



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΠΜΣ «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ
ΒΥΖΑΝΤΙΝΟΥ ΤΥΠΟΥ ΑΠΟ ΟΠΤΟΠΛΙΝΘΟΥΣ ΚΑΙ
ΙΣΟΠΑΧΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΥΔΙΑ ΠΑΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Χ. ΜΟΥΖΑΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών τοιχοποιιών βυζαντινού τύπου, κατασκευασμένων από οπτόπλινθους και ισοπαχή κονιάματα διαφόρων συνθέσεων μέσω πειραμάτων και προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Χαράλαμπο Μουζάκη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της εργασίας, την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλονται, επίσης, στην κ. Λουτσία Καράπιττα, για την πολύτιμη καθοδήγησή της τόσο κατά την εκμάθηση και χρήση του λογισμικού Abaqus, όσο και στη γενικότερη πορεία της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας, όπου διεξήχθησαν οι δοκιμές του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Λυδία Πανουτσοπούλου
Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Παν. Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιιών βυζαντινού τύπου, κατασκευασμένων από οπτόπλινθους και ισοπαχή κονιάματα διαφόρων συνθέσεων μέσω πειραμάτων και προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Συνολικά εξετάστηκαν τρεις συνθέσεις κονιαμάτων, με διαφορετικό είδος κονιάς η κάθε μία. Το πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία για τα κονιάματα αποκατάστασης ιστορικών τοιχοποιιών, εστιάζοντας στις απαιτήσεις που αυτά πρέπει να ικανοποιούν, ώστε να μπορούν να εφαρμοσθούν με ασφάλεια για την επέμβαση σε μια ιστορική κατασκευή. Επίσης, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις βυζαντινές τοιχοποιίες μεγάλου αρμού και συγκεκριμένα στο ναό της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη, ενώ παρατίθενται και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των υλικών του ναού, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι χρησιμοποιούμενες συνθέσεις των κονιαμάτων. Ορίζονται οι φυσικές και μηχανικές παράμετροι και κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούν τα συγκεκριμένα κονιάματα, ώστε να είναι συμβατά με την τοιχοποιία της Αγίας Σοφίας, όπως αυτή περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο. Δίνονται οι ιδιότητες των πρώτων υλών από τις οποίες παρασκευάστηκαν τα δοκίμια της τοιχοποιίας, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες που υπολογίστηκαν σε δοκίμια των τριών κονιαμάτων σε διάστημα ενός χρόνου.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των δοκιμών θλίψης που εκτελέστηκαν και παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο που εξετάστηκε ξεχωριστά και φωτογραφίες της τελικής κατάστασης των δοκιμίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξάγονται οι αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων ξεχωριστά και σε ομάδες ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο κονίαμα. Γίνεται, επιπλέον, σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με μαθηματικές σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του συγκεκριμένου τύπου τοιχοποιίας με πεπερασμένα στοιχεία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Abaqus, ενώ οι ιδιότητες της τοιχοποιίας εισήχθησαν μέσω προσομοιώματος αναπτυγμένου βάσει της υπορουτίνας VUMAT του

Abaqus/Explicit. Το προσομοίωμα βαθμονομήθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές θλίψης. Ακόμη, έγινε έλεγχος πειραματικών αποτελεσμάτων από σεισμικές δοκιμές.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν τόσο από το πειραματικό όσο και από το αναλυτικό μέρος της παρούσας εργασίας.

ABSTRACT

The target of this MSc dissertation is to investigate the mechanical properties of Byzantine masonry structures, constructed with bricks and different kinds of mortars of equal thickness, through experimental and computational simulations with finite elements. Three different mortar mixes were examined, each one with a different type of binder. The experimental phase of this dissertation was conducted at the Laboratory for Earthquake Engineering of the National Technical University of Athens.

The first chapter contains a synopsis, where the mortars used in the restoration of historic masonry are presented, focusing on the demands these have to satisfy in order to be applied on a historic structure with safety. Furthermore, Byzantine masonry structures with thick joints are reviewed and in particular the temple of Hagia Sophia in Constantinople, presenting the physical and mechanical properties of the materials used for the construction of the temple, as mentioned in appropriate references.

In the second chapter, the types of the mortars used in this dissertation are examined. The natural and mechanical parameters are defined, as well as the criteria these must satisfy in order to be compatible with the masonry of the Hagia Sophia temple, as described in the first chapter. The properties of raw materials used in the masonry mix design are explained in detail, as well as the mechanical properties of the three mortar mixes that were validated experimentally during the course of one year.

In the third chapter the stress tests that were conducted are described, demonstrating the stress strain diagrams for each specimen that was examined experimentally, along with photographs of the final state of the specimens after the tests.

In the fourth chapter the strength and elasticity modulus of each specimen are presented and later grouped according to the mortar used. Furthermore, there is a comparison between experimental results and mathematical expressions from bibliography.

In the fifth chapter the computational simulation of the masonry with finite elements is introduced. For this purpose, the commercial software Abaqus was used, while the masonry properties input was defined based on a VUMAT subroutine inside

Abaqus/Explicit. The model was optimized based on the experimental results of the compression tests. A further check of experimental results from earthquake simulations took place.

Finally, the sixth chapter is a discussion of the results obtained from both the analyses and the experiments.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή	3
1.1.	Κονιάματα αποκατάστασης	3
1.2.	Βυζαντινές τοιχοποιίες μεγάλου αρμού – Η Αγία Σοφία.....	6
2.	Συνθέσεις Κονιαμάτων	11
2.1.	Γενικά.....	11
2.2.	Πρώτες ύλες	13
2.2.1.	Κονίες	13
2.2.2.	Ποζολάνα.....	13
2.2.3.	Αδρανή.....	14
2.2.4.	Οπτόπλινθοι	14
2.3.	Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων	15
3.	Πειραματική Διαδικασία.....	18
3.1.	Περιγραφή δοκιμών	18
3.2.	Πειραματικά αποτελέσματα	20
3.2.1.	Δοκίμιο NHL 1	20
3.2.2.	Δοκίμιο NHL 2	21
3.2.3.	Δοκίμιο NHL 3	23
3.2.4.	Δοκίμιο MK 1	24
3.2.5.	Δοκίμιο MK 2	25
3.2.6.	Δοκίμιο LCem 1	26
3.2.7.	Δοκίμιο LCem 2	28
3.2.8.	Δοκίμιο LCem 3	30
4.	Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων	32
4.1.	Θλιπτική αντοχή & Μέτρο Ελαστικότητας	32
4.2.	Σύγκριση με σχέσεις από βιβλιογραφία.....	33

5.	Προσομοίωση με Πεπερασμένα Στοιχεία.....	35
5.1.	Προσομοίωση θλιπτικών δοκιμών	37
5.2.	Προσομοίωση σεισμικών δοκιμών	42
6.	Συμπεράσματα	49
	Βιβλιογραφία	50

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τον τελευταίο αιώνα έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον για τη συντήρηση και αποκατάσταση ιστορικών μνημείων παγκοσμίως και ειδικά στην Ευρώπη, καθώς αυτά πλήττονται ανεπανόρθωτα από τη φθορά του χρόνου, εκάστοτε εμπόλεμες διαμάχες, φυσικές καταστροφές κ.λπ. Το ενδιαφέρον αυτό μεταφράστηκε σε διάφορες μεθόδους αποκατάστασης, μόνιμες και προσωρινές, οι οποίες βασίζονται στην παλαιότερη εμπειρική γνώση, στην επιστημονική μελέτη των μνημείων και στην ανάπτυξη νέων υλικών.

Στην προσπάθεια για γρήγορη και αποτελεσματική αποκατάσταση των κονιαμάτων των ιστορικών κατασκευών, ως κύρια μέθοδος αναδείχθηκαν τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο. Το τσιμέντο είναι, άλλωστε, το κατεξοχήν υλικό με το οποίο είναι εξοικειωμένοι οι σύγχρονοι μηχανικοί, με φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά επιθυμητά για ευρεία εφαρμογή στις σύγχρονες κατασκευές. Τα ίδια, όμως, χαρακτηριστικά, π.χ. θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, μικροδομή, χημική σύσταση κ.ά., είναι αυτά που το καθιστούν ασύμβατο με τα παραδοσιακά ιστορικά κονιάματα, όπως αυτά έχουν μελετηθεί και καταγραφεί στη βιβλιογραφία.

Πιο συγκεκριμένα, τα τσιμεντιτικά κονιάματα έχουν αρκετά μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από τα υλικά των παραδοσιακών τοιχοποιιών, οδηγώντας πιθανόν σε αστοχία τα ασθενέστερα αυθεντικά δομικά υλικά. Επιπλέον, το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητάς τους εμποδίζει την ελεύθερη παραμόρφωση της ελαστικότερης ιστορικής τοιχοποιίας, ρηγματώνοντάς την, ομοίως και ο μεγαλύτερος συντελεστής θερμικής διαστολής τους. Το μικρό πορώδες και η πυκνή δομή των κονιαμάτων με βάση το τσιμέντο δυσκολεύει, ακόμη, την «αναπνοή» της τοιχοποιίας.

Από άποψη χημικής σύστασης, ένα τσιμεντιτικό κονίαμα περιέχει αλκαλικά στοιχεία σε εφταπλάσια συγκέντρωση από ένα ασβεστιτικό, ενώ τα διαλυτά άλατα που σχηματίζονται μεταναστεύουν στα γειτονικά πορώδη υλικά της τοιχοποιίας, δημιουργώντας εξανθήματα ή ασκώντας τάσεις λόγω διαδοχικών κρυσταλλώσεων ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Υπάρχει, επίσης, ο κίνδυνος σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων από την αντίδραση των περιεχόμενων υδραυλικών ενώσεων με το γύψο, ενώ τα περιεχόμενα αλκάλια ενδέχεται να αντιδράσουν με το

SiO₂ των πλίνθων και/ή αδρανών, προκαλώντας αλκαλοπυριτική αντίδραση που συνοδεύεται από διόγκωση.

Τέλος, το συνήθως γκρίζο χρώμα αυτών των κονιαμάτων αλλοιώνει την όψη και αισθητική των ιστορικών κατασκευών.

Οι παραπάνω αρνητικές επιπτώσεις των κονιαμάτων τσιμέντου εμφανίστηκαν αρκετό χρόνο μετά την αποκατάσταση, με ρωγμές, αστοχίες των ιστορικών υλικών, εξανθήματα κ.λπ. Ξεκίνησε, λοιπόν, μια προσπάθεια μελέτης των ιστορικών κονιαμάτων και προσομοίωσής τους με σύγχρονα υλικά, ώστε να δημιουργηθούν κονιάματα αποκατάστασης συμβατά με τις παραδοσιακές τοιχοποιίες, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι έχει εγκαταλειφθεί πλήρως η εφαρμογή των τσιμεντοκονιαμάτων. Η προσπάθεια αυτή δεν εστιάζει μόνο στον τύπο-προέλευση, αναλογία και διαβάθμιση των υλικών, αλλά και στις τεχνικές παρασκευής και εφαρμογής των κονιαμάτων, με στόχο τη διασφάλιση της συμβατότητας των νέων κονιαμάτων με τις ιστορικές κατασκευές.

Εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας υλικών από τα οποία αποτελούνται οι ιστορικές κατασκευές ανάλογα με την ιστορική περίοδο, τεχνοτροπία και διαθεσιμότητα, δεν υπάρχουν γενικές «συνταγές» ή πρότυπα ως προς το σχεδιασμό, παρασκευή και μετέπειτα έλεγχο συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης, που να καλύπτουν όλους τους τύπους ιστορικών κατασκευών. Η διεθνής βιβλιογραφία στο συγκεκριμένο τομέα χαρακτηρίζεται από κενά, παραλείψεις, ακόμη και αντιφάσεις, καθώς δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για όλους τους τύπους ιστορικών τοιχοποιιών. Ο ίδιος ο μνημειακός χαρακτήρας πολλών κατασκευών εμποδίζει τη διεξοδική μελέτη τους και οι ιστορικές πηγές, όταν είναι διαθέσιμες, περιέχουν πολλές ανακρίβειες. Προφανές είναι, ακόμη, ότι δεν είναι δυνατή η εφαρμογή τύπων και εξισώσεων πρόβλεψης μηχανικών χαρακτηριστικών που αναπτύχθηκαν για σημερινές τοιχοποιίες, φτιαγμένες με σύγχρονες τεχνικές και πρώτες ύλες.

Έτσι, λοιπόν, κρίνεται γενικά αποδεκτό ότι ο όρος «συμβατότητα» δεν αναφέρεται κατ' αποκλειστικότητα σε πανομοιότυπες συνθέσεις κονιαμάτων, αλλά σε ένα σύνολο ιδιοτήτων με τα αντίστοιχα όρια αποδοχής που αφορούν την κάθε περίπτωση. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν εργασίες αναφερόμενες σε συγκεκριμένους τύπους τοιχοποιίας, με τους ερευνητές να εστιάζουν σε διάφορες ιδιότητες, για τις οποίες δίνουν ορισμένες τιμές ανοχής, που διαφέρουν από εργασία σε εργασία. Έχουν γίνει, επίσης, προσπάθειες συγκεντρωτικής παρουσίασης των κύριων

χαρακτηριστικών που εξασφαλίζουν τη συμβατότητα κονιάματος – κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, οι Maurenbrecher et al [1] προτείνουν τα εξής:

- Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων να είναι μικρότερη από τα δομικά στοιχεία της τοιχοποιίας και ίση ή μικρότερη από την αντίστοιχη των ιστορικών κονιαμάτων. Τα ασθενή κονιάματα αποκατάστασης μπορούν να αφαιρεθούν ευκολότερα σε επόμενες προσπάθειες συντήρησης χωρίς βλάβη της αυθεντικής τοιχοποιίας και παράλληλα επιτρέπουν την ανάπτυξη μεγαλύτερων μετακινήσεων χωρίς ρηγμάτωση σε σχέση με ισχυρότερα κονιάματα. Προφανώς, θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη η διαφορά της εργαστηριακής από την επιτόπου αντοχή, καθώς και ο διαφορετικός χρόνος απόκτησης μέγιστης αντοχής των κονιαμάτων αποκατάστασης.
- Ειδικά σε τοιχοποιίες με συμπαγείς λίθους, θα πρέπει ο συντελεστής απορρόφησης νερού και διάχυσης ατμών να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από των ιστορικών δομικών υλικών, διότι το κονίαμα θα πρέπει να διευκολύνει την ξήρανση της τοιχοποιίας δια μέσου των αρμών της.
- Η συρρίκνωση του κονιάματος μετά την εφαρμογή στον αρμό θα πρέπει να είναι ελάχιστη έως και μηδενική. Προτείνεται η χρήση καλά διαβαθμισμένης πλυμένης άμμου, χωρίς αργλικές προσμίξεις, η χρήση μικρής ποσότητας νερού για την ανάμιξη του κονιάματος και η συντήρηση σε κατάλληλες συνθήκες. Σημειώνεται ότι επίδραση στην συρρίκνωση φαίνεται να έχει και το σχήμα των κόκκων της άμμου.
- Καλή πρόσφυση του κονιάματος με το δομικό στοιχείο, ώστε σε συνδυασμό με την μικρή συρρίκνωση να μειώνεται ο κίνδυνος εμφάνισης μικρορωγμών στη διεπιφάνεια δομικού στοιχείου – κονιάματος, άρα και η ποσότητα νερού που μπορεί να εισέλθει στην τοιχοποιία. Άλλοι ερευνητές προτείνουν ως μέγιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής τα 0.2 MPa [2] ή 0.3 MPa [3].
- Όπου αυτό είναι απαραίτητο, να ελέγχεται η ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης – απόψυξης. Τα κονιάματα με υψηλό ποσοστό υδρασβέστου εμφανίζουν χαμηλότερη ανθεκτικότητα στη δράση του παγετού όταν είναι κορεσμένα (και γενικά είναι περισσότερο ευπαθή, αφού χρειάζονται περισσότερο χρόνο για ανάπτυξη αντοχής), ενώ τα πορώδη

υλικά τείνουν να ξηραίνονται ευκολότερα. Βελτίωση της συμπεριφοράς θα μπορούσε να προκαλέσει η προσθήκη αερακτικού.

- Επίσης όπου είναι απαραίτητο, να ελέγχεται η ανθεκτικότητα στα άλατα, όπως για παράδειγμα τα θειικά.
- Ακόμη, θα πρέπει η μεταβολή του όγκου λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας ή της υγρασίας να είναι αντίστοιχη αυτής της πρωτότυπης τοιχοποιίας.
- Τέλος, τα κονιάματα αποκατάστασης θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από καλή εργασιμότητα και ευκολία κατά την εφαρμογή, η οποία να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό στην περίπτωση επισκευής ιστορικών κατασκευών.

Ειδική μέριμνα θα πρέπει να λαμβάνεται στην περίπτωση που το κονίαμα αποκατάστασης προορίζεται για την επισκευή τοιχοποιιών που φέρουν τοιχογραφίες, μωσαϊκά και λοιπές διακοσμήσεις.

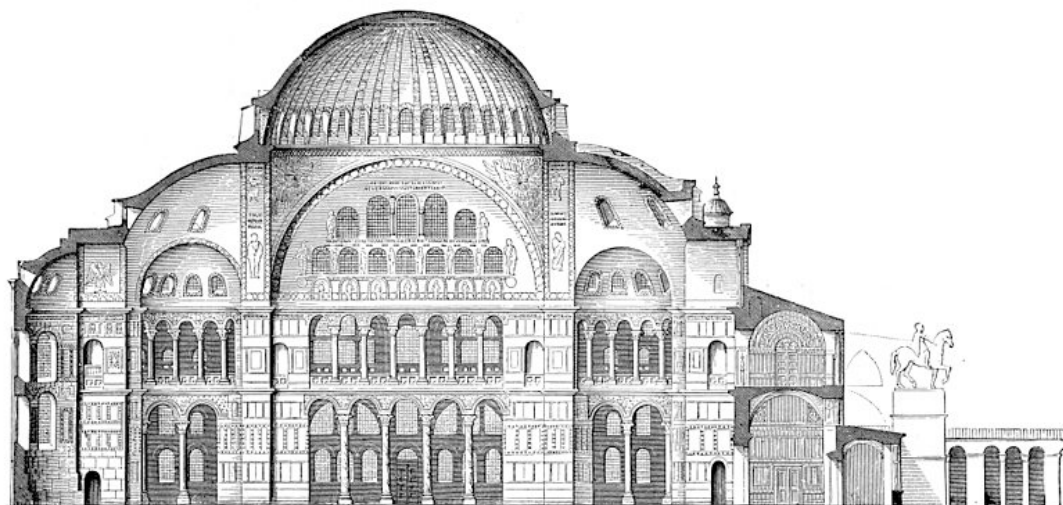
Τέλος, κάθε φορά θα πρέπει να ελέγχεται η αποτελεσματικότητα και συμβατότητα κάθε κονιάματος που προτείνεται για την επισκευή μιας συγκεκριμένης κατασκευής με εργαστηριακές δοκιμές για τη διακρίβωση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους, τη μικροδομή και το πορώδες, αλλά και την ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης.

1.2. BYZANTINEΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΡΜΟΥ – Η ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ

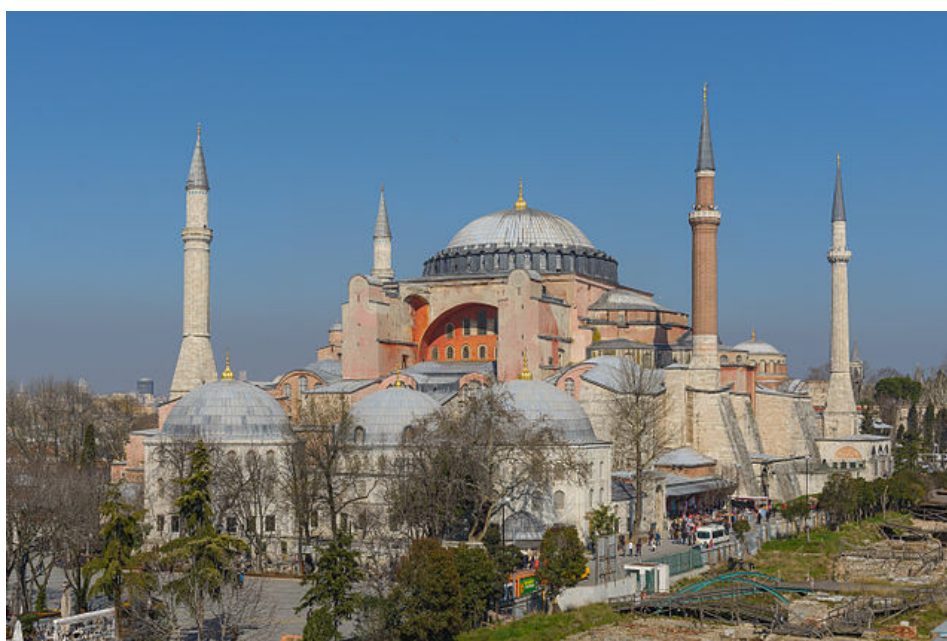
Τη Βυζαντινή περίοδο αναπτύχθηκε μια νέα, ιδιαίτερη τεχνική δόμησης μνημειακών κατασκευών, η οποία συνδύαζε οπτόπλινθους με αρμούς μεγάλου πάχους, περίπου ίσου με αυτό των πλίνθων. Τα χρησιμοποιούμενα κονιάματα περιείχαν εκτός από λεπτόκοκκα υλικά και θραύσματα κεραμικού μεγάλης διαμέτρου ως αδρανή, κατ' αντιστοιχία με το σκυρόδεμα. Τα θραύσματα προέρχονταν από θραύση κεραμιδιών, πλίνθων και άλλων κεραμικών αντικειμένων. Εικάζεται από διάφορους ιστορικούς ότι ο συγκεκριμένος τύπος δόμησης επιλέχθηκε για οικονομικούς λόγους, καθώς μειωνόταν ο απαιτούμενος αριθμός λίθων.

Χαρακτηριστικό δείγμα του συγκεκριμένου τύπου δόμησης αποτελεί ο ναός της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη, κατασκευασμένος κατά τη βασιλεία του αυτοκράτορα Ιουστινιανού. Ο περίφημος κεντρικός του τρούλος διαμέτρου 32 m

στηρίζεται σε 4 υποστυλώματα και έχει ανακατασκευασθεί μετά από διαδοχικές καταρρεύσεις εξαιτίας σεισμών μεταξύ του 542 και 557 μ.Χ..



Εικόνα 1.1 Τομή της Αγίας Σοφίας - αναπαράσταση [4].



Εικόνα 1.2 Η Αγία Σοφία σήμερα [5].

Όσον αφορά στα δομικά υλικά του ναού, στα τμήματα που υπόκεινται σε σημαντικές φορτίσεις (π.χ. πεσσοί, αντηρίδες κ.λπ.) χρησιμοποιήθηκαν λαξευτοί λίθοι, ενώ στα τμήματα που φέρουν μικρότερα φορτία (π.χ. τοίχοι, θόλοι κ.λπ.) χρησιμοποιήθηκαν οπτόπλινθοι. Το κονίαμα της οπτοπλινθοδομής είναι ασβεστοκονίαμα ισοπαχές με τους πλίνθους, με υδραυλικές ιδιότητες που οφείλονται στη χρήση των θραυσμένων κεραμικών (κουρασάνι). Αντίθετα, μεταξύ των

λαξευμένων λίθων των πεσσών εικάζεται ότι χρησιμοποιήθηκαν φύλλα μολύβδου, τα οποία, υποκείμενα σε συμπίεση, πληρούν τυχόν κενά δημιουργούμενα από μικροανωμαλίες της επιφάνειας των λίθων, αποφεύγοντας τη συγκέντρωση τάσεων. Ο τρούλος, σύμφωνα με ιστορικές πηγές, κατασκευάστηκε από σπογγώδεις οπτόπλινθους με χαμηλό ειδικό βάρος από τη Ρόδο και αποτελείται από 40 νευρώσεις. Το πάχος του μειώνεται προς την κορυφή, ενώ η στεγανότητά του εξασφαλίστηκε με φύλλα μολύβδου. Σημειώνεται ότι πολλές άλλες πληροφορίες από χρονογράφους της ίδιας ή μεταγενέστερης εποχής αντιμετωπίζονται με σκεπτικισμό λόγω της αμφισβητούμενης αξιοπιστίας τους.

Ο χαρακτηρισμός των αυθεντικών δομικών υλικών της Αγίας Σοφίας αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Οι Livingston et al [6] αναφέρουν ότι το κονίαμα παρουσιάζει χαρακτηριστικό ροζ χρώμα, που οφείλεται στη χρήση θραυσμάτων κεραμικού μεγέθους περίπου 1 cm. Η δομή του είναι πορώδης και εύθρυπτη. Οι αρμοί της τοιχοποιίας έχουν πάχος περίπου 5 – 7 cm. Ο συνδυασμός διαφόρων μεθόδων για το χαρακτηρισμό των κονιαμάτων κατέδειξε την ύπαρξη γύψου, καθώς και ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων του ασβεστίου που προέρχονται από την αντίδραση της υδρασβέστου με το κεραμάλευρο, με την επισήμανση ότι η ποσότητα της ποζολάνης αυτής που χρησιμοποιήθηκε θα ήταν μικρή. Η αρχική ποσότητα υδρασβέστου προσδιορίστηκε στο 40% κ.β. περίπου. Για τα αδρανή του κονιαμάτος αναφέρουν ότι τα θραυσμένα κεραμικά είχαν αναμιχθεί με άμμο κυρίως χαλαζιακής και ανθρακικής φύσης, ενώ εικάζουν ότι χρησιμοποιήθηκαν θραυσμένα κεραμικά αντί συμβατικών αδρανών ώστε να μειωθεί το ειδικό βάρος της κατασκευής. Οι διαστάσεις των οπτόπλινθων προσδιορίστηκαν ως 37.5x37.5x5 cm.

Οι Moroglou et al [7], [8], [9], από την πλευρά τους εξέτασαν δείγματα κονιαμάτος από τις διάφορες περιόδους κατασκευής του μνημείου, παρατηρώντας ότι η αναλογία κονιάς – αδρανών κυμαίνεται μεταξύ 1:4 έως 1:2, ενώ ιδανική κρίνεται η αναλογία 1:3, παρατηρούμενη και σε αντίστοιχα κονιαμάτα μνημείων Κλασικής και Βυζαντινής περιόδου σε Ρόδο και Κρήτη. Η συνδετική κονία παρουσιάζει υδραυλικό χαρακτήρα, εξαιτίας αφενός των πρώτων υλών για την παρασκευή της υδρασβέστου, αφετέρου στη χρήση ποζολανικών προσμίκτων, π.χ. κεραμάλευρο. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι ο ποζολανικός χαρακτήρας των κονιαμάτων οφείλεται στις αντιδράσεις πρόσφυσης στη διεπιφάνεια κεραμικού – κονιάς, οι οποίες εξαρτώνται από τις διαστάσεις των θραυσμάτων, το είδος των κεραμικών και τη συγκέντρωση του Ca(OH)_2 στο κονίαμα. Οι αντιδράσεις αυτές προσδίδουν αυξημένη

ανθεκτικότητα και μηχανικές αντοχές στο κονίαμα, καθώς μεταβάλλουν ευνοϊκά τη μικροδομή του. Παρατηρήθηκε, επιπλέον, η ύπαρξη άμορφου gel C-S-H, το οποίο αποτελεί τον κύριο παράγοντα αντοχής και στο γνωστό, συμβατικό σκυρόδεμα. Τονίζεται η άριστη συνεργασία – συμβατότητα μεταξύ κονιαμάτων και δομικών στοιχείων της τοιχοποιίας, εξασφαλίζοντας έτσι την ανθεκτικότητα του ναού μέχρι τις μέρες μας.

Όσον αφορά στην αντοχή του κονιάματος της Αγίας Σοφίας, λόγω των αναμενόμενων περιορισμών στη δειγματοληψία υπάρχουν λίγα πειραματικά αποτελέσματα. Δείγμα του κονιάματος ελέγχθηκε στο ΕΜΠ (Θ. Π. Τάσιος) με τη μέθοδο επί θραυσμάτων, αποτιμώντας την εφελκυστική αντοχή στα 0.5 – 1.2 MPa [7]. Στο Πανεπιστήμιο του Princeton έγιναν δοκιμές πρόσφυσης και εφελκυσμού σε τυπικό δείγμα διπλέτας κονιάματος – πλίνθου, που είχε παρθεί το 1949 κατά την αποκατάσταση ενός νεύρου του τρούλου του ναού, από τις οποίες διαπιστώθηκε εφελκυστική αντοχή ίση με 0.4 – 0.5 MPa [7], [10]. Επιπλέον, εκτελέστηκε δοκιμή διάρρηξης σε δύο κυλινδρικά δείγματα μήκους 4 cm και διαμέτρου 3.5 cm η οποία και έδωσε εφελκυστική αντοχή ίση με 0.7 – 1.2 MPa [7]. Τέλος, οι Durukal et al [11] εκτίμησαν τη θλιπτική αντοχή του κονιάματος με τη χρήση κρουσίμετρου στα 14 MPa.

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας εκτιμήθηκε επί τόπου με τη μέθοδο των υπερήχων. Για τους πλίνθους βρέθηκε δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ίσο με 3.1 GPa, για το κονίαμα 0.66 GPa, ενώ για το σύνθετο υλικό κονίαμα – πλίνθος 1.83 GPa [11]. Οι Aoki et al [12], από την άλλη πλευρά, εκτίμησαν το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας βάσει δυναμικών μετρήσεων στα 2.8 GPa για τους οπτόπλινθους και 6.8 GPa για τους λίθους του μνημείου.

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1 .

Πίνακας 1.1 Μηχανικές ιδιότητες υλικών Αγίας Σοφίας [7], [10], [11], [12].

Υλικό	f_c (MPa)	Δοκιμή	f_t (MPa)	Δοκιμή	E_d (GPa)	Δοκιμή
Κονίαμα	14.0	Κρουσιμετρία	0.4-0.5	Εφελκυσμού (Princeton)	0.66	Υπέρηχοι
	-	-	0.7.-1.0	Διάρρηξης (Princeton)	-	-
	-	-	0.5-1.2	Επί θραυσμάτων (EMΠ)	-	-
Οπτόπλινθοι	31.0	Κρουσιμετρία			3.10	Υπέρηχοι
					2.80	Δυναμικές δοκιμές
Οπτόπλινθος-Κονίαμα					1.83	Υπέρηχοι
Λίθοι					6.80	Δυναμικές Δοκιμές

2. ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάστηκαν πειραματικά δοκίμια τοιχοποιίας κατασκευασμένα από οπτόπλινθους και κονιάματα τριών διαφορετικών συνθέσεων. Οι συνθέσεις αυτές είχαν αναπτυχθεί στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ [13], στόχος της οποίας ήταν η αριστοποίηση του σχεδιασμού και η ανάπτυξη συστήματος αποτίμησης (κριτήρια και μεθοδολογία) συμβατών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων που προορίζονται για επεμβάσεις αποκατάστασης ιστορικών και παραδοσιακών κτιρίων και μνημείων.

Από το χαρακτηρισμό των ιστορικών κονιαμάτων της Αγίας Σοφίας, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 1.2, προέκυψαν τα εξής φυσικοχημικά χαρακτηριστικά:

- Η συνδετική κονία παρουσιάζει ελαφρώς υδραυλική φύση.
- Τα αδρανή αποτελούνται από ανάμιξη σπασμένου κεραμικού και άμμου, με διάμετρο μέγιστου κόκκου $D_{\max} \approx 12$ mm, ήτοι το 1/5 περίπου του πάχους του αρμού της τοιχοποιίας.
- Τα χονδρόκοκκα αδρανή ($D > 8$ mm) αποτελούνται αποκλειστικά από σπασμένο κεραμικό, ενώ οι μικρότερες διαμέτροι από ολοένα αυξανόμενο ποσοστού άμμου.
- Το συνολικό ποσοστό σπασμένου κεραμικού των αδρανών είναι 40%.

Επίσης, από τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα που υπάρχουν για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ιστορικών υλικών του ναού, ορίστηκαν τα παρακάτω κριτήρια καταλληλότητας για τα κονιάματα αποκατάστασης:

- Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων θα πρέπει να είναι μικρότερη αυτής των οπτόπλινθων. Αποδεκτές θεωρήθηκαν τιμές εντός του εύρους 8-14 MPa.
- Η εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων της Αγίας Σοφίας είχε βρεθεί ίση με 0.4-1.2 MPa. Καθώς η εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής έγινε μέσω καμπτικών δοκιμών, οι οποίες εν γένει δίνουν μεγαλύτερη αντοχή από την πραγματική, ως ελάχιστη τιμή ορίστηκε η $f_{fl,\min} = 1.5$ MPa, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για υγιή κονιάματα, χωρίς φθορές.
- Τέλος, όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας, αυτό θα πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό των οπτόπλινθων.

Με βάση τα παραπάνω παρασκευάστηκαν εννέα συνθέσεις κονιαμάτων, από τις οποίες τελικώς επιλέχθηκαν τρεις για την κατασκευή των δοκιμών τοιχοποιίας, αποτελούμενες από ίδιου τύπου αδρανή (μίξη άμμου – σπασμένου κεραμικού σε αναλογία 1:1), ενώ διέφεραν οι συνδετικές κονίες και ποζολανικά πρόσθετα: υδράσβεστος, υδραυλική άσβεστος, τσιμέντο και μετακαολίνη. Και στις τρεις συνθέσεις, η αναλογία κονίας – αδρανών είναι 1:2.33 (30% – 70% κ.β.), ενώ η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των κονιαμάτων αποτελεί αρκετά καλή προσέγγιση αυτής του ιστορικού κονιάματος. Οι επιλεγθείσες συνθέσεις και το είδος και κατά βάρος ποσοστό των υλικών των κονιαμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Ποσοστά (%) κατά βάρος υλικών των κονιαμάτων

Πρώτες Ύλες		Συνθέσεις		
		LCem.CF2.S.	NHL.CF2.S.	MK2.5.CF2.S.
Κονίες – Ποζολάνες (30%)	Υδράσβεστος (L)	15	–	27.5
	Υδραυλική Άσβεστος (NHL)	–	30	–
	Τσιμέντο (C)	15	–	–
	Μετακαολίνης (MK)	–	–	2.5
Αδρανή (70%)	Μίξη άμμων	35	35	35
	Θραυσμένο Κεραμικό CF2	35	35	35

Οι συνθέσεις MK2.5.CF2.S. και NHL.CF2.S. ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό στα παραπάνω χαρακτηριστικά και έδωσαν τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών εντός των επιθυμητών ορίων. Η σύνθεση LCem.CF2.S. χρησιμοποιήθηκε για συγκριτικούς λόγους, καθώς ήταν η μοναδική σύνθεση που περιείχε τσιμέντο.

Σημειώνεται ότι η ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των κονιαμάτων προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο ελέγχου ΣΚ-309 «Μέθοδος Δοκιμής Κάθισης». Ως μέγιστη τιμή κάθισης ορίστηκαν τα 4 cm, με βάση το κριτήριο χρήσης ελάχιστης ποσότητας νερού, εξασφαλίζοντας ικανοποιητική εργασιμότητα και παράλληλα μείωση της συρρίκνωσης λόγω εξάτμισης και επίτευξη υψηλότερων τιμών μηχανικών χαρακτηριστικών.

2.2. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

2.2.1. Κονίες

- Υδράσβεστος (L)

Χρησιμοποιήθηκε υδράσβεστος σκόνη της «Μακεδόνικης Ασβεστοποιίας». Το συνολικό περιεχόμενο ποσοστό σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ανέρχεται σε 89.10 % και του CaCO_3 σε 5.98 %.

- Υδραυλική Άσβεστος (NHL)

Χρησιμοποιήθηκε υδραυλική άσβεστος τύπου NHL-Z 3,5 της εταιρείας Lafarge. Η θλιπτική αντοχή κονιάματος της συγκεκριμένης υδραυλικής άσβεστου δίνεται ίση με 7 MPa σε 28 ημέρες και το φαινόμενο βάρος της κονιάς ανέρχεται σε 0.65 g/cm.

- Λευκό Τσιμέντο (LCem)

Χρησιμοποιήθηκε λευκό τσιμέντο τύπου II/A 42,5 N ΕΛΣ της εταιρείας "TITAN".

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες τσιμέντου.

Σύσταση	Κλίνκερ 80%
	Γύψος 3%
	Ασβεστόλιθος 17%
Ειδική Επιφάνεια (Blaine)	4300 cm ² /g
SO₃	3.2%
H₂O	27%
Αντοχή 2 ημ.	27MPa
Αντοχή 7 ημ.	40MPa
Αντοχή 28 ημ.	53MPa

2.2.2. Ποζολάνα

Χρησιμοποιήθηκε Μετακαολίνης (MK), τεχνητή ποζολάνα Metastar 501 της εταιρείας IMERYS Minerals Ltd..

Στο τεχνικό δελτίο του μετακαολίνη αναφέρεται ότι η ποζολανική δραστικότητα του είναι ίση με 950 mg δεσμευμένου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g ποζολάνης.

Πίνακας 2.3 Ιδιότητες μετακαολίνη.

Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm³)	0.38
Πραγματική πυκνότητα (g/cm³)	2.52
Ειδική επιφάνεια (m²/g)	13.83
Ολικό SiO₂ (%)	54.19
Δραστικό SiO₂ (%)	44.59
f_c (MPa) από δοκιμή ποζολανικότητας	13.1

2.2.3. Αδρανή

- Άμμος S.Q., χαλαζιακή ποταμίσια.
- Άμμος S.Cc.2-4, θραυστή λατομείου ασβεστολιθικής σύστασης.
- Θραυσμένο Κεραμικό C.F.2

Πίνακας 2.4 Ιδιότητες αδρανών.

Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm³)	1.89
Πραγματική πυκνότητα (g/cm³)	2.64
Ολικό πορώδες (%)	28.4

2.2.4. Οπτόπλινθοι

Χρησιμοποιήθηκαν συμπαγείς οπτόπλινθοι βιομηχανικής παραγωγής, διαστάσεων 34.3x34.3x4.2 cm και φαινόμενης πυκνότητας ίσης με 1.79 g/cm³.

Πίνακας 2.5 Ιδιότητες οπτόπλινθων.

f_c (MPa)	24.6
f_f (MPa)	4.1
V_{us} (m/s)	2065
E_d (GPa)	6.341
Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm³)	1.79
Διορθωμένη πυκνότητα (g/cm³)	2.68
Ολικό πορώδες (%)	33.5
Συντελεστής Υδαταπορροφ. (g/cm²s^{1/2})	0.041
Ροφημένο Νερό – Εμβάπτιση (%)	14.40

2.3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Οι μηχανικές ιδιότητες των τριών κονιαμάτων που μελετούνται στην παρούσα εργασία είχαν προσδιορισθεί (Αγγελακοπούλου 2006) με διάφορες δοκιμές, ως εξής:

- Θλιπτική (f_c) και καμπτική (f_{fl}) αντοχή κατά τα πρότυπα ASTM C116-99 και ASTM C78-00 αντίστοιχα
- Στατικό μέτρο ελαστικότητας (E_{st}) κατά το πρότυπο ASTM C116-99
- Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_d) με τη μέθοδο των υπερήχων κατά το πρότυπο ASTM C597-97.

Εκτός του E_{st} , το οποίο προσδιορίστηκε μόνο μετά από διάστημα 12 μηνών, οι υπόλοιπες ιδιότητες μετρήθηκαν σε διαστήματα 1, 3, 6 και 12 μηνών μετά τη χύτευση των δοκιμίων. Στους 12 μήνες έγιναν δύο δοκιμές, μία για δοκίμιο συντηρημένο στο εργαστήριο και μία για δοκίμιο συντηρημένο επί τόπου, μαζί με το αντίστοιχο δοκίμιο τοιχοποιίας.

Για κάθε σύνθεση χυτεύθηκαν 12 πρισματικές μήτρες διαστάσεων 10x10x50 cm για την αποτίμηση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων και 3 κυλινδρικές μήτρες διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm για την αποτίμηση της θλιπτικής αντοχής και του στατικού μέτρου ελαστικότητας.

Τα καλούπια μετά την πλήρωση τους, καλύφθηκαν με λινάτσες οι οποίες διαβρέχονταν ώστε τα δοκίμια να παραμένουν σε σταθερές συνθήκες υγρασίας RH> 95% μέχρι το ξεκαλούπωμα 7 ημέρες μετά. Μετά την απομάκρυνση τους από τα καλούπια, τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου με υγρασία RH=50 ± 5 %. Η θερμοκρασία ήταν 20 ± 2 °C τόσο πριν όσο και μετά το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων και μέχρι τη θραύση τους.

Επιπροσθέτως, έγιναν δοκιμές σε δοκίμια συντηρημένα στις ίδιες συνθήκες με τα δοκίμια τοιχοποιίας (βλ. Ενότητα 3.1).

Οι ιδιότητες που προσδιορίστηκαν εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα. Ο χαρακτηρισμός «επί τόπου» αναφέρεται στα δοκίμια που συντηρήθηκαν όμοια με τους τοιχίσκους.

Πίνακας 2.6 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων [13].

Σύνθεση	Χρόνος (μήνες)	Φαινόμενη Πυκνότητα (Mgr/m ³)	f _c (MPa)	f _n (Mpa)	E _{st} (Gpa)	V _{υπερήχων} (m/s)	E _d (GPa)
NHL.CF2.S.	1	1.97	10.10	0.90		3293	17.827
	3	1.93	14.50	1.82		3652	21.471
	6	1.92	17.50	2.07		3337	17.805
	12	1.85	18.70	2.22	3.574	3469	18.547
	12 - Επί τόπου	1.77	9.70	1.60	–	3255	15.628
MK2.5.CF2.S.	1	1.72	5.00	0.90		2008	5.789
	3	1.63	8.70	1.76		2402	7.851
	6	1.63	8.50	1.52		2442	8.085
	12	1.62	8.40	1.50	0.824	2274	6.981
	12 - Επί τόπου	1.57	4.60	1.20	–	1953	4.989
LCem.CF2.S.	1	1.90	19.00	2.31		3213	16.380
	3	1.87	19.80	3.20		3610	20.307
	6	1.84	22.90	3.51		3418	17.932
	12	1.83	24.80	3.38	4.744	3214	15.742
	12 - Επί τόπου	1.82	11.60	3.50	–	3152	15.065

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.6, παρατηρείται ότι οι αντοχές της σύνθεσης της υδραυλικής ασβέστου (NHL.CF2.S.) αυξάνουν κατά το διάστημα των 12 μηνών ωρίμανσης. Η σύνθεση με το μετακαολίνη (MK2.5.CF2.S.) παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή αντοχών για 3 μήνες ωρίμανσης, ενώ μετά μειώνονται ελαφρά. Η σύνθεση LCem.CF2.S., που περιείχε τσιμέντο, εμφάνισε αύξηση της θλιπτικής αντοχής καθ' όλη τη διάρκεια των 12 μηνών, αντίθετα με την καμπτική αντοχή, η οποία μειώθηκε κατά τους 6 τελευταίους μήνες. Διαπιστώνεται, τέλος, ότι η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων του τσιμέντου και της υδραυλικής ασβέστου είναι αρκετά υψηλή ώστε να χρησιμοποιηθούν οι συγκεκριμένες σε αποκαταστάσεις ιστορικών κατασκευών.

Αντίθετα, στην περίπτωση συντήρησης «επί τόπου», ήτοι σε συνθήκες όμοιες με τα δοκίμια της τοιχοποιίας, και για τις τρεις συνθέσεις η θλιπτική αντοχή είναι περίπου το μισό αυτής που καταγράφηκε για συντήρηση σε συνθήκες εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα ποικίλλουν για την καμπτική αντοχή, καθώς μειώθηκε λίγο στην περίπτωση της σύνθεσης MK2.5.CF2.S., κατά το ήμισυ για την NHL.CF2.S., ενώ αυξήθηκε στην περίπτωση της LCem.CF2.S.. Καθώς οι προκύπτουσες στην πράξη

θλιπτικές αντοχές των συνθέσεων υδραυλικής ασβέστου και τσιμέντου είναι αρκετά χαμηλότερες, ενδεχομένως τελικά να είναι δυνατή η χρήση τους σε επεμβάσεις.

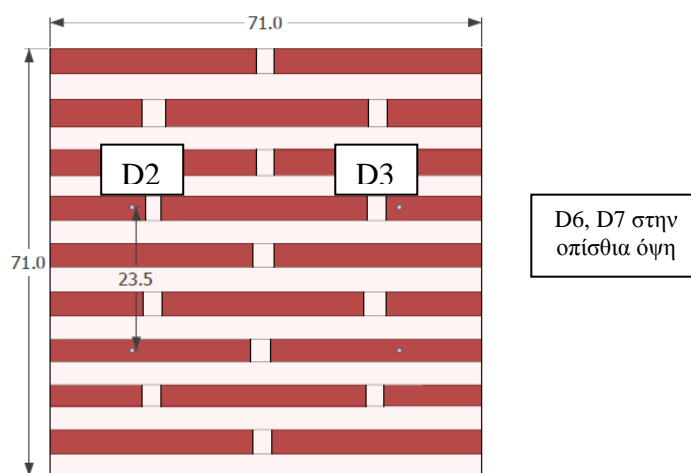
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 δοκιμές θλίψης δοκιμίων τοιχοποιίας. Τα δοκίμια αποτελούνταν από 9 σειρές οπτόπλινθων, διαστάσεων 34.3x34.3x4.2 cm, καθ' ύψος, με κάθε σειρά να αποτελείται από δύο οπτόπλινθους, ενώ το πλάτος των δοκιμίων ήταν ίσο με το πλάτος των οπτόπλινθων. Οι αρμοί, οριζόντιοι και κατακόρυφοι, είχαν πάχος ίσο με αυτό των οπτόπλινθων.

Οι τοιχοποιίες κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας και χτίστηκαν σταδιακά, ώστε να αποφευχθεί η μείωση του πάχους του αρμού εξαιτίας του βάρους των υπερκείμενων στρώσεων. Μετά την κατασκευή τους, τα δοκίμια καλύφθηκαν με λινάτσες, οι οποίες διαβρέχονταν καθημερινά για τις 3 πρώτες ημέρες, εν συνεχεία κάθε 2 μέρες για τις επόμενες 4 και τελικά παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος στο χώρο του Εργαστηρίου. Πριν τις δοκιμές, εδράζονταν σε μεταλλική βάση με μια λεπτή στρώση κονιάματος γύψου, ενώ κονίαμα γύψου τοποθετούνταν και στην άνω επιφάνεια για επιπέδωσή της.

Οι θλιπτικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο EN 1052-1 “Method of test for masonry – Part 1: Determination of compressive strength” [14], στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, από τον Ιανουάριο έως τον Απρίλιο του 2014. Για τη μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκαν 4 ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα, δύο στην εμπρόσθια και δύο στην οπίσθια όψη του τοίχου, στο μεσαίο τρίτο του ύψους του. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μετρητική διάταξη.



Σχήμα 3.1 Μετρητική διάταξη θλιπτικών δοκιμών.



Εικόνα 3.1 Πειραματική διάταξη.

Η ονομασία των δοκιμίων προέκυψε από το είδος του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή κάθε δοκιμίου και έναν αύξοντα αριθμό. Για παράδειγμα, το όνομα «NHL1» δηλώνει το πρώτο δοκίμιο κατασκευασμένο με κονίαμα υδραυλικής ασβέστου NHL.CF2.S.. Στον παρακάτω Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δοκίμια.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά δοκιμίων.

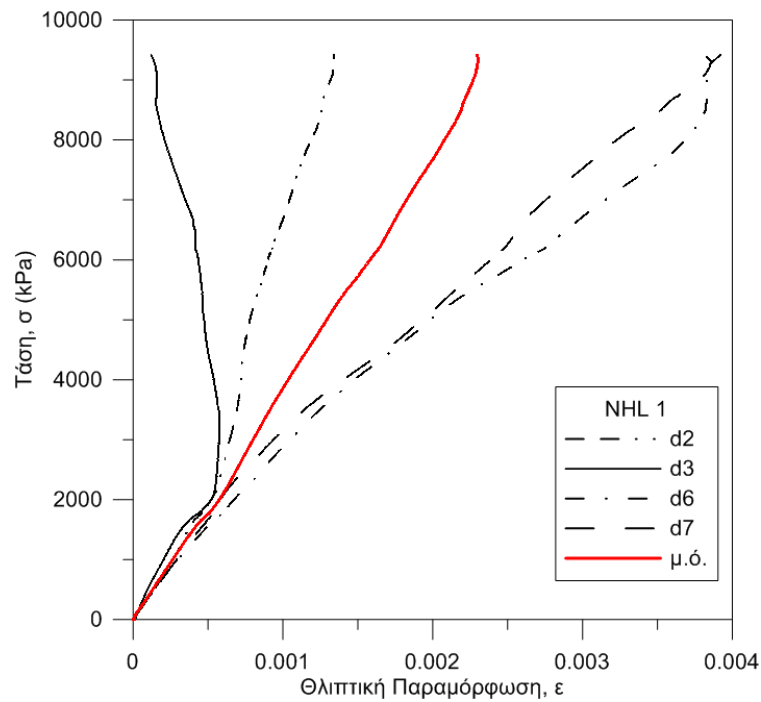
Αριθμός δοκιμίου	Ονομασία δοκιμίου	Κονίαμα	Διαστάσεις l x h x t (cm)	Ποκνότητα (kg/m³)
1	NHL 1	NHL.CF2.S.	73x72x34	1706.7
2	NHL 2	NHL.CF2.S.	70.5x72x34	1767.3
3	NHL 3	NHL.CF2.S.	73.5x68.3x34.4	1818.8
4	MK 1	MK2.5.CF2.S.	71x50x35	1540.0
5	MK 2	MK2.5.CF2.S.	71x67x35	1520.2
6	LCem 1	LCem.CF2.S.	70.5x72x35	1632.3
7	LCem 2	LCem.CF2.S.	71x71x35	1672.0
8	LCem 3	LCem.CF2.S.	73x71x34.5	1677.7

3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η πορεία κάθε πειράματος ξεχωριστά. Επίσης, δίνονται οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης που εξήχθησαν κάθε φορά.

3.2.1. Δοκίμιο NHL 1

Στο δοκίμιο NHL 1 παρουσιάστηκε εκκεντρότητα της φόρτισης μεταξύ εμπρόσθιας και οπίσθιας όψης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης. Τελικώς, η μέγιστη τάση που καταγράφηκε ήταν ίση με 9.41 MPa. (Δεν υπάρχουν εικόνες της τελικής κατάστασης του συγκεκριμένου δοκιμίου.)



Σχήμα 3.2 Δοκίμιο NHL 1 – διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.

3.2.2. Δοκίμιο NHL 2

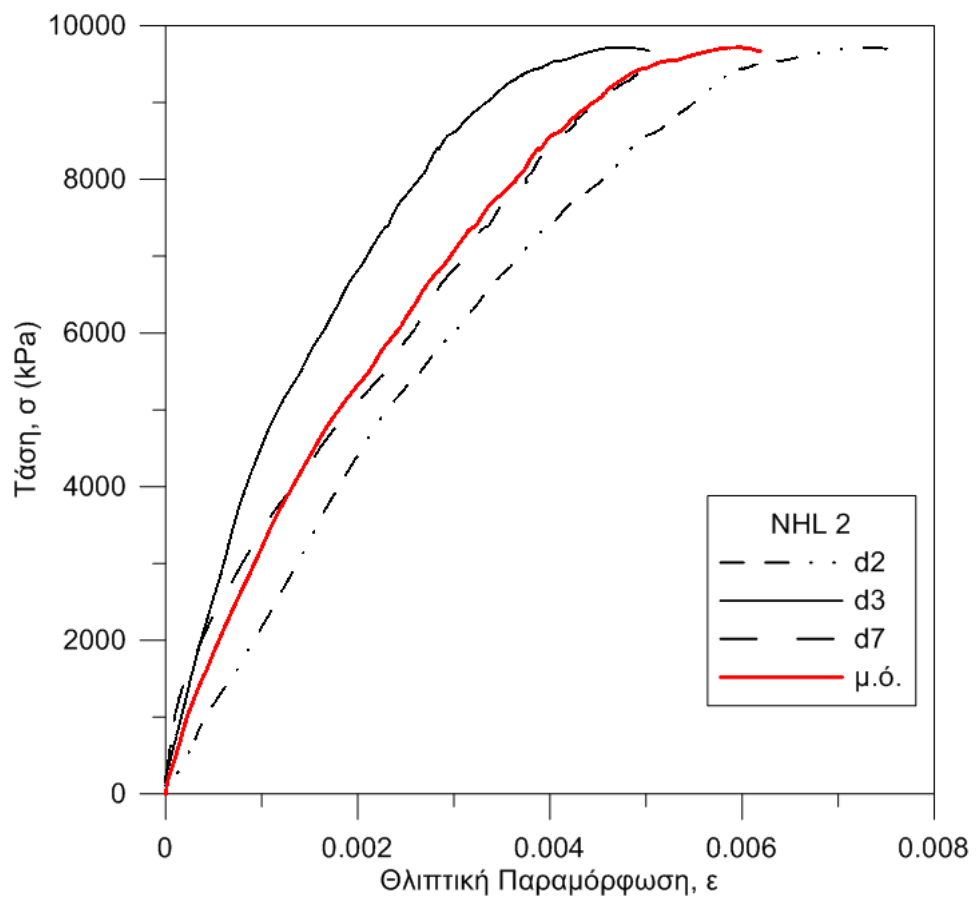
Στο δοκίμιο NHL 2 παρατηρήθηκε αποκόλληση όλης της εμπρόσθιας όψης κατά την αστοχία του, ενώ οι ρωγμές που φαίνονται στο υπόλοιπο τμήμα διαπερνούν το πάχος του. Επίσης αποκολλήθηκε ένα τριγωνικό τμήμα, μικρότερου πάχους, της πίσω όψης. Η αστοχία επήλθε για τάση ίση με 9.71 MPa.



Εικόνα 3.2 Δοκίμιο NHL 2 - Εμπρόσθια όψη, τελική κατάσταση.



Εικόνα 3.3 Δοκίμιο NHL 2 – Πίσω όψη, τελική κατάσταση.



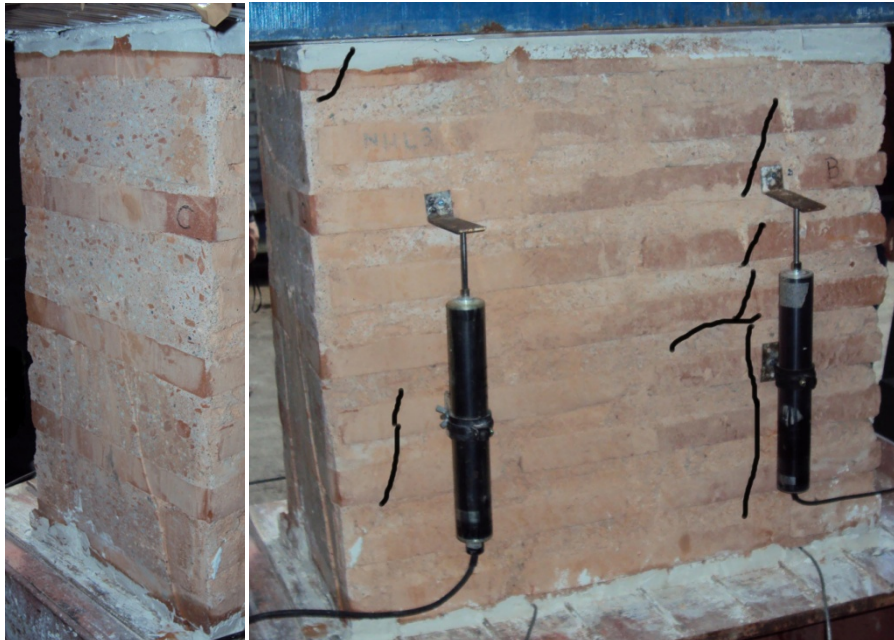
Σχήμα 3.3 Δοκίμιο NHL 2 – διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.

3.2.3. Δοκίμιο NHL 3

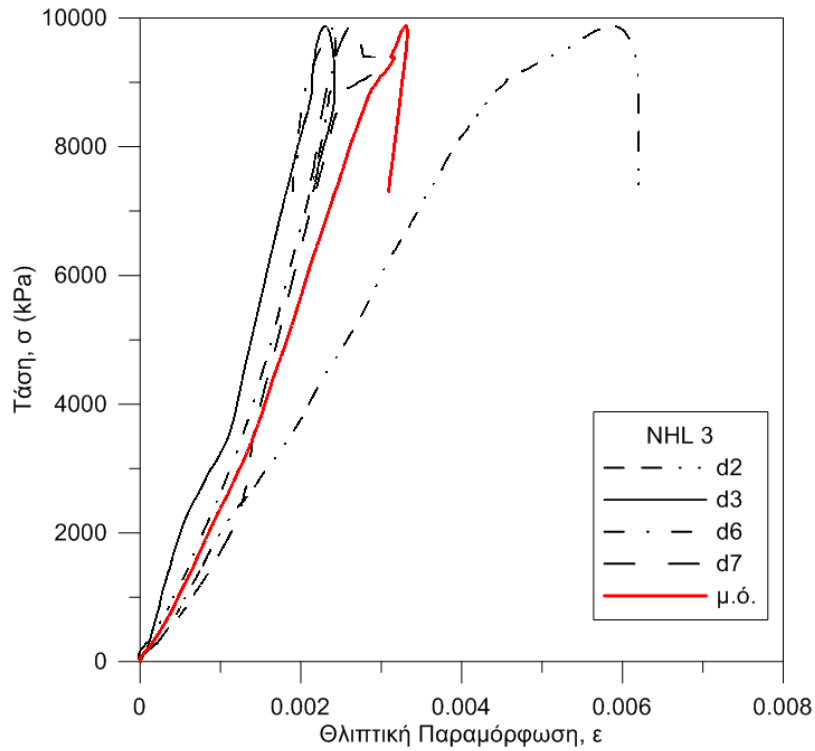
Το συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσίασε κατακόρυφες ρωγμές στη θέση των μηχανοσυστημάτων της δεξιάς του πλευράς. Η μέγιστη τάση ήταν ίση με 9.88 MPa, η μεγαλύτερη που παρατηρήθηκε από όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν.



Εικόνα 3.4 Δοκίμιο NHL 3 – Όψη D - Όψη A.



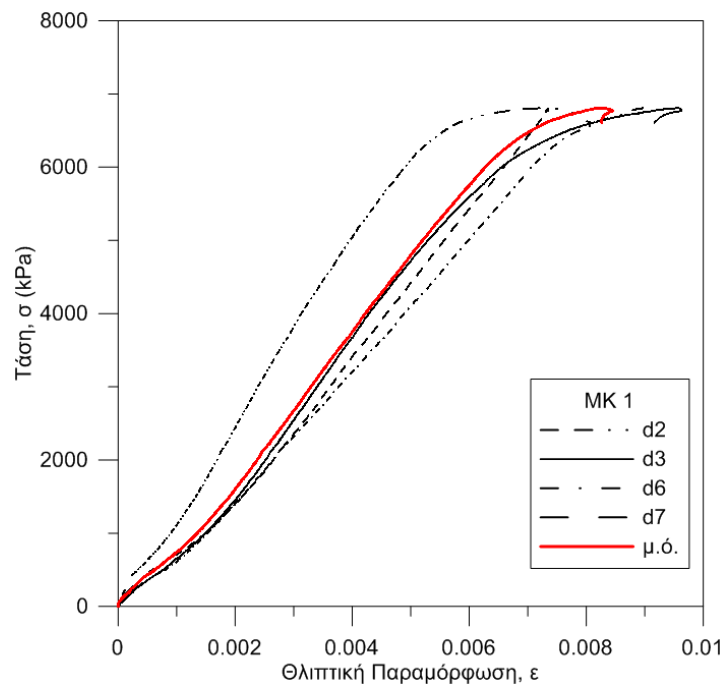
Εικόνα 3.5 Δοκίμιο NHL 3 – Όψη C - Όψη B.



Σχήμα 3.4 Δοκίμιο NHL 3 – διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

3.2.4. Δοκίμιο MK 1

Το δοκίμιο αστόχησε για τάση 6.76 MPa. (Δεν υπάρχουν εικόνες της τελικής κατάστασης του συγκεκριμένου δοκιμίου.)



Σχήμα 3.5 Δοκίμιο MK 1 – διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

3.2.5. Δοκίμιο MK 2

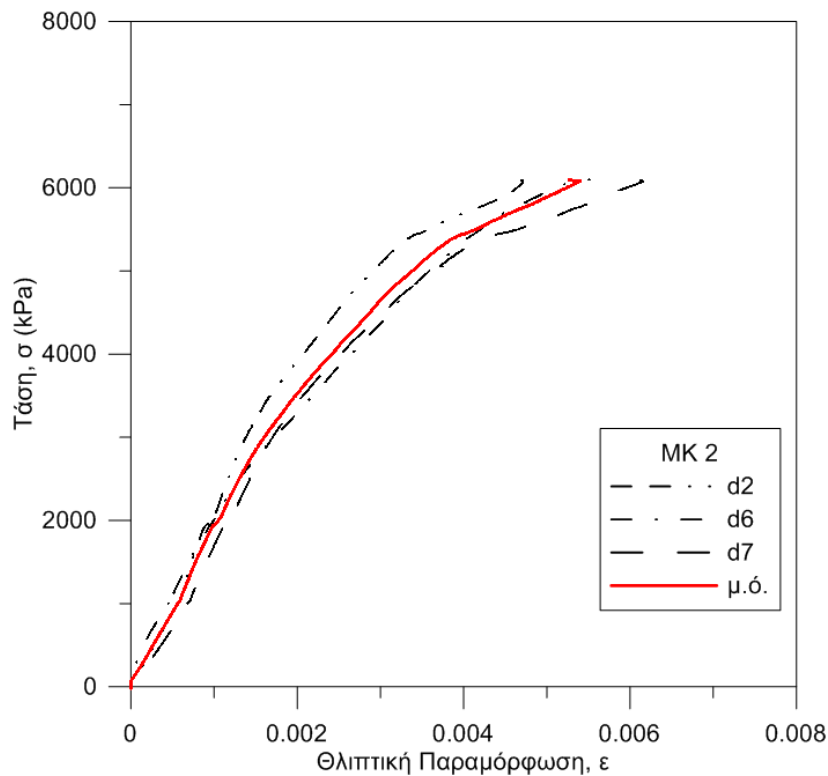
Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, οι ρωγμές συγκεντρώθηκαν στα δύο ακραία τρίτα, ενώ υπήρξε σύνθλιψη της κάτω γωνίας μεταξύ A και D όψης. Κυρίως κατακόρυφες ρηγματώσεις παρατηρήθηκαν και στις δύο πλαϊνές όψεις του δοκιμίου. Η μέγιστη θλιπτική τάση ήταν ίση με 6.13 MPa.



Εικόνα 3.6 Δοκίμιο MK 2 – Όψη D - Όψη A.



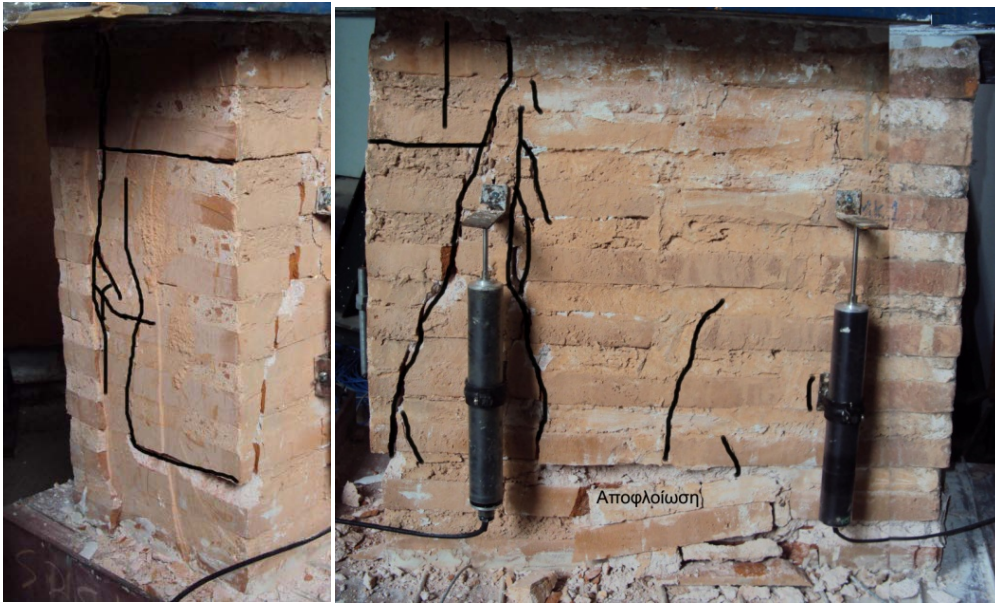
Εικόνα 3.7. Δοκίμιο MK 2 – Όψη C - Όψη B.



Σχήμα 3.6 Δοκίμιο MK 2 – διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

3.2.6. Δοκίμιο LCem 1

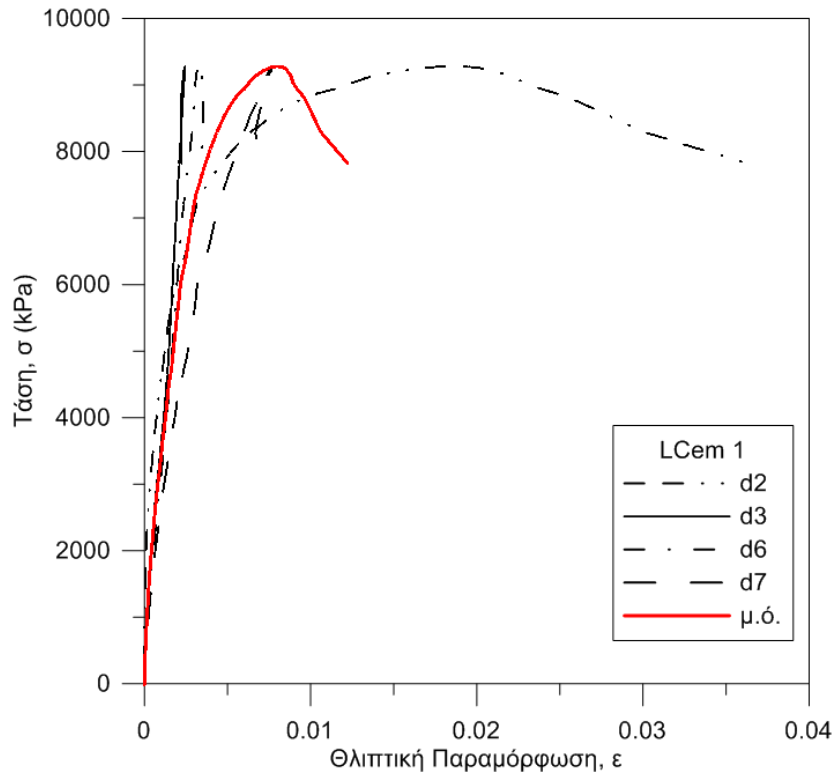
Στο δοκίμιο LCem 1 παρατηρήθηκε αποκόλληση της γωνίας μεταξύ των όψεων A – D στο μεσαίο τρίτο περίπου του ύψους του δοκιμίου. Επίσης στην όψη A παρατηρήθηκε αποφλοΐωση των 2 κάτω στρώσεων οπτόπλινθων στο μέσο, καθώς και έντονη ρηγμάτωση κοντά στη θέση του μηκυσιόμετρου D2. Στην όψη D δημιουργήθηκαν δύο σημαντικές κατακόρυφες ρωγμές, ενώ δύο οριζόντιες ρωγμές σχηματίστηκαν στη διεπιφάνεια οπτόπλινθου-κονιάματος. Η όψη C παρουσίασε μόνο μικρή αποφλοΐωση στην κάτω ίνα. Στην όψη B παρατηρήθηκαν ρωγμές κοντά στο μηκυσιόμετρο D7, που βρίσκεται πίσω από το D2 της όψης A, και αποφλοΐωση των κάτω στρώσεων. Η συγκέντρωση των ρωγμών στη μία πλευρά του δοκιμίου φαίνεται και στις αντίστοιχες καταγραφές τάσης – παραμόρφωσης. Η μέγιστη τάση που καταγράφηκε ήταν ίση με 9.28 MPa.



Εικόνα 3.8 Δοκίμιο LCem 1 – Όψη D - Όψη Α.



Εικόνα 3.9. Δοκίμιο LCem 1 – Όψη C - Όψη Β.



Σχήμα 3.7 Δοκίμιο LCem 1 - διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

3.2.7. Δοκίμιο LCem 2

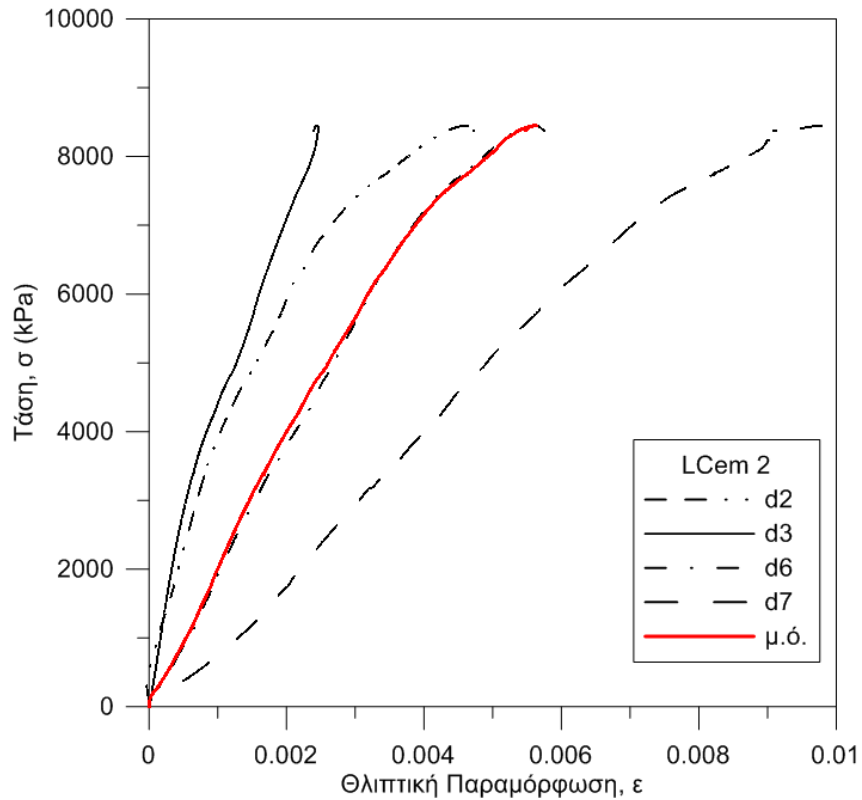
Στο δοκίμιο LCem 2 παρατηρήθηκε πλήρης αποκόλληση της γωνίας μεταξύ των όψεων A – D. Επίσης στην όψη A (εμπρόσθια) παρατηρήθηκε αποφλοιώση των οπτόπλινθων στα αριστερά της πάνω και κάτω στρώσης. Η ρωγμή κατά μήκος της όψης D βρίσκεται στο μέσο περίπου της όψης, κλίνοντας προς τα αριστερά στη βάση του δοκιμίου. Όμοια ρηγμάτωση υπήρξε και στην όψη C. Στην όψη B (πίσω) παρατηρήθηκαν κυρίως κατακόρυφες ρωγμές, αλλά και λοξές, ενώ στο μέσο της όψης υπήρξε αποκόλληση ενός τριγωνικού τμήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι ρωγμές διαπερνούν και τους αρμούς και τους οπτόπλινθους. Η μέγιστη τάση ήταν ίση με 8.45 MPa.



Εικόνα 3.10 Δοκίμο LCem 2 – Όψη D - Όψη Α.



Εικόνα 3.11 Δοκίμο LCem 2 – Όψη C - Όψη Β.



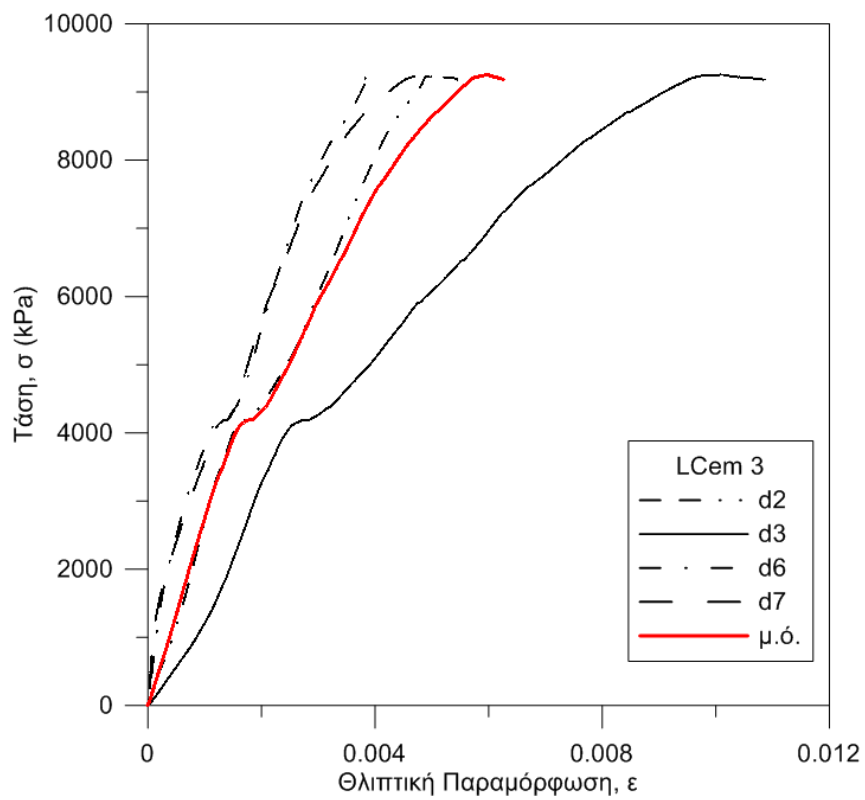
Σχήμα 3.8 Δοκίμιο LCem 2 – διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

3.2.8. Δοκίμιο LCem 3

Τέλος, το δοκίμιο LCem 3 αρχικά παρουσίασε αποφλοιώση των οπτόπλινθων της κάτω στρώσης και , ενώ με την αύξηση του φορτίου δημιουργήθηκαν κατακόρυφες ρωγμές στα δύο ακραία τμήματα. Η τελική κατάσταση του δοκιμίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η μέγιστη τάση που καταγράφηκε ήταν ίση με 9.252



Εικόνα 3.12 Δοκίμιο LCem 3 – Τελική κατάσταση.



Σχήμα 3.9 Δοκίμιο LCem 3 – διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1. ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ & ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι θλιπτικές αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίστηκαν για κάθε δοκίμιο τοιχοποιίας. Το μέτρο ελαστικότητας κατά το EN 1052-1 υπολογίζεται στο 1/3 της αντοχής του δοκιμίου.

Πίνακας 4.1 Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμίων.

Αριθμός δοκιμίου	Ονομασία δοκιμίου	F_{max} (kN)	f_c (MPa)	E (GPa)
1	NHL 1	2336.02	9.41	3.77
2	NHL 2	2328.78	9.72	3.17
3	NHL 3	2496.81	9.88	2.45
4	MK 1	1691.41	6.77	0.90
5	MK 2	1521.97	6.13	1.90
6	LCem 1	2289.30	9.28	3.63
7	LCem 2	2099.61	8.45	2.06
8	LCem 3	2330.15	9.25	2.74

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν η μέση και η χαρακτηριστική αντοχή των τριών ομάδων δοκιμίων, καθώς και το μέσο μέτρο ελαστικότητας.

Πίνακας 4.2 Μέση και χαρακτηριστική αντοχή, μέσο μέτρο ελαστικότητας.

Ομάδα	Μέση αντοχή, f (MPa)	Χαρακτηριστική αντοχή, f_k (MPa)	Μέσο μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)
NHL	9.67	8.05	3.13
MK	6.44	5.37	1.40
LCem	8.99	7.49	2.81

Παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας έδειξαν τα δοκίμια με το κονίαμα υδραυλικής ασβέστου, ακολουθούμενα από αυτά με το κονίαμα τσιμέντου. Τα δοκίμια με τη σύνθεση του μετακαολίνη είχαν περίπου το μισό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις άλλες δύο συνθέσεις.

4.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΠΟ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γενικά δεν υπάρχουν εκτενή δεδομένα γύρω από τις ιστορικές μονόστρωτες τοιχοποιίες μεγάλου αρμού, ενώ και τα διαθέσιμα χαρακτηρίζονται από μεγάλες αποκλίσεις, ώστε να μην έχουν αναπτυχθεί αξιόπιστες σχέσεις που να συνδέουν τις αντοχές του κονιάματος και των δομικών μονάδων με αυτή της τοιχοποιίας ως σύνθετο υλικό.

Οι αντοχές που υπολογίστηκαν από τα πειράματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εξής σχέσεις:

$$\bullet \quad f_c = \frac{\frac{2}{3}\sqrt{f_{bc}} + k_1 \cdot f_{mc} - k_2}{1 + 3.50\left(\frac{V_m}{V_w} - 0.30\right)}, \quad (1)$$

όπου λαμβάνονται $k_1 = 0.20$ και $k_2 = 0$ MPa για οπτοπλινθοδομή [15], [16]

$$\bullet \quad f_k = K \cdot f_b^{0.70} \cdot f_m^{0.70}, \quad (2)$$

(σχέση EC 6) όπου λαμβάνεται $K = 0.45$ συντηρητικά, καθώς δεν είναι γνωστή η σύσταση των οπτόπλινθων [17]

Σημειώνεται ότι η σχέση (2) από τον Ευρωκώδικα 6 χρησιμοποιείται εδώ καταχρηστικά, καθώς αφενός αναφέρεται σε νέες και όχι ιστορικές τοιχοποιίες, αφετέρου δεν έχει αναπτυχθεί για περιπτώσεις όπου το κονίαμα των αρμών είναι ισοπαχές με τους οπτόπλινθους. Παρόλα αυτά, θεωρήθηκε σκόπιμη η εφαρμογή της, αφού αποτελεί την πιο γνωστή σχέση που συνδέει τις ιδιότητες των ξεχωριστών υλικών με αυτήν της τελικής τοιχοποιίας.

Ο υπολογισμός των αντοχών με βάση τις σχέσεις (1) και (2) έγινε δύο φορές, βάσει των δύο αποτελεσμάτων για την αντοχή του κονιάματος που είχαν εκτιμηθεί.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Παρατηρείται ότι παραδόξως η σχέση του Ευρωκώδικα δίνει αποτελέσματα που ανταποκρίνονται περισσότερο στις πραγματικές τιμές της αντοχής που εκτιμήθηκαν από τα πειράματα. Η σχέση (1) δίνει υπερβολικά συντηρητικά αποτελέσματα, οδηγώντας σε δαπανηρές ή και ανέφικτες επιλογές για την αποκατάσταση ιστορικών τοιχοποιιών του τύπου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Είναι, λοιπόν, προφανής η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης για την ανάπτυξη αξιόπιστων σχέσεων που να συνδέουν τις ιδιότητες της τοιχοποιίας με αυτές των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται.

Πίνακας 4.3 Υπολογισμός αντοχής τοιχοποιίας από βιβλιογραφικές σχέσεις.

Σχέση (1)		
NHL	12 μήνες	2.72
	Επί τόπου	2.03
MK	12 μήνες	1.93
	Επί τόπου	1.63
LCem	12 μήνες	3.19
	Επί τόπου	2.17
Σχέση (2)		
NHL	12 μήνες	10.20
	Επί τόπου	8.37
MK	12 μήνες	8.02
	Επί τόπου	6.69
LCem	12 μήνες	11.10
	Επί τόπου	8.83

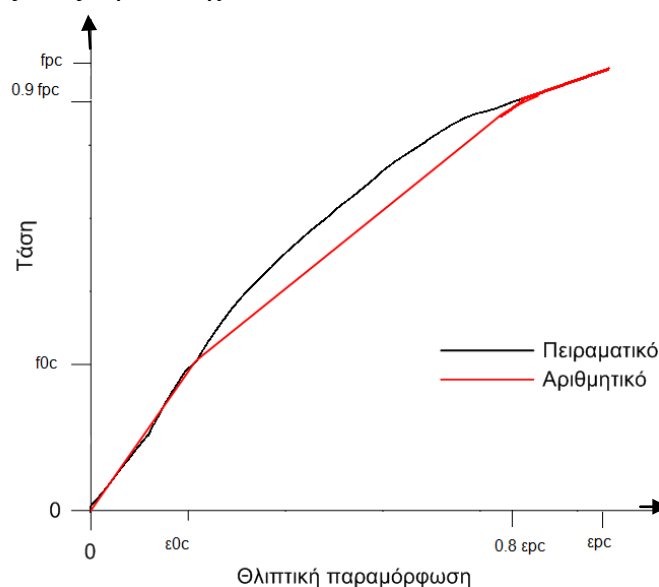
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας ήταν η προσομοίωση του συγκεκριμένου τύπου τοιχοποιίας με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Abaqus/Explicit, που χρησιμοποιεί τη δυναμική μέθοδο ρητής ολοκλήρωσης για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για δυναμικά φαινόμενα που πραγματοποιούνται σε υψηλές συχνότητες, αλλά και για την επίλυση ψευδοστατικών προβλημάτων.

Το προσομοίωμα που εφαρμόστηκε είχε αναπτυχθεί παλαιότερα στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας ([18], [19]) με βάση την υπορουτίνα VUMAT του Abaqus/Explicit, η οποία επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει τη μηχανική καταστατική συμπεριφορά ενός υλικού. Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος έγινε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε θλίψη προσομοιώθηκε με τριγωνικό μοντέλο, προσαρμόζοντας κατάλληλα το προσομοίωμα, για καλύτερη περιγραφή των καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων που εξήχθησαν από τα πειράματα. Οι τρεις κλάδοι ορίζονται ως εξής (βλ. Σχήμα 5.1):

- Α κλάδος: ελαστικός, ως το 1/3 της θλιπτικής αντοχής (f_c^0).
- Β κλάδος: ορίστηκε έως το επόμενο σημείο αλλαγής κλίσης, από το μέσο όρο των σημείων όπου αυτό συνέβη στα πειράματα.
- Γ κλάδος: έως την αστοχία.



Σχήμα 5.1 Τριγωνικό προσομοίωμα για θλίψη.

Το εν λόγω προσομοίωμα θεωρεί την άοπλη τοιχοποιία ως ορθότροπο υλικό και ελέγχει τους ακόλουθους 3 τύπους αστοχίας:

- αστοχία σε εφελκυσμό κάθετα και παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς
- αστοχία σε θλίψη κάθετα και παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς και
- αστοχία σε διάτμηση υπό κατακόρυφη θλιπτική δράση.

Οι παράμετροι του υλικού που εισάγονται στο προσομοίωμα είναι οι εξής: το μέτρο ελαστικότητας E , ο λόγος Poisson ν , η εφελκυστική αντοχή παράλληλα και κάθετα στους οριζόντιους αρμούς $f_{tx/y}^0$ και η αντίστοιχη μέγιστη εφελκυστική τροπή $\epsilon_{tx/y}^0$, η θλιπτική αντοχή παράλληλα και κάθετα στους οριζόντιους αρμούς $f_{cx/y}^p$ και η μέγιστη θλιπτική τροπή $\epsilon_{cx/y}^p$, η διατμητική αντοχή f_s , οι ενέργειες θραύσης $G_{tx/y}$ (εφελκυσμός) και G_s (διάτμηση), η παραμένουσα διατμητική αντοχή f_{sr} , η τάση για την οποία ανακτάται η δυσκαμψία του υλικού σε διεύθυνση παράλληλη και κάθετη στους οριζόντιους αρμούς $f_{px/y}$ και οι παράμετροι αποφόρτισης από εφελκυσμό, a_t , θλίψη, a_c , και διάτμηση, a_s .

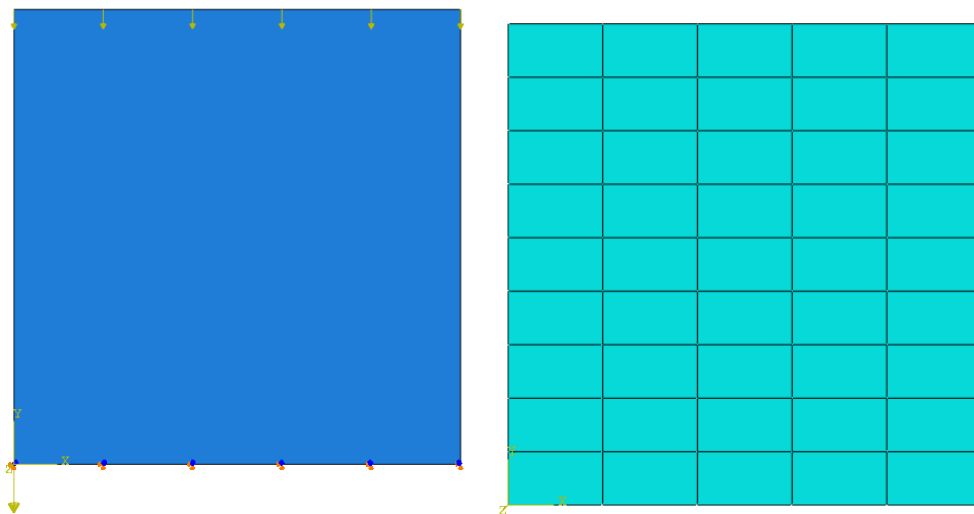
Γενικά, οι παράμετροι αυτοί μπορούν να προκύψουν από πειραματικές δοκιμές και σχέσεις ή τιμές που δίνονται στη βιβλιογραφία. Στην παρούσα εργασία έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η τοιχοποιία θεωρήθηκε απλουστευτικά και λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων ως ισότροπο υλικό.
- Το μέτρο ελαστικότητας, η θλιπτική αντοχή και η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση λήφθηκαν από τα πειραματικά δεδομένα.
- Η θλιπτική τάση «διαρροής», f_c^0 , λήφθηκε ίση με το 1/3 της θλιπτικής αντοχής, όπου έγινε και ο υπολογισμός του E κατά το πρότυπο EN 1052-1.
- Ο λόγος του Poisson θεωρήθηκε ίσος με 0.2.
- Η εφελκυστική αντοχή λήφθηκε ίση με το 10% της θλιπτικής.
- Η τάση ανάκτησης δυσκαμψίας θεωρήθηκε ίση με την εφελκυστική αντοχή.
- Η αντοχή σε διάτμηση f_s θεωρήθηκε ίση με 1.5 φορές την εφελκυστική αντοχή, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή λήφθηκε ίση με $0.6 \cdot f_s$.

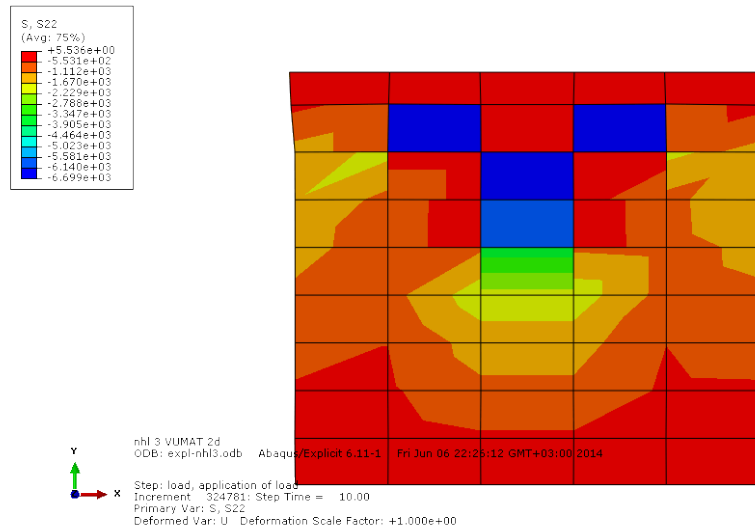
- Η ενέργεια θραύσης εφελκυστικής ρωγμής G_t θεωρήθηκε ίση με 0.2 από τη βιβλιογραφία και με δοκιμές βάσει των εξισώσεων που διέπουν το προσομοίωμα. Ομοίως, η ενέργεια θραύσης σε διάτμηση G_s θεωρήθηκε ίση με το 1% της αντοχής σε διάτμηση εκφρασμένης σε kPa ή με το 1, όποιο ήταν μικρότερο.
- Τέλος, και οι τρεις παράμετροι αποφόρτισης λήφθηκαν ίσες με 0.8.

5.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για την προσομοίωση των θλιπτικών δοκιμών επί των δοκιμίων τοιχοποιίας, χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατα στοιχεία κελύφους (CPS4R). Καθώς το προσομοίωμα αναφέρεται στην τοιχοποιία ως σύνθετο υλικό, το ύψος των στοιχείων ορίστηκε ως το πάχος ενός αρμού κονιάματος συν ενός σπτόπλινθου. Η κατακόρυφη δράση επιβλήθηκε ως κατανεμημένη δύναμη ανά κόμβο της άνω ίνας. Η βάση του τοιχίσκου θεωρήθηκε πακτωμένη. Καταγράφηκαν οι μετατοπίσεις των αντίστοιχων σημείων με τις θέσεις των μηκυνσιόμετρων της πειραματικής διάταξης, καθώς και η αντίδραση στη βάση του τοίχου.



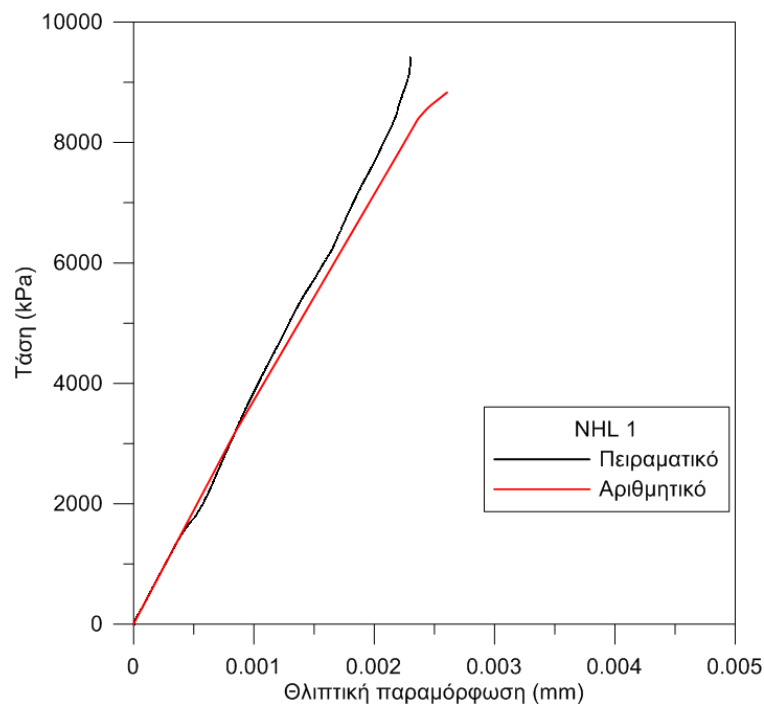
Εικόνα 5.1 Φόρτιση φορέα και δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.



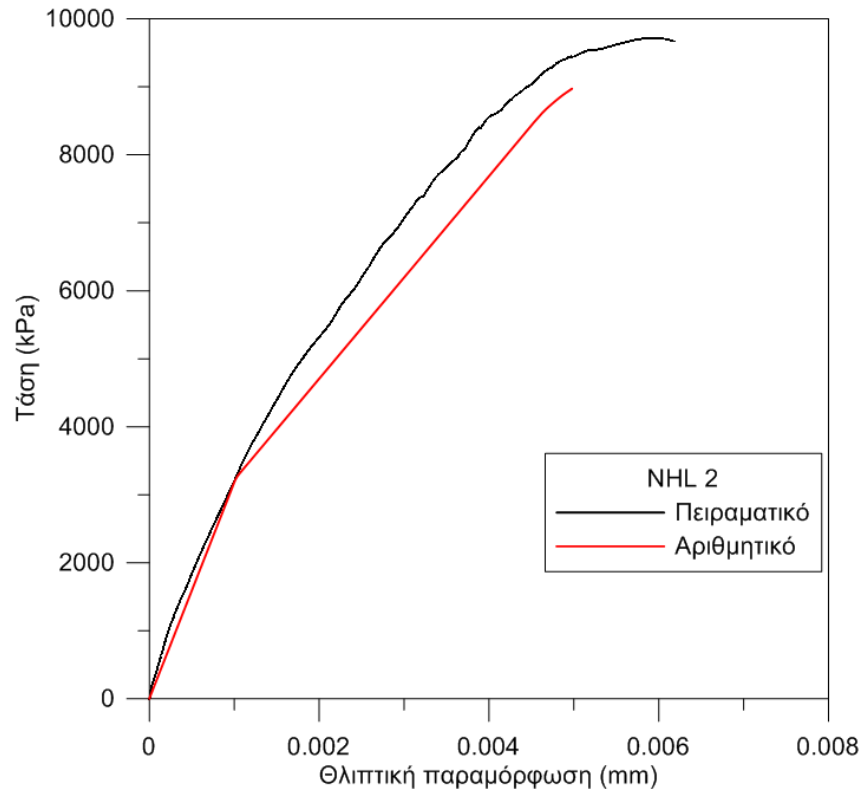
Εικόνα 5.2 Ενδεικτική κατανομή τάσεων κατά την αστοχία.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων που εξήχθησαν από την ανάλυση για κάθε δοκίμιο σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά. Όπου αποκλίνουν οι δύο καμπύλες, αυτό οφείλεται στην προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης με τριγωνικό μοντέλο, ενώ ορισμένες ανωμαλίες των πειραματικών διαγραμμάτων δεν μπορούν να αναπαραχθούν αριθμητικά, καθώς οφείλονται σε φαινόμενα που δε λαμβάνονται υπόψη στο προσομοίωμα.

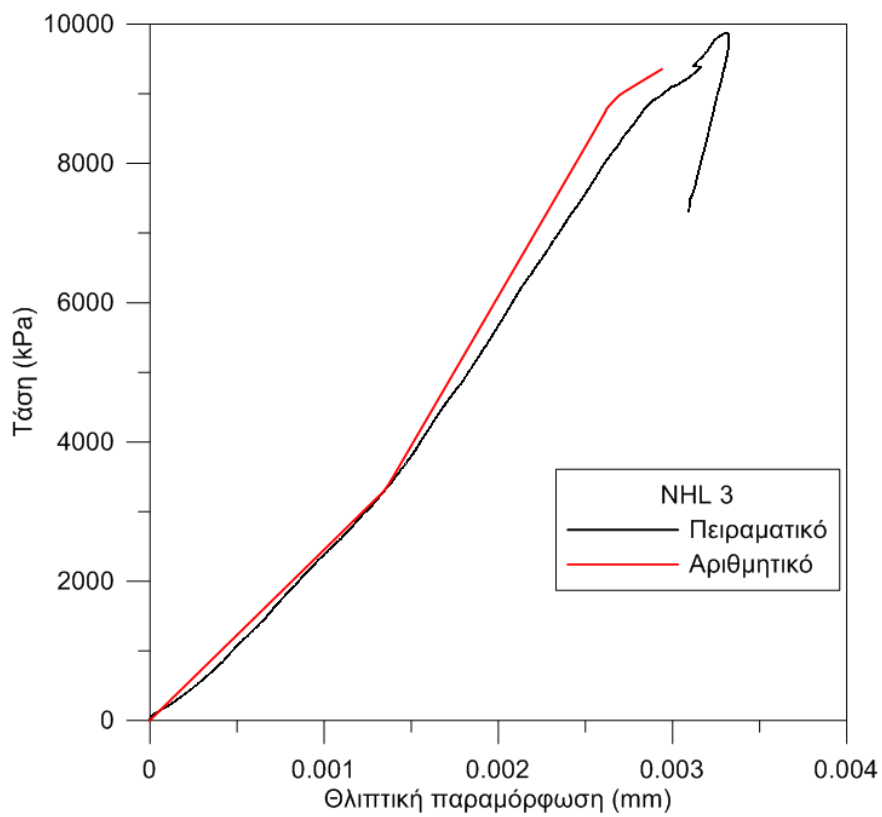
Εν γένει διαπιστώνεται ότι το αριθμητικό προσομοίωμα, μετά την κατάλληλη βαθμονόμηση, περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των δοκιμίων.



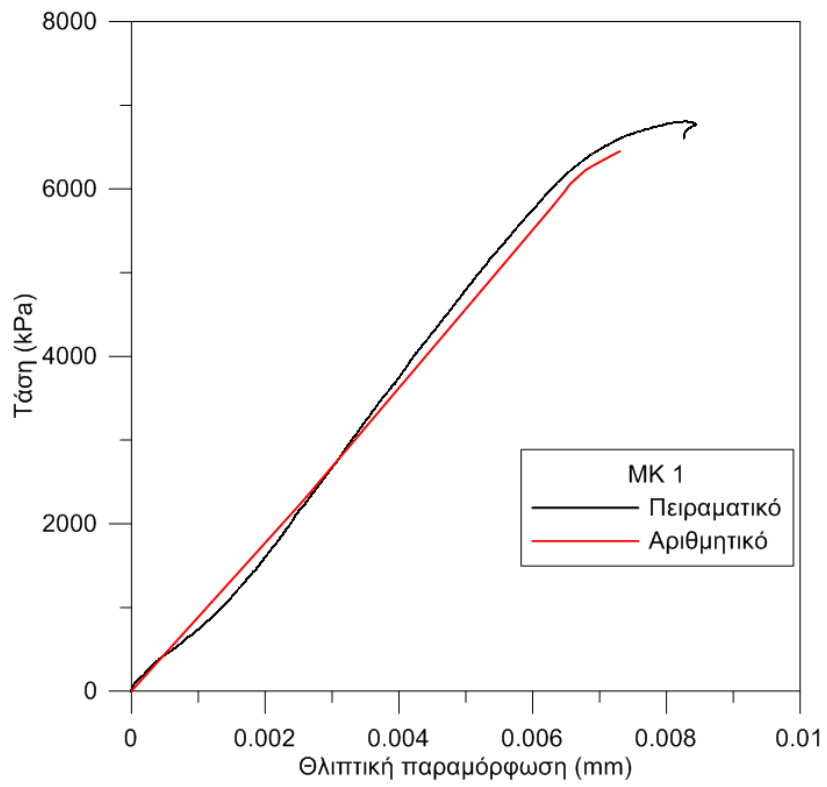
Σχήμα 5.2. Δοκίμιο NHL 1.



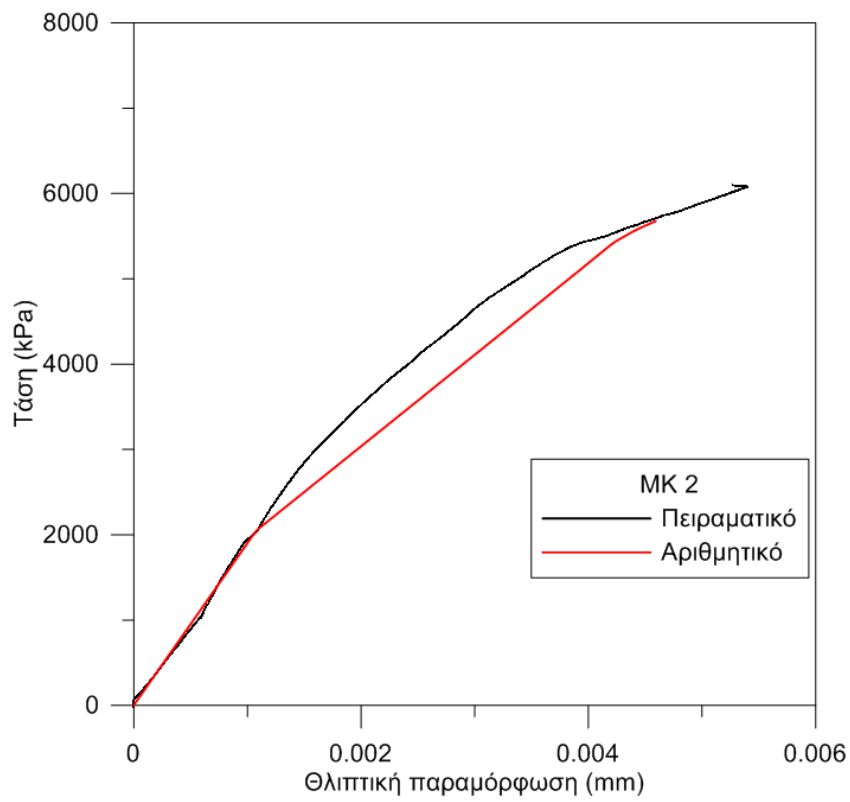
Σχήμα 5.3 Δοκίμιο NHL 2.



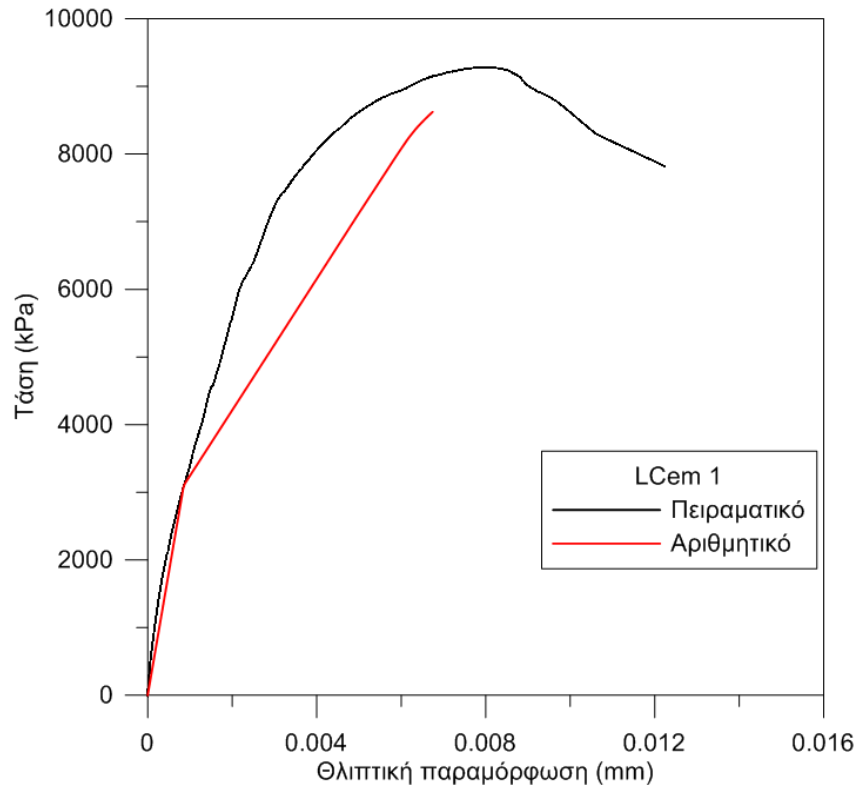
Σχήμα 5.4 Δοκίμιο NHL 3.



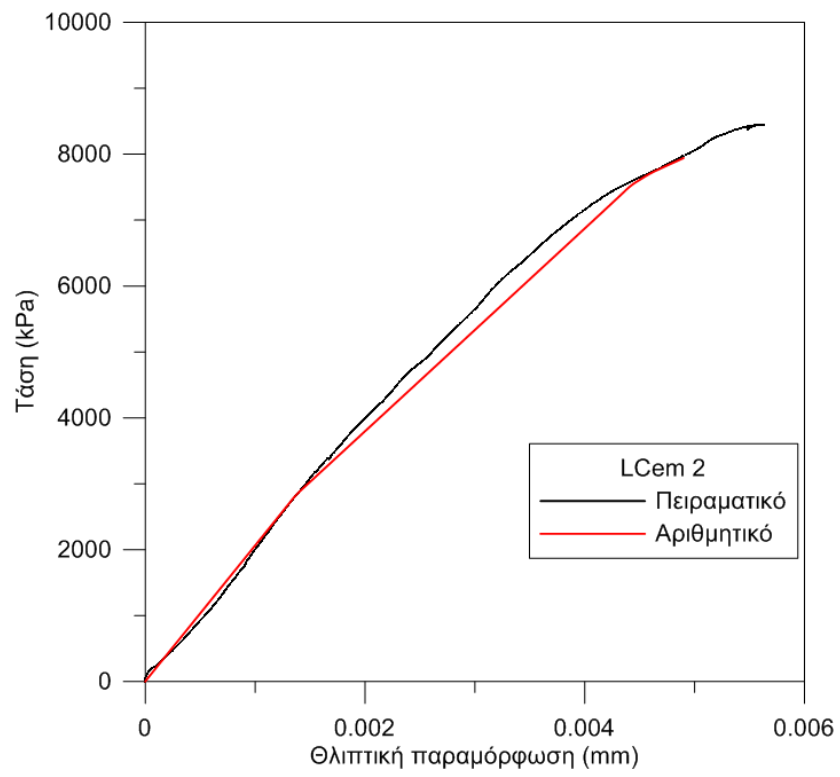
Σχήμα 5.5 Δοκίμιο MK 1.



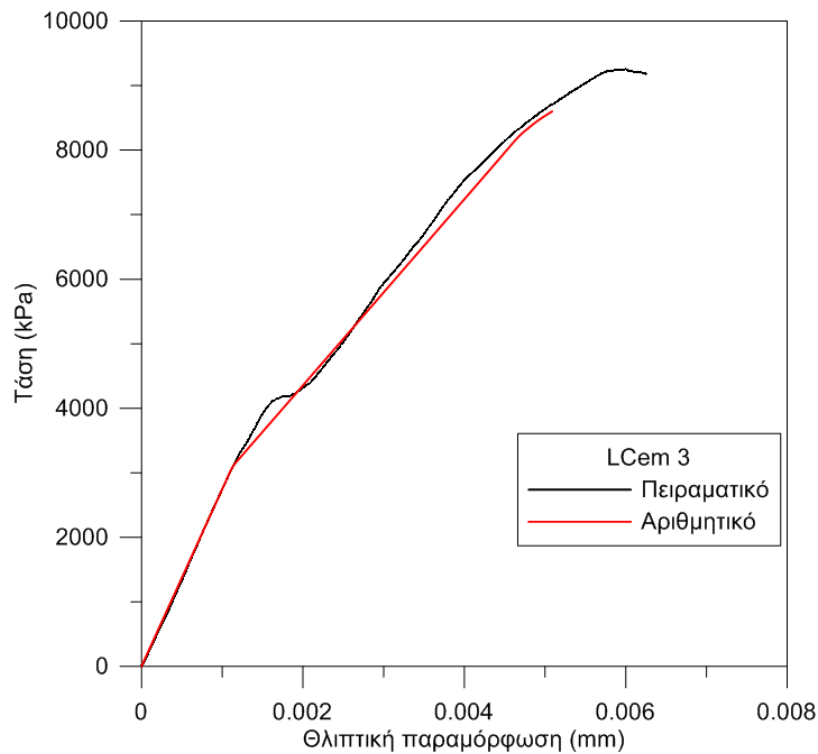
Σχήμα 5.6 Δοκίμιο MK 2.



Σχήμα 5.7 Δοκίμιο LCem 1.



Σχήμα 5.8 Δοκίμιο LCem 2.



Σχήμα 5.9 Δοκίμιο LCem 3.

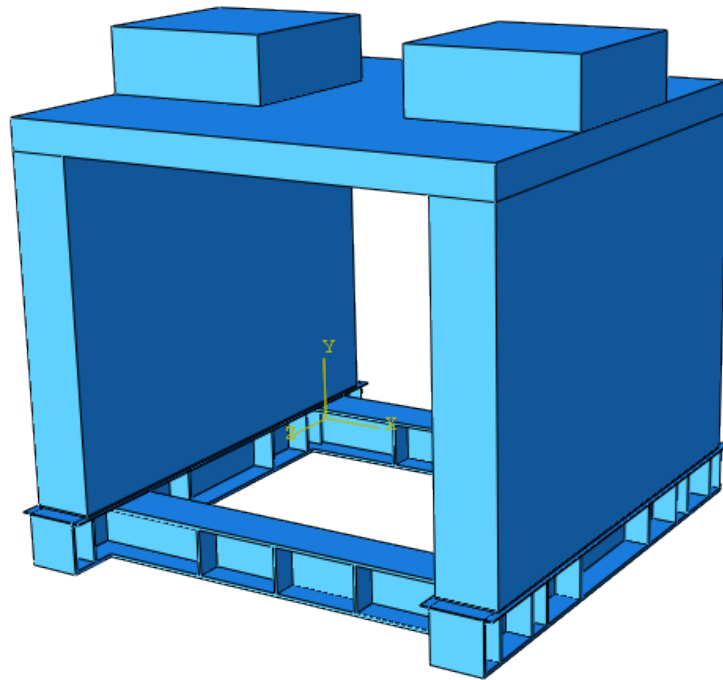
5.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στη συνέχεια, πάλι με το λογισμικό Abaqus, έγινε προσπάθεια αναπαραγωγής πειραματικών αποτελεσμάτων από σεισμικές δοκιμές, οι οποίες είχαν πραγματοποιηθεί σε δοκίμιο τοιχοποιίας με κονίαμα μετακαολίνη (MK2.5.CF2.S.) ([13], [20]).

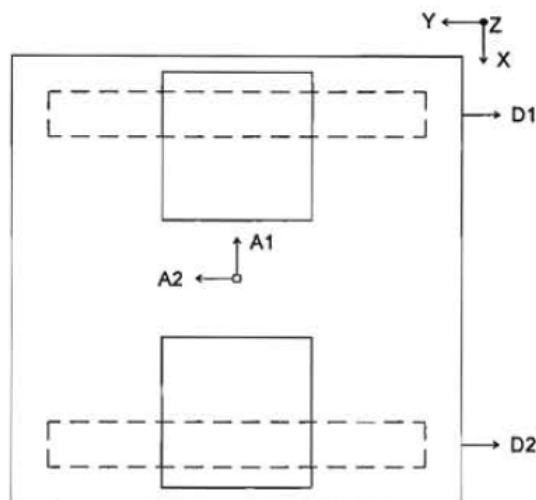
Το δοκίμιο (Σχήμα 5.10) αποτελούνταν από δύο παράλληλους τοίχους διαστάσεων 2.70x2.00x0.35 m, οι οποίοι συνδέονταν μεταξύ τους με μια πλάκα σκυροδέματος πάχους 0.18 m. Στην πλάκα τοποθετήθηκαν πρόσθετες χαλύβδινες μάζες συνολικού βάρους 6 T. Οι τοίχοι είχαν κατασκευασθεί πάνω σε μεταλλική βάση, η οποία στη συνέχεια πακτώθηκε στη σεισμική τράπεζα μέσω κοχλιών. Αφού προσδιορίστηκαν η ιδιοσυχνότητα του δοκιμίου στην εκτός επιπέδου των τοίχων διεύθυνση και ο λόγος απόσβεσης του δοκιμίου, το δοκίμιο διεγέρθηκε από χρονοϊστορία επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y. Η χρονοϊστορία αυτή αποτελούσε τη διαμήκη (longitudinal) συνιστώσα του σεισμού της Έδεσσας, κλιμακούμενη διαδοχικά από μέγιστη επιτάχυνση 0.08 g έως 0.86 g, συνολικά 10 φορές. Η μετρητική διάταξη του πειράματος φαίνεται στην Εικόνα 5.3.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπιστώνεται ότι και οι δύο τοίχοι δεν υπέστησαν καμία βλάβη και στις 10 δοκιμές. Καθώς, λοιπόν, οι τοίχοι παρέμειναν

στην ελαστική περιοχή καθ' όλα τα πειράματα, το υλικό της τοιχοποιίας ορίστηκε ως ελαστικό σύμφωνα με το Abaqus, με μέτρο ελαστικότητας $E = 1.40 \text{ GPa}$ (από τις δοκιμές θλίψης). Το σκυρόδεμα της πλάκας θεωρήθηκε κατηγορίας C 16/20, ενώ ορίστηκε στη βάση των τοίχων και μια στρώση πάχους 1 cm μαλακού κονιάματος γύψου με $E = 0.2 \text{ GPa}$. Οι ιδιότητες του χάλυβα για τις δοκούς της βάσης και τις μάζες ορίστηκαν όπως στον Ευρωκώδικα 3. Το δοκίμιο θεωρήθηκε πακτωμένο στη βάση του στα σημεία όπου βρίσκονταν οι κοχλίες στα πραγματικά πειράματα.

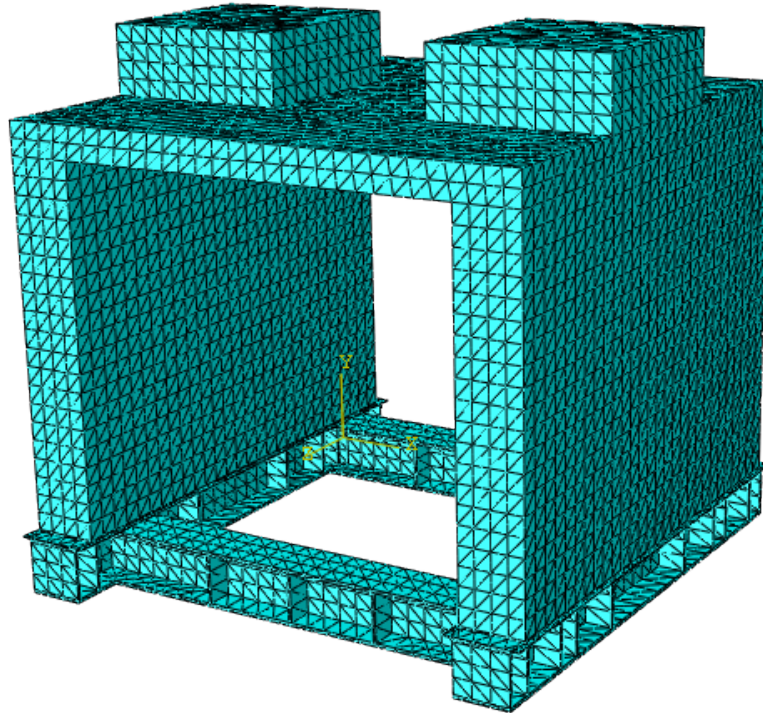


Σχήμα 5.10 Δοκίμιο σεισμικών δοκιμών.



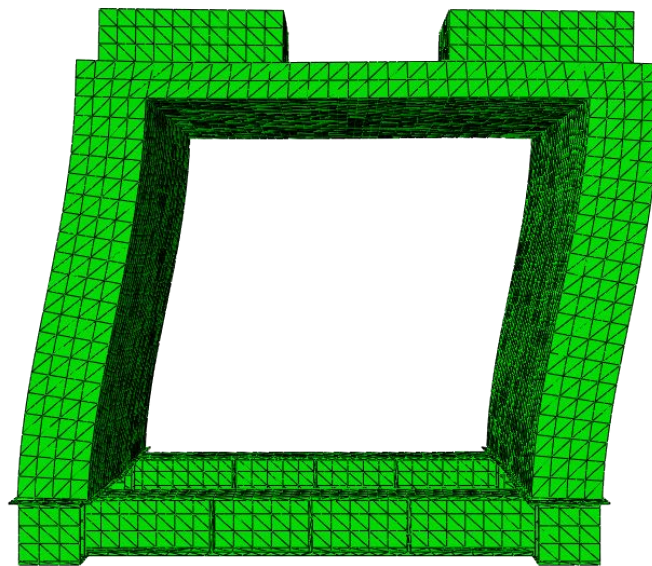
Εικόνα 5.3 Μετρητική διάταξη σεισμικών δοκιμών [13].

Για την προσομοίωση του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τέταρτης τάξης δέκα κόμβων (C3D10). Το δίκτυο που δημιουργήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.4 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.

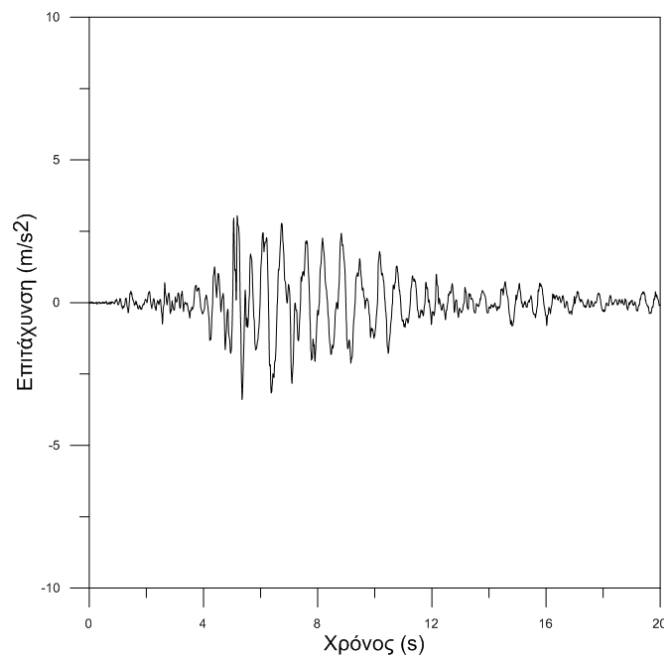
Αρχικά εξήχθησαν οι ιδιομορφές του φορέα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η δεσπόζουσα ιδιομορφή είναι μεταφορική κατά X (εκτός επιπέδου των τοίχων), ενώ η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα βρέθηκε ίση με $f_{\text{num}} = 7.09 \text{ Hz}$ ($T = 0.14 \text{ s}$), σε σχέση με τη $f_{\text{exp}} = 7.12$ από τα πειραματικά δεδομένα.



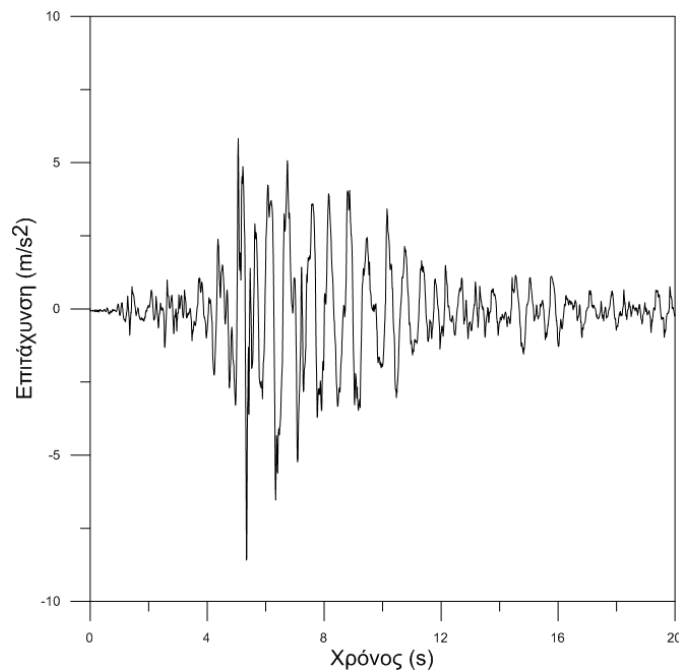
Εικόνα 5.5 1η ιδιομορφή – Μεταφορική κατά X – $f = 7.09 \text{ Hz}$.

Για την ανάλυση χρονοϊστορίας του φορέα, χρησιμοποιήθηκε λόγος απόσβεσης 2%, βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Από τις διεγέρσεις που επεβλήθησαν στο φορέα κατά τις πειραματικές δοκιμές, επιλέχθηκαν οι δοκιμές 4 και 8, με μέγιστη επιτάχυνση 0.31 g και 0.59 g αντίστοιχα. Για περιορισμό του απαιτούμενου χρόνου των αναλύσεων, χρησιμοποιήθηκαν τα πρώτα 20 δευτερόλεπτα των χρονοϊστοριών, μετά τα οποία η επιβαλλόμενη επιτάχυνση, αλλά και η καταγεγραμμένη απόκριση του φορέα τείνουν να μηδενισθούν.

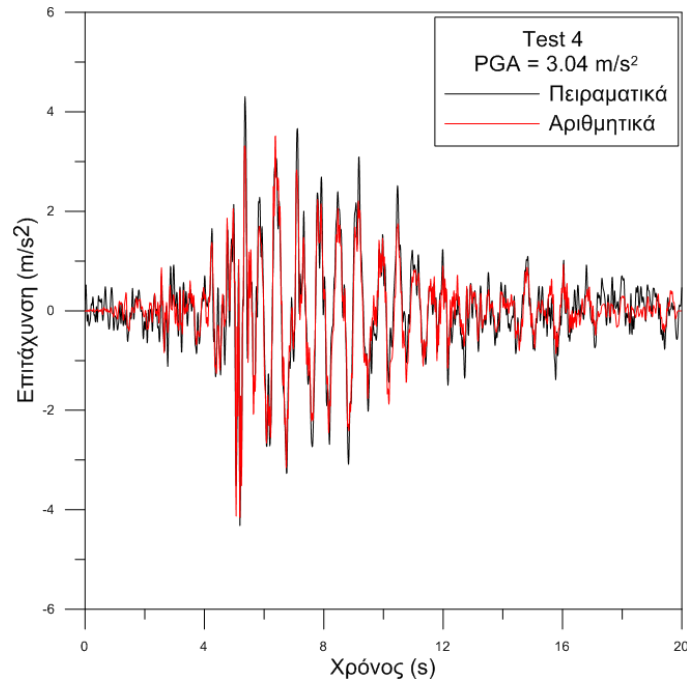


Σχήμα 5.11 Χρονοϊστορία δοκιμής 4 – PGA = 3.04 m/s².

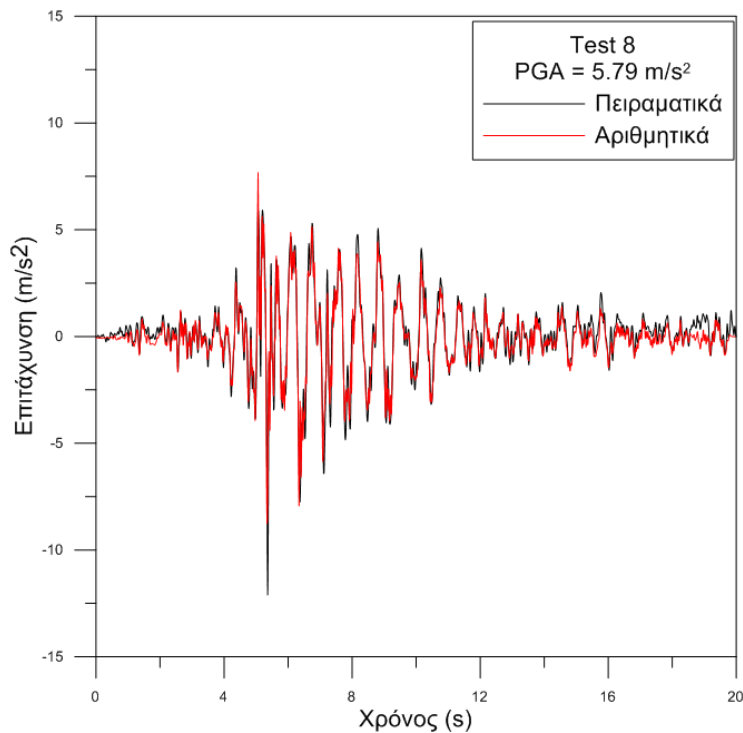


Σχήμα 5.12 Χρονοϊστορία δοκιμής 8 – PGA = 5.79 m/s².

Στα παρακάτω σχήματα αντιπαραβάλλεται η πραγματική απόκριση του δοκιμίου καταγεγραμμένη στο κέντρο της πλάκας (σημείο A2) με αυτήν που υπολογίστηκε από την ανάλυση χρονοϊστορίας με το λογισμικό Abaqus. Παρατηρούμε ότι υπάρχει καλή σύγκλιση μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων, τόσο για την ασθενέστερη όσο και για την πιο ισχυρή διέγερση.

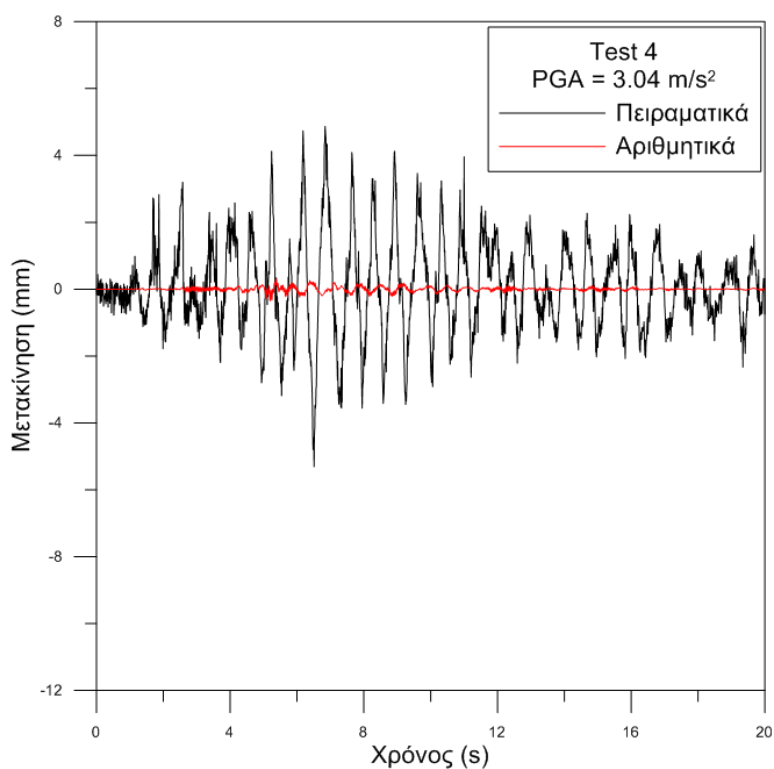


Σχήμα 5.13 Επιτάχυνση στο σημείο A2 - Δοκιμή 4.

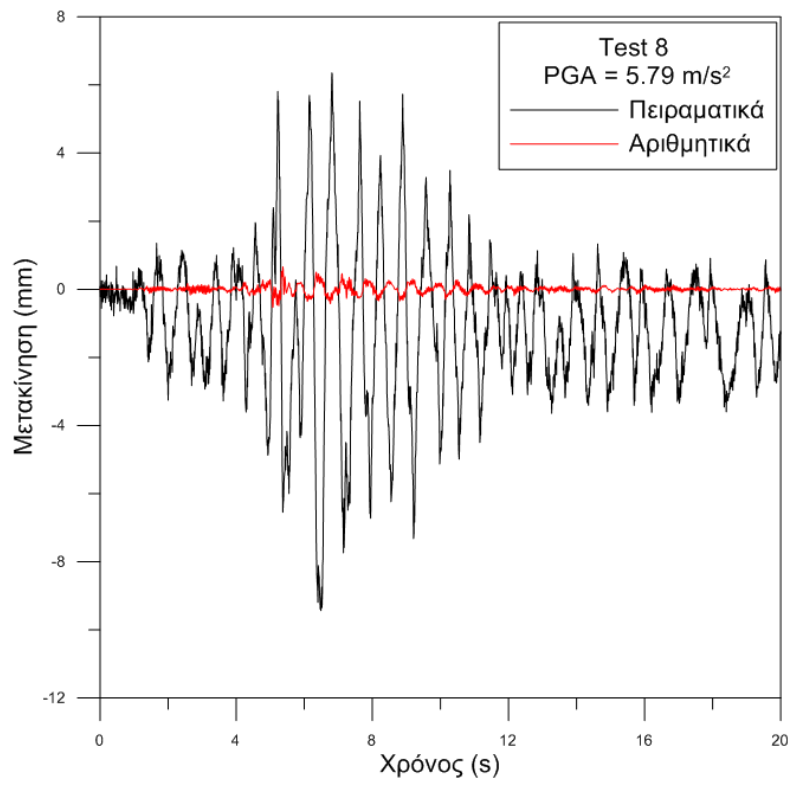


Σχήμα 5.14 Επιτάχυνση στο σημείο A2 - Δοκιμή 8.

Η ίδια καλή σύγκλιση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων δεν παρατηρείται στην περίπτωση των σχετικών μετακινήσεων που καταγράφηκαν στο μέσο του πάχους της πλάκας, στη θέση των δύο τοίχων. Αυτό συμβαίνει λόγω μερικής αποκόλλησης του δοκιμίου από τη μεταλλική βάση στο επίπεδο της στρώσης του κονιάματος γύψου, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να λικνίζεται, δίνοντας, έτσι, μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Το ενδεχόμενο αποκόλλησης του δοκιμίου από τη βάση και ο επακόλουθος λικνισμός δε λήφθηκαν υπόψη κατά την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, οδηγώντας στις αποκλίσεις που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Σημειώνεται ότι η πειραματική μετακίνηση του φορέα εμφανίζεται ως ο μέσος όρος των μετακινήσεων στις δύο θέσεις μέτρησης D1 και D2.



Σχήμα 5.15 Μετακίνηση πλάκας σκυροδέματος - Δοκιμή 4.



Σχήμα 5.16 Μετακίνηση πλάκας σκυροδέματος - Δοκιμή 8.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια τοιχοποιίας που εξετάστηκαν επέδειξαν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες.
- Οι συνθέσεις με τσιμέντο και υδραυλική άσβεστο θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν και σε νέες κατασκευές, π.χ. εκκλησίες, που μιμούνται τη συγκεκριμένη βυζαντινή τεχνοτροπία δόμησης.
- Η σύνθεση του μετακαολίνη επέδειξε σχεδόν το μισό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις άλλες δύο, όπως επίσης και μικρότερη αντοχή.
- Δεν αναφέρεται στη βιβλιογραφία κάποια μαθηματική σχέση που να συνδέει με ικανοποιητική ακρίβεια τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών με αυτές της τοιχοποιίας ως σύνθετο υλικό.
- Η περαιτέρω έρευνα που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη τέτοιων σχέσεων είναι δύσκολη, εξαιτίας του μνημειακού χαρακτήρα των περισσότερων κατασκευών βυζαντινού τύπου.
- Το προσομοίωμα του υλικού στο Abaqus/Explicit που χρησιμοποιήθηκε οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, εφόσον βαθμονομηθεί σωστά βάσει πειραμάτων ή/και με χρήση κατάλληλων εφοδίων από τη βιβλιογραφία, εάν αυτά είναι διαθέσιμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Maurenbrecher A., Trischuk K., Rousseau, M. Z. (2001), “Review of factors affecting the durability of repointing mortars for older masonry”, 9th Canadian Masonry Symposium, Fredericton, N.B. 6/4/2001, pp. 1-12.
- [2] Knofel D., Huesmann M. (1993), “Mortel zur Fugeninstandsetzung an historischen Bauwerken”, Bautenschutz + Bausanierung, Vol. 16, No. 3, pp. 30-34.
- [3] Suter G. T., Thomson M. L., Fontaine L. (1998), “Mortar study of mechanical properties for the repointing of the Canadian Parliament Buildings”, APT Bulletin, Vol. 29, No. 2, Association for Preservation Technology, pp. 51-58.
- [4] Lübke W., Semrau M. (1908) “Grundriß der Kunstgeschichte” 14. Auflage, Paul Neff Verlag, Esslingen, μέσω [wikipedia](#).
- [5] Arild Vågen (2013) μέσω [Wikimedia Commons](#)
- [6] Livingston R. A., Stutzman P. E., Mark R. and Erdik M. (1993), “Preliminary analysis of the masonry of the Aya-sofya Basilica, Istanbul”, Materials issues in art and archaeology, III, MRS Symposium, V. 267, P. Vandiver et al. (eds.), Materials Research Society, Pittsburg PA, pp. 721-736.
- [7] Moropoulou A., Cakmak A. S., Biscontin G., Bakolas A., Zendri E. (2002), “Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia”, Construction and Building Materials 16, pp. 543-552.
- [8] Moropoulou A., Cakmak A. S., Bakolas A., Lampropoulos K., Bisbikou K. (1995), “Properties and technology of the crushed brick mortars of Hagia Sophia”, 7th International Conference: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Chania, Crete, Greece, 24-26 May 1995.
- [9] Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E. (1998), “Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis”, Thermochemica Acta 321, pp. 151-160.
- [10] Cakmak A. S., Moropoulou A., Mullen C. L. (1995), “Interdisciplinary study of dynamic behavior and earthquake response of Hagia Sofia”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 14, pp. 125-133.
- [11] Durukal E., Yuzugullu O., Beyen K., “Non Destructive testing techniques of structural materials in historic structures”, PACT 55, pp. 221-229.

- [12] Aoki T., Kato K., Ishikawa K., Hidaka K., Yorulmaz M., Cili F. (1997), “Principle of structural restoration for Hagia Sophia Dome”, Proceedings of the 5th Conference of Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings (STREMAH), San Sebastian, Spain, Vol. 3, pp. 467-476.
- [13] Αγγελακοπούλου Ε. (2006), “Κριτήρια και μέθοδοι αποτίμησης φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών κατά την διερεύνηση αριστοποίησης συμβατών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων αποκατάστασης ιστορικών τοιχοποιιών, με έμφαση στις ποζολανικές πρώτες ύλες”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [14] EN 1052-1 “Method of test for masonry – Part 1: Determination of compressive strength”
- [15] Βιντζηλαίου Ε., Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος ΔΠΜΣ «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών» «Προχωρημένη Μηχανική Φέρουσας Τοιχοποιίας».
- [16] Tassios, Chronopoulos (1986), “Aseismic dimensioning of interventions on low-strength masonry buildings”, Middle East and Mediterranean Regional Conference on low-strength masonry in seismic areas, Middle East Univ., Ankara.
- [17] Eurocode 6 “Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures”
- [18] Καραπίττα Λ. (2011), “Ανάπτυξη και πειραματική βαθμονόμηση καταστατικού προσομοιώματος άοπλης τοιχοποιίας υπό σεισμική καταπόνηση”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [19] Καραπίττα Λ., Μουζάκης Χ., Καρύδης Π. (2008), “Καταστατικά προσομοιώματα για την ανάλυση άοπλης τοιχοποιίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση”, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, 5–7 Νοεμβρίου 2008.
- [20] Τελική έκθεση προόδου: “Αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοιχοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα παραδοσιακού τύπου – Προδιαγραφές κατάλληλων υλικών” Επιστημονικός υπεύθυνος: Καθ. Ε.Μ.Π. Π. Καρύδης, Συνεργαζόμενοι τομείς: Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Καθ. Μοροπούλου Α. και Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Καθ. Κ. Συρμακέζης, Αθήνα, Φεβρουάριος 2004.