



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ELAICH - Educational linkage approach in cultural heritage**  
**Euromed Heritage 4. Programme funded by the European Union**

***EUROMED ELAICH DISSEMINATION EVENT, Athens, February 23 & 24, 2010***

**Πρόγραμμα Αναπτυξιακής Συνεργασίας μεταξύ Ελλάδας  
και Τουρκίας**

**Η Αγιά Σοφιά ως υπόδειγμα ολοκληρωμένης διεθνούς  
διεπιστημονικής συνεργασίας**

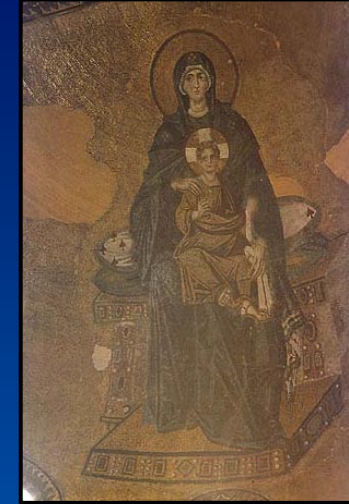
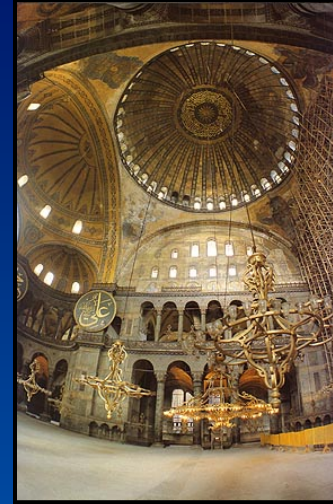
**Μελέτη ιστορικών κονιαμάτων και σχεδιασμός και  
παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης για την  
αντισεισμική προστασία της Αγιά Σοφιάς**

Π. Μούνδουλας Δρ. Χημ. Μηχ ΕΜΠ

Α. Μπακόλας Δρ. ΕΜΠ

Α. Μοροπούλου Καθ. ΕΜΠ

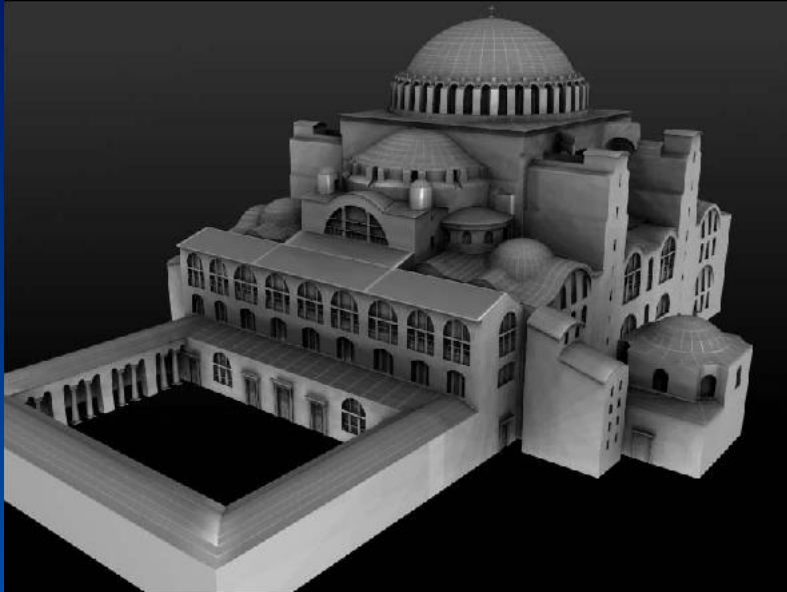
# ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ



- 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])

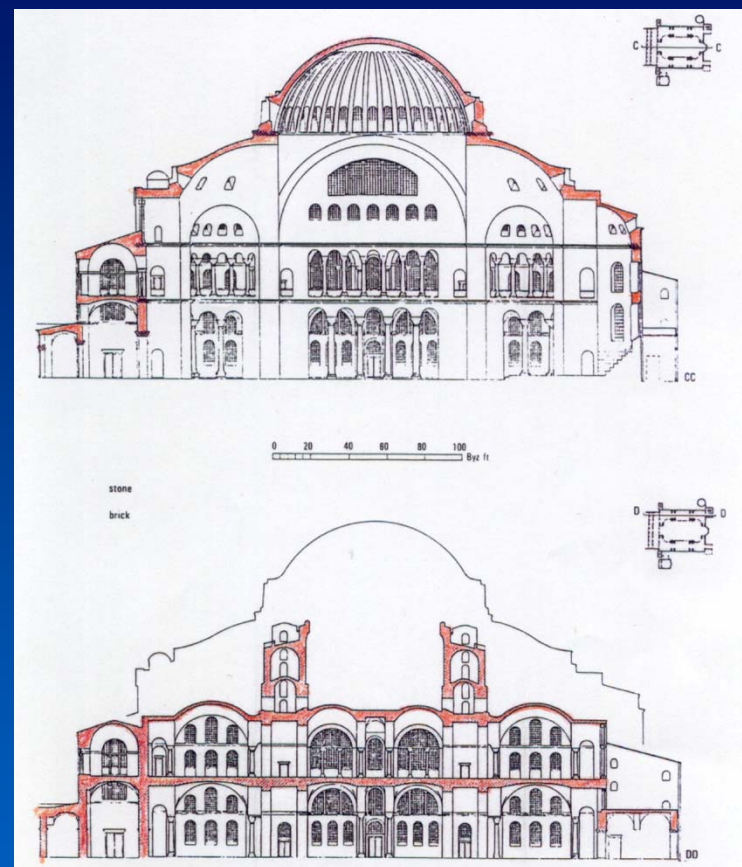
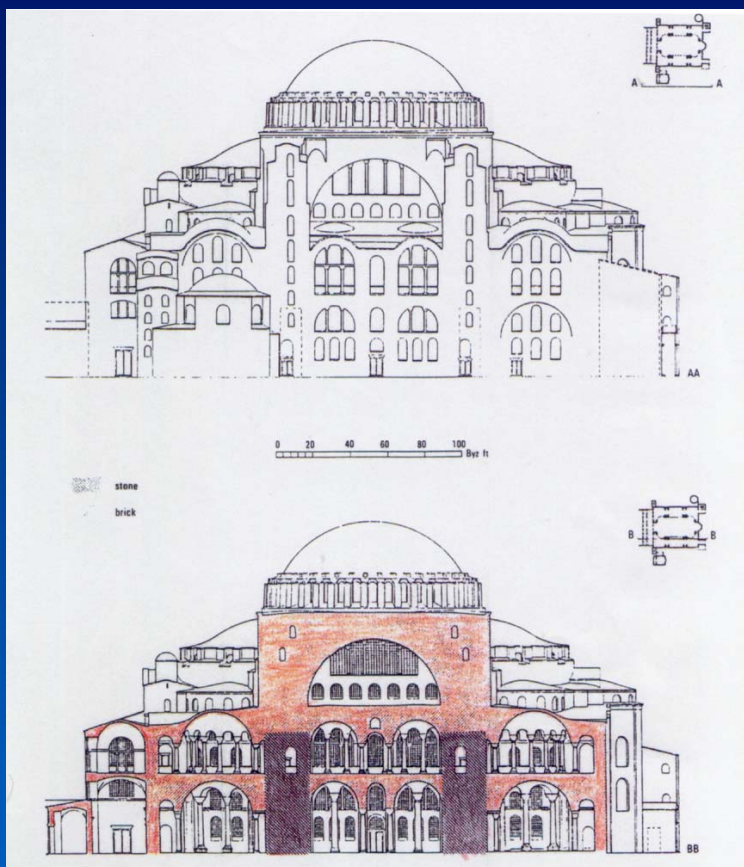


# ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



- Το βάρος του θόλου υποστηρίζεται από τα δύο ημιθολωτά ανοίγματα στην ανατολή και την δύση, τις αψίδες στις γωνίες του κυρίου ναού, και τα τεράστια αντιστοιχίσματα στην βόρεια και νότια πλευρά
- Η εκκλησία έχει διαστάσεις 77 x 79 m και ο επιβλητικός θόλος που βρίσκεται στα 62 m πάνω από το έδαφος έχει διάμετρο 33m.
- Ο κύριος ναός έχει πλάτος 38.07 m, περίπου δύο φορές το πλάτος των διαδρόμων (πλάτους 18.29 m έκαστος)

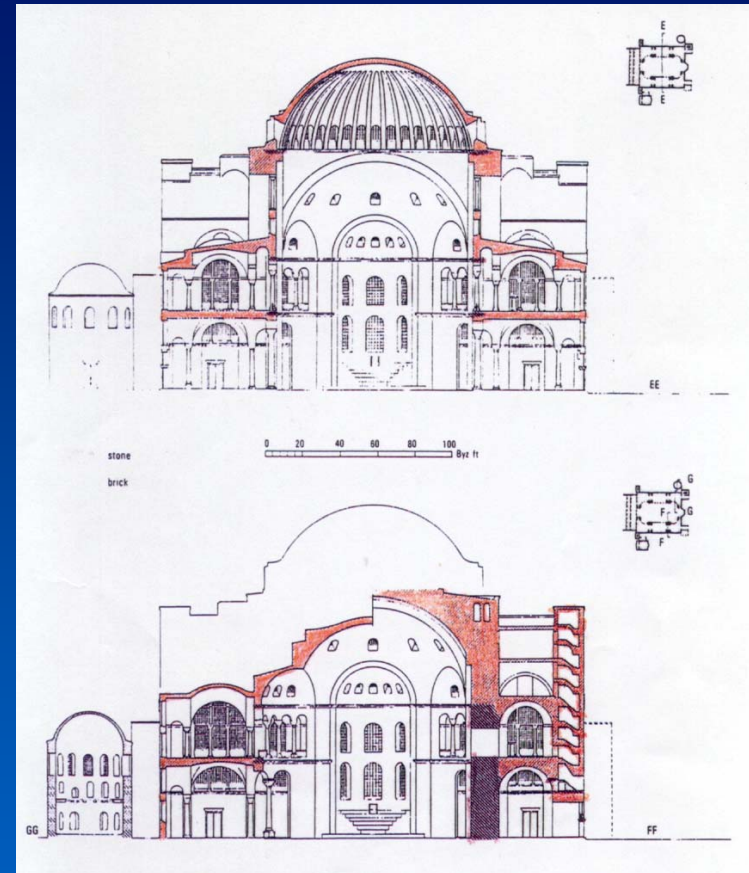
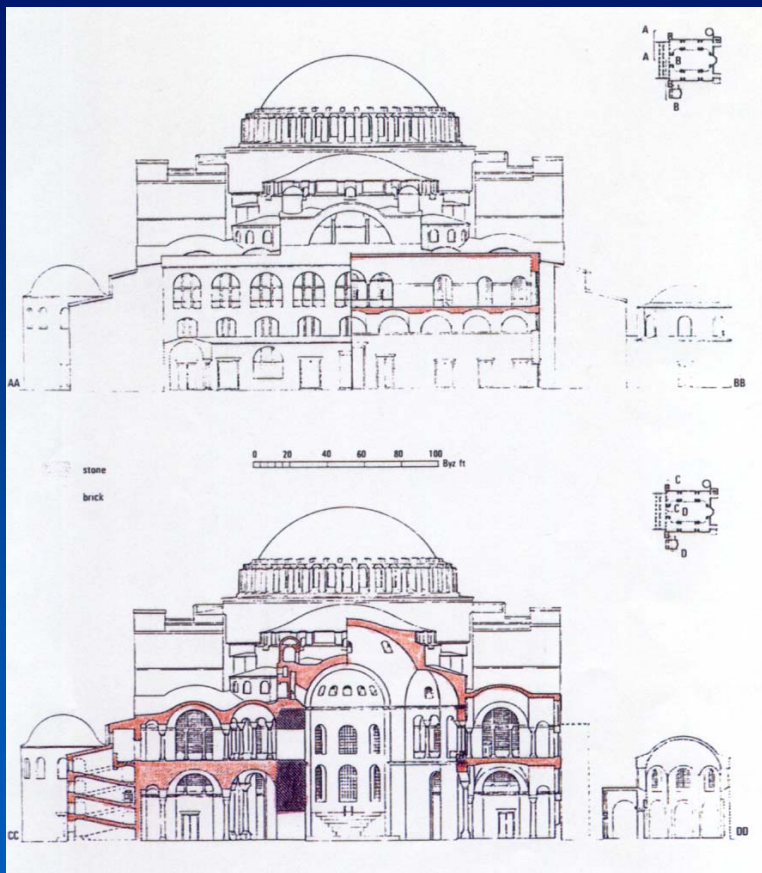
# ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



*Διαμήκεις τομές του μνημείου προς Βορρά*

ΑΠΟ ΤΗΝ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

# ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



*Εγκάρσιες τομές του μνημείου προς Ανατολή*

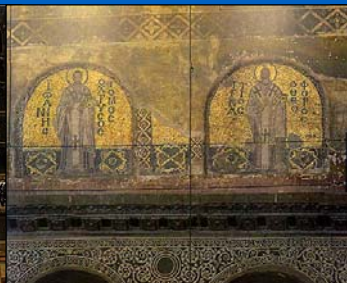
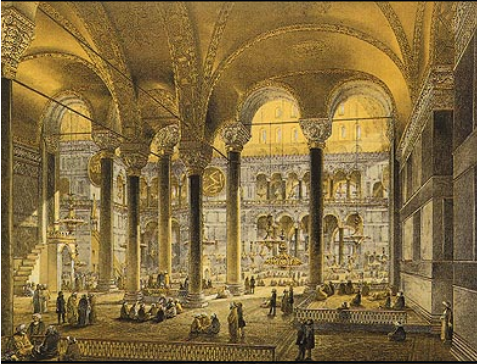
ΑΠΟ ΤΗΝ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

# ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

- Η Ιουστινιανή εκκλησία παραδόθηκε στις 28 / 12 / **537**
- Αρχιτέκτονες του ναού ήταν οι γεωμέτρεις **Ισίδωρος και Ανθέμιος**.
- Η δομή του κτιρίου αδυνάτησε 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

# ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

- Την περίοδο 1847 - 1849 πραγματοποιήθηκε η επέμβαση από τους Ελβετούς αρχιτέκτονες Gaspare και Giuseppe **Fossati**. Τα ψηφιδωτά που υπήρχαν, καθαρίστηκαν από το ασβεστόχρισμα και τα επιχρίσματα με τα οποία είχαν καλυφθεί κατά την Οθωμανική περίοδο. Τα ψηφιδωτά επανακαλύφθηκαν για προστασία. Η επέμβαση αυτή έγινε με ελαιώδη βαφή ή τέμπερα πάνω σε ασβεστιτική βάση και επικαλύφθηκε με φύλλο χρυσού.
- Στις αρχές του 20ου αιώνα πραγματοποιήθηκε η επέμβαση **Vakif**. Κατά την επέμβαση αυτή το επίχρισμα καλύφθηκε από αδιαφανές κίτρινο πιγμέντο σε μπλε μέσο.
- Το 1932 το **Βυζαντινό Ινστιτούτο** ξεκινά το έργο της αποκάλυψης των ψηφιδωτών και αποκατάστασης των εναπομεινάντων(αρκετά είχαν εξαφανισθεί από την επέμβαση Fossati). Το κτίριο άνοιξε το 1934 ως μουσείο, και η **αποκατάσταση ολοκληρώθηκε το 1964.**



# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΩΝ



# 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

# ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ 1994

## Ερευνητικές Ομάδες:

- Δομική Ανάλυση (Prof. Ahmet Çakmak, PU)
- Αντισεισμική Προστασία (Prof. Mustafa Erdik, BU)
- Γεωφυσικές Μελέτες (Prof. Ahmet İşikara, BU)
- Μελέτες Δομικών Υλικών (Καθ. Α. Μοροπούλου, ΕΜΠ)

Λόγω της διαθεσιμότητας αρκετών δεδομένων σχετικά με τις φθορές από ιστορικούς σεισμούς και με βάση την εκτενή έρευνα που έχει διεξαχθεί από τις επιστημονικές ομάδες

## Η ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ

επιλέχθηκε σαν το πρώτο μνημείο όπου θα επικεντρώνονταν οι ερευνητικές δραστηριότητες της κοινής πρωτοβουλίας

# ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ (PRINCETON UNIV. 1995)

Διατμηματικό σεμινάριο (Χειμερινό Εξάμηνο '95):  
*Program in Hellenic Studies (Prof. S. Ćurčić)*  
*Dept. Civil Eng. and Operations Research (Prof. A. Çakmak)*

*“Constantinople / Istanbul : Architecture and  
Structural Analysis of Monuments”*



*10-ήμερη επίσκεψη για επιτόπια μελέτη,  
ώστε να δοθεί η δυνατότητα στους  
φοιτητές να αντιληφθούν την  
τοπογραφία της πόλης και της  
αρχιτεκτονικής των μνημείων της*



# ΕΛΛΗΝΟ-ΤΟΥΡΚΙΚΟ ΣΥΜΦΩΝΟ

## ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

(Αγκυρα, 15 Νοεμβρίου 1999)

- **Setting up of a Joint Committee of Experts for the examination of school textbooks**
- **Developing common school activities, such as encouraging school twinning**
- **Encouraging the use of educational material in the schools of both countries with a view to promote friendship, understanding and solidarity**
- **Promoting the participation of their youth in the summer camps**
- **Increasing the number of scholarships reciprocally granted in the field of Turkish and Greek language and culture**
- **Encouraging cooperation between universities**
  - **Participating in exhibitions and cultural events to be held in both countries**
  - **Supporting cooperation between the National Libraries of the two countries**
  - **Promoting joint archaeological research in the fields of excavations, museums etc.**
  - **Cooperation between the General Directorate of State Archives of Turkey and the State Archives of Greece**
  - **Promoting Olympic ideals and Olympic truce**

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## [ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΠ & ΒU-KOΕΡΙ]

### ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΜΠ & ΒU-KOΕΡΙ

- *Επέκταση του πρωτοκόλλου για Βυζαντινά και Οθωμανικά μνημεία και στις δύο χώρες για την αντισεισμική προστασία*
- *Αντισεισμική προστασία των κτιριακών υποδομών των μουσείων και των εκθεμάτων τους στις δύο πόλεις*



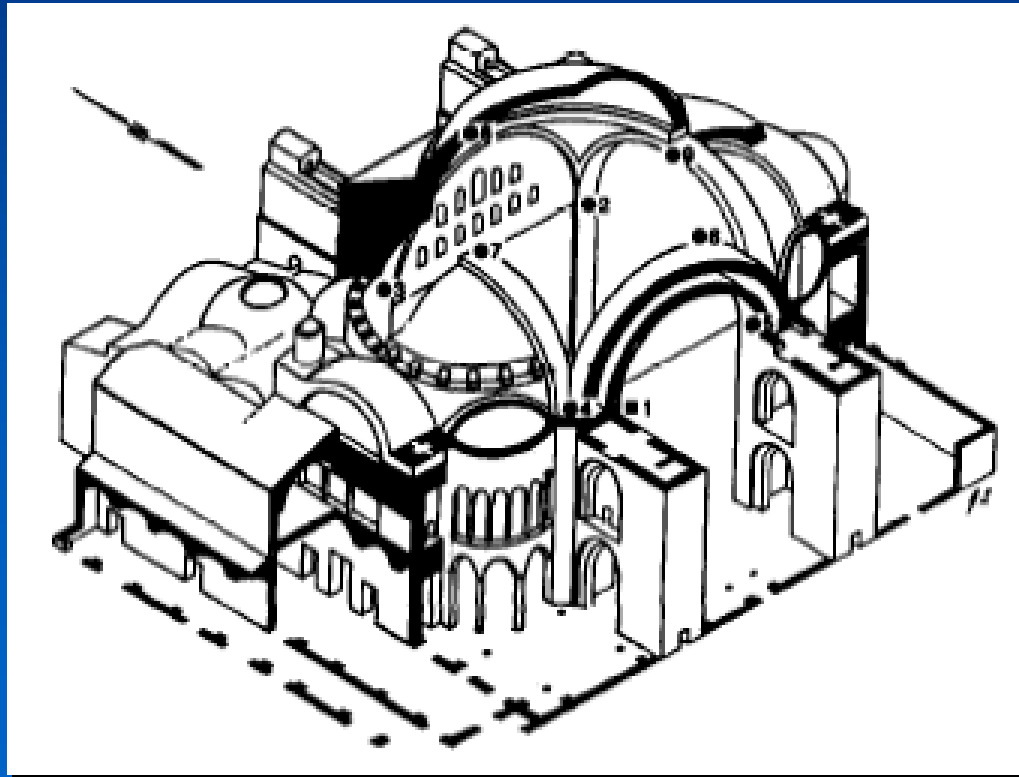
- ✓ *Έκδοση αδειών και υποστήριξη επι-τόπου μελετών*
- ✓ *Κοινές επισκέψεις*
- ✓ *Κοινά ερευνητικά προγράμματα*
- ✓ *Πιλοτική εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης τα οποία προσομοιώνουν στα ιστορικά σε επιλεγμένη τοιχοποιία της Αγιά Σοφιάς*
- ✓ *Μη-καταστρεπτικός έλεγχος επιχρισμένων επιφανειών στο εσωτερικό της Αγιά Σοφιάς για την αποκάλυψη ψηφιδωτών*

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ  
ΤΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ  
ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ**

Η συμπεριφορά του μνημείου στα  
δυναμικά και στατικά φορτία είναι σε  
άμεση εξάρτηση με τα φυσικοχημικά και  
μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών  
του υλικών (πλίνθοι και κονιάματα)

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

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





# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## Τεχνική κατασκευής της ιστορικής τοιχοποιίας



Πεσσοί: Λαξευτοί λίθοι

Τοιχοποιία

Θολοδομία

Συμπαγείς πλίνθοι, Ισχυρά,  
υδραυλικά κονιάματα με  
κεραμικά τεμάχια

Νάρθηκας, Εξωνάρθηκας

Συμπαγείς πλίνθοι  
Ενισχυτικές ζώνες από  
λαξευτούς ευμεγέθεις λίθους  
(βάση και γένεση των τόξων)

Διαστάσεις πλίνθου

Μήκος: 30-36 cm

Πάχος: 3,5-4 cm

Κονίαμα αρμών: 6-7 cm

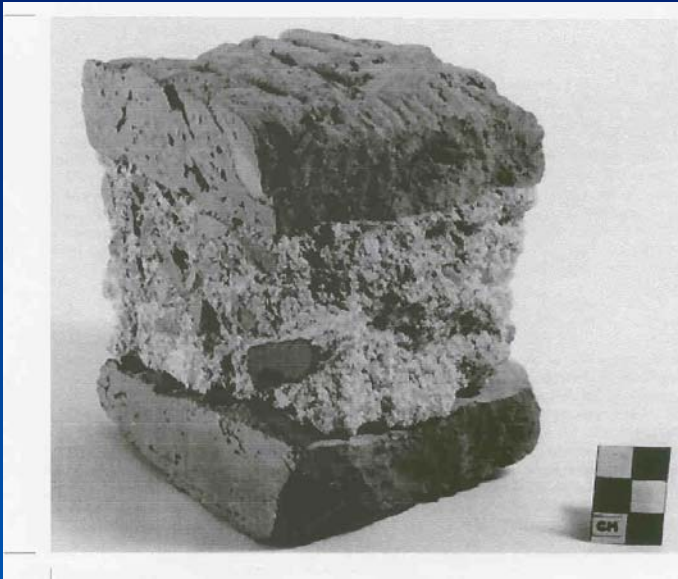
# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## Ενόργανες μέθοδοι χαρακτηρισμού

- *Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM)*
- *Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)*
- *Πολωτικό Μικροσκόπιο (OM)*
- *Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διαπερατότητας (TEM)*
- *Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο - Χημική Μικροανάλυση (SEM-EDX)*
- *Ποροσιμετρία Υδραργύρου*
- *Κοκκοδιαβάθμιση*
- *Θερμικές Μέθοδοι Ανάλυσης (DTA/TG)*

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## Χαρακτηριστικά ιστορικού κονιάματος της Αγιά Σοφιάς



- Υδραυλική φύση της κονιάς
- Τα αδρανή είναι μίγμα κεραμικών θραυσμάτων μεγάλης διαμέτρου (<math><15\text{mm}</math>) & 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

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## Χαρακτηριστικά Μικροδομής

Ολικός ειδικός όγκος :	190-240 (mm <sup>3</sup> /g)
Φαινόμενη πυκνότητα:	1.5 – 1.7 (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 :	38 – 43 %

## Αποτελέσματα XRD

Sample	Q	Cc	Ar	An	San	Do	CaAH	CaSH	Mont.	K	Musc
2 (matrix)	+++	++++		++	++			+	+		+
2 (ceramic)	++++	++++		++	++	+	+	+	+	+	+
3 (ceramic)	++++	++		++	++	+	+		+	+	+
3b (matrix)	+++	++++		+	+		+				

Quartz: SiO<sub>2</sub> (5-0490); Calcite: CaCO<sub>3</sub> (5-0586); Anorthite-plagioclase: CaAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (12-301); Sanidine: NaO.6K<sub>0.4</sub>ArSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (10-357); Calcium Silicate hydrate: 5 Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O (3-0248); Calcium aluminate hydrate: Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>.8H<sub>2</sub>O (2-0083); Montmorillonite: CaNaMgFeAlSi(OH)<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O; Kaolinite: Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> (12-447); and Muscovite: (K, Na)(Al, Mg, Fe)<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>(7-14)

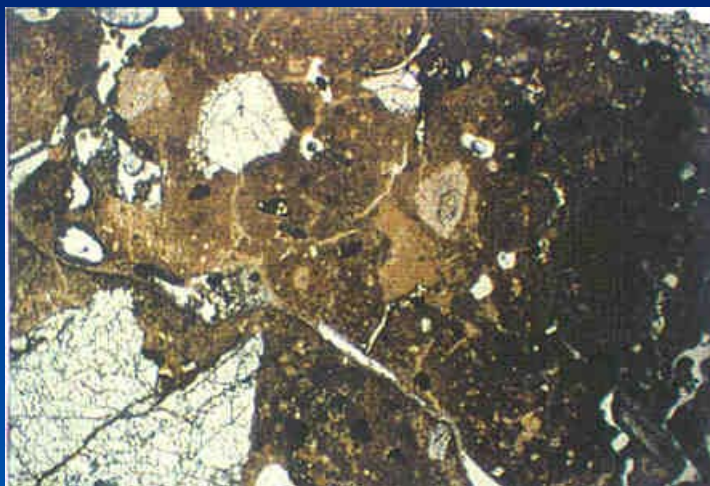
# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

## Κοκκοδιαβάθμιση

- Συνδετικό Υλικό: Υδράσβεστος 25%
- Κατά περιπτώσεις ως πρόσθετο κεραμάλευρο
- Αδρανή: Άμμος Θραυσμένο Κεραμίδι 75%
- Αναλογία άμμου / θραυσμένου κεραμικού ~ 1:1
- Θραύσματα κεραμικού ως 1,5 cm
- Η κοκκοδιαβάθμιση από τα χαμηλά κλάσματα (63 – 125 μm) ξεκινά αποκλειστικά με άμμο
- Όσο προχωρά προς μεγαλύτερα κλάσματα αυξάνει η αναλογία θραυσμένου κεραμικού
- Στις υψηλές διαμέτρους κόκκων (1,0 - 1,5 cm) υπάρχει αποκλειστικά θραυσμένο κεραμικό

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

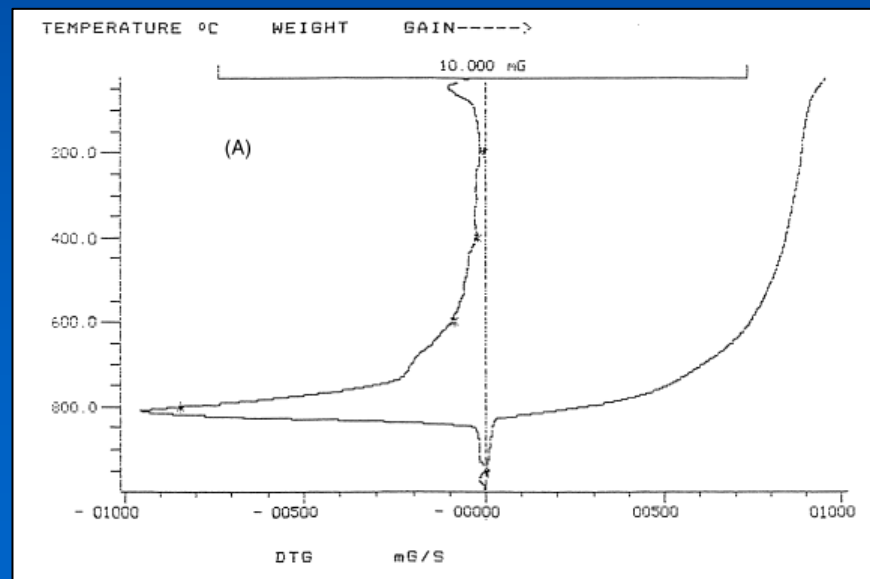
## Πολωτική μικροσκοπία



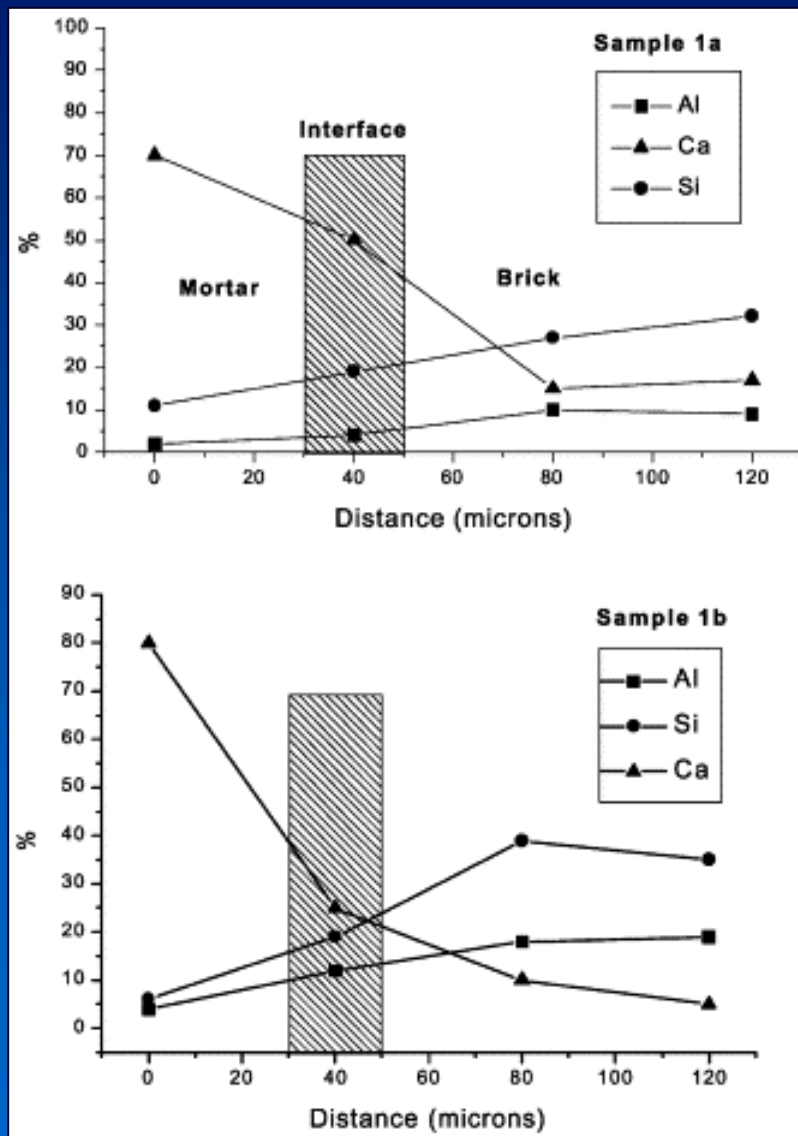
*Όρια αντίδρασης στην διεπιφάνεια  
κεραμικού – μήτρας, διεσπαρμένα με την  
μορφή φλεβών στην μήτρα*

## DTA/DTG

*Χαρακτηριστική καμπύλη  
θερμικής ανάλυσης από δείγμα  
κονιάματος της Αγία Σοφιάς*

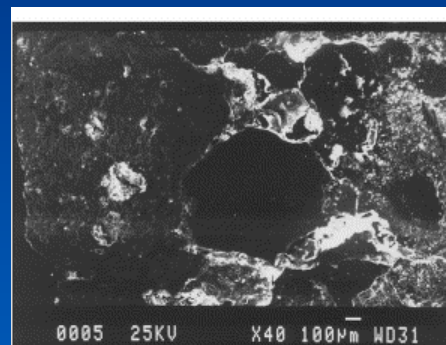


# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

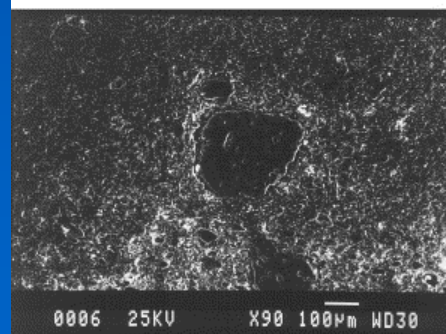


## SEM-EDX:

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



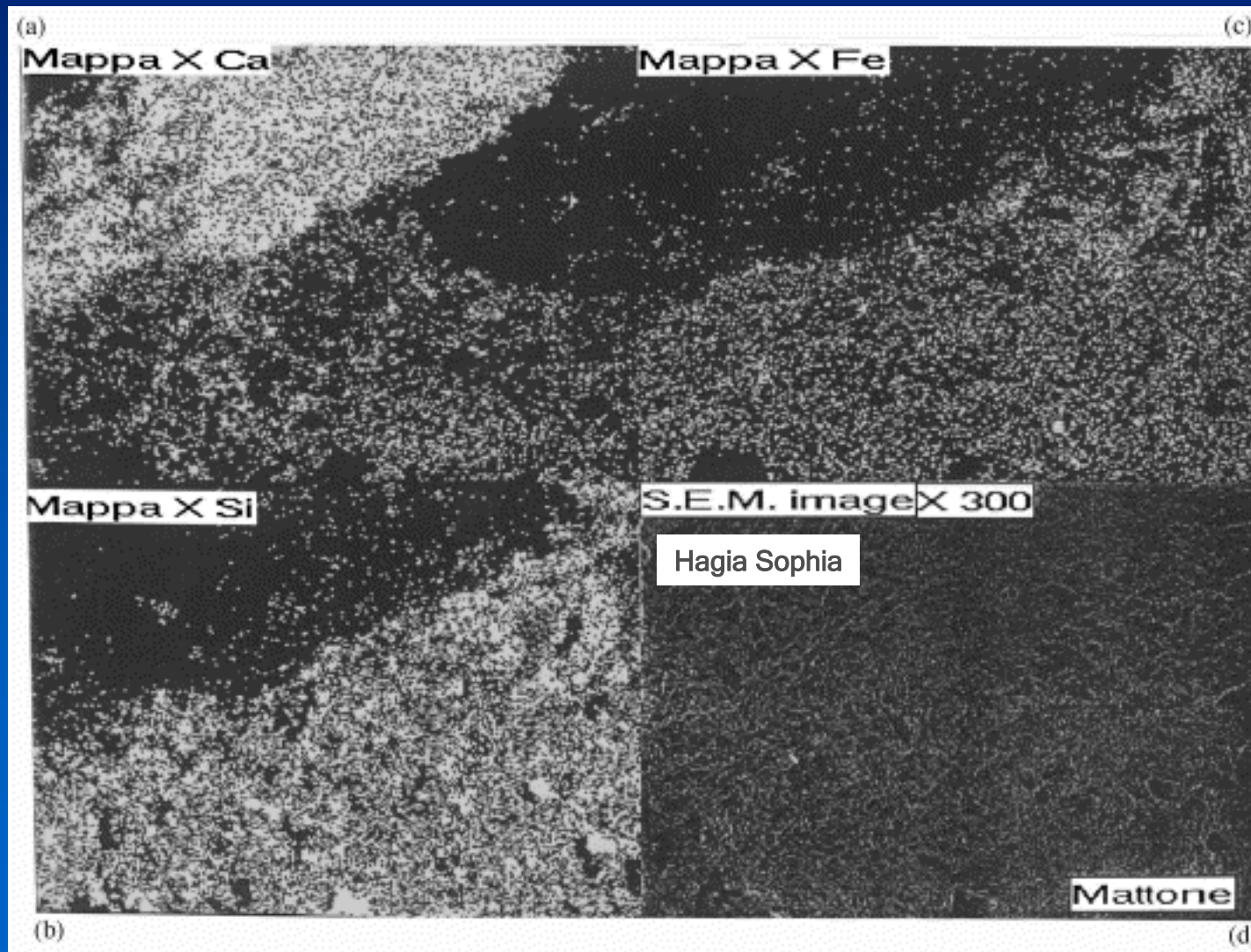
(a): x40



(b): x90

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

SEM-EDX Mapping: (Ca, Si and Fe) στη διεπιφάνεια κεραμικού συνδετικής ύλης (Ιστορικό Κονίαμα Αγιά Σοφιάς)

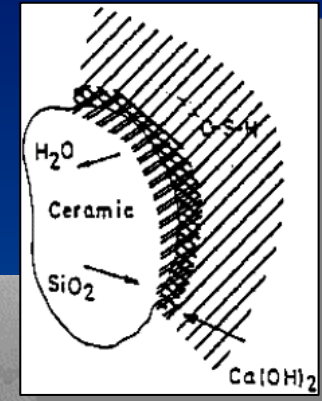




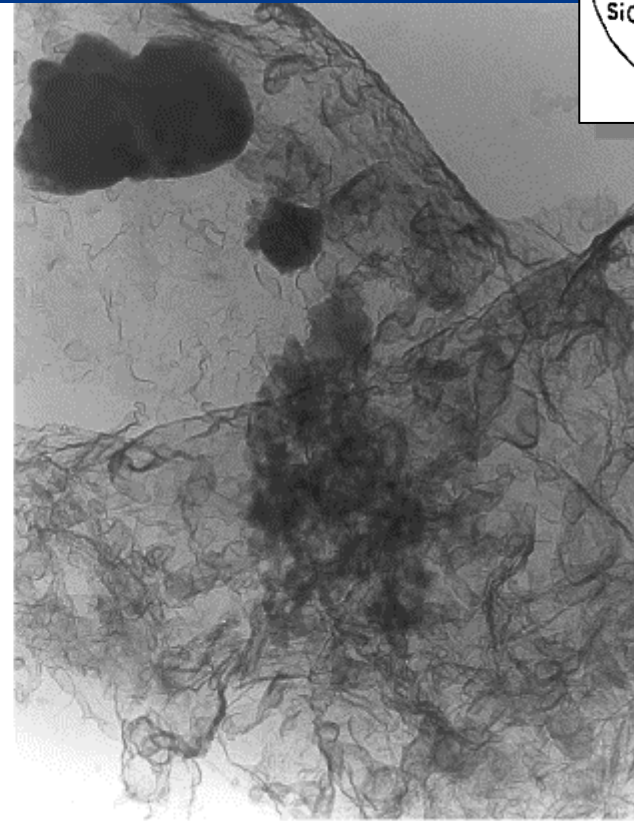
# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## TEM:

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



(a)



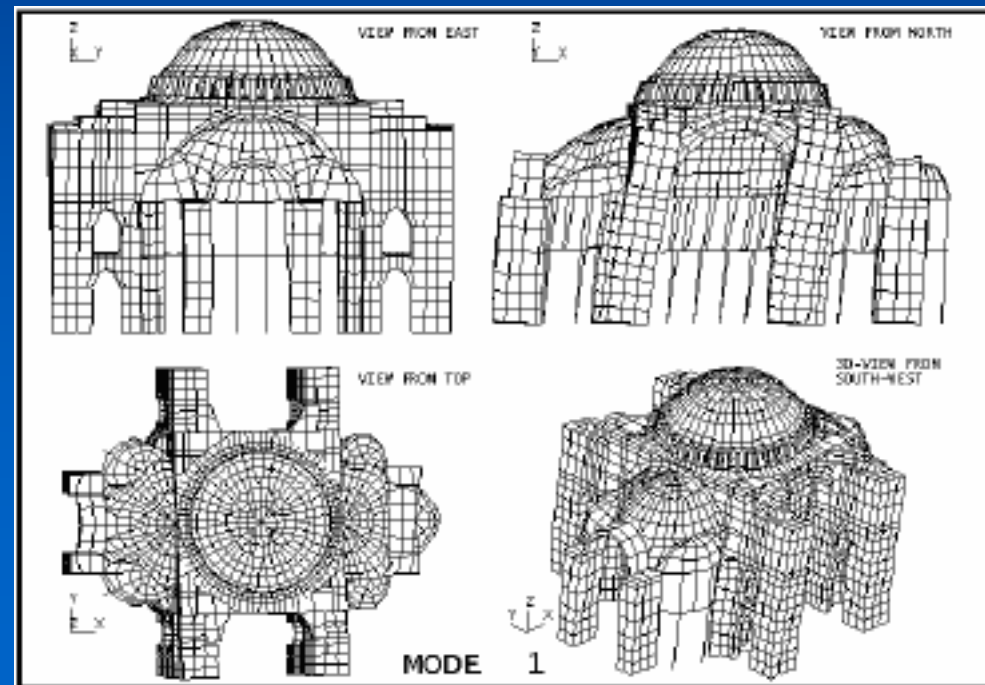
(b)

**ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ  
ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ**

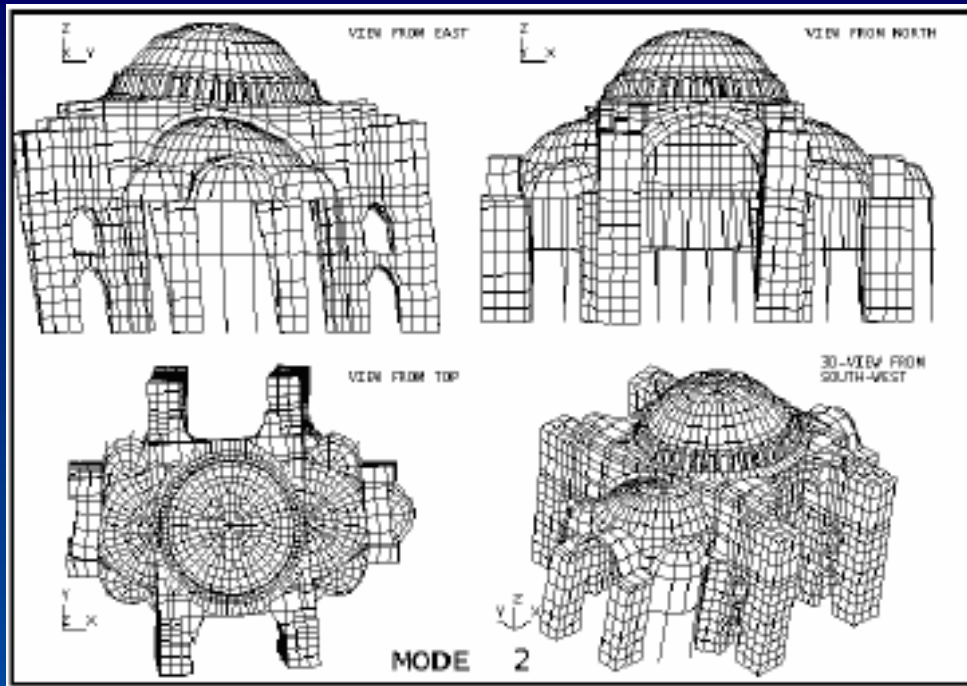
# ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

Table 2.2 Parameters from modal analysis results (Eigenvalue, frequency, and participation (effective) mass factor - M.P.F)

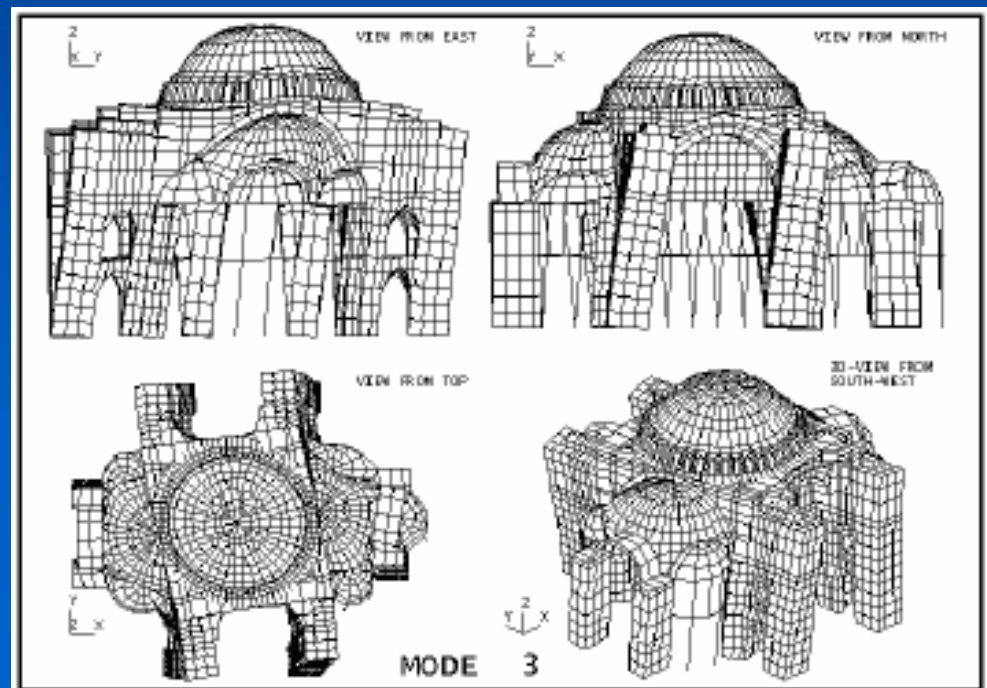
PERCENT OF MASS PARTICIPATION FACTORS (M.P.F.) IN:								
			X DIRECTION		Y-DIRECTION		Z-DIRECTION	
Mode	Eigenvalue	Freq.	M.P.F	SUM OF M.P.F	M.P.F	SUM OF M.P.F	M.P.F	SUM OF M.P.F
1	134.35	1.8448	64.9000	64.9000	0.0216	0.0216	0.0001	0.0001
2	182.09	2.1476	0.4092	65.3100	62.5200	62.5400	0.0095	0.0096
3	196.39	2.2304	1.6940	67.0100	9.1620	71.7000	0.0015	0.0111
4	308.32	2.7946	0.0684	67.0700	0.0991	71.8000	0.0001	0.0113
5	314.81	2.8239	0.0000	67.0700	1.4180	73.2200	0.4074	0.4187



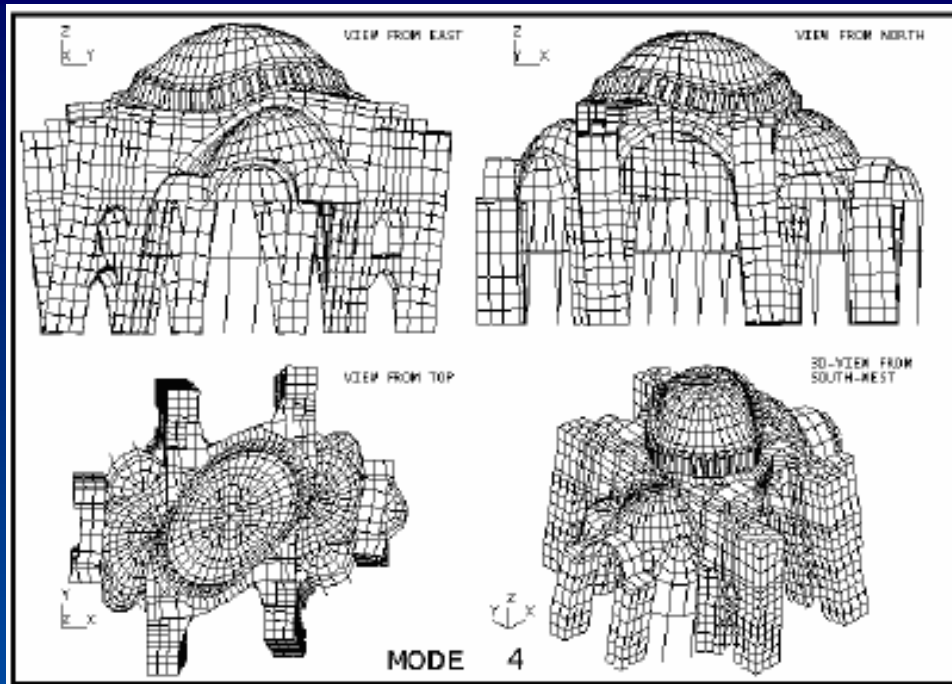
1<sup>ος</sup> τρόπος παραμόρφωσης  
(1<sup>st</sup> mode)



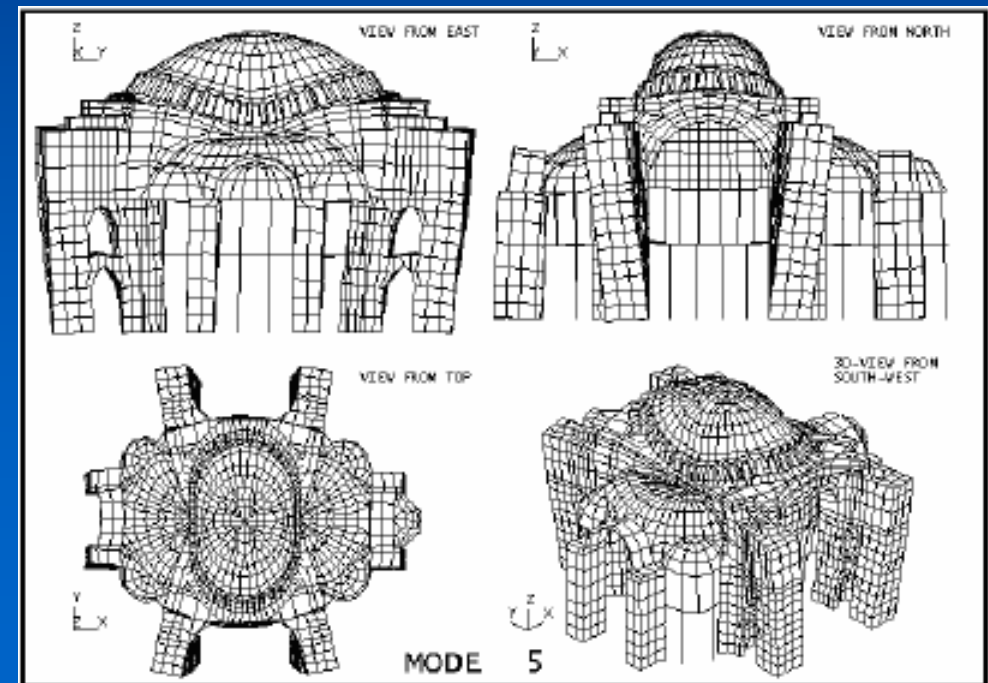
2<sup>ος</sup> τρόπος παραμόρφωσης  
(2<sup>nd</sup> mode)



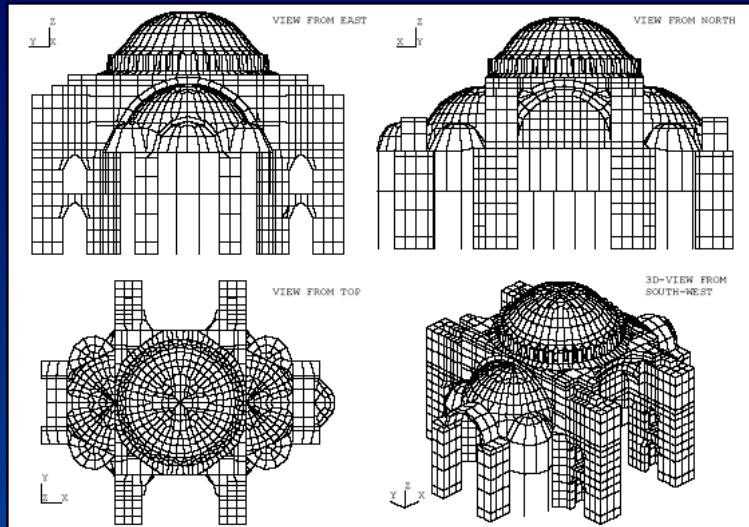
3<sup>ος</sup> τρόπος παραμόρφωσης  
(3<sup>rd</sup> mode)



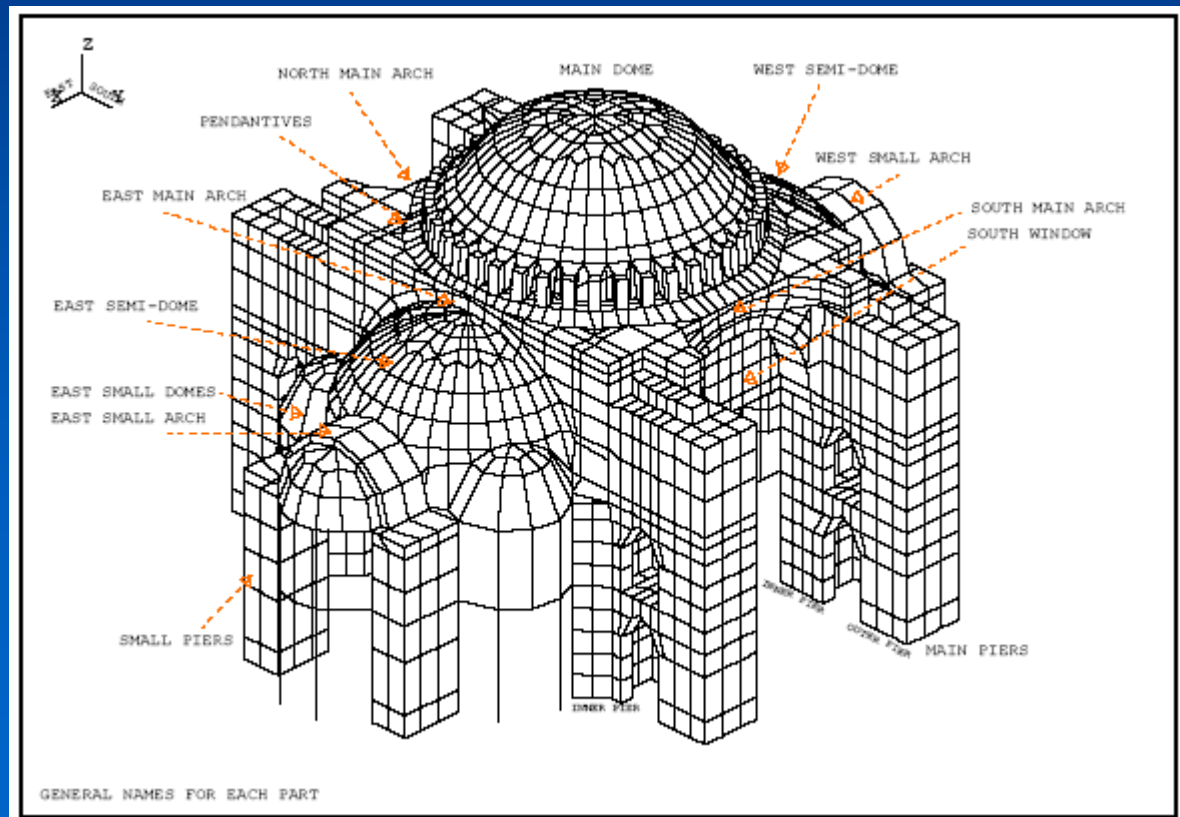
4<sup>ος</sup> τρόπος παραμόρφωσης  
(4<sup>th</sup> mode)



5<sup>ος</sup> τρόπος παραμόρφωσης  
(5<sup>th</sup> mode)



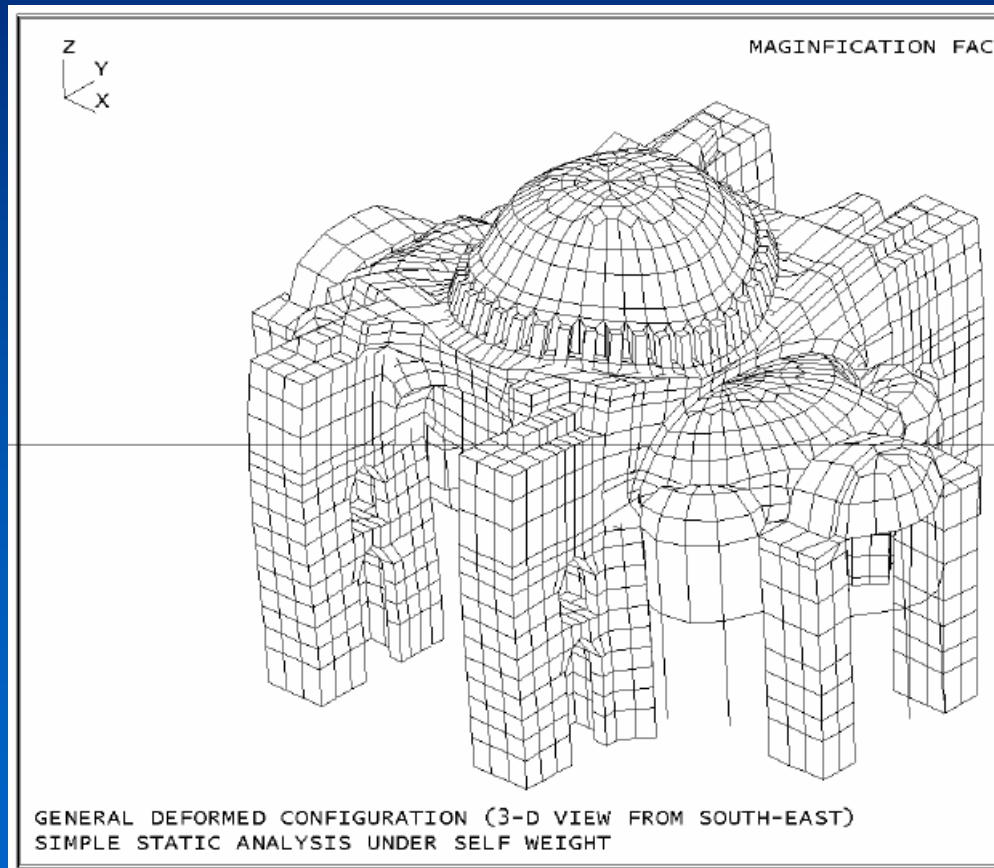
# ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



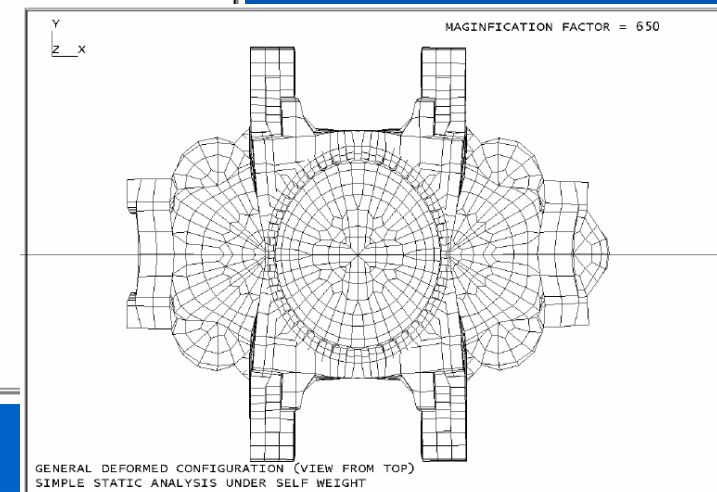
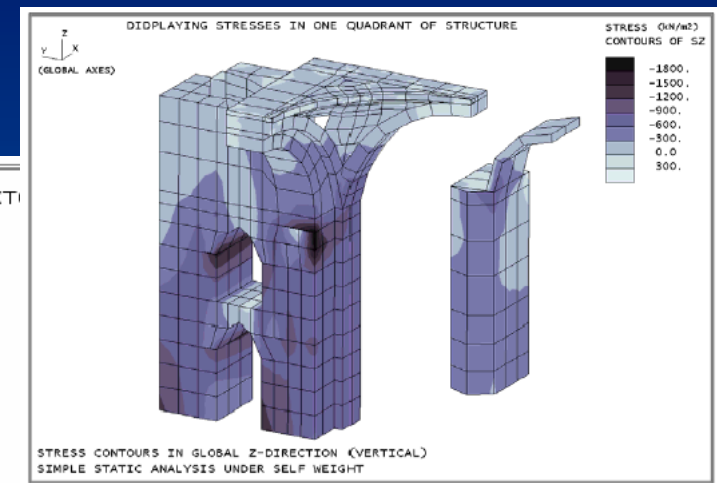
# ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

## ΤΑΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

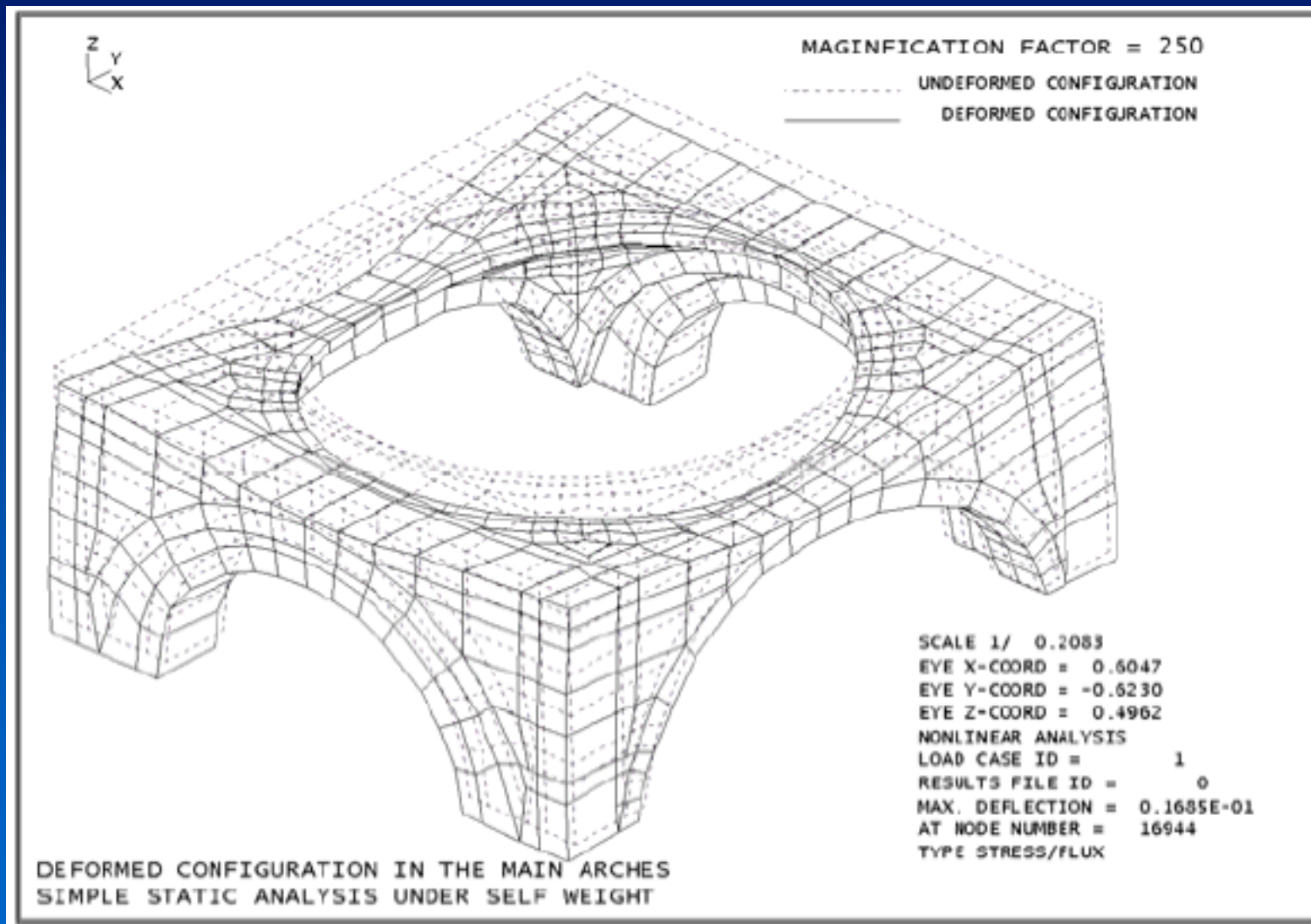
### ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΟΓΩ ΙΔΙΟΥ ΒΑΡΟΥΣ



3-διάστατη απεικόνιση από νοτιοανατολικά



# ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ



**ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΟΞΩΝ ΛΟΓΩ ΙΔΙΟΥ ΒΑΡΟΥΣ**

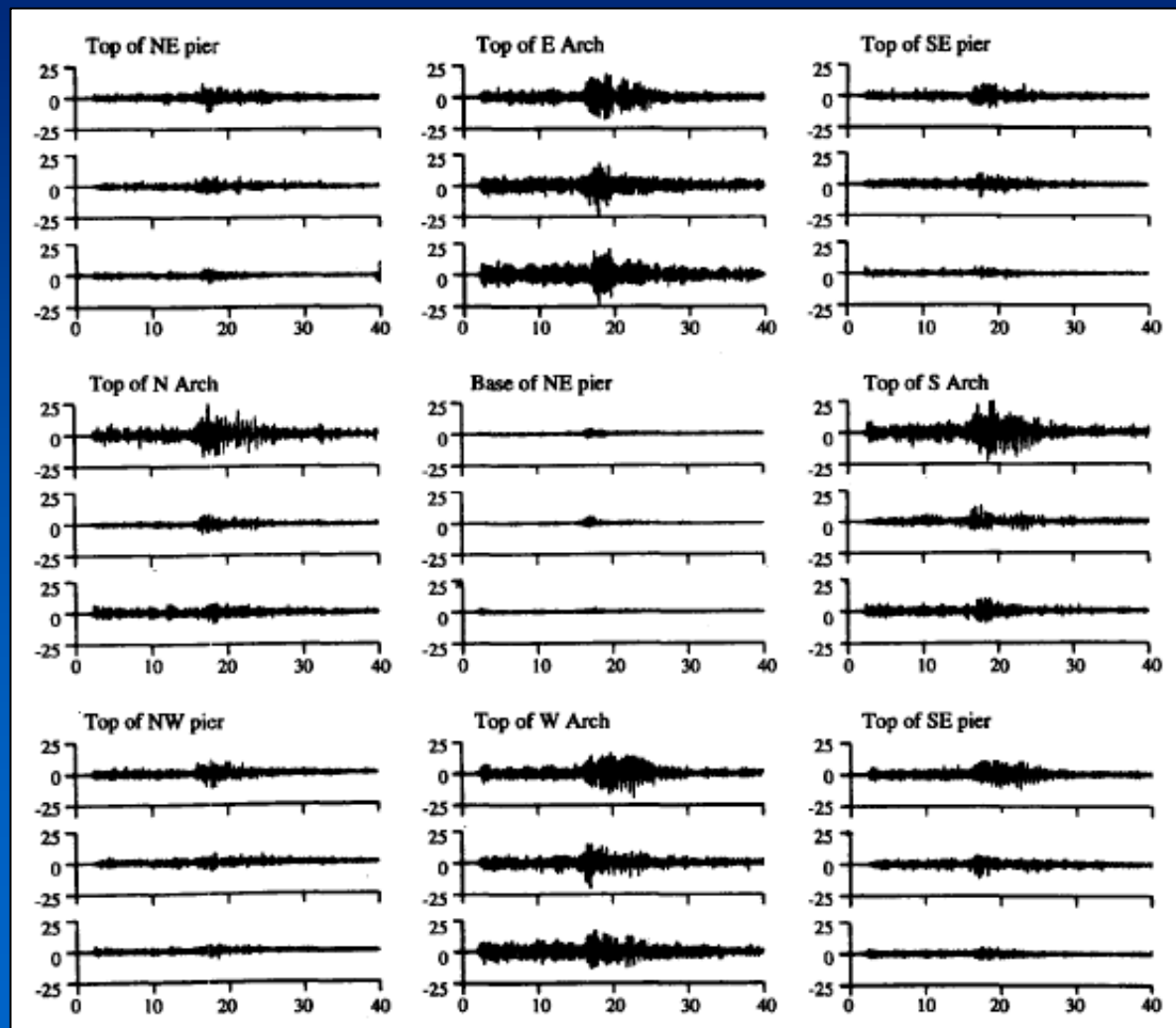


# ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

- *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.*

# ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ

*Καταγραφή των επιταχύνσεων που μετρήθηκαν στην Αγιά Σοφιά από τον σεισμό μεγέθους 4.8 στις 22 Μαρτίου 1992, στο Karacabey*



**ΣΥΜΒΑΤΑ & ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΑ  
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ  
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

# 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*

## ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ

Συνδετική ύλη (κονία):

υδράσβεστος

Αδρανή:

συμβατικά ή κεραμικά

Αναλογία κονίας / 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>)

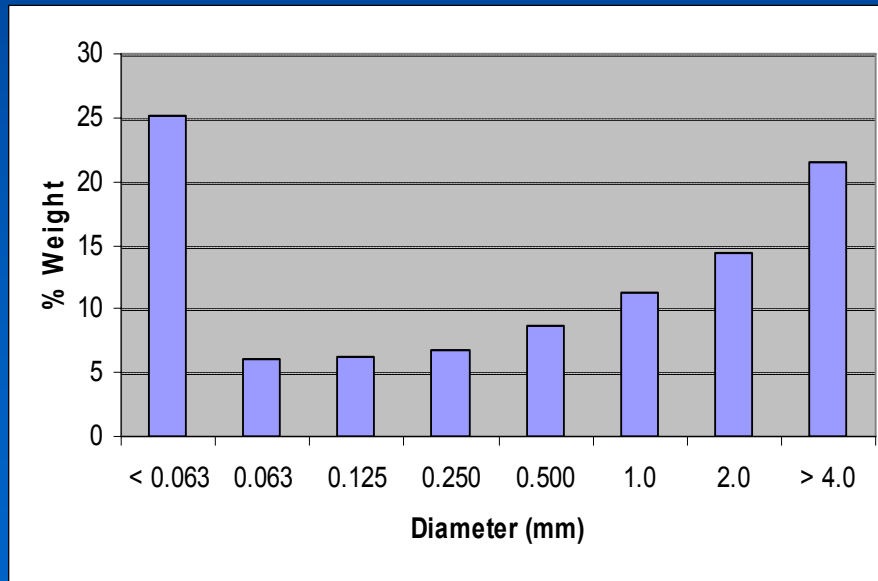
Μέση ακτίνα πόρων: 0.1 - 0.8 (μm)

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

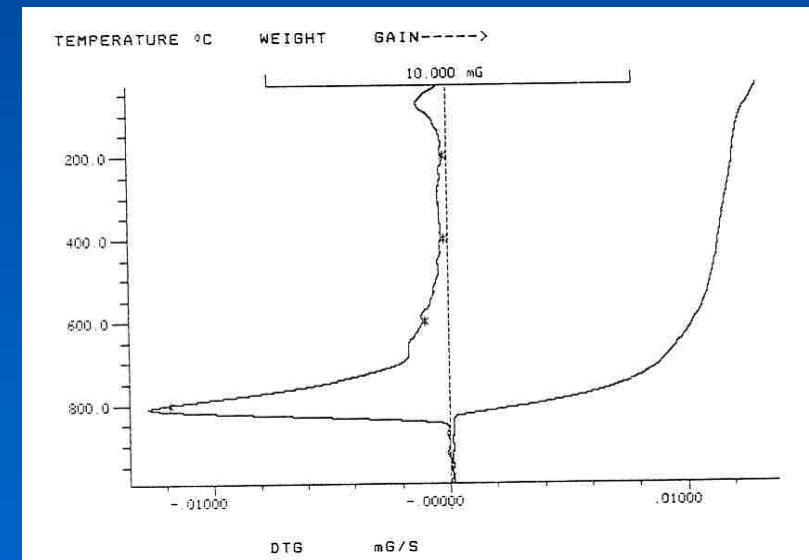
Ολικό Πορώδες: 32 - 43 %

Μηχανικές αντοχές

Αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 0.5 - 1.2 MPa



Κοκκοδιαβάθμιση κονιάματος  
θραυσμένου κεραμικού



Διαφορική Θερμική και  
Θερμοβαρυσμετρική ανάλυση

## ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΣΒΕΣΤΗ- ΠΟΖΟΛΑΝΑΣ

Συνδετική ύλη (κονία):

Αδρανή:

Πρόσθετα:

Αναλογία κονιάς / αδρανών:

υδράσβεστος

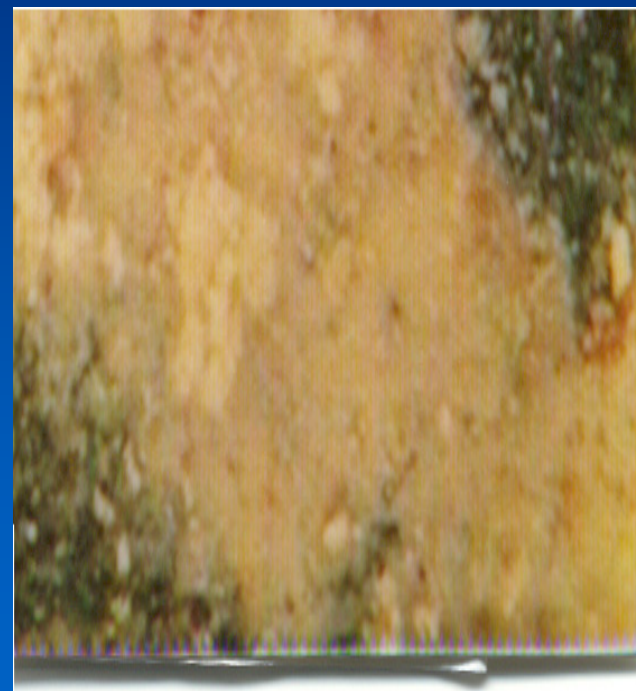
ασβεστιτικής/ αργιλοπυριτικής φύσης ή  
μίξη αυτών

Ποζολάνα

1:2-1:4



Στέρνες στο Λαύριο



Μικροσκοπία Οπτικών Ινών



## ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΑΣΒΕΣΤΗ - ΠΟΖΟΛΑΝΗ

Όρια αποδοχής για την μικροδομή

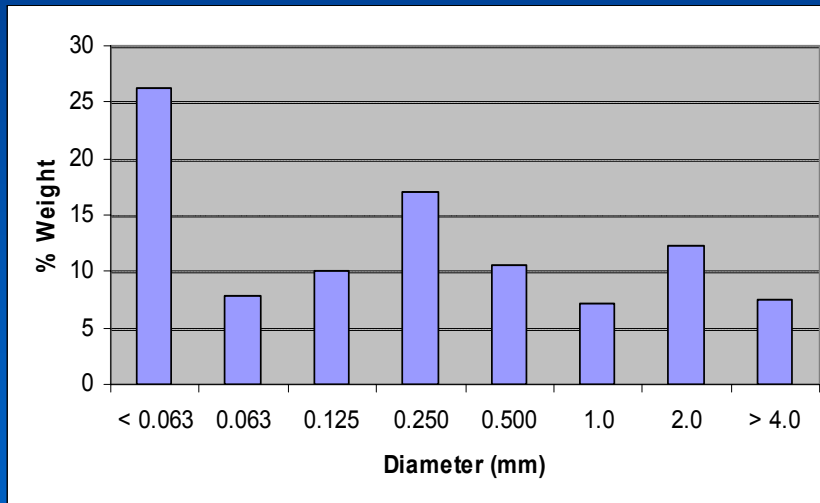
Ολικός ειδικός όγκος : 160-265 (mm<sup>3</sup>/g)

Φαινόμενη πυκνότητα: 1.6 - 1.9 (g/cm<sup>3</sup>)

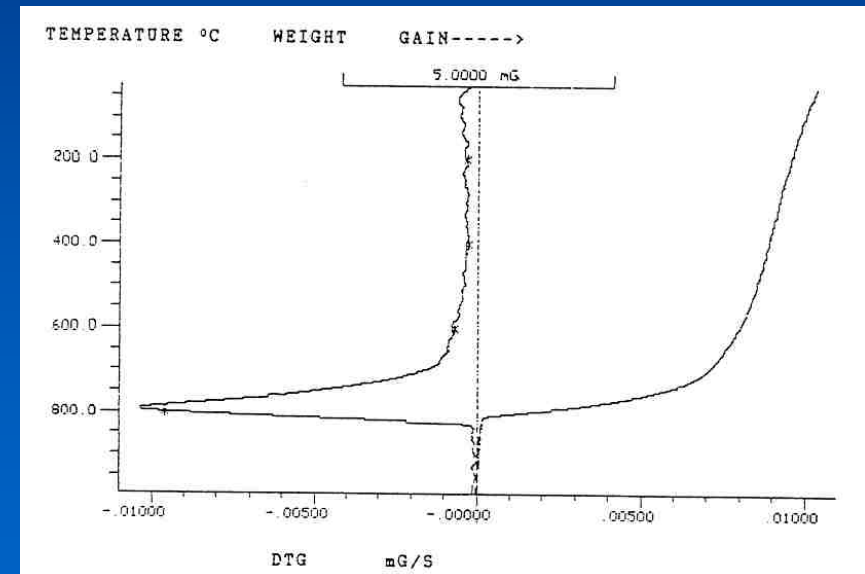
Μέση ακτίνα πόρων : 0.1 -1.5 (μm)

Ειδική Επιφάνεια : 3 - 14 (m<sup>2</sup>/g)

Ολικό Πορώδες : 30 - 42 %



Κοκκοδιαβάθμιση κονιαμάτων  
ασβέστη - ποζολάνας



Διαφορική Θερμική και  
Θερμοβαρμετρική ανάλυση

**ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ  
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

# **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%) ENV459/1**
- δ) Ποσότητα ελεύθερου νερού <50%**

**Φυσική Υδραυλική άσβεστος:**

- 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

## **ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ**

Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (DTA-TG),  
**για την εξακρίβωση των προδιαγραφών των πρώτων υλών, ως προς τη σύσταση 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.**



## 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

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

## Δοκιμές αποτίμησης τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων

### Μέτρηση εξάπλωσης

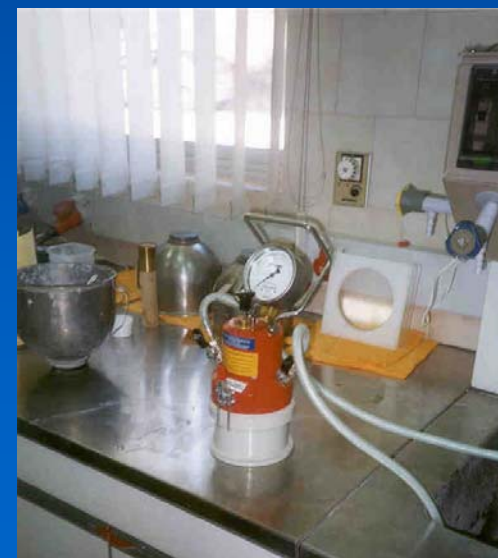
*Άμεση σχέση με την απαιτούμενη ποσότητα νερού για ικανοποιητική εργασιμότητα*

*Αποτελεί μέτρο της παραμόρφωσής του όταν αυτό υπόκειται σε τάσεις*



### Μέτρηση περιεχόμενου αέρα

*Ποσοστό του αέρα που περιέχεται σε ορισμένο όγκο νωπού κονιάματος*



## Δοκιμές αποτίμησης τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων

### **Συγκρατούμενο νερό**

*Αποτελεί την ποσότητα του νερού που συγκρατείται στο κονίαμα.*

### **Μέτρηση ειδικού βάρους**

*Ζύγιση της μάζας του κονιάματος που απαιτείται για να πληρωθεί μεταλλικό δοχείο όγκου 2 lt. Ο λόγος της μάζας του κονιάματος που απαιτείται προς τον όγκο αποτελεί το ειδικό βάρος του κονιάματος.*

*Χρησιμοποιείται το ίδιο μεταλλικό δοχείο με την μέτρηση του περιεχόμενου αέρα.*



## 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**

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

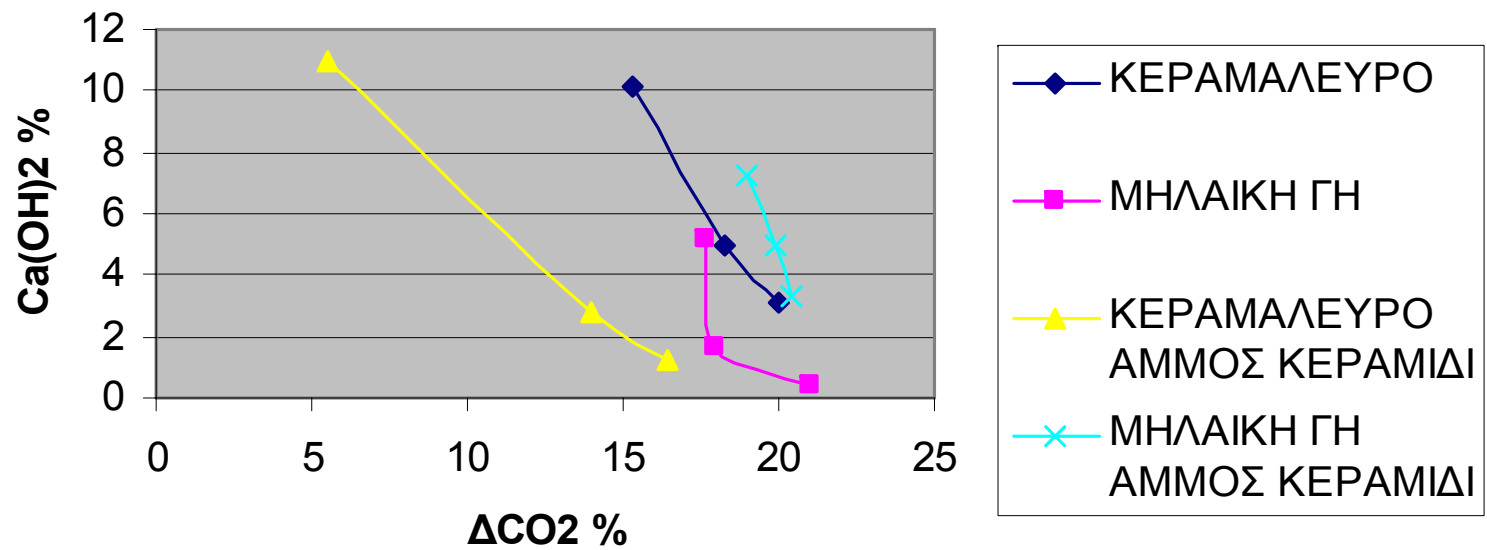
**Η αποτίμηση των συνθέσεων των κονιαμάτων αποκατάστασης κατά την σκλήρυνσή τους γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους και σύμφωνα με τα όρια αποδοχής, που έχουν προκύψει από την μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων:**

- 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**

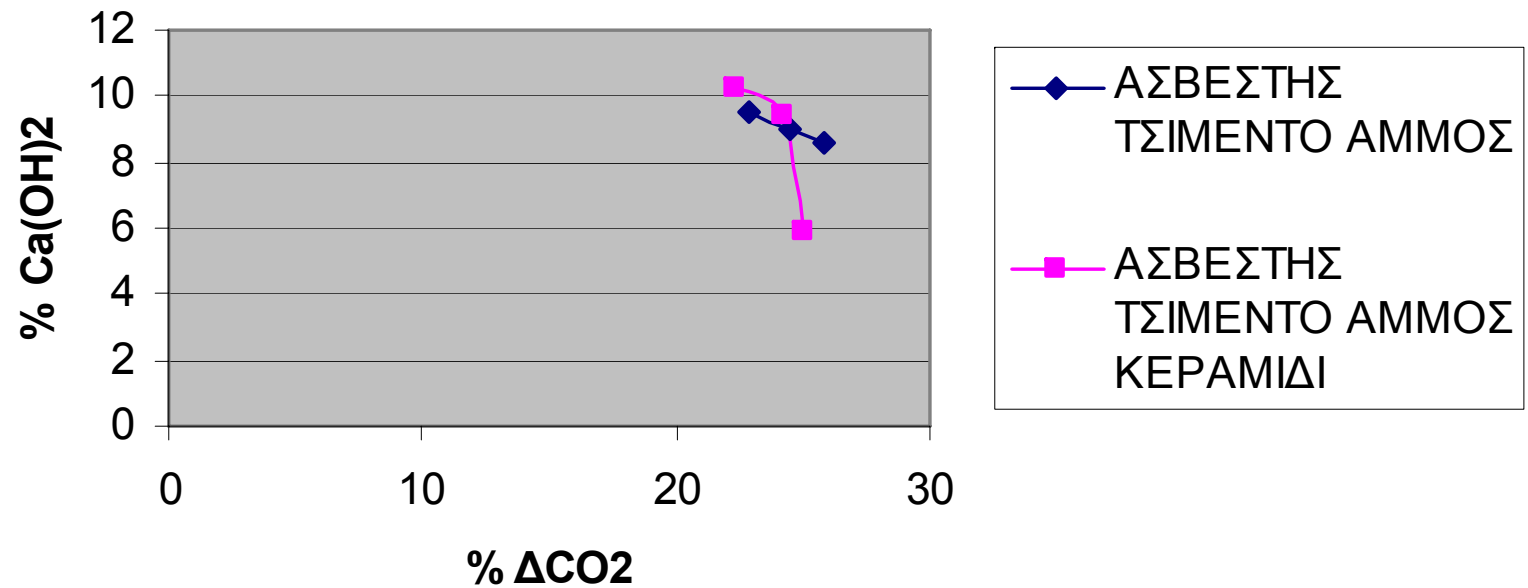
# ***ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ***



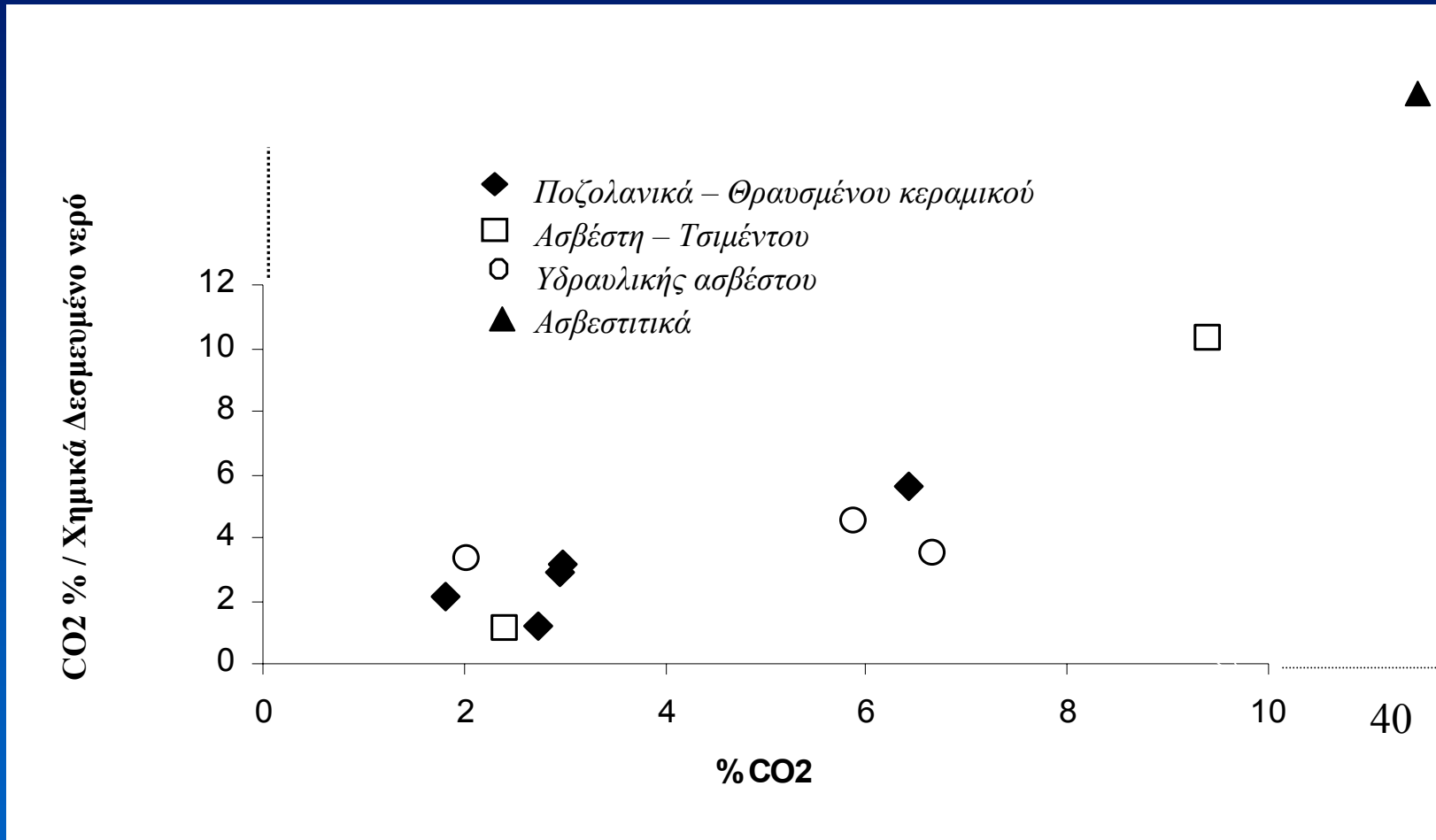
## Εξέλιξη της ενανθράκωσης στα κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα



## Εξέλιξη της ενανθράκωσης κονιάματα ασβέστη - τσιμέντου



**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

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

*Μετά από 9 Μήνες*

## Ποζολανικά Κονιάματα (κεραμάλευρο, Μηλαϊκή γη θραυσμένο κεραμικό)

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

## 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

# ***ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ***

## ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

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

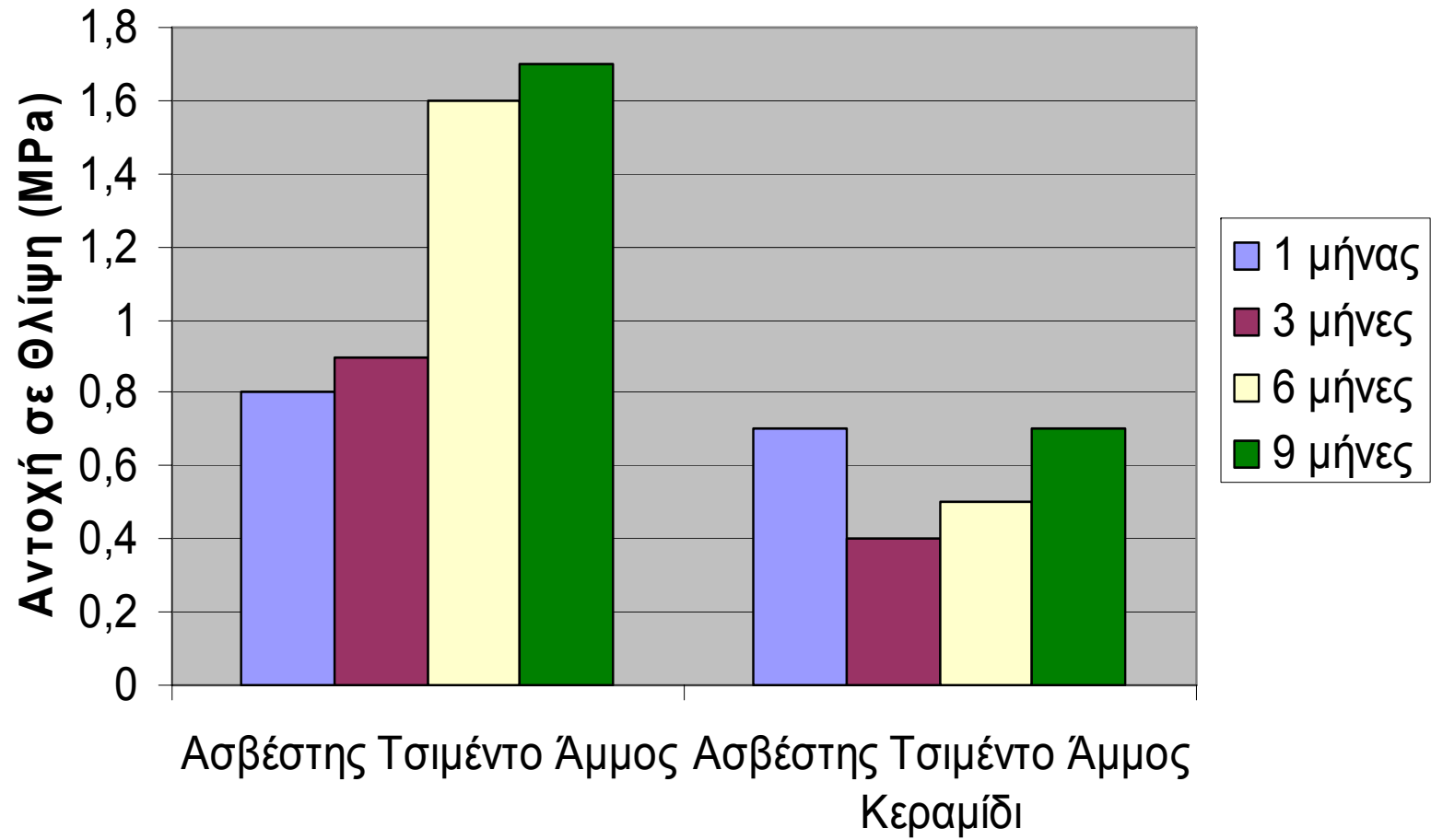
Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας σε σχέση με την θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων (Κριτήριο Πενέλλη, Παπαγιάννη)

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)

## Αντοχή σε θλίψη τσιμεντιτικών κονιαμάτων



## 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>Εφελκυσμός (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
ΟΡΙΑ ΑΠΟΔΟΧΗΣ	160-265	1.60-1.90	30-42	3.0-14.0	0.10-1.50

# ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

## Κονιάματα με αδρανές θραυσμένο κεραμικό

*Στις συνθέσεις με αδρανές σπασμένο κεραμίδι παρουσιάζεται μία άμεση επίδραση στη μικροδομή του κονιάματος από την μικροδομή του κεραμιδιού (π.χ. ακτίνα πόρων, συνολικό πορώδες, συνολικός όγκος)*

## Γενικές παρατηρήσεις

*Μείωση του συνολικού πορώδους στη διάρκεια του χρόνου*

*(μειούμενο από 1 – 9 μήνες)*

*Μείωση του συνολικού όγκου*

*Μείωση της μέσης ακτίνας πόρων*

*Αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας*

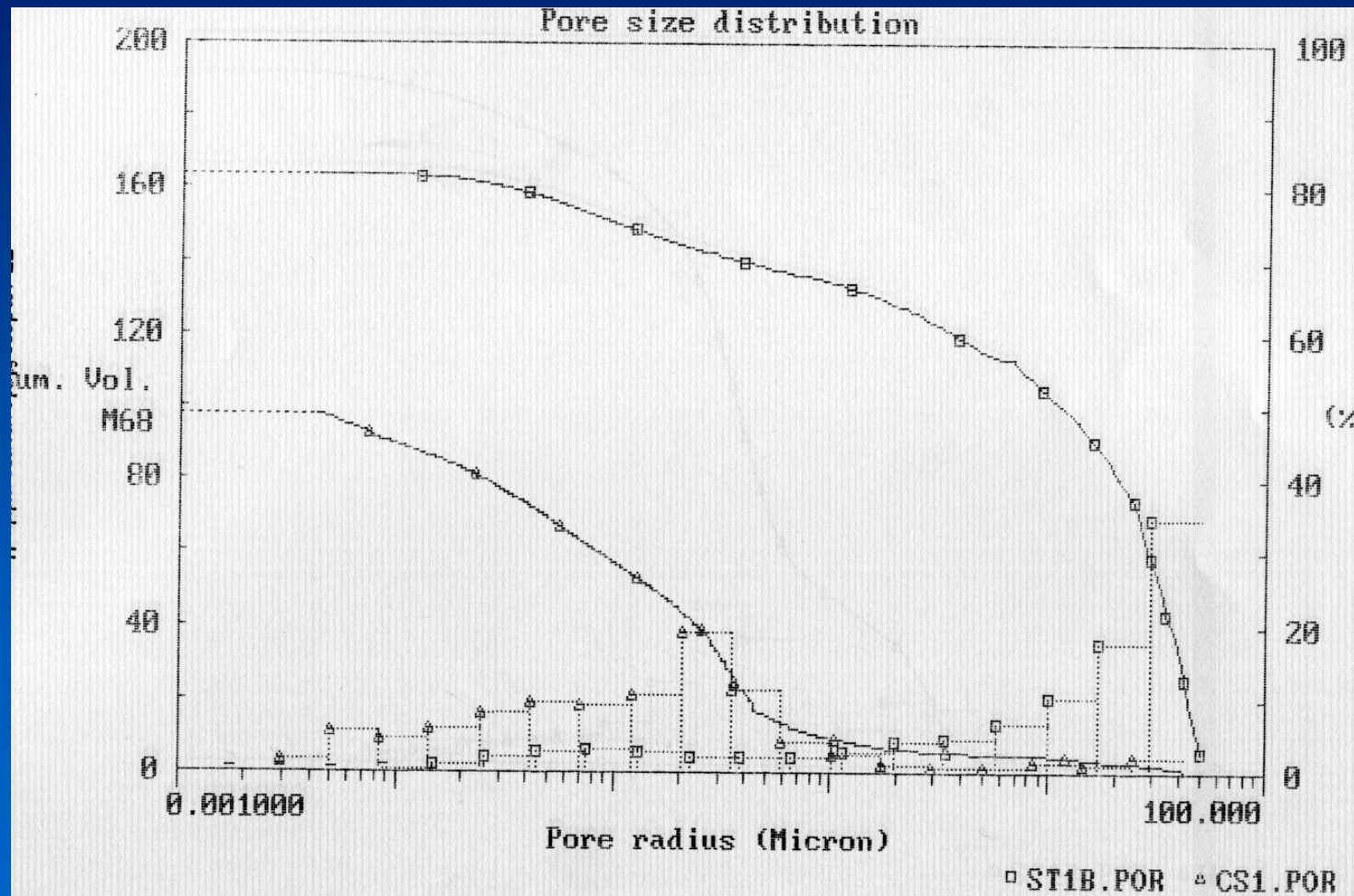
## ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Για την αποτίμηση της συμβατότητας της μικροδομής είναι απαραίτητο να εξεταστούν τα κονιόματα 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

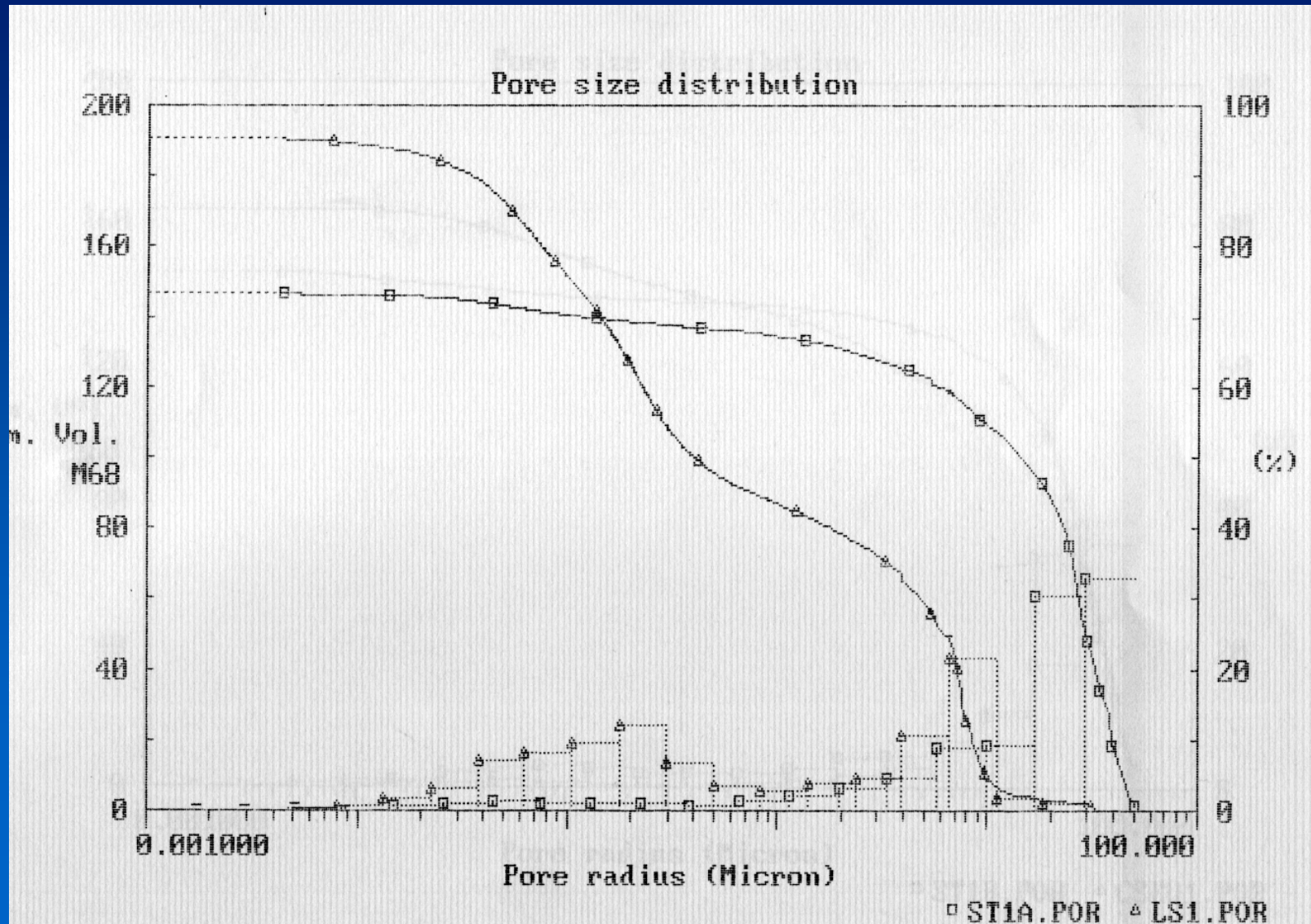
θα επιβεβαιώσουν την συμβατότητα, ή μη, των κονιαμάτων αυτών με παραδοσιακά δομικά στοιχεία

# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΠΩΡΟΛΙΘΟΥ - ΤΣΙΜΕΝΤΙΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ





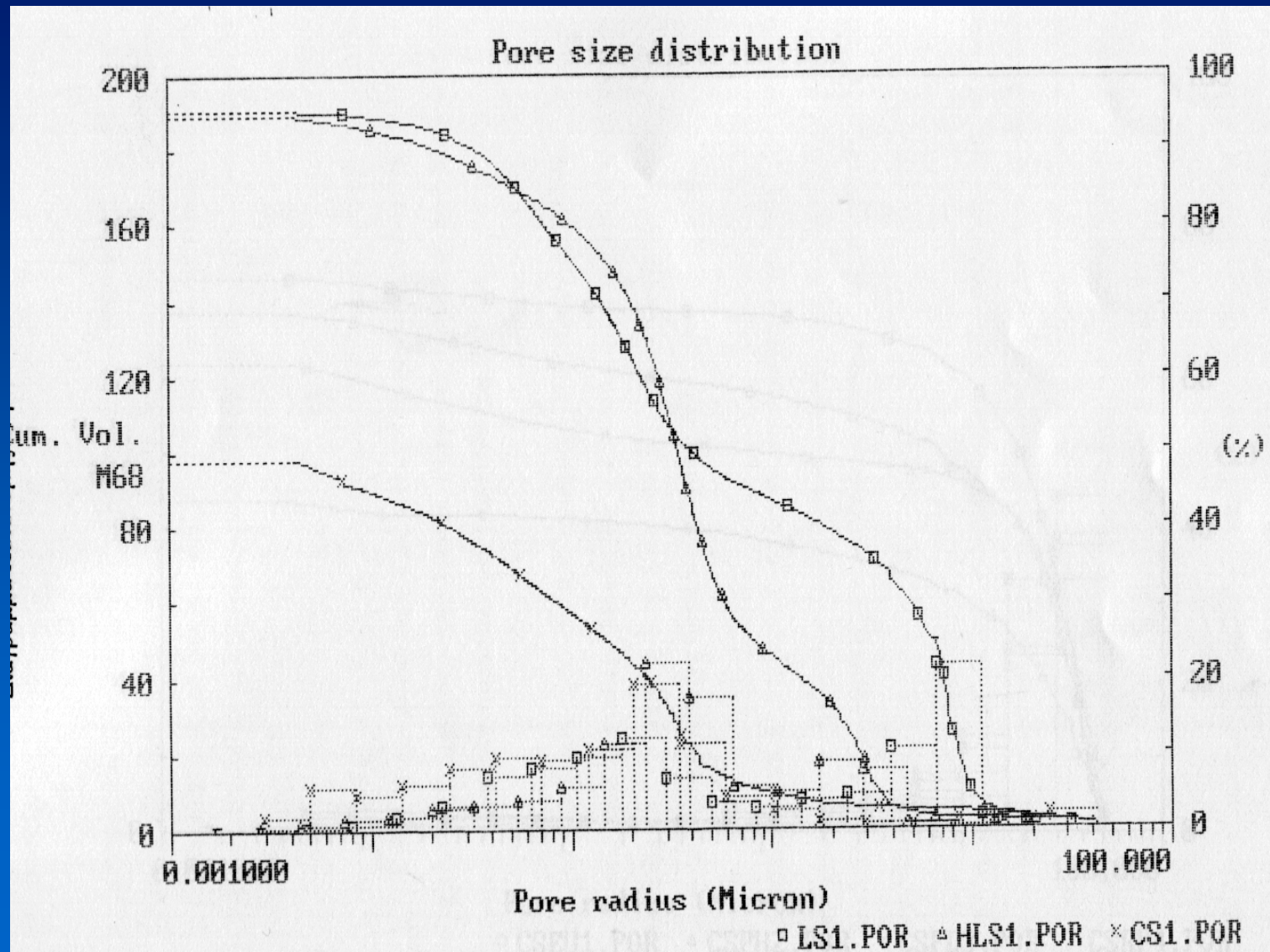
# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΠΩΡΟΛΙΘΟΥ - ΤΣΙΜΕΝΤΙΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ



## Η συσχέτιση μεταξύ συντελεστή υδατοαπορρόφησης και ειδικής επιφάνειας

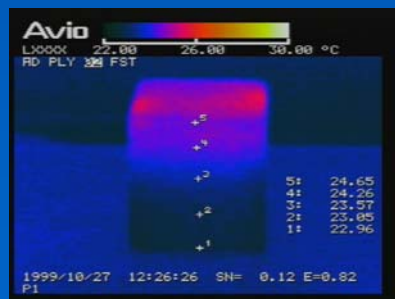
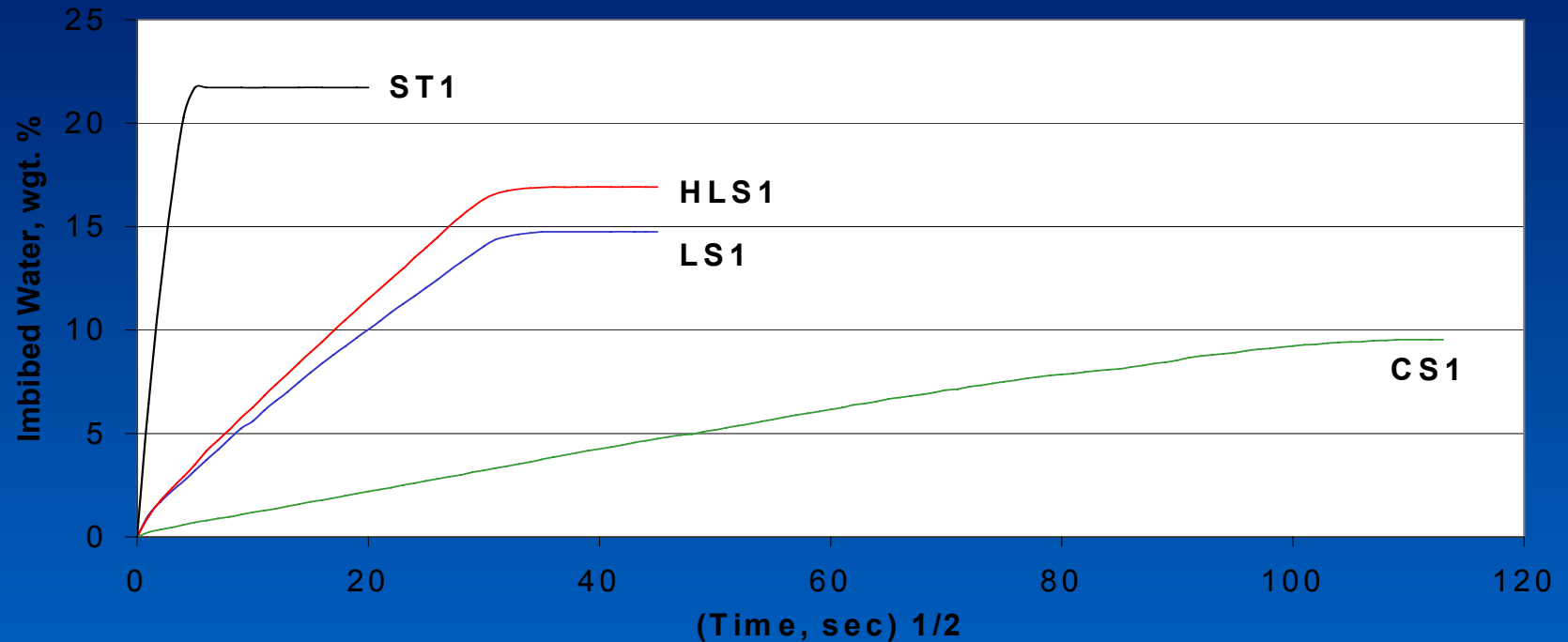
	<b>ΕΙΔΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣ ΗΣ (g/cm<sup>2</sup>*sec<sup>1/2</sup>)</b>
<b>ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ</b>	<b>0.55</b>	<b>0.379</b>
<b>ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ</b>	<b>2.37 – 2.99</b>	<b>0.039 – 0.050</b>
<b>ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ</b>	<b>3.59 – 4.24</b>	<b>0.036 – 0.045</b>
<b>ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ</b>	<b>1.85 – 2.22</b>	<b>0.046 – 0.065</b>
<b>ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΑΣΒΕΤΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ</b>	<b>5.31 – 9.03</b>	<b>0.009 – 0.017</b>

# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

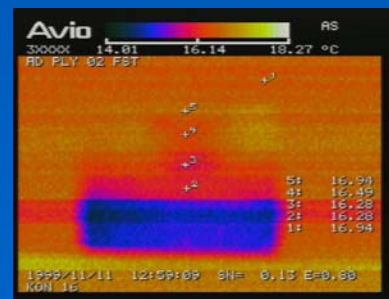


# ΔΟΚΙΜΕΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ

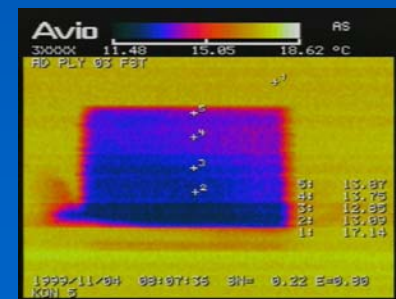
Water Absorption of Porous Stone & Mortars



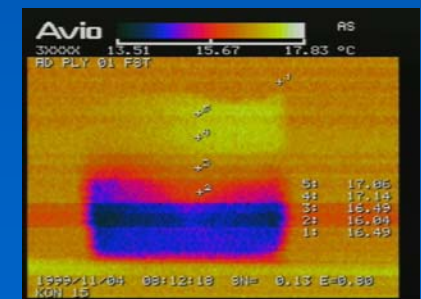
ΛΙΘΟΣ



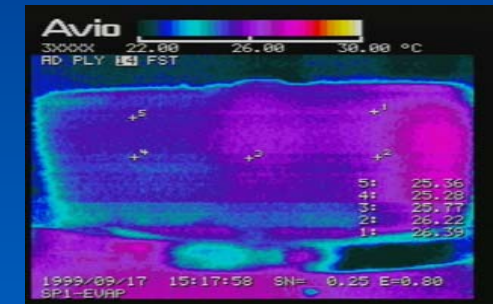
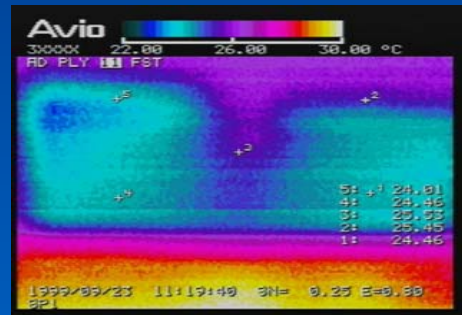
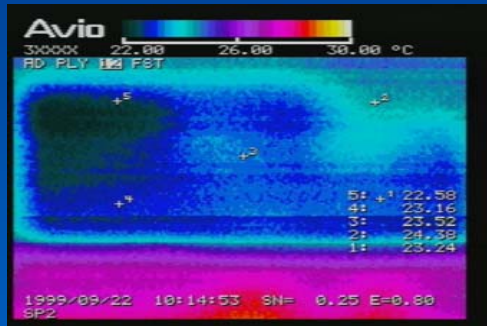
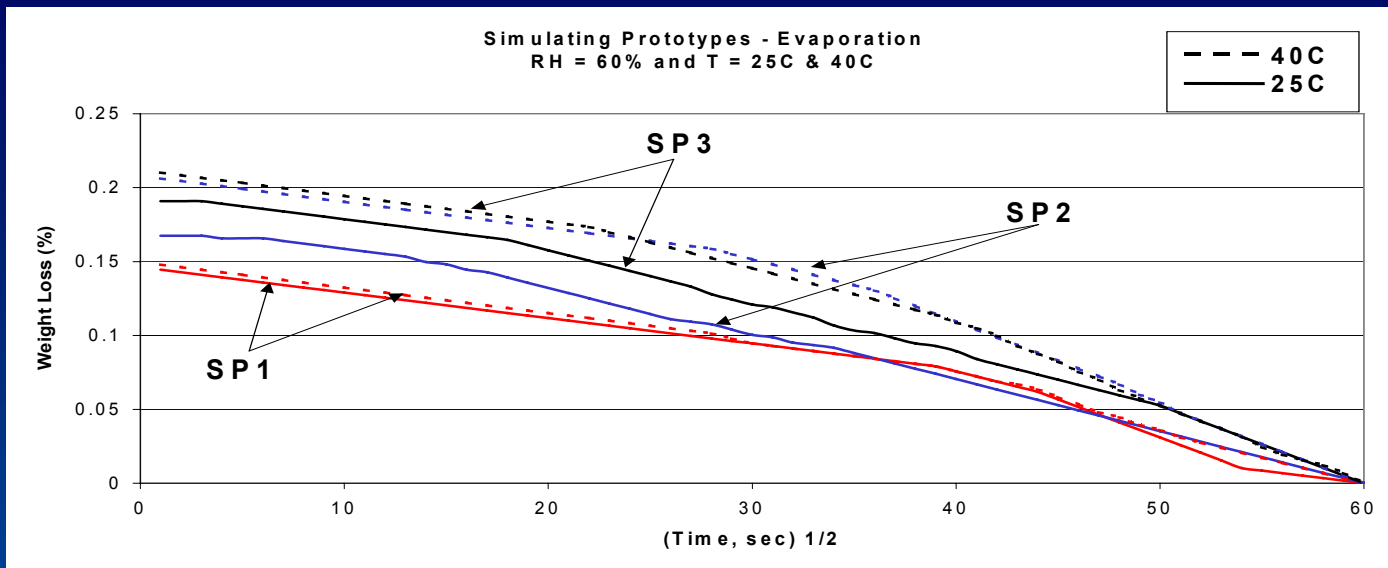
ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ



ΤΣΙΜΕΝΤΙΤΙΚΟ



ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟ



## 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 διπτή συμπεριφορά (διαχωρισμός φάσεων καταλήγει σε κατανομή πόρων δύο ταχυτήτων)

***ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ –  
ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ  
ΜΕ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ***

# ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

## ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ (PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS)

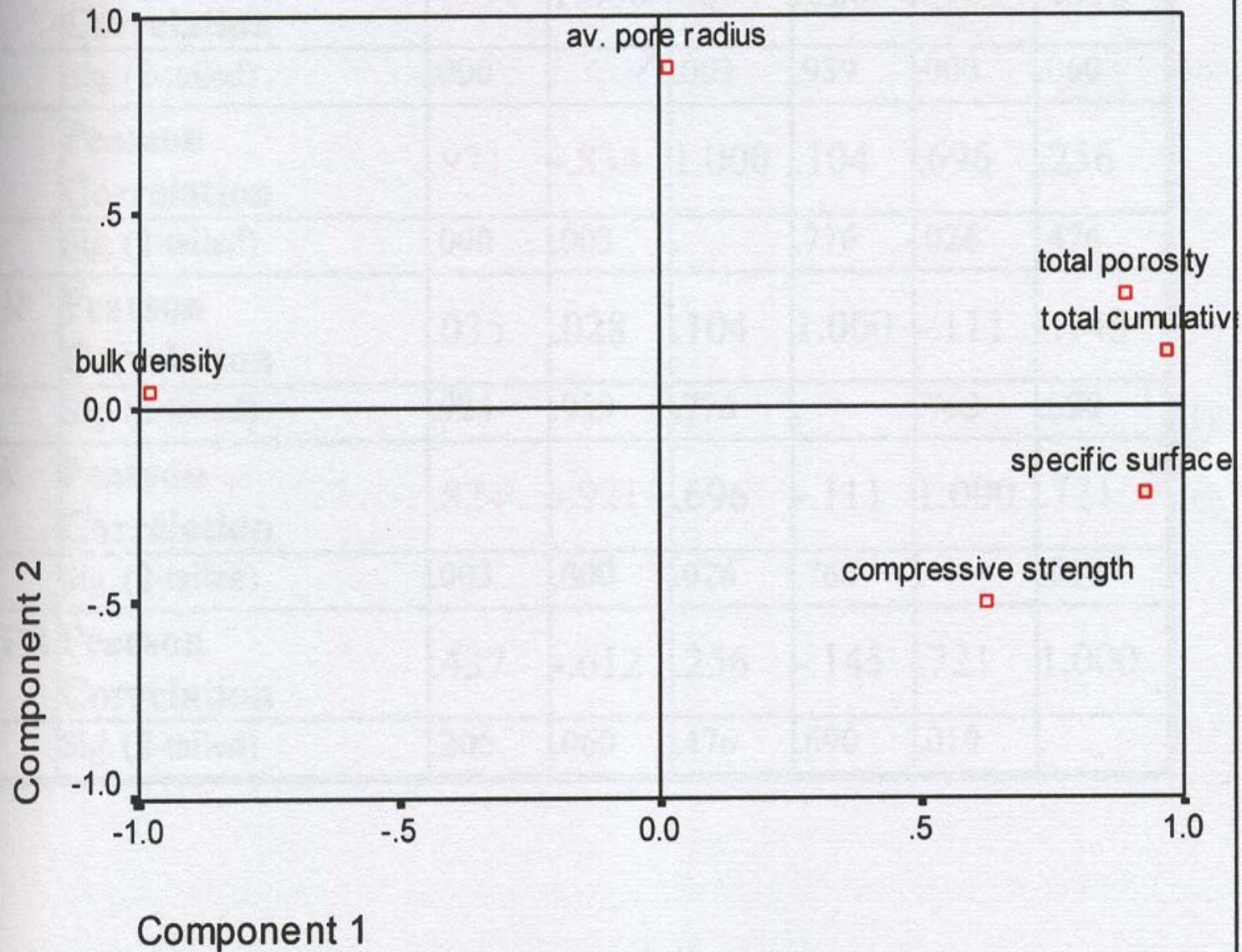
Οι στόχοι στους οποίους επικεντρώθηκε η ανάλυση είναι:

- Να βρεθεί ποιες από τις ανεξάρτητες ιδιότητες της μικροδομής σχετίζονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τις μηχανικές αντοχές και ποιες όχι.
- Να γίνει προσπάθεια ομαδοποίησης των διαφόρων ειδών κονιαμάτων όσον αφορά την συμπεριφορά τους, με κριτήρια τις τιμές των μεταβλητών και τις προδιαγραφές τόσο στη μικροδομή όσο και στις μηχανικές αντοχές.

Σαν δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν όλα τα αποτελέσματα από την ποροσιμετρία υδραργύρου και τις μετρήσεις μηχανικών αντοχών

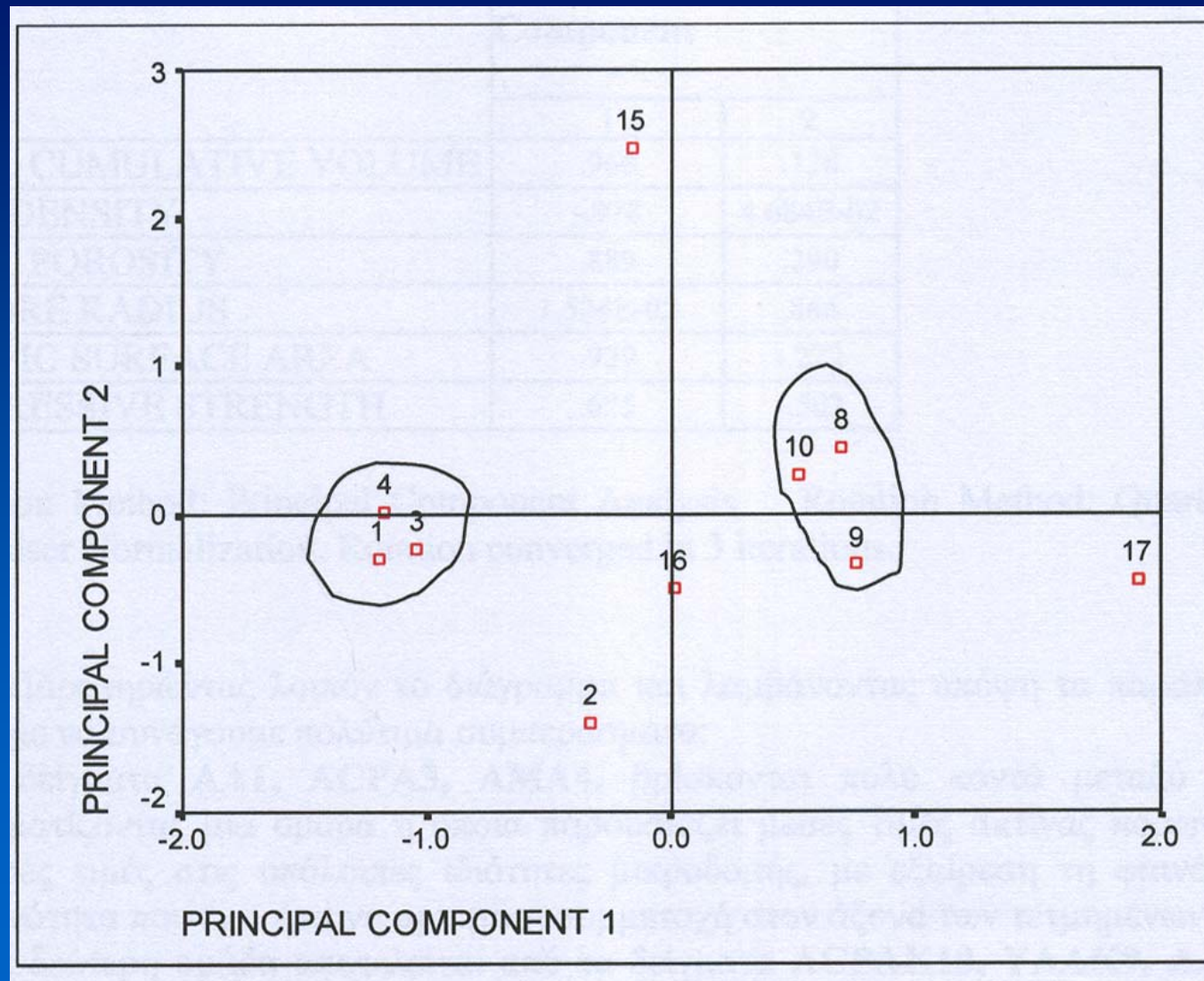


## Component Plot in Rotated Space



	Όγκος	Πυκνότητα	Ολικό Πορώδες	Μέση Ακτίνα Πόρων	Ειδική Επιφάνεια
Όγκος	1	<b>-.931</b>	<b>.971</b>	.035	<b>.824</b>
Πυκνότητα	<b>-.931</b>	1	<b>-.834</b>	.028	<b>-.921</b>
Ολικό Πορώδες	<b>.971</b>	<b>-.834</b>	1	.104	<b>.696</b>
Ειδική Επιφάνεια	<b>.824</b>	<b>-.921</b>	<b>.696</b>	<b>-.111</b>	1
Θλίψη	<b>.437</b>	<b>-.612</b>	<b>.256</b>	<b>-.145</b>	<b>.721</b>

# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ

Οι μηχανικές αντοχές (εκφραζόμενες από την αντοχή σε θλίψη) σχετίζονται με την ειδική επιφάνεια.

Ο ολικός ειδικός όγκος συνδέεται με την ειδική επιφάνεια και αντιστρόφως ανάλογα με την πυκνότητα.

Δεν μπορεί να γίνει καμία συσχέτιση της μέσης ακτίνας πόρων με τις υπόλοιπες ιδιότητες.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ**

Η συμπεριφορά των κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου κατά την περίοδο πρόσληψης των μηχανικών αντοχών είναι ιδιαίτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Τόσο τα χαρακτηριστικά της μικροδομής όσο και αυτά των μηχανικών αντοχών σταθεροποιούνται μετά τους τρεις μήνες από την παρασκευή τους.

Επίσης παρατηρείται αύξηση της ειδικής επιφάνειας, μεγέθους ιδιαίτερος σημαντικού, για την ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων και άρα μηχανικών αντοχών. Κάτι τέτοιο παρατηρείται σε μικρότερο βαθμό στις συνθέσεις με ποζολανικά πρόσθετα και ειδικότερα κεραμάλευρο

**ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΠΗΞΗΣ ΚΑΙ  
ΠΡΟΣΛΗΨΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ  
ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΤΑ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΧΡΗΣΙΜΑ  
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΟΛΥΤΙΜΑ ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ  
ΑΡΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

1. Η αντίστροφη μηχανική προσέγγιση αποτελεί την βάση της μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης. Είναι όμως απαραίτητο να υπάρχουν περαιτέρω στοιχεία όπως προκύπτουν από:

- *Κριτήρια αποτίμησης νωπών κονιαμάτων*
- *Κριτήρια αποτίμησης της επιτελεστικότητας*
- *Παραμέτρους που ελέγχουν την ανάπτυξη της μικροδομής και άρα της συμβατότητας*
- *Συσχέτιση αποτελεσμάτων για τον καθορισμό των παραμέτρων που ελέγχουν την ανάπτυξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων, την σχέση των ιδιοτήτων μεταξύ τους και με τις πρώτες ύλες παρασκευής των κονιαμάτων*

2. Κρίνεται αναγκαία η χρήση προτύπου για την καταγραφή των ιδιοτήτων των νωπών κονιαμάτων και την αποτίμηση αυτών. Εγείρεται η ανάγκη ύπαρξης προτύπου που θα αναφέρεται στα παραδοσιακά υλικά
3. Κριτήριο που ελέγχει την επιτελεστικότητα αποτελεί ο λόγος της εφελκυστικής προς την θλιπτική αντοχή, ο οποίος πρέπει και να βρίσκεται σε όρια από  $1/4 - 1/6$  για τα κονιάματα από παραδοσιακά υλικά. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι περισσότερες από τις προτεινόμενες συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης πληρούν αυτό το κριτήριο. Κριτήριο αποτελούν και οι απόλυτες τιμές των μηχανικών αντοχών, οι οποίες πρέπει να εκτιμώνται κατά περίπτωση ανάλογα με την χρήση του κονιάματος αποκατάστασης και τις αντοχές του βασικού δομικού υλικού.

4. Η αποτίμηση της συμβατότητας της μικροδομής ελέγχεται τόσο από τα όρια αποδοχής που έχουν προκύψει από τα ιστορικά κονιάματα, όσο και από την μελέτη της ανάπτυξης της και την σύγκριση με τα δομικά υλικά σε υδρομετρικές συνθήκες υδατοαπορρόφησης και εξάτμισης

Η αποτίμηση της συμβατότητας της μικροδομής δείχνει ότι:

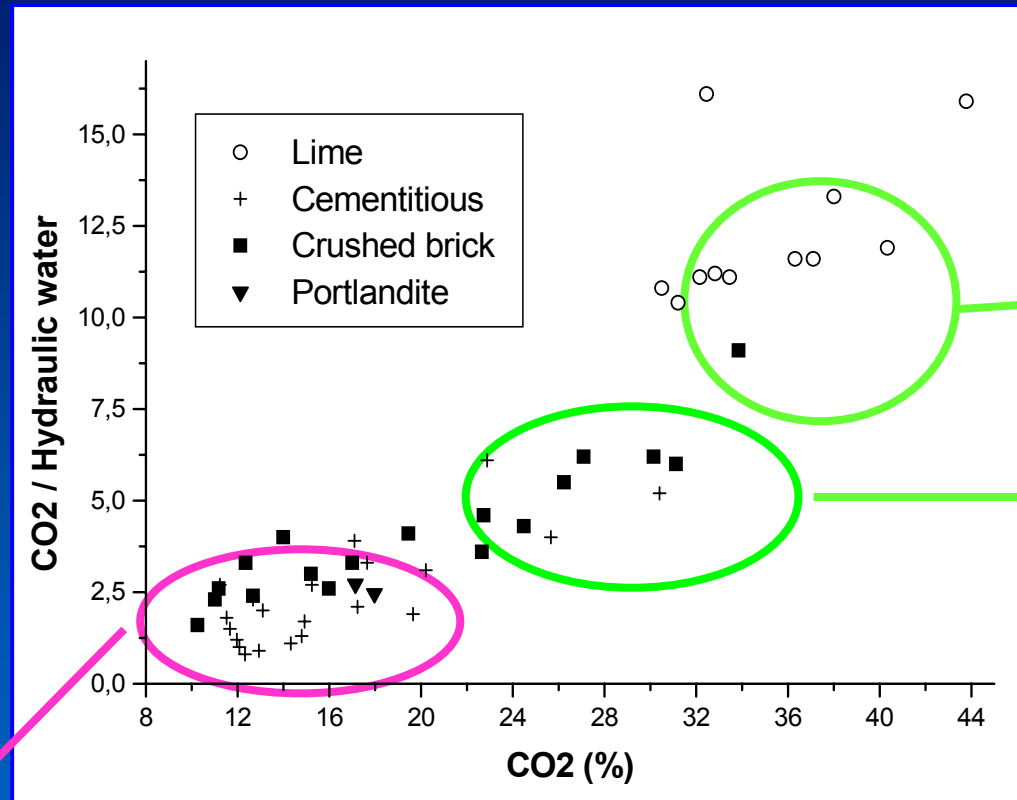
- Οι κατηγορίες των τυπικών ασβεστοτικών κονιαμάτων, των κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου και των κονιαμάτων με ποζολανικά πρόσθετα εμφανίζονται συμβατά τόσο στην ανάπτυξη της μικροδομής, όσο και στην συμπεριφορά τους σε συνθήκες εξάτμισης και υδατοαπορρόφησης.
- Η παράμετρος της ειδικής επιφάνειας έχει άμεση σχέση με τον συντελεστή υδατοαπορρόφησης.
- Οι κατηγορίες των τσιμεντιτικών κονιαμάτων σε διάφορες αναλογίες συμμετοχής του τσιμέντου σε αυτά, αποδεικνύονται ως ασύμβατα είτε σε όρους ανάπτυξης της μικροδομής, είτε σε όρους συμβατότητας κατά την υδατοαπορρόφηση και εξάτμιση, είτε και στα δύο



5. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης επιτρέπει την συσχέτιση των ιδιοτήτων μεταξύ τους αλλά και με τις πρώτες ύλες παρασκευής:

- Υψηλές τιμές ειδικής επιφάνειας με υψηλές μηχανικές αντοχές και άμεση σχέση αυτών με την χρήση υδραυλικής ασβέστου και κεραμάλευρου
- Χαμηλές τιμές ειδικής επιφάνειας με υψηλές τιμές πορώδους και ολικού ειδικού όγκου με την χρήση υδρασβέστου
- Μεγαλύτερες αναλογίες συνδετικού υλικού με υψηλότερες μηχανικές αντοχές και μεγαλύτερες τιμές ειδικής επιφάνειας
- Χρήση θραυσμένου κεραμικού οδηγεί σε υψηλότερες εν γένει μηχανικές αντοχές, αλλά και έλεγχος των παραμέτρων της μικροδομής από αυτό

Διάγραμμα εξέλιξης της ενανθράκωσης σε σχέση με την ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων

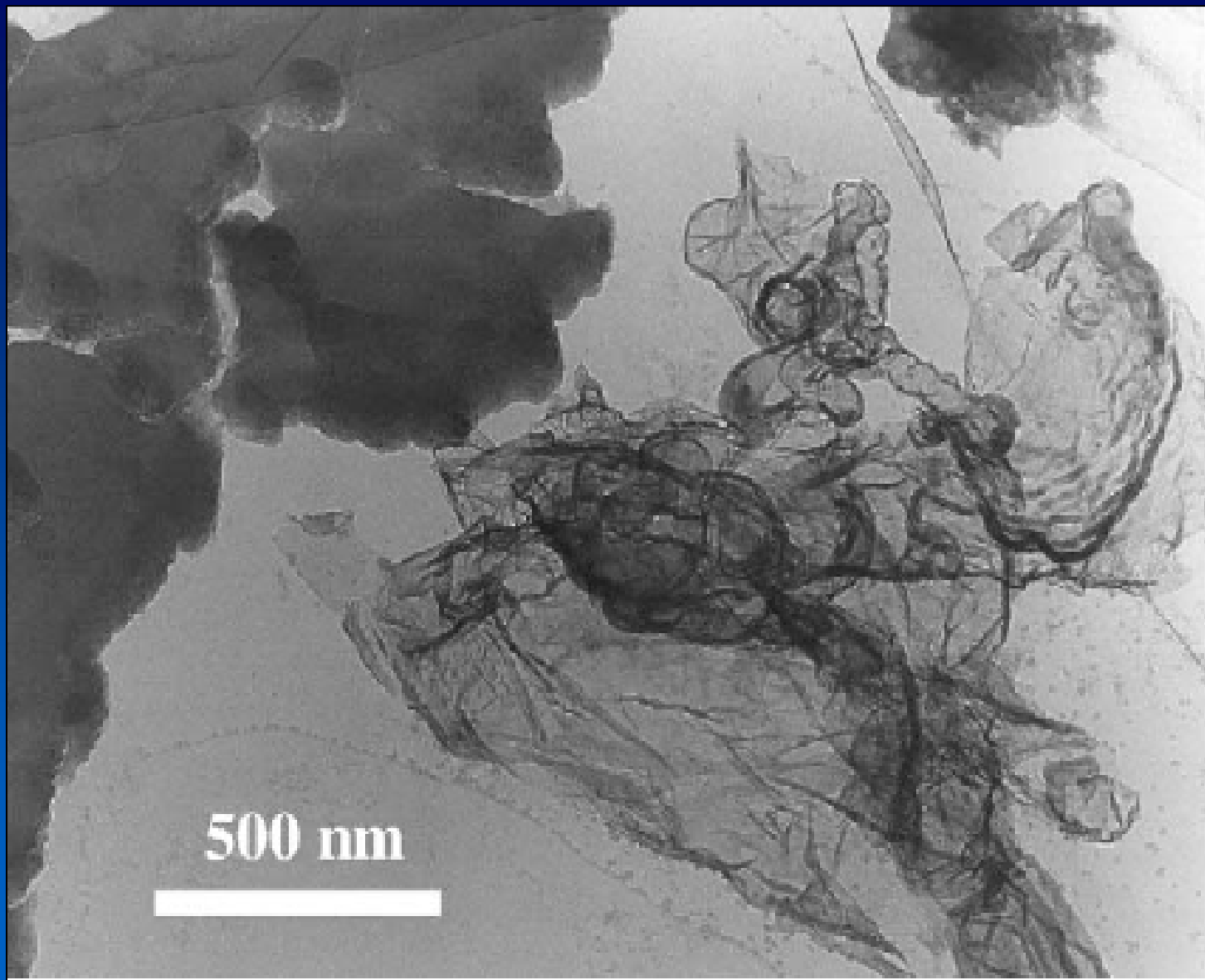


**Υδραυλικά  
Κονιάματα**

**Ασβεστιτικά  
Κονιάματα**

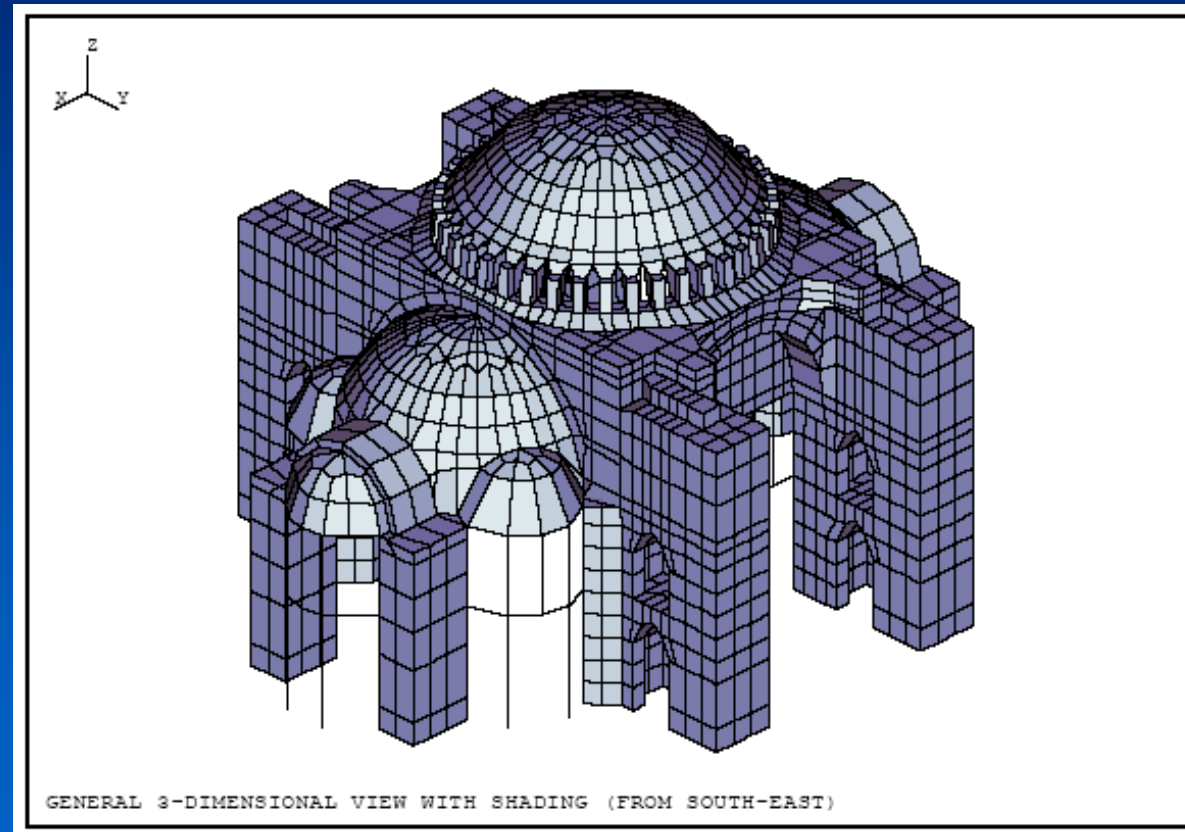
**Κονιάματα με  
ποζολανικά  
πρόσθετα**

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



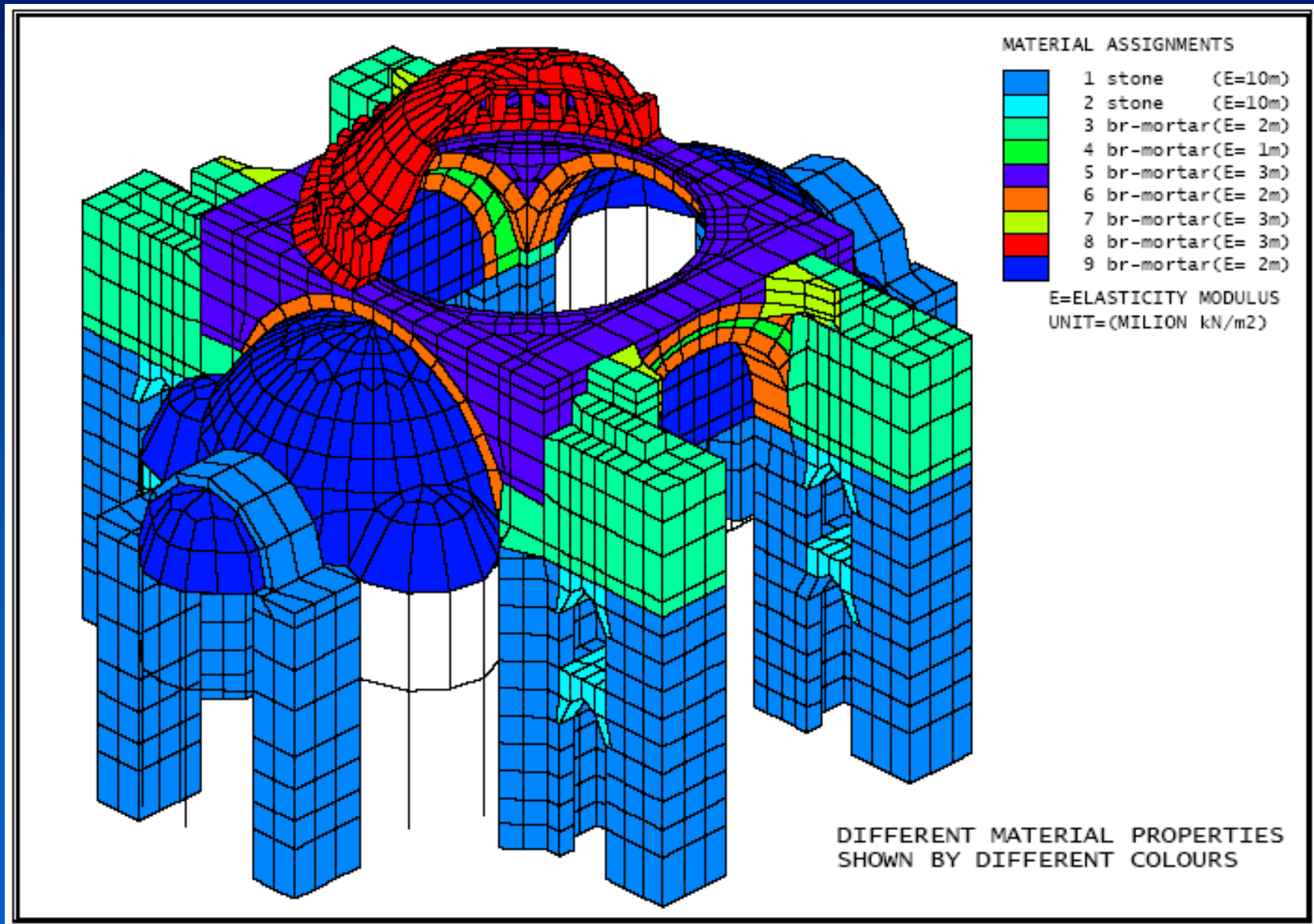
Μικρογραφία TEM πάστας με Cab-O-Sil™. Δημιουργία ένυδρης αργιλοπυριτικής ένωσης ασβεστίου (C-S-H) μετά από 4 ώρες. Θερμοκρασία αντίδρασης 800 °C.

# ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΝΗΜΕΙΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ



*Γενική ισομετρική άποψη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της Αγιά Σοφιάς*

# ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

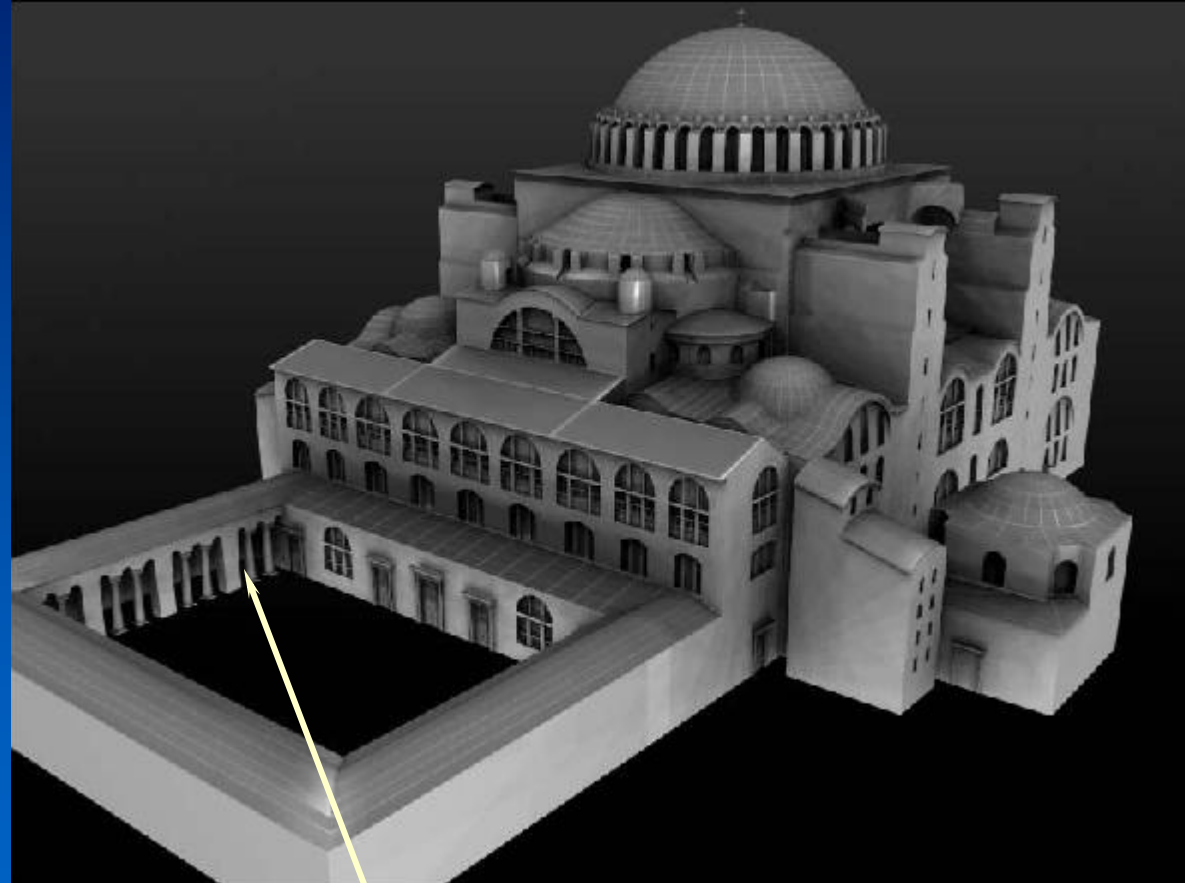


*Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης  
σχεδιασμού συμβατών κονιαμάτων  
αποκατάστασης και της προσομοίωσης σεισμικής  
συμπεριφοράς με το βελτιωμένο μοντέλο  
πεπερασμένων στοιχείων έγινε εκτεταμένη  
αποκατάσταση του μνημείου.*

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

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

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



*Η τοιχοποιία στην οποία έγινε η εφαρμογή*



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



*Η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ*

**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*

## Μακροσκοπικές παρατηρήσεις στην τοιχοποιία

### *Προβλήματα του τμήματος της τοιχοποιίας στην οποία έγινε η πιλοτική εφαρμογή*

- Ανερχόμενη Υγρασία
- Φθαρμένη επιφάνεια από μολυσμένη ατμόσφαιρα
- Χρήση Ασύμβατων Υλικών σε προγενέστερες επεμβάσεις αποκατάστασης προκαλούν φαινόμενα φθοράς
- Μεγάλη κάθετη σχισμή μεταξύ των τούβλων και των κονιαμάτων



**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*



Μικροσκοπικές παρατηρήσεις στην τοιχοποιία

*Μικροσκοπία Οπτικών  
Ινών  
Επιφανειακή φθορά  
κονιαμάτων*

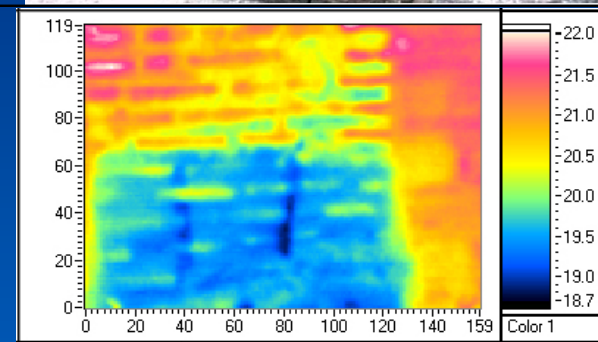
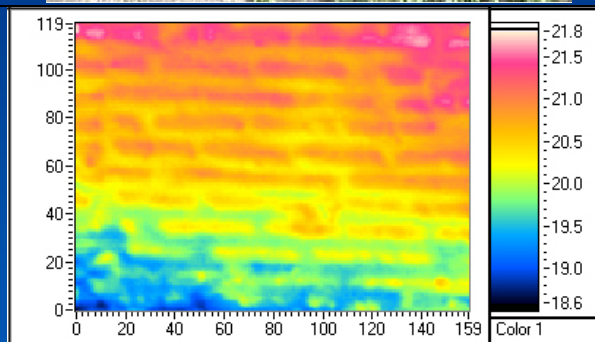
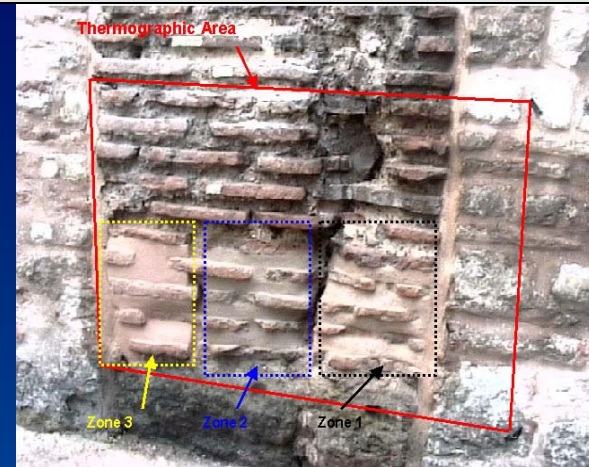
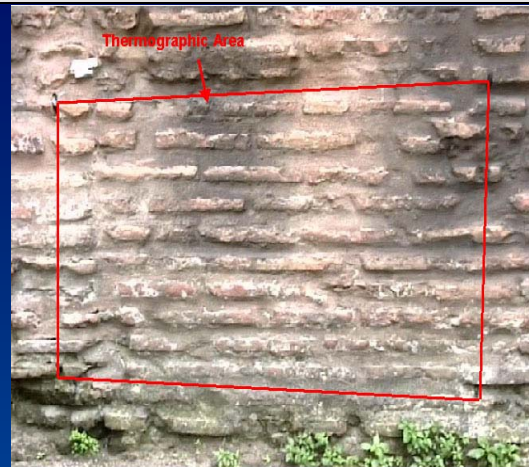


Επιφανειακό επίπεδο  
Εξαιρετικά φθαρμένο

Υπόστρωμα: υγιές,  
ισχυρό κονίαμα,  
ιδιαίτερώς συνεκτικό



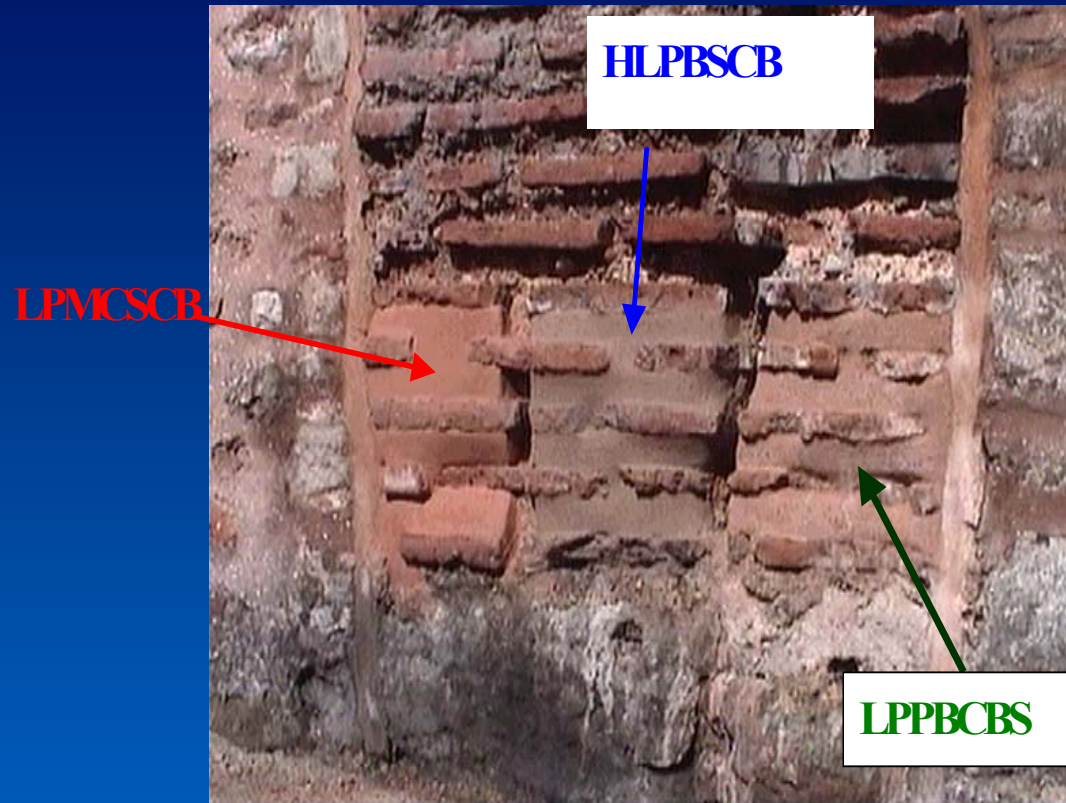
## ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ



*Εξέταση με Θερμογραφία στην επιλεγμένη τοιχοποιία. Προβλήματα από ανερχόμενη υγρασία*

*Θερμογραφία υπερύθρου μετά την πιλοτική εφαρμογή. Παρατηρείται ομοιόμορφη συμπεριφορά και στις τρεις ζώνες εφαρμογής.*

## Τα κονιάματα μετά την εφαρμογή



- ❖ *Κονίαμα με Υδράσβεστο και Κεραμάλευρο ως ποζολανικό πρόσθετο και μίγμα αδρανών Θραυσμένου 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*



**ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ  
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ  
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ  
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**

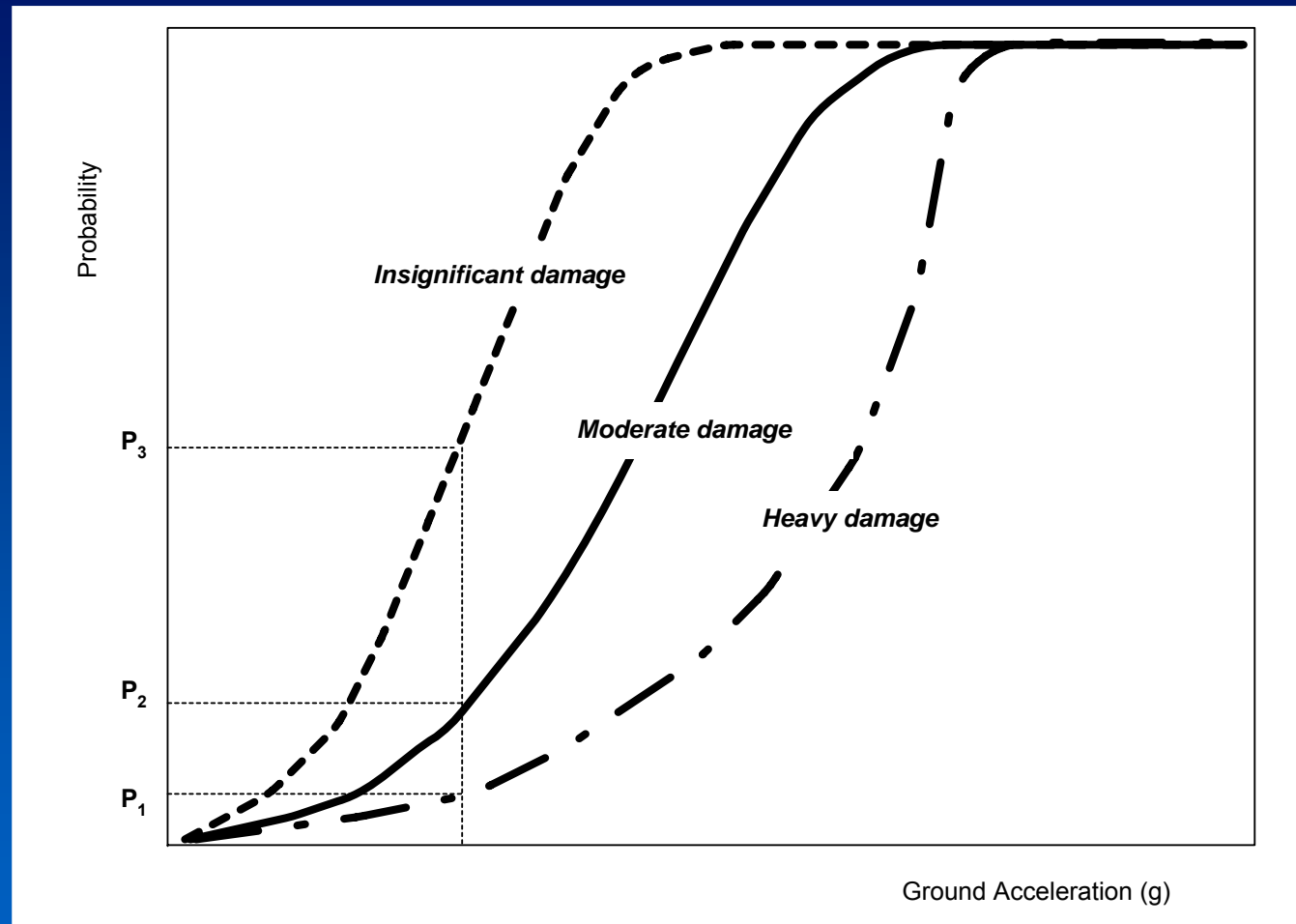
# Σχεδιασμός Αντισεισμικής Προστασίας Μνημείων

## Σκοπός

Πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής και των επιμέρους δομικών στοιχείων της σε σεισμική δράση.

1. Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου. Προσομοίωση της κατασκευής & πρόβλεψη συμπεριφοράς σε σεισμικές δράσεις
2. Δεδομένα σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής
3. Καθορισμός κριτηρίων για ταυτοποίηση των καταστάσεων βλάβης
4. Καθορισμός παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφορά μιας κατασκευής σε σεισμικές δράσεις (μηχανικά χαρακτηριστικά δομικών υλικών, γεωμετρία κατασκευής)
5. Επίλυση για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων & διαφορετικές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων.
6. Ανάπτυξη καμπυλών θραυστότητας οι οποίες συσχετίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών με την εδαφική επιτάχυνση & την πιθανότητα εμφάνισης διαφορετικού βαθμού βλάβης στην κατασκευή.
7. Τελική επιλογή των υλικών & τεχνικών συντήρησης, αποκατάστασης & ενίσχυσης σύμφωνα με τα δεδομένα των καμπυλών θραυστότητας.

## Καμπύλες Θραυστότητας



Για την ίδια τιμή εδαφικής επιτάχυνσης & για την ίδια κατασκευή η πιθανότητα να παρουσιαστεί συγκεκριμένος βαθμός βλάβης σχετίζεται με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών (αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας)

Στο παραπάνω πλαίσιο ένα ολοκληρωμένο, διεπιστημονικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε από το ΕΜΠ.

### Σκοπός του προγράμματος

- Μελέτη της επίδρασης των κονιαμάτων στην στατική και δυναμική συμπεριφορά των παραδοσιακών τοιχοποιιών της Βυζαντινής περιόδου
- Επιλογή κατάλληλων κονιαμάτων αποκατάστασης τα οποία θα συνεισφέρουν στην βέλτιστη απόκριση των ιστορικών κατασκευών σε στατική και δυναμική καταπόνηση

1. Σχεδιασμός και παραγωγή κονιαμάτων μεγάλων αδρανών (σκυρόδεμα) - Αποτίμηση των φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους - Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Επ. Υπεύθ.: Καθ. Α. Μοροπούλου

2. Μελέτη της συμπεριφοράς πιλοτικών τοιχοποιιών σε στατική και δυναμική καταπόνηση - Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Εργ. Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Επ. Υπευθ. Καθ. Π. Καρύδης

3. Μελέτη της συμπεριφοράς συγκεκριμένου μνημείου διαμέσου πεπερασμένων στοιχείων - Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Δομοστατικής, Επ. Υπευθ. Καθ. Κ. Συρμακέζης

Επιλογή κατάλληλων κονιαμάτων αποκατάστασης τα οποία θα συνεισφέρουν στην βέλτιστη απόκριση των ιστορικών κατασκευών σε στατική και δυναμική καταπόνηση

1. Σχεδιασμός και παραγωγή κονιαμάτων μεγάλων αδρανών (σκυρόδεμα) - Αποτίμηση των φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους - Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Επ. Υπεύθ.: Καθ. Α. Μοροπούλου

### Αρχή του σχεδιασμού

Η μελέτη των ιστορικών κατασκευών τα οποία παρουσίασαν άριστη συμπεριφορά σε σεισμούς μπορεί να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για

- ο Την αποκωδικοποίηση των δομικών υλικών και των τεχνικών κατασκευής
- ο Την αναπαραγωγή υλικών με ανάλογη συμπεριφορά

Χαρακτηριστικά Βυζαντινά μνημεία τα οποία παρουσίασαν άριστη συμπεριφορά σε σεισμούς είναι :

- Η Αγιά Σοφία στην Κωνσταντινούπολη
- Ο Άγιος Μιχαήλ στο Κίεβο

### Υλικά Κατασκευής

παρουσίασαν  
ανάλογη  
φυσικοχημική και  
μηχανική  
συμπεριφορά και  
τεχνολογία  
παραγωγής

Αγιά Σοφιά



Άγιος Μιχαήλ

## Σκυροδέματα Κατασκευών Βυζαντινής Περιόδου

### Ανάλογα Φυσικοχημικά και Μηχανικά Χαρακτηριστικά

- ο Υψηλή Εφελκυστική Αντοχή
- ο Χαμηλό Μέτρο Ελαστικότητας
- ο Χαμηλές τιμές πυκνότητας
- ο Παρουσία άμορφων ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων σε μορφή gel στην συνδετική κονία τα οποία παρέχουν μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας
- ο Καλή πρόσφυση μεταξύ
  - ο Συνδετικής Κονίας-Αδρανών
  - ο Σκυροδέματος-Οπτόπλινθου



## Κριτήρια για την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης όσον αφορά στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά

1. Ανάλογη **μικροδομή** με ιστορικό σκυρόδεμα και οπτόπλινθο
2. **Χημική Συγγένεια** με ιστορικό σκυρόδεμα και οπτόπλινθο (χημική πρόσφυση σκυροδέματος/ οπτόπλινθου εκτός από μηχανική)
3. **Απουσία παραγωγής παραπροϊόντων** που μπορεί να βλάψουν τα υπό γειτνίαση δομικά υλικά

Κριτήρια για την αποτίμηση των κονιαμάτων  
αποκατάστασης όσον αφορά στα μηχανικά  
χαρακτηριστικά

1. Αντοχή σε Κάμψη:  $>2 \text{ MPa}$
2. Μέτρο Ελαστικότητας  $<14000 \text{ MPa}$
3. Θλιπτική Αντοχή  $\sim 8-14 \text{ MPa}$  (δεδομένου ότι το σκυρόδεμα πρέπει να παρουσιάζει χαμηλότερη θλιπτική αντοχή από τα δομικά στοιχεία - Για τους ιστορικούς πλίνθους  $F_{c,b} \sim 15-18 \text{ MPa}$ )

## Σχεδιασμός των συνθέσεων σκυροδεμάτων

### Επιλογή πρώτων υλών

Πρώτες ύλες παραδοσιακού τύπου προκειμένου να διασφαλιστεί η φυσικοχημική συμβατότητα με τα αυθεντικά υλικά

#### Συνδετικές Κονίες

Αερίκος ασβέστης, Φυσικός Υδραυλικός Ασβέστης (NHL3.5-Z σύμφωνα με το ENV 459-1)

#### Ποζολανικά Πρόσθετα

Φυσικής Προέλευσης (Μηλαϊκή Γη)

Τεχνητής Προέλευσης (Μετακαολίνης)

**Τσιμέντο:** για συγκριτικούς λόγους

Με την συγκεκριμένη έρευνα: επίτευξη 3 κύριων στόχων

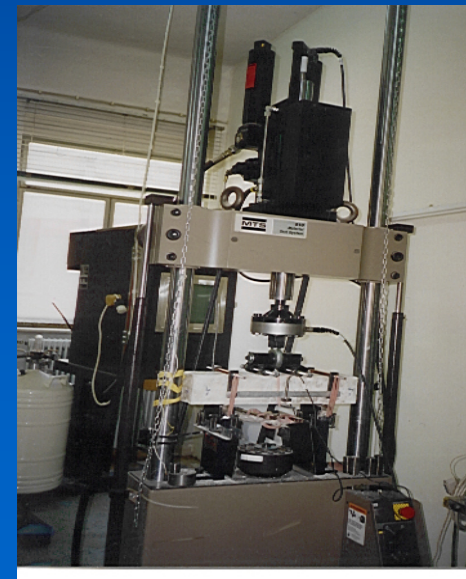
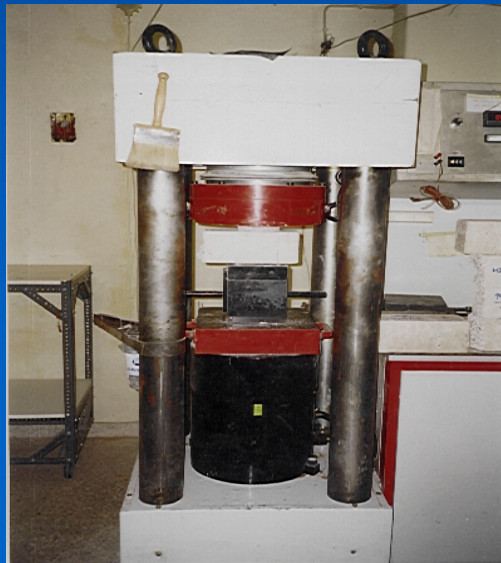
- *Επίδραση της φύσης των αδρανών στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων.*
- *Επίδραση της φύσης της συνδετικής κονίας στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων.*
- *Παραγωγή σκυροδεμάτων ανάλογων με τα ιστορικά - Μελέτη συμπεριφοράς πιλοτικών τοιχοποιιών σε στατική, δυναμική καταπόνηση- Μελέτη συμπεριφοράς συγκεκριμένου μνημείου σε στατική, δυναμική καταπόνηση (πεπερασμένα στοιχεία)*

# ΤΕΧΝΙΚΕΣ

## Μηχανικά Χαρακτηριστικά

ο Αντοχή σε Θλίψη (ASTM C 116) [TONI  
TECHNIK INSTRUMENT, μέγιστο φορτίο: 3000  
KN, Ρυθμός φόρτισης: 0.5-1KN/sec]

ο Αντοχή σε Κάμψη (ASTM C 78-00) [AVERY -  
DENISON 7122, μέγιστο φορτίο: 2.000KN]  
στα χρονικά διαστήματα των 1, 3, 6 μηνών.



## ΤΕΧΝΙΚΕΣ

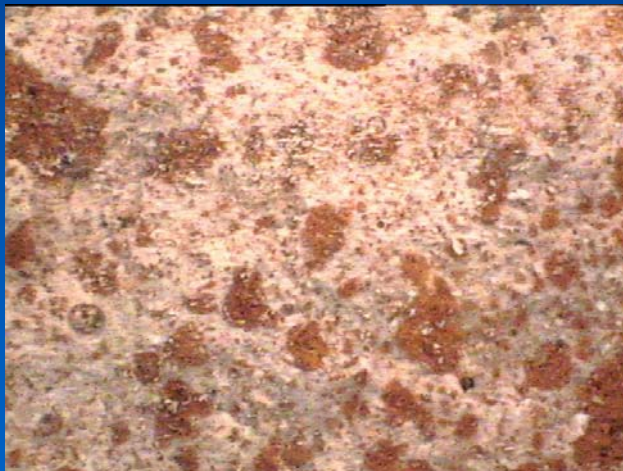
ο Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών για την αποτίμηση της συνάφειας των αδρανών με την συνδετική κονία, την ομογένεια της συνδετικής ύλης και τυχόν ύπαρξη μικρορωγμών

ο Υπερηχοσκόπηση για την αποτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας Ed (CNS Farnell-Pundit 5, transducers frequency: 54 KHz)

ο Διαφορική Θερμική και Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση [DTA/TG, Netzsch 409EP) για την αποτίμηση της μεταβολής του  $\text{Ca(OH)}_2$  στους 1, 3, 6, 12 μήνες

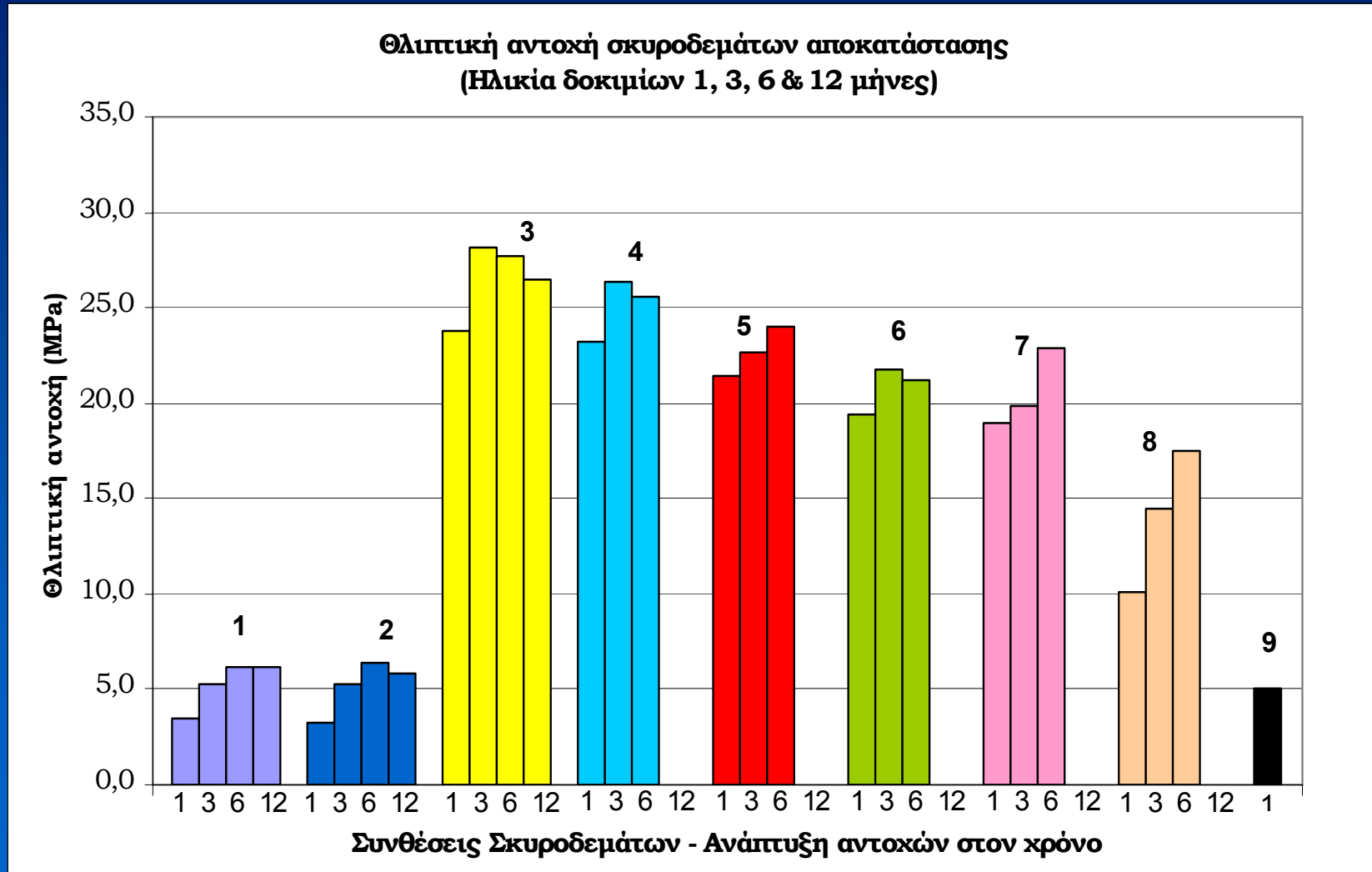
## Αποτελέσματα - Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών

*Μακροσκοπική Φωτογραφία:*  
Ομοιόμορφη κατανομή των  
αδρανών στην μάζα του  
σκυροδέματος



Φωτογραφία FOM: Καλύτερη πρόσφυση της συνδετικής κονίας  
με το θραυσμένο κεραμικό από ότι με το γαρμπίλι

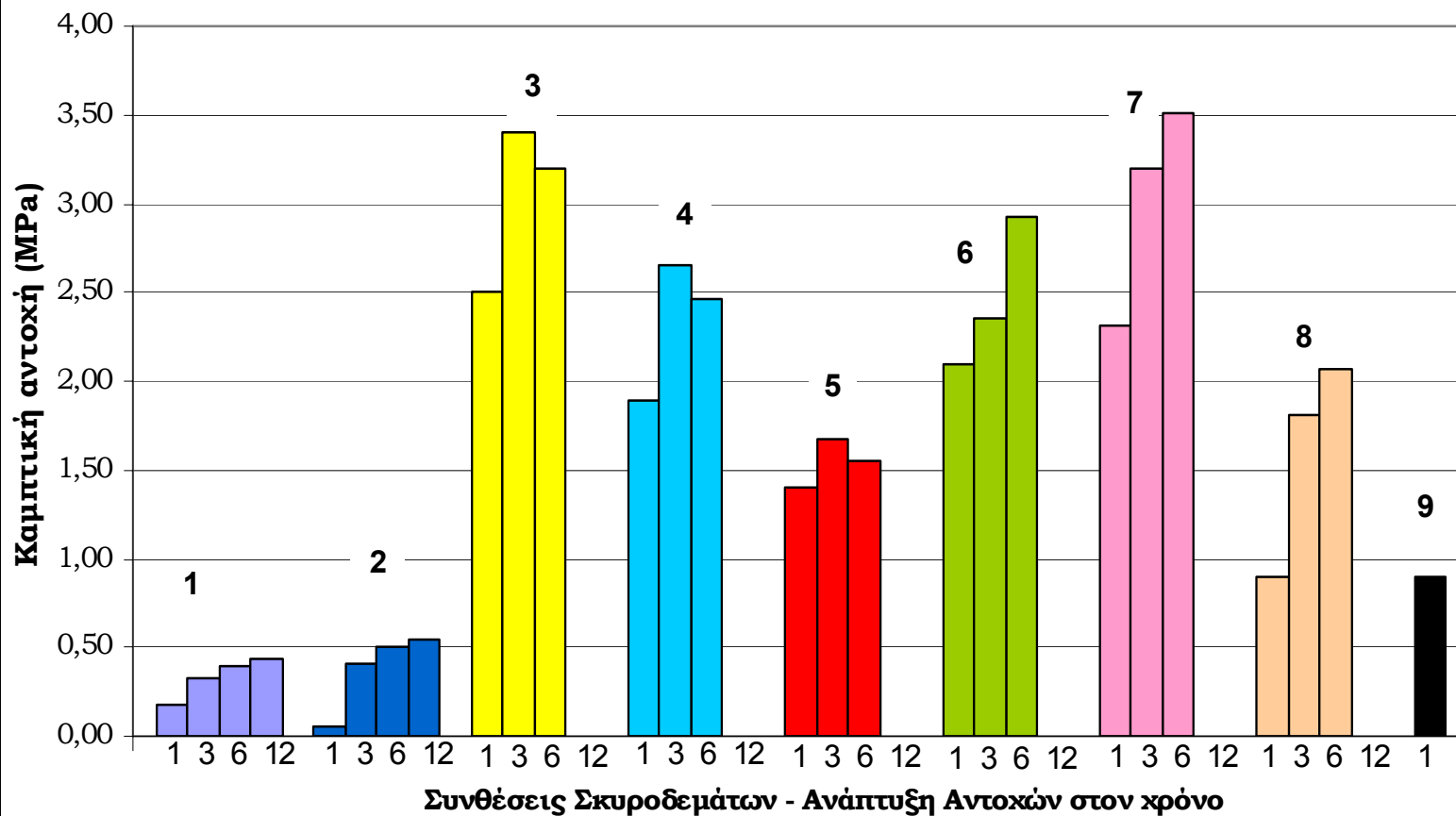
# Αποτελέσματα Αντοχή σε Θλίψη





# Αποτελέσματα Αντοχή σε Κάμψη

Καμπτική αντοχή σκυροδεμάτων αποκατάστασης  
(Ηλικία δοκιμίων 1, 3, 6 & 12 μήνες)



## Σύγκριση των 2 ποζολανικών προσθέτων

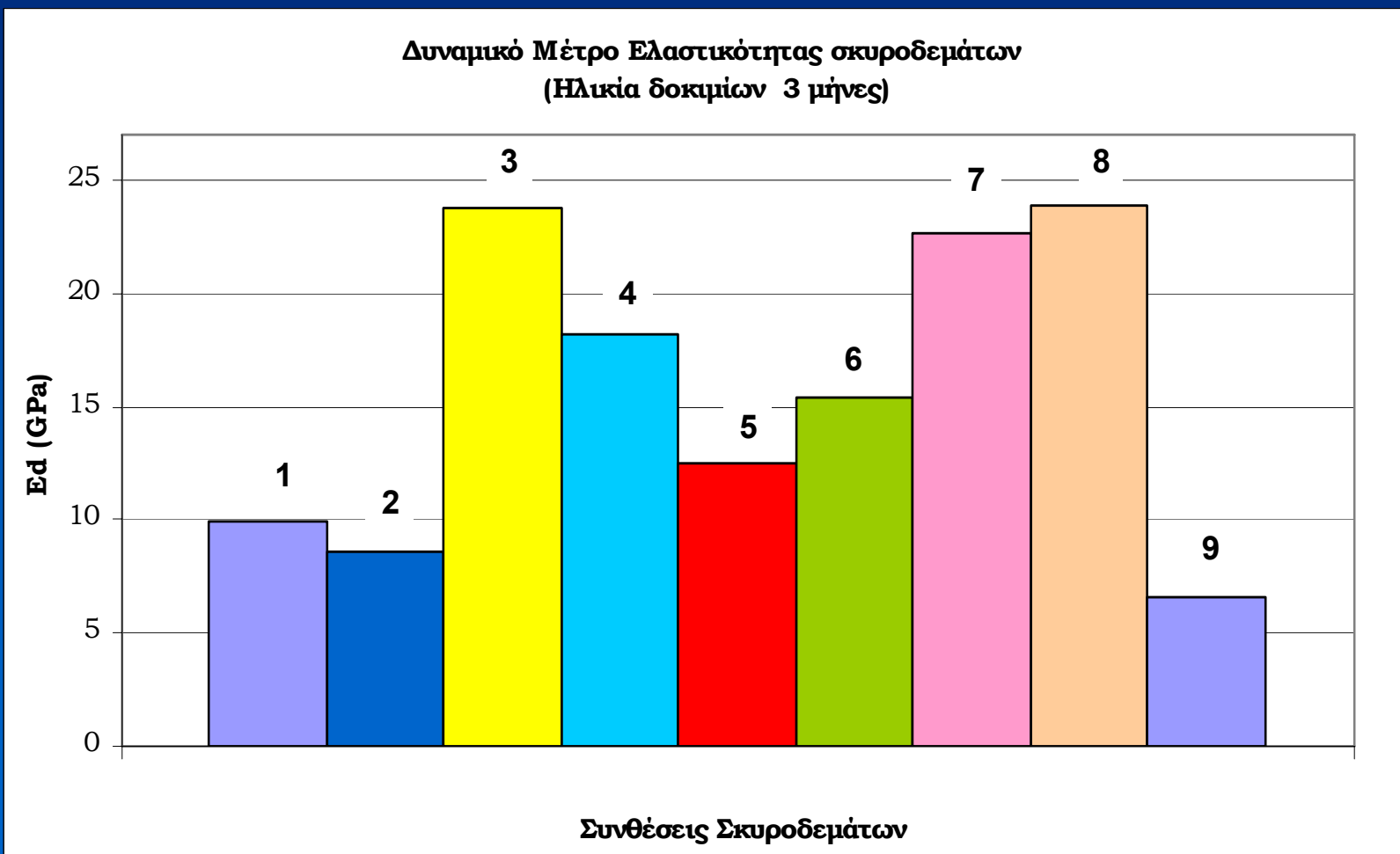
Η χρήση μετακαολίνη αύξησε τις τιμές της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής κατά >500% σε σχέση με την μηλαϊκή γη.

Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στα παρακάτω χαρακτηριστικά του Μετακαολίνη:

- ο Υψηλή λεπτότητα
- ο Χημική σύσταση
- ο Υψηλή ειδική επιφάνεια

# Αποτελέσματα

## Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας σε χρονικό διάστημα 3 μηνών



Τελικό αποτέλεσμα της ερευνητικής εργασίας  
Επιλογή 3 τύπων σκυροδεμάτων τα οποία να  
παρουσιάζουν εύρος των μηχανικών τους  
αντοχών και τα οποία θα αποτιμηθούν:

Στην κλίμακα  
πυλοτικών  
τοιχοποιιών σε  
στατικές και  
δυναμικές τάσεις

Στην κλίμακα ενός  
συγκεκριμένου  
μνημείου  
χρησιμοποιώντας  
πεπερασμένα  
στοιχεία

Μελέτη της συμπεριφοράς πιλοτικών  
τοιχοποιιών σε στατική και δυναμική  
καταπόνηση - Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
ΕΜΠ, Εργ. Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Επ.  
Υπευθ. Καθ. Π. Καρύδης

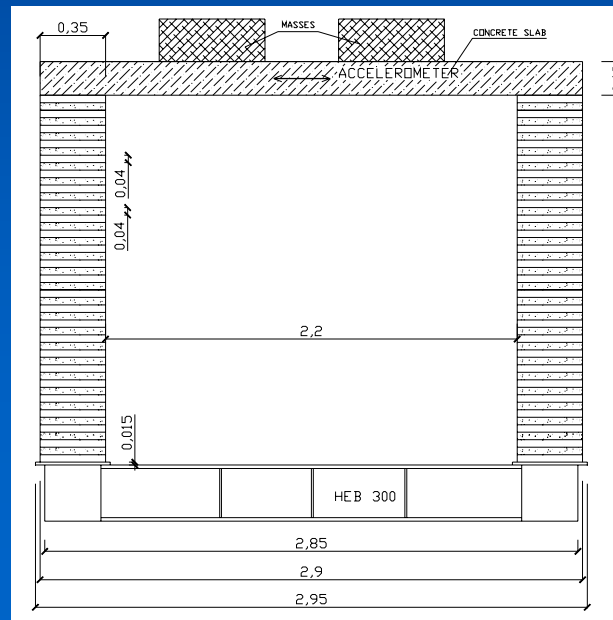
Στόχος

Μελέτη της συνεισφοράς των σκυροδεμάτων  
στην στατική και δυναμική απόκριση της  
τοιχοποιίας



Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας  
Κατασκευή 2 παράλληλων τοιχοποιιών με διαστάσεις  
2.70m x 2.00m x 0.35m, οι οποίες θα συνδέονται με  
πλάκα σκυροδέματος.

Το δοκίμιο θα υποβληθεί σε διέγερση λευκού θορύβου για  
το προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του  
(ιδιοπερίοδος και απόσβεση). Στη συνέχεια το δοκίμιο θα  
υποβληθεί σε κλιμακωτά αυξανόμενη διέγερση. Τέλος, θα  
προσδιοριστούν τα διαγράμματα τέμνουσας-μετακίνησης  
για σεισμικές καταπονήσεις.



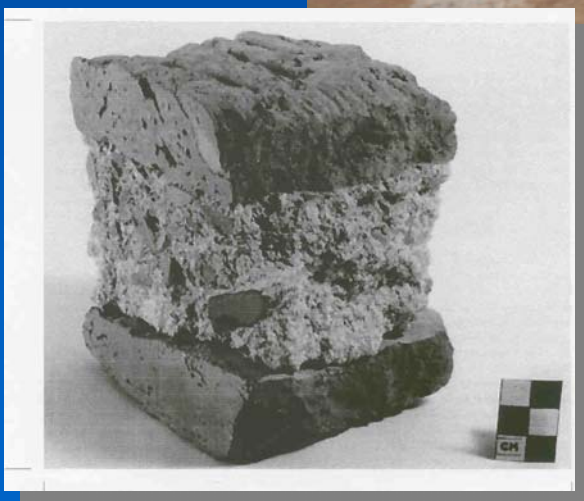
3. Μελέτη της συμπεριφοράς συγκεκριμένου μνημείου  
διαμέσου πεπερασμένων στοιχείων - Σχολή Πολιτικών  
Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Δομοστατικής, Επ. Υπευθ.  
Καθ. Κ. Συρμακέζης

## Στόχος

Μελέτη της συνεισφοράς των σκυροδεμάτων στην  
δυναμική απόκριση ενός συγκεκριμένου μνημείου της  
Βυζαντινής περιόδου



# ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΒΥΖΑΝΤΙΝΟΥ ΤΥΠΟΥ



# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΑΠΕΖΑ ΤΟΥ ΕΜΠ



*Τα αποτελέσματα από την αντισεισμική τράπεζα αποδεικνύουν τις προβλέψεις του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, καθώς οι πιλοτικές τοιχοποιίες αντέχουν σε προσομοίωση σεισμού 7 R*

# Η ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

## Θερμογραφία υπερύθρου

Εντοπισμός και ανίχνευση υγρασίας σε τοιχοποιίες  
Αποκάλυψη υποκείμενων στρωμάτων (ψηφιδωτών, μεταλλικών υποβάθρων, κ.α.)

## Μικροσκοπία οπτικών ινών

Μελέτη μορφολογίας επιφανειών και εκτίμηση φθοράς

## Υπερηχοσκόπηση

Αποτίμηση βάθους φθοράς  
Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων

## Γεωραντάρ

Στρωματογραφική ανάλυση  
Αποκάλυψη εσωτερικών ρηγματώσεων

# ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

- **Τοποθέτηση αισθητήρων σεισμικής δραστηριότητας** στην Αγιά Σοφιά για την αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου (BU-KOERI)
- **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.
- 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 Αγιά Σοφιάς το 557 μ.Χ.

# ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Μελέτη για τον **χαρακτηρισμό και τη διάγνωση της φθοράς των ιστορικών υλικών** της Αγιά Σοφιάς.
- 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 τρωτοτήτα 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.

# ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

- **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

- **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.

## ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Cakmak, A.S., Moropoulou, A., Mullen, C.L., "Interdisciplinary Study of Dynamic Behaviour and Earthquake Response of Hagia Sophia", *J. Soil dynamics and earthquake engineering*, **14**, No 9 (1995) pp. 125-133.
2. Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., "Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies", *Thermochimica Acta*, **2570** (1995) pp. 743-753.
3. 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) pp. 779-795.
4. Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Bakolas, A., Labropoulos, K., Bisbikou, K., "Properties and Technology of the crushed brick mortars of Hagia Sophia", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering VII*, ed. A.S. Cakmak and C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Southampton Boston (1995) pp. 651-661.
5. Moropoulou, A., Cakmak, A., Biscontin, G., "Crushed brick / lime mortars of Justinian's Hagia Sophia", *Materials Issues in Art and Archaeology V*, Vol. 462, ed. P.B. Vandiver, J.R. Druzik, J.F. Merkel, J. Stewart, Publ. Materials Research Society, Pittsburgh (1997) pp. 307-316.
6. Cakmak, A.S., Erdik, M., Moropoulou A., "A joint program for the protection of the Justinian Hagia Sophia", in Proc. 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, ed. A. Moropoulou, F. Zezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Vol. 4 (1997) pp. 153-171.
7. Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zendri, E., "Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis", *Thermochimica Acta*, **321** (1998) pp. 151-160.
8. Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Biscontin, G., "Criteria and methodology to evaluate the Hagia Sophia crushed brick / lime mortars", *PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology*, **55** (1998) pp. 39-54.
9. Cakmak, A.S., Moropoulou, A., Erdik, M., "Dynamic behaviour and earthquake response of Hagia Sophia", *PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology*, **56** (1998) pp.31-47.
10. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Cakmak A.S., "Compatible restoration mortars, preparation and evaluation for Hagia Sophia earthquake protection", *PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology*, **56** (1998) pp. 79-118.



## ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

11. 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.
12. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, A., “Thermal analysis in the evaluation of compatible restoration mortars during setting and hardening”, in Proc. Int. Conf. on 4th Mediterranean Conference on Calorimetry and Thermal Analysis, ed. G.C. Papanicolaou, G. Parisakis, Patras, (1999), pp. 179 – 186.
13. Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., “Investigation of the technology of historic mortars”, *J. Cultural Heritage*, **1** (2000) pp. 45-58.
14. Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., “Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures”, *J. Construction and Building Materials*, **14**, No 1 (2000) pp. 35-46.
15. Moropoulou, A., “Reverse engineering to discover traditional technologies: A proper approach for compatible restoration mortars”, *PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology*, **58** (2000) pp. 81-107.
16. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., “Criteria and methodology for restoration mortars compatible to the historic materials and structures”, in Proc. 9th Int. Symp. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, (2000), pp. 403-412.
17. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Anagnostopoulou, S., Aggelakopoulou, E., “Compatible restoration mortars for the earthquake protection of Hagia Sophia”, *PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology*, **59** (2000) pp. 29-51.
18. 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.
19. 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.
20. Erdik, M., Cakmak, A.S., Moropoulou, A., Yuzugullu, O., Durukal, E., “Earthquake protection of Hagia Sophia”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2002).

## ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

21. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas P., Aggelakopoulou, E., «Simulating and ameliorating historic mortars by repair mortars, produced by traditional raw materials», in Proc. 2nd Chemical Engineering Conf. for Collaborative Research in Eastern Mediterranean, Ankara, (2001).
22. 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.
23. 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, ed. P. Vandiver, M. Goodway, J.R. Druzik, J.L. Mass, Publ. Materials Research Society, Pittsburgh (2001).
24. Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Biscontin, G., Bakolas, A., Zendri, E., “Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: The crushed brick-lime mortars of Justinian’s Hagia Sophia”, *Construction and Building Materials*, 16, No 18 (2002) pp. 543-552.
25. Moropoulou, A., Bakolas, A., Giannoulaki, M., Karoglou, M., “Characterization of Dome mosaics of Hagia Sophia in Constantinople”, *Scienza e Beni Culturali XVIII*, ed. G. Biscontin, G. Driussi, Publ. Arcadia Ricerche, (2002) pp. 225-235.
26. Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Aggelakopoulou, E., Kouli, M., Aggelopoulos, A., Griniezakis, S., Aggelopoulos, A., Uzunoglou, N.K., “Research and development for a new methodology based on NDT techniques for the reveal of mosaics”, in Proc. of the 8th Eur. Conf. on NDT, Barcelona, (2002) Proceedings in CD-Rom, No 443.
27. 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*, (2003).
28. 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.
29. Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S., “Composite materials in ancient structures”, *Cement and Concrete Composites*, (2003).
30. Moropoulou A., Aggelakopoulou E., Athanasiadou K., Xatziantoniou K., Kollias S., “Repair mortars for the Byzantine masonries restoration interventions”, *Advances in Earthquake Engineering IV, Earthquake Resistant Engineering Structures*, ed. G. Latini, C.A. Brebbia, Publ. Wessex Institute of Technology (2003) pp.253-262.
31. Cakmak, A.S., Freely, J., Erdik, M., Moropoulou, A., Labropoulos, K. “Byzantine Istanbul as an open Lab for international interdisciplinary courses of Princeton university, Bogazici University and National Technical University – Materials Science and Engineering Section” 7th International Symposium of the Organization of World Heritage Cities, Rhodes, (2003).

**ΔΙΑΧΥΣΗ  
ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑΣ**

*Επιτυχημένη διοργάνωση με ταυτόχρονη έκδοση  
πρακτικών δύο διεθνών συνεδρίων:*

*Κωνσταντινούπολη [Οκτώβριος '00] &  
Αθήνα [Δεκέμβριος '00]*

*Στο πλαίσιο του Προγράμματος της Ε.Ε.  
RAPHAEL EU*

*COMARECH*

*“Πρωτοβουλία για Σύνταξη Προδιαγραφών  
Συμβατών Υλικών για την Διατήρηση της  
Ευρωπαϊκής Πολιτιστικής Κληρονομιάς”*

## ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ

Εκπαιδευτική επίσκεψη μεταπτυχιακών φοιτητών του ΔΠΜΣ του ΕΜΠ “Προστασία Μνημείων” στην Κων/πολη, με διαλέξεις στο Πανεπιστήμιο του Βοσπόρου και επί τόπου επισκέψεις σε Βυζαντινά και Οθωμανικά μνημεία [Οκτ '00]


Επιστημονική επίσκεψη ειδικών από το Πανεπιστήμιο του Βοσπόρου στην Αθήνα, με διαλέξεις στο ΕΜΠ και επί τόπου επισκέψεις σε Βυζαντινά και Οθωμανικά Μνημεία [Δεκ.. '00]

*Οργάνωση εκπαιδευτικών  
και πρακτικών σεμιναρίων  
αναφορικά με τις επεμβάσεις  
συντήρησης, τις τεχνικές και  
τα υλικά:*

*ITECOM  
Advanced Study Course*

*“Innovative Technologies and  
Materials for the Conservation of  
Monuments”*

*Athens 8-20 Dec. '03*

ADVANCED STUDY COURSE  
I T E C O M  
“INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND  
MATERIALS FOR THE CONSERVATION  
OF MONUMENTS”  
Athens, 8 - 20 December 2003, Greece  
5th Framework Programme  
ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT  
Key Action:  
CITY OF TOMORROW AND CULTURAL HERITAGE  
  
Coordinated by:  
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
With the participation of:  
Arcadia Ricerche s.r.l., Bogazici University, Hellenic Cement Research Center Ltd, Italian National  
Research Council, Municipality of Athens Development Agency, Polytechnic of Milan, TITAN Cement  
Company S.A., University Ca Foscari of Venice, University of Antwerp, University of Trieste  
Funded by:  
EUROPEAN COMMISSION – RESEARCH DIRECTORATE-GENERAL  
Sponsored by various technical, construction and industrial partners  
