραμικά

Αναλογία κονιάς / αδρανών:

1:2-1:4



Κονίαμα Θραυσμένου Κεραμικού  
από την Αγία Σοφία



Μικροσκοπία Οπτικών Ινών

# ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ

Όρια αποδοχής για τη μικροδομή

Ολικός ειδικός όγκος : 170-290 (mm<sup>3</sup>/g)

Φαινόμενη πυκνότητα: 1.5 - 1.9 (g/cm<sup>3</sup>)

Μέση ακτίνα πόρων: 0.1 - 0.8 (μm)

Ειδική Επιφάνεια: 3.5 - 15 (m<sup>2</sup>/g)

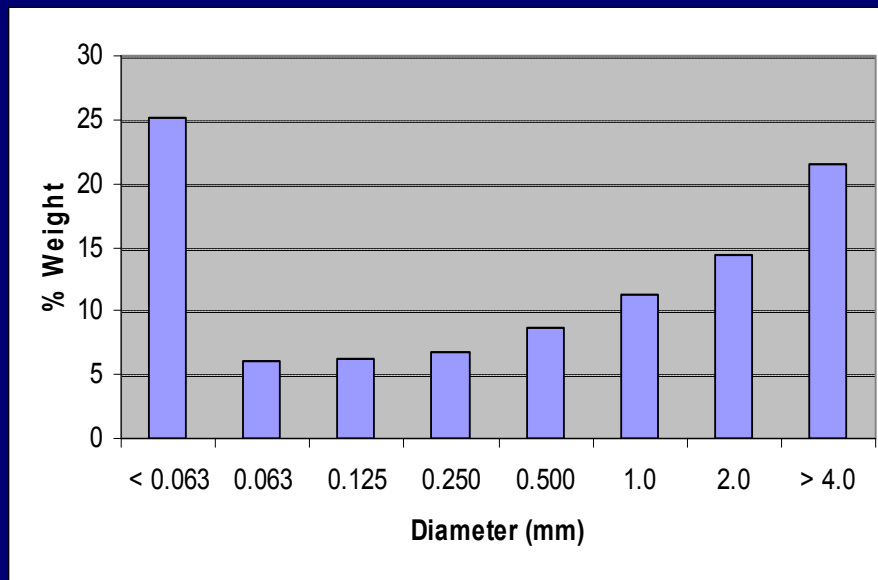
Ολικό Πορώδες: 32 - 43 %

Μηχανικές αντοχές

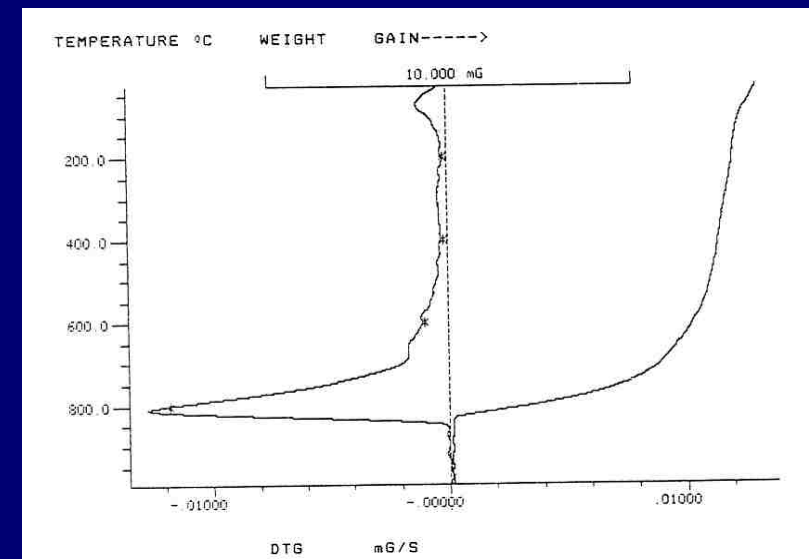
Αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 0.5 - 1.2 MPa

*Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Bakolas, A., Labropoulos, K., Bisbikou, K. 1995*

*Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Biscontin, G., Bakolas, A., Zendri, E., 2002*



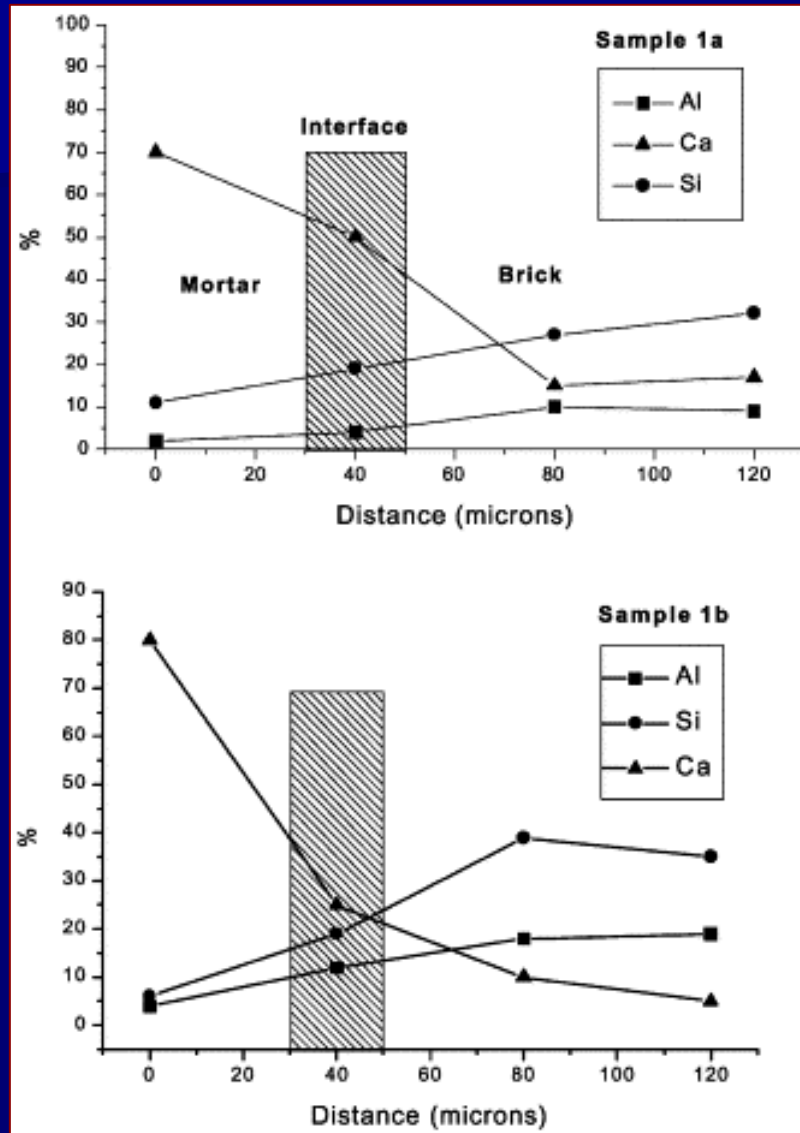
Κοκκοδιαβάθμιση κονιάματος  
θραυσμένου κεραμικού



Διαφορική Θερμική και  
Θερμοβαρυσμετρική ανάλυση

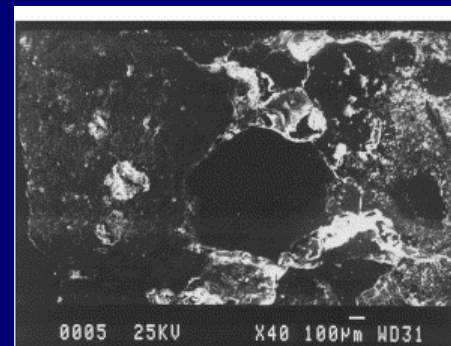


# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

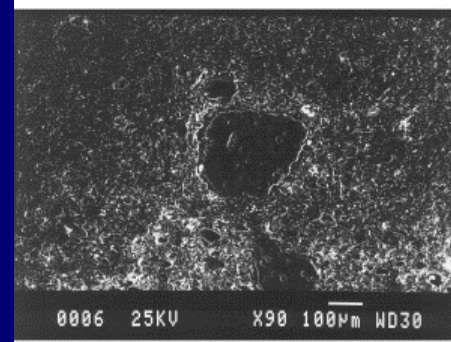


## SEM-EDX:

Συγκεντρώσεις Ca, Si, Al στην διεπιφάνεια μήτρας/κεραμικού (α) δείγμα από θόλο, (β) δείγμα από δυτικό τόξο



(a): x40



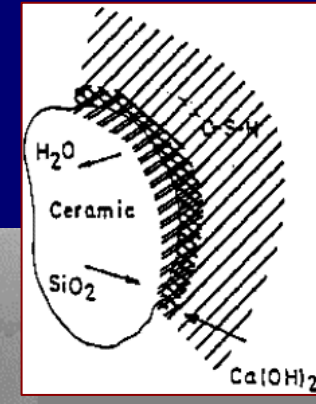
(b): x90

- Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., 1995
- Moropoulou, A., Cakmak, A., Biscontin, G., 1997
- Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zendri, E., 1998

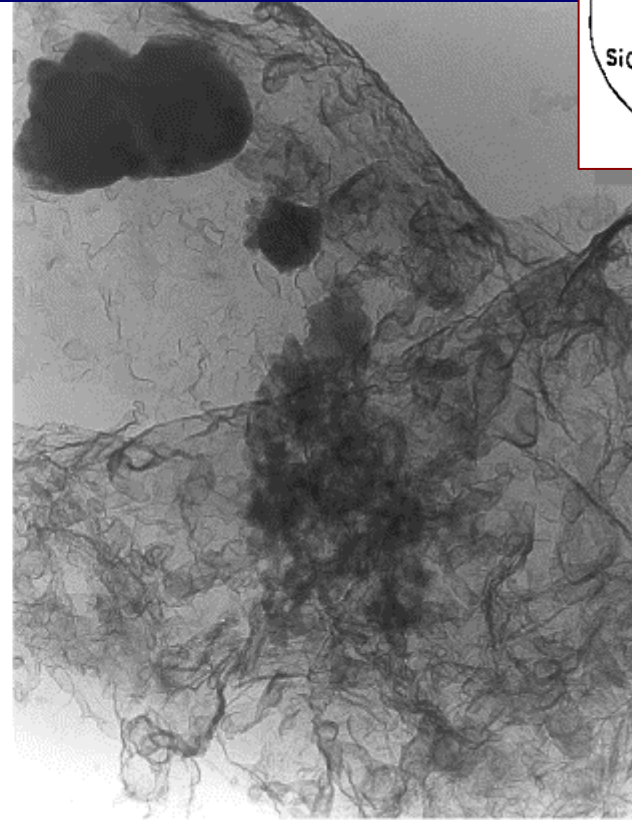
# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## TEM:

*Μικροκρυσταλλική διεπιφάνεια C-S-H του ασβεστίτη με  
τα θραύσματα κεραμικού*



(a)



(b)

*Moropoulou, A., Cakmak, A., Labropoulos, K.C., Van Grieken, R., Torfs, K., 2004*

# ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

*Μούνδουλας Π. «Συμβατά κονιάματα αποκατάστασης» διδ. Διατριβή, ΕΜΠ  
2004, Επιβλ. Α. Μοροπούλου*

*Μοροπούλου, Α., Βακόλας, Α., Αναγνωστοπούλου, Σ., 2003*

# **ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

Από την μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων επιλέγεται να εξεταστούν οι παρακάτω κατηγορίες κονιαμάτων αποκατάστασης:

## **I. ΑΕΡΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ**

ΚΟΝΙΑ: ΠΟΛΤΟΣ ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΥ

## **II. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ**

ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ

ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΗ – ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Ειδικά για τα κονιάματα της τελευταίας κατηγορίας, μιας και δεν αποτελούν υποκατηγορία των ιστορικών κονιαμάτων, μελετώνται για λόγους σύγκρισης με τα ιστορικά (ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ;) και λόγω της συχνής χρήσης τσιμέντου στις επεμβάσεις συντήρησης με κονιάματα αποκατάστασης σε διάφορες αναλογίες

## 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, υδραυλικός ασβέστης, τσιμέντο.

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

Αδρανή  
πυριτική άμμος και θραυσμένο κεραμίδι

## **ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΔΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ:**

### **Υδράσβεστος:**

- α) Χαμηλή θερμοκρασία όπτησης (~900 °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%) EN196/1
- δ) Ποσότητα ελεύθερου νερού <50%

### **Φυσική Υδραυλική ασβέστος:**

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

# ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΠΟΥ ΕΙΣΦΕΡΟΥΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

## Κεραμάλευρο (Τεχνητή Ποζολάνη):

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

## Μηλαϊκή γη:

1. Μεγάλη ειδική επιφάνεια
2. Υψηλή λεπτότητα <math><63 \mu\text{m}</math>
3. Ποζολανικές ιδιότητες (τιμές σε αντοχή >5 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

## Θραυσμένο κεραμικό:

1. Απουσία ξένων προσμίξεων (βιολογικά προϊόντα, άλατα <1%), καθώς και οι προϋποθέσεις που ισχύουν για το κεραμάλευρο



Πυριτική άμμος



Θραυσμένο κεραμικό

## Κονιάματα με Ποζολανικά Πρόσθετα



- α) Υδράσβεστος (20%) - Κεραμάλευρο (10%) - Άμμος (70%)*
- β) Υδράσβεστος (20%) - Κεραμάλευρο (10%) Άμμος (31,5%) – Κεραμίδι (38,5%)*
- γ) Υδράσβεστος (20%) – Μηλαϊκή Γη (10%) - Άμμος (70%)*
- δ) Υδράσβεστος (20%) – Μηλαϊκή Γη (10%) - Άμμος (31,5%) - Κεραμίδι (38,5%)*

## Κονιάματα Σύγκρισης με Ασβέστη - Τσιμέντο



- α) Υδράσβεστος (25%) – Τσιμέντο ΙΙ35 (5%)- Άμμος (70%)*
- β) Υδράσβεστος (25%) – Τσιμέντο ΙΙ35 (5%) – Άμμος (31%) – Κεραμίδι (38%)*
- γ) Τσιμέντο ΙΙ35 (25%) – Άμμος (75%)*
- δ) Υδράσβεστος (15%) – Τσιμέντο ΙΙ35 (15%) – Άμμος (70%)*

# **ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΝΩΠΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΕΥΝΩΝ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΑ**

## **Κριτήρια Καταγραφής Χαρακτηριστικών των Νωπών Κονιαμάτων**

- 1. Ελάχιστη ποσότητα νερού*
- 2. Καλή εργασιμότητα*
- 3. Εύκολη εφαρμογή σε πιλοτική τοιχοποιία*

## **Αποτίμηση των τεχνικών χαρακτηριστικών τους Πρότυπο για την Αποτίμηση των Νωπών Κονιαμάτων DIN 18555 /1982**

**Η χρήση του προτύπου έχει συγκριτική αξία  
καθώς αυτό αφορά στο τσιμέντο.**

- Η χρήση του κρίνεται επιβεβλημένη έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι αναπαραγωγίσιμα
- Χρειάζεται να προκύψουν προδιαγραφές και πρότυπο για κονιάματα αποκατάστασης με παραδοσιακά υλικά

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΝΩΠΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

- *Όσο το δυνατόν περισσότερο συγκρατούμενο νερό τόσο το καλύτερο για την συμπεριφορά του κονιάματος στην τοιχοποιία.*
- *Τα κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό είναι ελαφρότερα από αυτά με άμμο*
- *Τα προτεινόμενα κονιάματα με παραδοσιακά υλικά έχουν χαμηλά ποσοστά σε περιεχόμενο αέρα*

*Ακολουθεί η εισαγωγή τους σε μήτρες 4X4X16cm, με συγκεκριμένη διαδικασία έτσι ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη και σωστή διαστρωμάτωση τους σε αυτές*

*Γίνεται συντήρησή τους αρχικά σε θερμοκρασία 25 °C και 100% υγρασία η οποία μειώνεται σταδιακά μετά από 2 ημέρες*

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΗΞΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S., "Optimization of compatible restoration mortars for the protection of Hagia Sophia", in Proc. 2nd Int. Cong. Studies in Ancient Structures, Istanbul Vol. 2, 2001, pp. 519-529

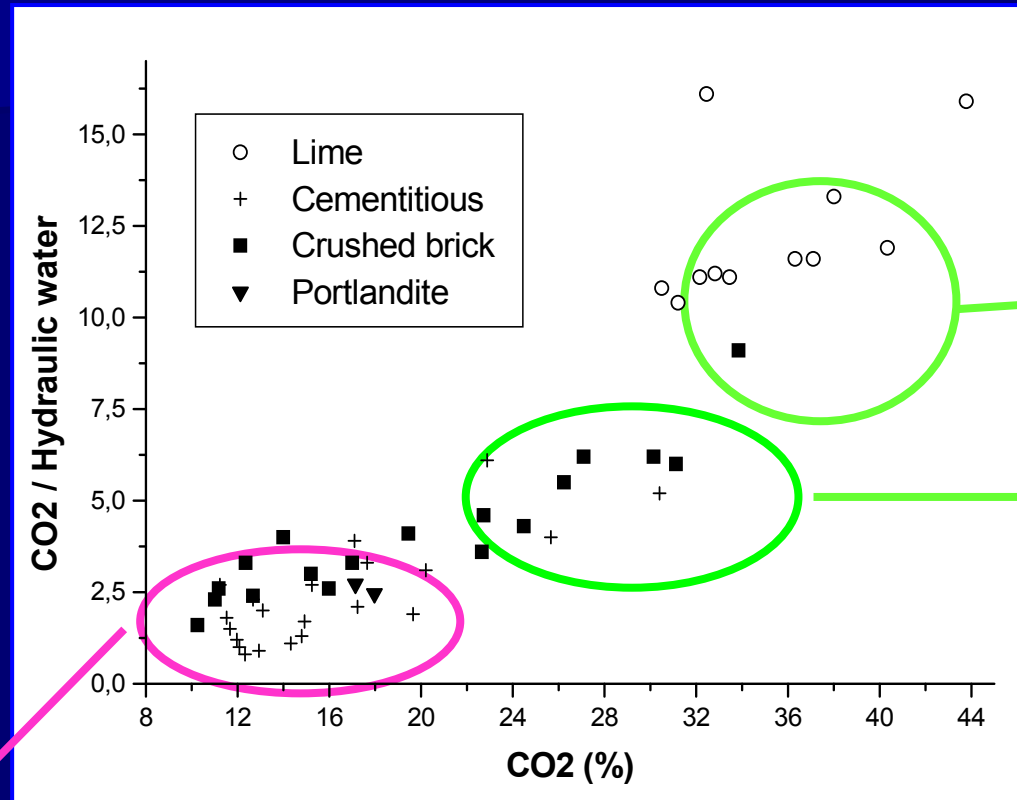
Μούνδουλας Π. «Συμβατά κονιάματα αποκατάστασης» διδ. Διατριβή, ΕΜΠ 2004, Επιβλ. Α. Μοροπούλου

## ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΗΞΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ - ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΠΟΔΟΧΗΣ

Η αποτίμηση των συνθέσεων των κονιαμάτων αποκατάστασης κατά την σκλήρυνσή τους γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους και σύμφωνα με τα όρια αποδοχής, που έχουν προκύψει από την μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων:

1. Διαφορική θερμική ανάλυση - Θερμοβαρυμετρία (DTA-TG), στο επίπεδο ενανθράκωσης / ανάπτυξης υδραυλικών φάσεων
2. Μηχανικές αντοχές, για την εκτίμηση της επιτελεστικότητας
3. Εξέταση μικροδομής με ποροσιμετρία υδράργυρου, για την αποτίμηση της συμβατότητας

## Διάγραμμα εξέλιξης της ενανθράκωσης σε σχέση με την ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων



**Υδραυλικά  
Κονιάματα**

**Ασβεστικά  
Κονιάματα**

**Κονιάματα με  
ποζολανικά  
πρόσθετα**

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



# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

*Μετά από 9 Μήνες*

**Κονιάματα Υδραυλικής Ασβέστου**

Χημικά δεσμευμένο νερό μετά από μόλις 15 ημέρες σκλήρυνσης.  
Παρουσία υδραυλικών φάσεων

**Τυπικά Ασβεστοιτικά Κονιάματα**

Χαμηλότεροι ρυθμοί ενανθράκωσης η οποία συνεχίζεται και μετά τους 9 μήνες.

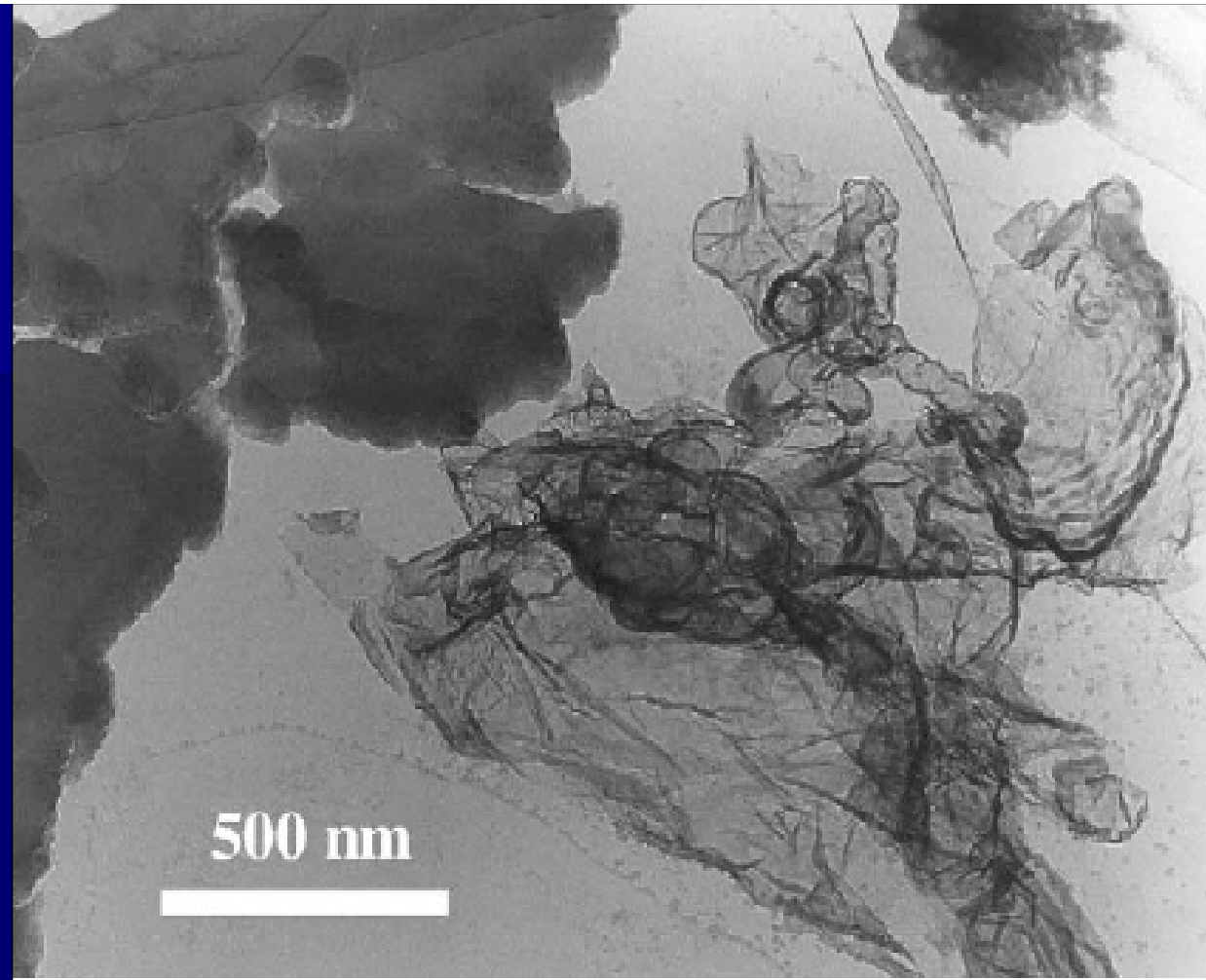
**Ποζολανικά Κονιάματα (κεραμάλευρο, Μηλαϊκή γη)**

Μέσοι ρυθμοί ενανθράκωσης. Σημαντική ποσότητα χημικά δεσμευμένου νερού. Τόσο το κεραμάλευρο όσο και η Μηλαϊκή γη βοηθούν στην ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων

## **Κονιάματα ασβέστη - τσιμέντου**

Χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο κονιάματα παρουσιάζουν συμπεριφορά παρόμοια με των ασβεστιτικών. Επέρχεται διαχωρισμός των φάσεων ασβέστη – τσιμέντου καθώς δεν υπάρχει συνάφεια μεταξύ τους

Υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο κονιάματα παρουσιάζουν πολύ υψηλές αντοχές (εκτός ορίων) και απολύτως ασύμβατη μικροδομή τόσο με τα δομικά υλικά όσο και με τα ιστορικά κονιάματα όπως θα φανεί στην συνέχεια



Μικρογραφία TEM πάστας με Cab-O-Sil™. Δημιουργία ένυδρης αργιλοπυριτικής ένωσης ασβεστίου (C-S-H) μετά από 4 ώρες. Θερμοκρασία αντίδρασης 800 °C.

Moropoulou, A., Cakmak, A., Labropoulos, K.C., Van Grieken, R., Torfs, K., "Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate (c-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars", *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) pp. 1-6.

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

- *Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas P., Aggelakopoulou, E., 2001*
- *Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S., 2001*
- *Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S., 2003*

**Κάμψη ( $f_{m,f}$ ), Θλίψη ( $f_{m,c}$ )  
και εμμέσως Εφελκυσμός ( $f_{m,t} = 2/3 \times f_{m,f}$ ):**

Εκτίμηση της ανάπτυξης των αντοχών που αποκτούν οι διάφορες συνθέσεις των κονιαμάτων κατά την σκλήρυνσή τους

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας σε σχέση με την θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων  
(Κριτήριο Πενέλλη, Παπαγιάννη)

Υπολογισμός του λόγου εφελκυστικής / θλιπτική αντοχή για την αποτίμηση της λειτουργίας τους στην τοιχοποιία. Αποδεκτή περιοχή για ιστορικά κονιάματα

$$f_{m,t}/f_{m,c} = 1/4 - 1/6$$

(Κριτήριο Θ. Τάσιου)

## ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

		Θλίψη (MPa)	Κάμψη (MPa)	Εφελκυσμός (MPa)	Λόγος
Ασβέστης Κεραμάλευρο Άμμος	6 μήνες	1,6	0,4	0,27	<b>1 / 5,9</b>
	9 μήνες	1,9	0,5	0,33	<b>1 / 5,8</b>
Ασβέστης Μηλαϊκή γη Άμμος	6 μήνες	0,9	0,4	0,27	1 / 3,3
	9 μήνες	1,5	0,4	0,27	<b>1 / 5,5</b>
Ασβέστης Κεραμάλευρο Άμμος Κεραμίδι	6 μήνες	2,0	0,4	0,27	1 / 7,4
	9 μήνες	2,5	0,6	0,4	<b>1 / 6,2</b>
Ασβέστης Μηλαϊκή γη Άμμος Κεραμίδι	6 μήνες	0,5	0,4	0,27	1 / 1,9
	9 μήνες	0,6	0,5	0,33	1 / 1,9

## ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

		<b>Θλίψη (MPa)</b>	<b>Κάμψη (MPa)</b>	<b>Εφελκυσμό ς (MPa)</b>	<b>Λόγος</b>
<b>Ασβέστης Τσιμέντο Άμμος</b>	1 μήνας	0,8	0,2	0,1	1 / 8
	3 μήνας	0,9	0,3	0,2	1 / 4,5
	6 μήνες	1,6	0,5	0,3	1 / 5,3
	9 μήνες	1,7	0,3	0,2	1 / 8,5
<b>Ασβέστης Τσιμέντο Άμμος Κεραμίδι</b>	1 μήνας	0,7	0,2	0,1	1 / 7
	3 μήνας	0,4	0,2	0,1	1 / 4
	6 μήνες	0,5	0,3	0,2	1 / 2,5
	9 μήνες	0,7	0,4	0,3	1 / 2,3

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

## Κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα

*Ικανή ανάπτυξη μηχανικών αντοχών, ιδιαίτερα στις συνθέσεις με κεραμάλευρο σαν συνδετικό υλικό (χρειάζεται εξέταση της λεπτότητας του πρόσθετου στις συνθέσεις με Μηλαϊκή γη)*

*Ο λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή εντός ορίων*

## Κονιάματα με συνδετικό υλικό ασβέστη-τσιμέντο

*Η ανάπτυξη μηχανικών αντοχών δεν είναι ικανοποιητική  
Διαχωρισμός φάσεων λόγω μικρής αναλογίας του τσιμέντου σε  
σχέση με τον ασβέστη*



## ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

### ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

	Συνολικός Όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Συνολικό Πορώδες (%)	Ειδική Επιφάνεια (m <sup>2</sup> /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
<b>ΟΡΙΑ ΑΠΟΔΟΧΗΣ</b>	<b>160-265</b>	<b>1.60-1.90</b>	<b>30-42</b>	<b>3.0-14.0</b>	<b>0.10-1.50</b>

*Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S., 2001a*

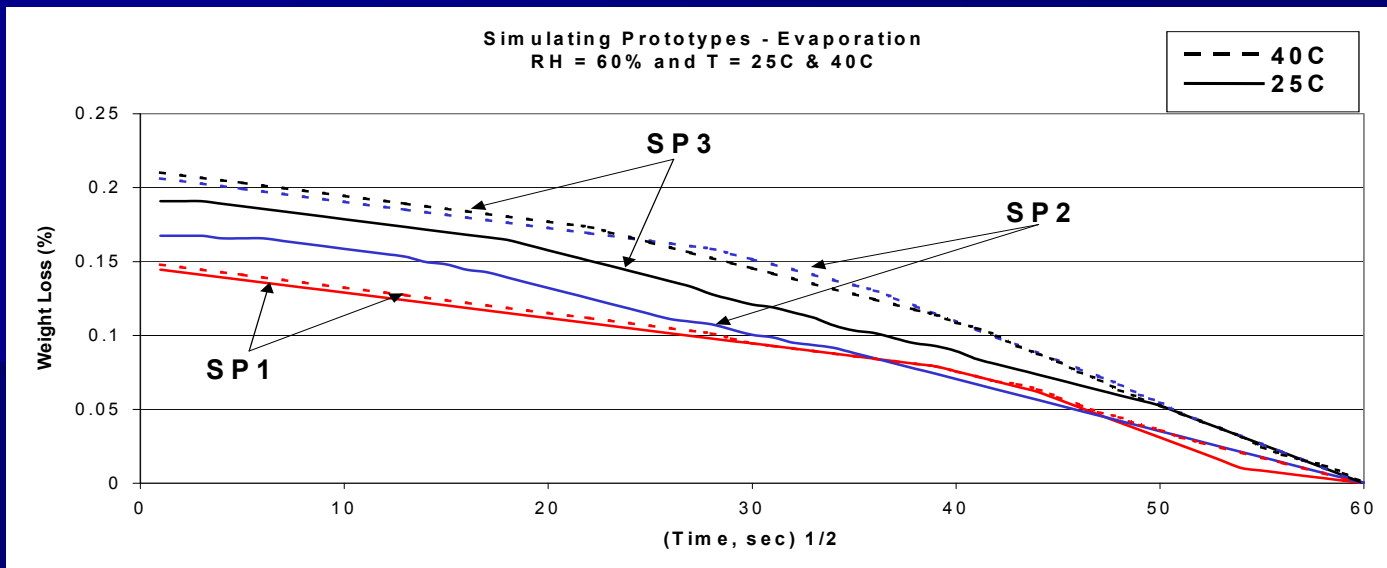
*Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S., 2001b*

## ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Για την αποτίμηση της συμβατότητας της μικροδομής είναι απαραίτητο να εξεταστούν τα κονιάματα αποκατάστασης σε σχέση και με τα δομικά στοιχεία μιας ιστορικής κατασκευής αλλά και ως προς την κατανομή του πορώδους σε διάφορες ακτίνες πόρων και όχι μόνο ως προς τα απόλυτα νούμερα των χαρακτηριστικών της μικροδομής (πορώδες, μέση ακτίνα πόρων)

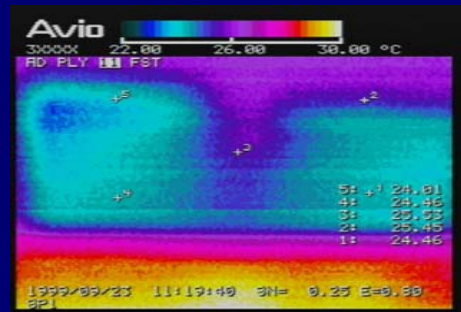
Παράλληλα, η ταυτόχρονη παρακολούθηση με Θερμογραφία Υπερύθρου κονιαμάτων αποκατάστασης διαφόρων κατηγοριών και δομικών στοιχείων, καθώς και πρότυπων στοιχείων τοιχοποιίας (λίθος – κονίαμα – λίθος) σε συνθήκες υδατοαπορρόφησης και εξάτμισης σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της μικροδομής

θα επιβεβαιώσουν την συμβατότητα, ή μη, των κονιαμάτων αυτών με παραδοσιακά δομικά στοιχεία



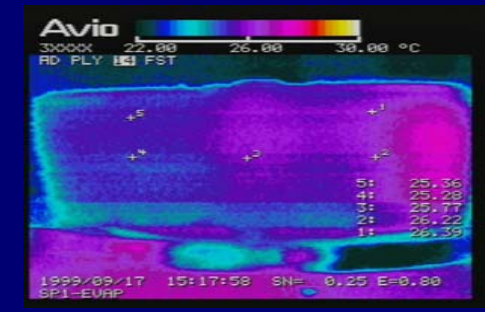
### ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ

*Οι πρότυπες Τοιχοποιίες με ασβεστιτικό και υδραυλικό κονίαμα παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά κατά την εξάτμιση και ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας*



### ΤΣΙΜΕΝΤΙΤΙΚΟ

*Οι πρότυπες τοιχοποιίες με τσιμεντιτικό κονίαμα παρουσίασαν διαφοροποιήσεις στην συσσώρευση της υγρασίας και την ταχύτητα εξάτμισης κατά περιοχές*

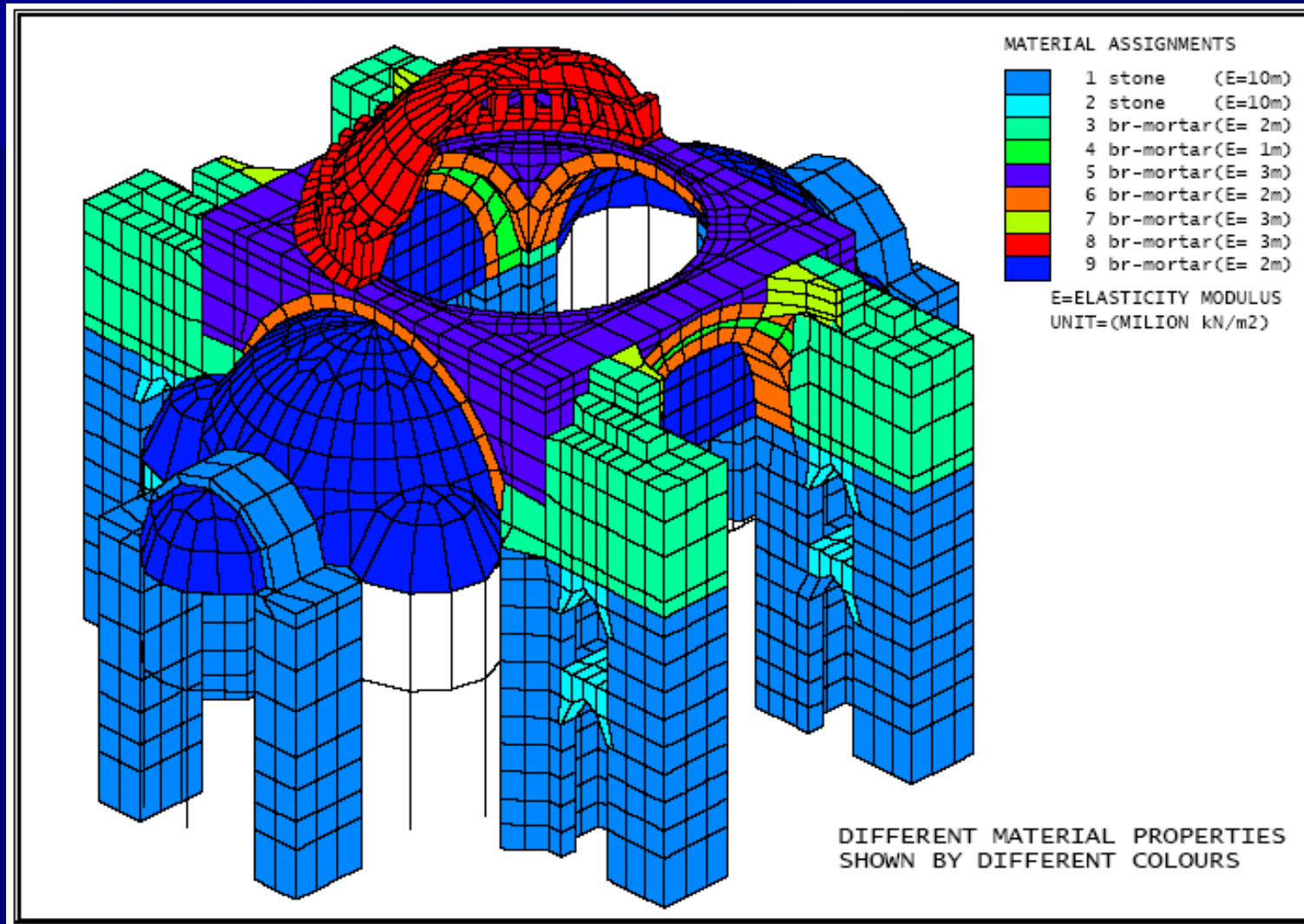


### ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ

## **ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ**

- Προκύπτει άμεση σχέση μεταξύ του συντελεστή υδατοαπορρόφησης και της ειδικής επιφάνειας
- Φαίνεται ότι οι πόροι κάτω από 0.1 μm δεν συμμετέχουν στο φαινόμενο της ρόφησης όπως προκύπτει από την μέτρηση του συνολικά ροφούμενου νερού
- Συμβατότητα του εξεταζόμενου λίθου αναφοράς με τα ασβεστιτικά, κονιάματα υδραυλικής ασβέστου καθώς και τα κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα
- Ασυμβατότητα με τα τσιμεντιτικά κονιάματα. Όσο μεγαλύτερη η συμμετοχή του τσιμέντου τόσο μεγαλύτερη η ασυμβατότητα
- Κονιάματα με χαμηλή συμμετοχή του τσιμέντου εμφανίζουν διττή συμπεριφορά (διαχωρισμός φάσεων καταλήγει σε κατανομή πόρων δύο ταχυτήτων)

# ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



*Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης  
σχεδιασμού συμβατών κονιαμάτων  
αποκατάστασης και της προσομοίωσης σεισμικής  
συμπεριφοράς με το βελτιωμένο μοντέλο  
πεπερασμένων στοιχείων έγινε εκτεταμένη  
αποκατάσταση του μνημείου.*

*Οι προτεινόμενες συνθέσεις έδειξαν  
ικανοποιητική συμπεριφορά στον μεγάλο σεισμό  
του 1999*

# ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΜΒΑΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ

Cakmak, A.S., Freely, J., Erdik, M., Moropoulou, A., Labropoulos, K., 2003

Moropoulou, A., Kouï, M., Avdelidis, N.P., Delegou, E.T., Aggelakopoulou, E., Karoglou, M., Karmis, P., Aggelopoulos, A., Griniezakis, S., Karagianni, E.A., Uzunoglou, N.K., "Investigation for the compatibility of conservation interventions on Hagia Sophia mosaics using NDT techniques", *PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology*, **59** (2000) pp. 103-120.

Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Aggelakopoulou, E., Griniezakis, S., Kouï, M., Aggelopoulos, A., Karmis, P., Uzunoglou, N.K., "Examination of plastered mosaic surfaces using NDT techniques", *INSIGHT J. of the British Institute of non-destructive testing*, **43**, No 4 (2001) pp. 241-243.



**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΕΨΗ  
ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΤΟΥ ΕΜΠ ΣΤΗΝ  
ΚΩΝ/ΠΟΛΗ [Οκτώβριος 2000]**

**Πιλοτική Εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης  
σε συγκεκριμένη τοιχοποιία της Αγιά Σοφιάς**

*→ Αποτίμηση της συμπεριφοράς κονιαμάτων αποκατάστασης*



*Τοιχοποιία πριν την Πιλοτική Εφαρμογή*



*Η τοιχοποιία μετά την Πιλοτική  
Εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης*

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΕΨΗ  
ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΤΟΥ ΕΜΠ ΣΤΗΝ  
ΚΩΝ/ΠΟΛΗ [Οκτώβριος 2000]**



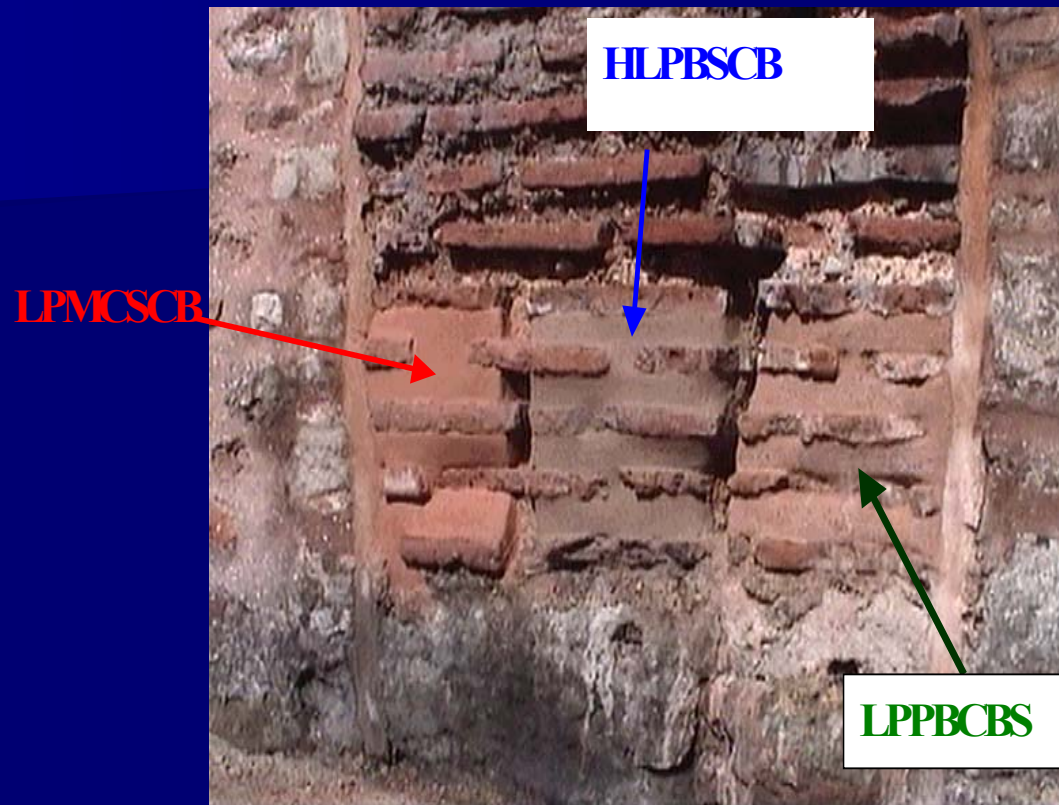
*Μικροσκοπία Οπτικών Ινών για την  
εκτίμηση της κατάστασης της τοιχοποιίας  
πριν και μετά την πιλοτική εφαρμογή*

*Θερμογραφία Υπερύθρου στην τοιχοποιία  
στην οποία πραγματοποιήθηκε η πιλοτική  
εφαρμογή*





# Τα κονιάματα μετά την εφαρμογή



- ❖ *Κονίαμα με Υδράσβεστο και Κεραμάλευρο ως ποζολανικό πρόσθετο και μίγμα αδρανών Θραυσμένον Κεραμικού και Άμμου (LPPBSCB)*
- ❖ *Κονίαμα με φυσική Υδραυλική Άσβεστο & κεραμάλευρο ως ποζολανικό πρόσθετο και αδρανή μίγμα θραυσμένου κεραμικού & άμμου (HLPBSCB)*
- ❖ *Κονίαμα με Υδράσβεστο και Μηλαϊκή γη ως ποζολανικό πρόσθετο και αδρανή μίγμα θραυσμένου κεραμικού και άμμου (LPMCSCB)*

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

- ❖ *Ικανοποιητική εργασιμότητα των κονιαμάτων αποκατάστασης που εφαρμόστηκαν*
- ❖ *Ικανοποιητικοί ρυθμοί πήξης*
- ❖ *Δεν παρουσιάστηκαν μικρορωγμές κατά την πήξη*
- ❖ *Επί τόπου αποτίμηση με Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους (Θερμογραφία Υπερύθρου, Υπέρηχους και Μικροσκοπία Οπτικών Ινών) επιβεβαιώνουν την συμβατότητα, τις ικανοποιητικές αντοχές και την συμβατή μικροδομή των κονιαμάτων που εφαρμόστηκαν με τα ιστορικά υλικά*

# ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

- **Τοποθέτηση αισθητήρων σεισμικής δραστηριότητας** στην Αγία Σοφία για την αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου (BU-KOERI)
- **Διεπιστημονική μελέτη** της δυναμικής συμπεριφοράς και της σεισμικής απόκρισης του μνημείου της Αγία Σοφιάς. Εφαρμόστηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τα δεδομένα των μελετών σχετικά με τα υλικά και των γεωτεχνικών μελετών για το χαρακτηρισμό της αντοχής, της ακαμψίας και της θεμελίωσης και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μνημείου σε σεισμική καταπόνηση έως 7R.
- Παράλληλες **μελέτες της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών και των υλικών σημαντικών βυζαντινών μνημείων της Κωνσταντινούπολης**, όπως οι Ναοί των Αγίων Σεργίου και Βάκχου και της Αγίας Ειρήνης, ενώ **συγκριτική μελέτη των υλικών με τη Μεγάλη Βασιλική της Ρόδου απέδειξε τη κοινή τεχνολογία κατασκευής και την προέλευση από εκεί των πρώτων υλών**, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανακατασκευή του Τρούλου της Αγία Σοφιάς το 557 μ.Χ
- Μελέτη για τον **χαρακτηρισμό και τη διάγνωση της φθοράς των ιστορικών υλικών της Αγία Σοφιάς.**
- .

# ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Τα αυθεντικά κονιάματα, που αποσαθρώθηκαν από τις συνεχείς καταπονήσεις, τη φθορά του χρόνου και τη διάβρωση λόγω της θαλασσινής και διαβρωμένης ατμόσφαιρας, έπρεπε να συμπληρωθούν ή και να αντικατασταθούν. Η διεπιστημονική ομάδα ως προς το θέμα αυτό **συνέστησε την αποφυγή της χρήσης κονιαμάτων από τσιμέντο ή μίγματα πολυμερών** λόγω αφενός του υψηλού επιπέδου διαλυτών αλάτων, αφετέρου της ασυμβατότητας τους με τα αυθεντικά δομικά υλικά που απεδείχθη ότι αυξάνουν την τρωτότητα του μνημείου σε σεισμική καταπόνηση.
- Η εξωτερική **αποκάλυψη της αυθεντικής τοιχοποιίας** του μνημείου άρχισε το Μάρτιο του 1994 με κοινή εκτίμηση της Διεπιστημονικής Ομάδας και πρόταση προς την Εφορεία Έργων της Αγιά Σοφιάς, ως αναγκαιότητα για την επέμβαση αποκατάστασης και συμπλήρωσης των συνδετικών κονιαμάτων και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, που βαίνει προς ολόκληρωση.
- **Παρασκευή συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης** που να προσομοιώνουν τα ιστορικά κονιάματα της Αγιά Σοφιάς, που απεδείχθησαν εξόχως ανθεκτικά στις σεισμικές καταπονήσεις.
- **Προσομοίωση της συμπεριφοράς του μνημείου με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων σε σεισμική καταπόνηση 7R**, με βάση αυτά τα κονιάματα αποκατάστασης, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

# ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

- **Επί τόπου εφαρμογές μη καταστρεπτικών μεθόδων εξέτασης** σε επιλεγμένες επιχρισμένες επιφάνειες στο εσωτερικό του μνημείου της Αγιά-Σοφιάς στην Κωνσταντινούπολη, και ειδικότερα στον Νάρθηκα, στις Γαλλαρίες-Γυναικωνίτη και στον Τρούλο, για την **αποτίμηση της διαστρωμάτωσης και της φθοράς στις επιφάνειες** (ψηφιδωτά: επιχρισμένα, συντηρημένα, ασυντήρητα-φθαρμένα). Αποδείχθηκε ότι υπάρχουν σε μεγάλη έκταση επιχρισμένα ψηφιδωτά, ενώ η συνολική σάρωση με μη καταστρεπτικές μεθόδους είναι απαραίτητη για την συντήρηση και των ήδη αποκαλυμμένων ψηφιδωτών (ανάπλαση κανάβου, συντήρηση στο αρχικό σχέδιο).
- **Πιλοτική εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης** σε συγκεκριμένη επιφάνεια τοιχοποιίας που υπέδειξαν οι αρμόδιες αρχές της Αγιά –Σοφιάς, για τη συνεχή μέτρηση και παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους σε σεισμική καταπόνηση. Αυτά τα κονιάματα αποκατάστασης παρασκευάστηκαν στο πλαίσιο του κοινού πρωτοκόλλου συνεργασίας με το Πανεπιστήμιο του Bogazici, το Πανεπιστήμιο του Princeton, από το Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του ΕΜΠ, με κριτήριο την συμβατότητά τους με τα δομικά υλικά της τοιχοποιίας και την ισότροπη και ικανοποιητική απόκρισή τους σε σεισμικές καταπονήσεις.





The ancient basilica of Emperor Justinian I still stands in Turkey's capital.

## Shaken, not stirred

Hagia Sophia has stood four-square in Istanbul for more than 1,500 years. **Virginia Hughes** finds out how this venerable building has resisted the area's numerous earthquakes.

Istanbul is a city in motion. In just the past four decades, its population has exploded from 2 million to 10 million people, with migrants flowing in from the countryside for work. Most of them now live in multi-storey concrete structures, thrown up in haste and without concern for earthquake resistance.

That's a problem, because Istanbul is also literally in motion — perched as it is near the North Anatolian fault (see map). In 1999, a magnitude-7.4 earthquake killed some 18,000 people and destroyed more than 15,000 buildings in and around Izmit, a town lying 100 kilometres to the east. If such an earthquake were to strike the capital — and that's worryingly likely — twice as many might die, suggests a recent analysis led by Mustafa Erdik, an earthquake engineer at Boğaziçi University in Istanbul. And some 40,000 buildings could be destroyed.

Yet one of Istanbul's most famous buildings has already survived 15 centuries of earthquakes. It is a 55-metre-high, brick-and-mortar domed construction — Hagia Sophia. For decades, historians have debated how the building has withstood such seismic stress, and whether its architects planned it that way. Now, computer models and chemical analyses are providing clues to fuel these long-running debates. Were the Byzantine builders inventing new technologies, or just lucky? And when

Istanbul is hit by the next big one, will Hagia Sophia collapse — or be the only thing left standing in the rubble?

### Being flexible

Hagia Sophia has endured in a land notorious for geophysical, political and religious instability. When the Muslim Ottomans invaded in 1453, they transformed it from a Christian basilica into a mosque; in 1935, the Turkish government secularized it by turning it into a museum.

The original building got its start in AD 532, at the command of Emperor Justinian I. Meaning 'holy wisdom' in Greek, Hagia Sophia was the first structure to combine the rectangular plan of traditional basilicas with the central dome of imperial buildings such as the Pantheon in Rome. Justinian spared no expense; the church cost 145,000 kg of gold (worth US\$3 billion today) and is one of the most expensive structures ever built.

And who better to build what was then the greatest church in the world than the two greatest experts of the time: Anthemius of Tralles and Isidorus of Miletus. "Anthemius was the best military engineer that Justinian had," says Ahmet Çakmak, a professor emeritus in earthquake engineering at Princeton University. "Isidorus was the director of the biggest scientific

academy in the world," he adds. "It's like you hired Oppenheimer to build your house."

Çakmak, who spent his childhood visiting Hagia Sophia, has always been fascinated by earthquakes. At 23, he left Turkey to teach at Princeton in New Jersey, and by the time Istanbul hit its population boom a decade later, he was chair of the engineering department. But it wasn't until the mid-1980s that the theoretically minded Çakmak turned his attention to practical studies of the monument from his childhood.

At the time, his engineering colleague Robert Mark was creating computerized models to show how buildings bear their loads. Mark's work explained how medieval builders' observations of mortar cracks probably led to the invention of flying buttresses, for example. Çakmak encouraged him to make the same kind of studies of Hagia Sophia. "The technology was just beginning," Mark recalls.

Together, they made computer models that could simulate how the church moved under various conditions, such as earthquakes. They have been arguing over the results ever since.

Today's Hagia Sophia is a hodgepodge of domes, buttresses, supporting walls and minarets, added at various times in the name of religion or restoration. But, as the computer models show, the church's structural strength

comes from its original square core. "Virtually all domed structures before its time were essentially domes on piers," says architectural historian abun Taylor of Harvard University in Cambridge, Massachusetts. In contrast, Hagia Sophia is built on the crowns of piers, which support the dome and then tend to piers that form the corners of a square. "That was new," says Taylor.

Also new were Hagia Sophia's pendentives — the concave triangular sections of brick and mortar that made smooth structural transitions between the curved tops of the four arches and the bottom of the dome. But how did Anthemius and Isidorus plan their structure, before the discovery of calculus or Newton's force laws? Although engineers and historians disagree about the extent of their knowledge and innovation, most agree that the architects must have relied heavily on simple geometric ratios, and on the example of existing buildings such as the Pantheon.

### Cracking idea

Until Mark modelled the Pantheon's dome in the late 1980s, most historians believed the windows in Hagia Sophia's dome were added solely for visual effect. There are 40 of these windows, one between each of the ribs of brick and mortar that support the 31-metre-diameter dome. Mark's research suggested that the windows were added to avoid cracking. They knew from looking at the Pantheon that that region would want to crack anyway along the axis of the windows," he explains, "so they used windows to, in a way, put the cracks in themselves."

That would have helped in seismically active Constantinople, as the city was then known. Hagia Sophia has stood, sustaining only minimal damage, through more than a dozen major earthquakes. Part of this success can be attributed to its arches and pendentives, which help evenly distribute the dome's weight equally among the four underlying pillars. But



the very bricks and mortar that make up the church have also helped.

Modern earthquake-resistant buildings are constructed to be light and flexible, in order to withstand shaking. Hagia Sophia was both, far ahead of its time. Its bricks are much lighter and more porous than the bricks used elsewhere in the empire in that period. Çakmak's studies have shown that the bricks must have been baked at relatively low temperatures, less than about 750 °C, to get the right reaction between sand and lime. "If it becomes higher than that," he says, "the sand becomes glassy and dense."

The original builders also used a special kind of mortar. Working with his colleagues at the National Technical University of Athens, Greece, Çakmak has found that the mortar contains a calcium-silicon compound similar to that used in today's Portland cement. The high tensile strength of this mixture has allowed the church to absorb the shaking from large earthquakes, he says. In 2002, the team reported that, amazingly, after 1,500 years the calcium and silicon in the mortar could still react. "The mortar cures itself," he explains. "After each shaking, there are micro-cracks, which are healed over time." (Mark, for his part, argues that the mortar's consistency may vary throughout the building, and thus cannot explain everything.)

The ratio of brick to mortar used in the build-

ing may also contribute to its strength. To build faster, the masons used extremely thick mortar joints, often thicker than the bricks themselves. The thick joints make the material "more like reinforced concrete," says Çakmak — although the technique is only possible with such a strong mortar.

Did the builders include such earthquake-resistant features intentionally? Before Hagia Sophia, says Çakmak, architects simply created very heavy buildings if they wanted them to survive earthquakes. But Anthemius was interested in the topic and even, reportedly, built his own earthquake-simulation machine. "He realized that the forces in a dynamic system are proportional to mass," argues Çakmak. "So his concept of using lighter brick and flexible mortar instead of stone makes good sense."

But Mark disagrees with his friend, coming down on the side of most architectural historians. "Ahmet thinks that they had knowledge that I don't think they had," he says.

### Old reliable

Such queries aside, many wonder how Hagia Sophia will fare in the next great earthquake — the region just south of Istanbul is expected to experience two tremors of equal or greater magnitude to the Izmit earthquake in the next few decades. In 1991, a team of Turkish and US researchers fitted Hagia Sophia with several vibration sensors. From data gathered during tiny earthquakes, Çakmak created three-dimensional computer simulations that could predict

how the building might move during a large earthquake. The model shows that when hit by a magnitude-7.5 tremor, the walls of Hagia Sophia will tremble and sway dramatically back and forth. The tops of its arches will feel the most stress. But the dome will remain unscathed, and the church will stand.

And if the earthquake is greater than magnitude 7.5? "If it's greater than that, there's very little we can do," Çakmak says. Indeed, if the worst earthquake predictions come true, Hagia Sophia — standing or not — will be the last thing anybody is worried about.

Virginia Hughes is a science writer in New York City.

**"It's like you hired Oppenheimer to build your house."**  
— Ahmet Çakmak



Recent innovation: triangular 'pendentives' join supporting arches to the building's enormous dome.

1. Parsons, T. et al. *Science* **289**, 661-665 (2000).
2. Erdik, M. & Durukal, E. *Nat. Hazards* (in press).
3. Bork, R., Mark, R. & Murray, S. *J. Soc. Arch. Hist.* **56**, 478-493 (1997).
4. Mark, R. *Am. Soc. Mech. April* 142-150 (1987).
5. Moropoulou, A., Çakmak, A. & Polikretis, K. *J. Am. Ceram. Soc.* **85**, 366-372 (2002).
6. Moropoulou, A. et al. in *Wessex Int. Trans. Built Environ.* **15** (eds. Brébiba, C. & Hernandez, S. & El-Sayed, M.) (WIT Press, 1995).
7. Moropoulou, A., Çakmak, A. S., Biscontin, G., Bakolas, A. & Zentilli, E. *Ceramic Int.* **16**, 543-552 (2000).
8. Hubert-Ferrari, A. et al. *Nature* **404**, 269-273 (2000).
9. Çakmak, A., Moropoulou, A. & Mullen, C. L. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* **14**, 125-133 (1995).