



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

# Η θηραϊκή γη ως δομικό υλικό: Δομικά χαρακτηριστικά και μέθοδοι αποτίμησης και ενίσχυσης

Διπλωματική εργασία

**Ξενάκης Βασίλειος**

Επιβλέπων

Φραγκιαδάκης Μιχαήλ, Αν. Καθηγητής

# Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Διερευνητικές εργασίες
- Μέθοδοι αποτίμησης
- Μέθοδοι ενίσχυσης
- Εφαρμογή
- Συμπεράσματα

# Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει οδηγό για των απαιτούμενων βημάτων για το στατικό τους επανέλεγχο των συνηθέστερων παραδοσιακών κτηρίων που συναντώνται στη Θήρα. Οι διερευνητικές εργασίες και οι μέθοδοι ενίσχυσης που περιγράφονται αφορούν σε κτήρια που δεν είναι χαρακτηρισμένα ως διατηρητέα ή μνημεία.

## Θηραϊκή γη

Είναι μία ηφαιστειογενής πυριτικής σύστασης φυσική ποζολάνη με υδραυλικές ιδιότητες συγκρίσιμες με το σύγχρονο τσιμέντο – Καθοριστικός ο ρόλο της στις κατασκευές του νησιού.

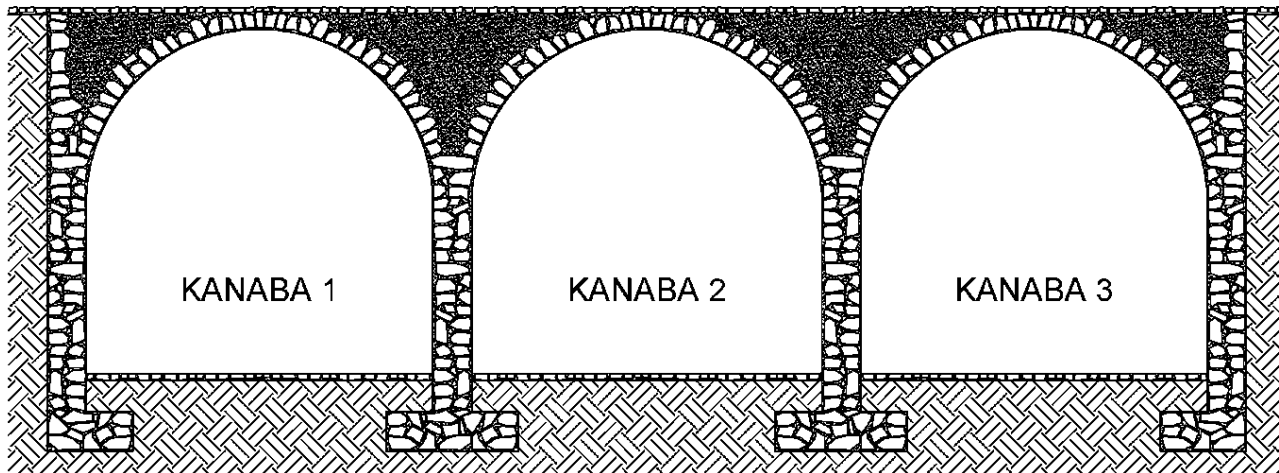






## Υπόσκαφα

Λαξεμένα σε αποθέσεις θηραϊκής γης



## Κάναβες

Υπόγειες αποθήκες





## Αρχοντικά

Μεγάλα κτήρια κατοικιών



## Σταυροθόλια

Απαίτηση μεγάλων ανοιγμάτων  
& Αυξημένα φορτία



## Ημικυλινδρικοί θόλοι

Απαίτηση μεγάλων ανοιγμάτων & Αυξημένα φορτία



## Σκαφωτοί θόλοι

Μικρή απαίτηση ανοιγμάτων & Μειωμένα φορτία



# Λιθοσώματα

**Μαυρόπετρα:** Ανδεσίτης, υψηλή θλιπτική αντοχή, δύσκολη στην κατεργασία.

**Κοκκινόπετρα:** Αιματίτης, διαχωρίζεται σε συμπαγή και σπογγώδη.

Τα φέροντα στοιχεία κατασκευάζονται από μαυρόπετρα και συμπαγή κοκκινόπετρα.

Η σπογγώδης κοκκινόπετρα χρησιμοποιείται κυρίως για διακοσμητικούς λόγους πέριξ των ανοιγμάτων.





## Ασβεστοθηροκονιάματα

Παράγονταν από την ανάμιξη θηραϊκής γης, ασβέστη, νερού και ως αδρανές υλικό συνήθως χρησιμοποιούταν άμμος θαλάσσης ή κοινό χώμα

## Ελαφρόπετρα – Κίσσηρης

Χρησιμοποιείται ως υλικό πλήρωσης της “σκάφης” των θόλων

## Ξυλεία

Η ξυλεία στο νησί ήταν πάντοτε σε έλλειψη συνεπώς ιδιαίτερως ακριβή. Η έλλειψη συνετέλεσε στην υιοθέτηση του τρόπου κατασκευής με θόλους.





## Γεωμετρική αποτύπωση της κατασκευής

Γίνεται από πεπειραμένο τοπογράφο μηχανικό καθώς:

- Η κάτοψη του υπογείου συνήθως διαφέρει από εκείνη των υπερκείμενων ορόφων.
- Απαιτείται ιδιαίτερη μέριμνα για την αποτύπωση των θολωτών τμημάτων.
- Οι τοίχοι μπορεί να αποκλίνουν από την κατακόρυφο.



## Στατική αποτύπωση της κατασκευής

Αποσκοπεί στη σύνταξη των as-built (ως κατασκευάσθη) σχεδίων του φέροντος οργανισμού



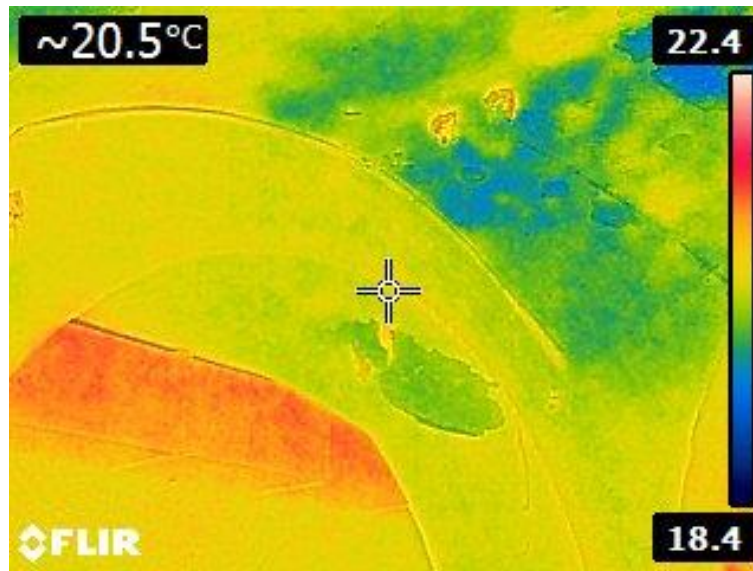
# Λήψη και θραύση δοκιμίων λιθοσωμάτων και κονιάματος

Για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας απαιτείται η γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών που την απαρτίζουν.

- Λήψη τεμαχίων λιθοσωμάτων και κονιαμάτων
- Διαμόρφωσή τους σε δοκίμια κατάλληλων διαστάσεων
- Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης







## Κρουσιμετρήσεις

Έμμεση εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής μέσω της καταγραφής της επιφανειακής σκληρότητας και έλεγχος της ομοιομορφίας των λιθοσωμάτων.

## Θερμογραφικός έλεγχος

Εντοπισμός περιοχών υγρασίας ή και εισροής ύδατος με χρήση θερμοκάμερας. Οι περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία αποτελούν κρίσιμες περιοχές για τέτοιου είδους φαινόμενα.

# Οπτικός έλεγχος – παθολογία

Ο οπτικός έλεγχος διεξάγεται από πεπειραμένο πολιτικό μηχανικό και αποτελεί πρωταρχική ένδειξη της υφιστάμενης κατάστασης του φέροντος οργανισμού.

## Συμπεράσματα διερευνητικών εργασιών

Τα ευρήματα όλων των εργασιών συγκεντρώνονται και αξιολογούνται σε μία ενιαία έκθεση η οποία συνοδεύει το κτήριο. Η έκθεση αναφέρει:

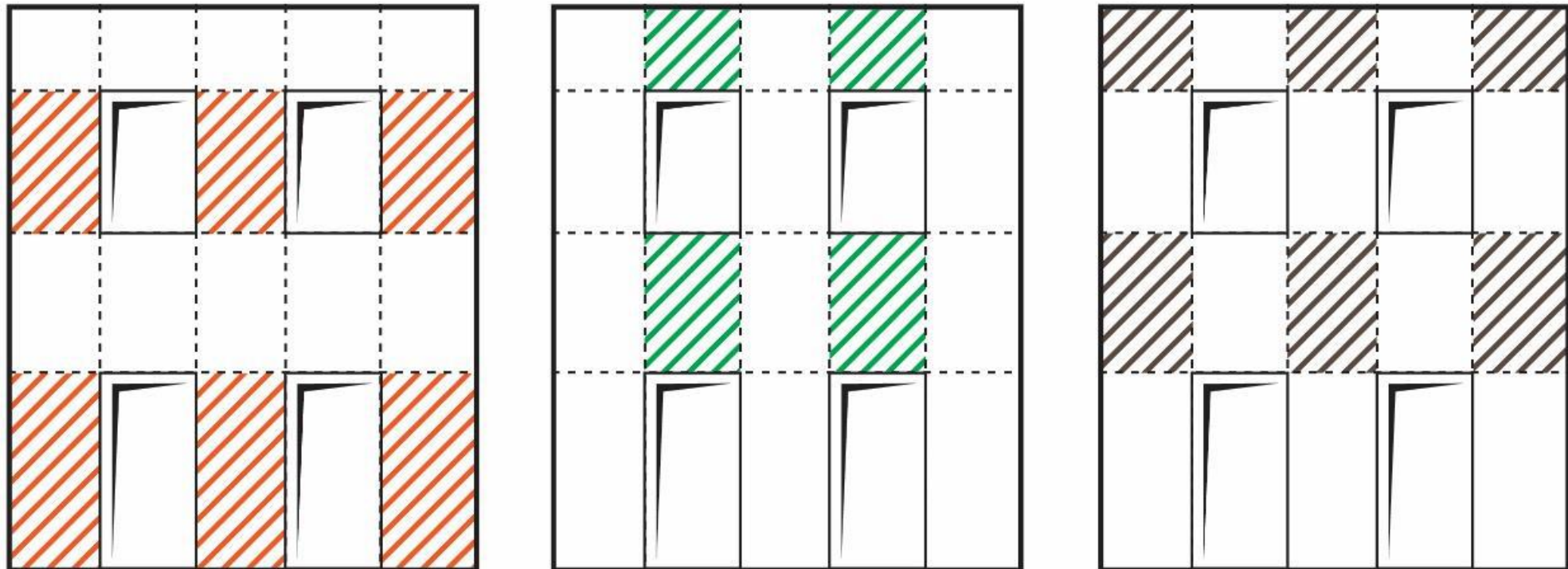
- τη στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (ΣΑΔ),
- τα μηχανικά χαρακτηριστικά και
- τις επιμέρους αντοχές τις τοιχοποιίας





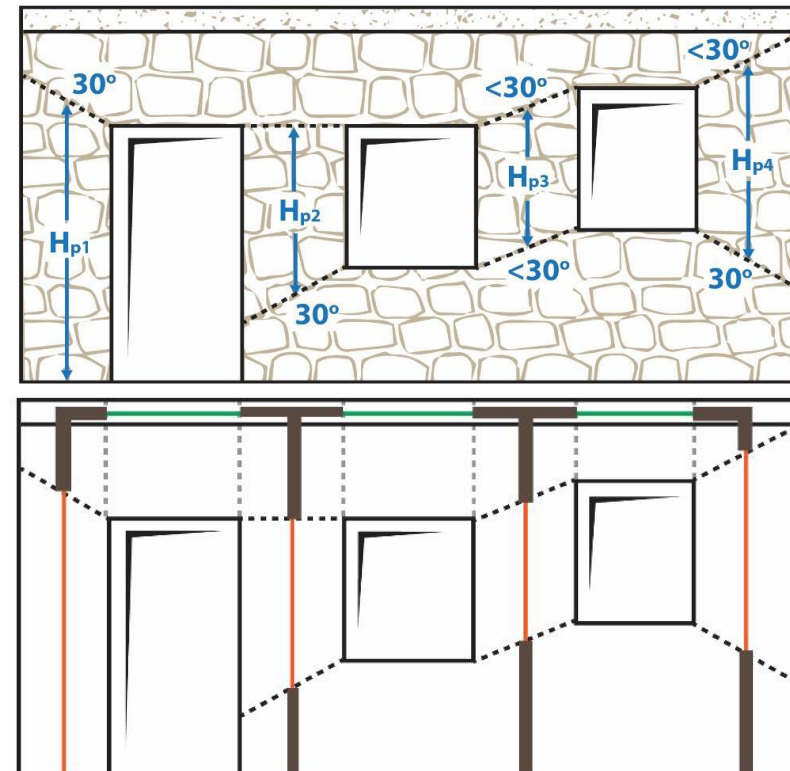
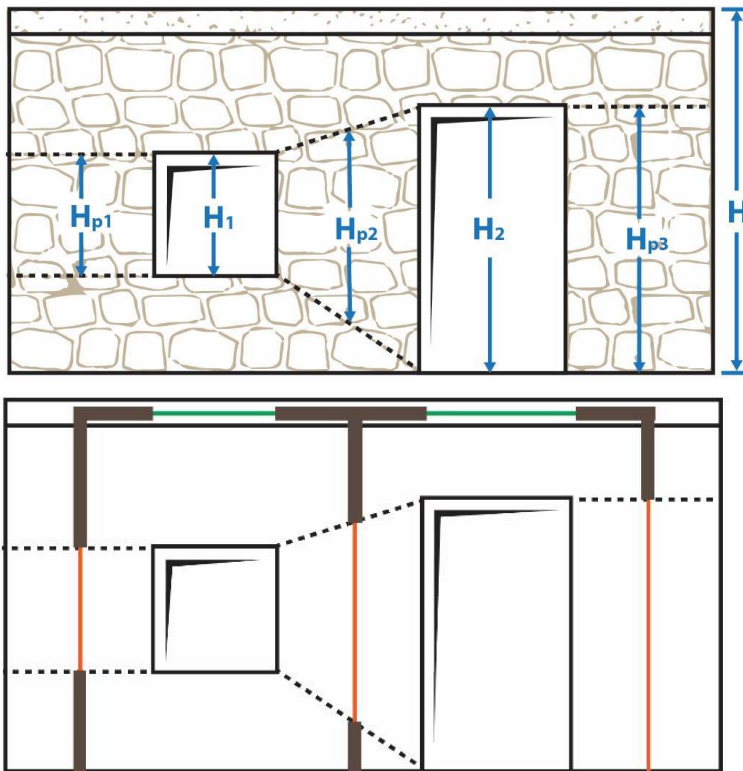
## Ανάλυση: μέθοδος ισοδυναμίου πλαισίου (ΜΙΠ)

Στη μέθοδο γίνεται η προσομοίωση της κατασκευής με γραμμικά μέλη υποστυλωμάτων και υψίκορμες δοκούς σχηματίζοντας ισοδύναμα πλαίσια στις κύριες διευθύνσεις του σεισμού. Γίνεται η θεώρηση πρισματικών μελών με παραδοχή καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων. Οι κόμβοι πεσσών και υπέρθυρων προσομοιώνονται με άκαμπτα μέλη.



# Ανάλυση: μέθοδος ισοδυναμίου πλαισίου (ΜΙΠ)

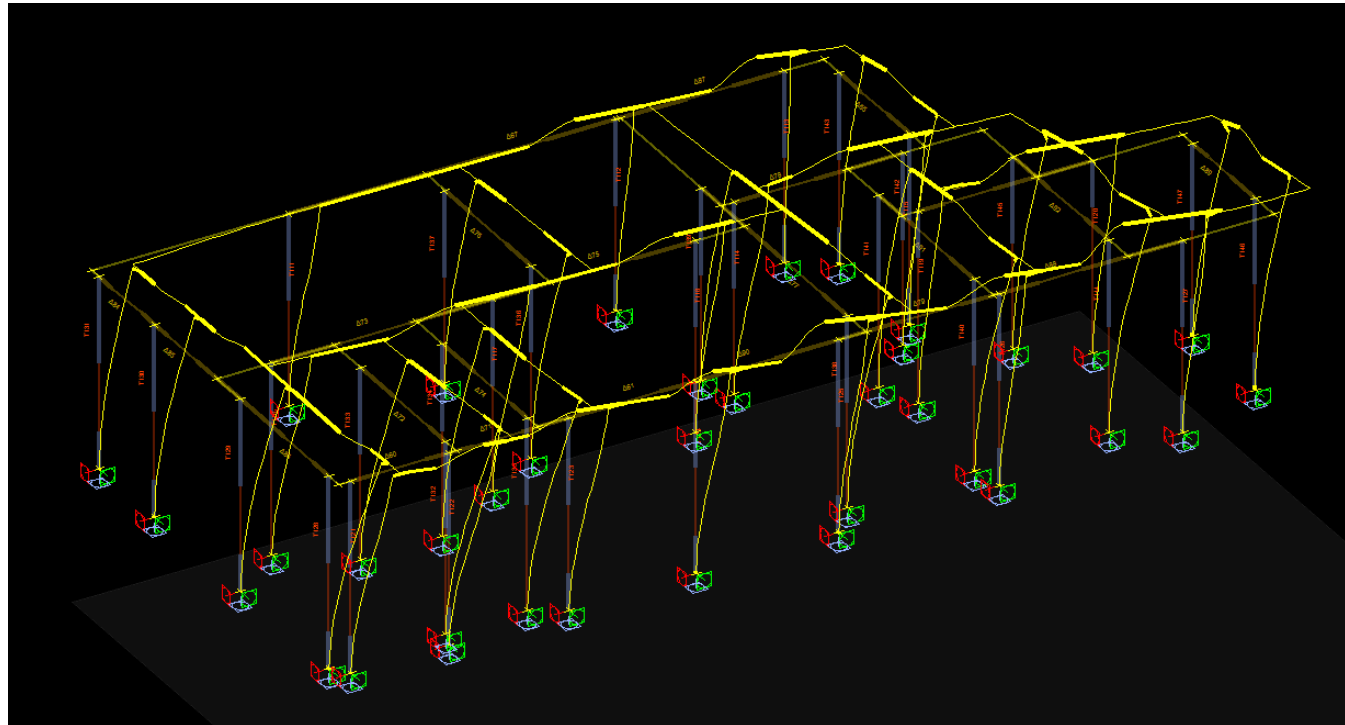
Για την ορθή προσομοίωση με τη ΜΙΠ είναι κρίσιμη η εκτίμηση του παραμορφώσιμου ύψους κάθε πεσσού, αναλόγως με τη γεωμετρία του φορέα και τη θέση των ανοιγμάτων εκτιμάται το ύψος κάθε πεσσού αναλόγως με την επιλεγόμενη μέθοδο εκτίμησης.





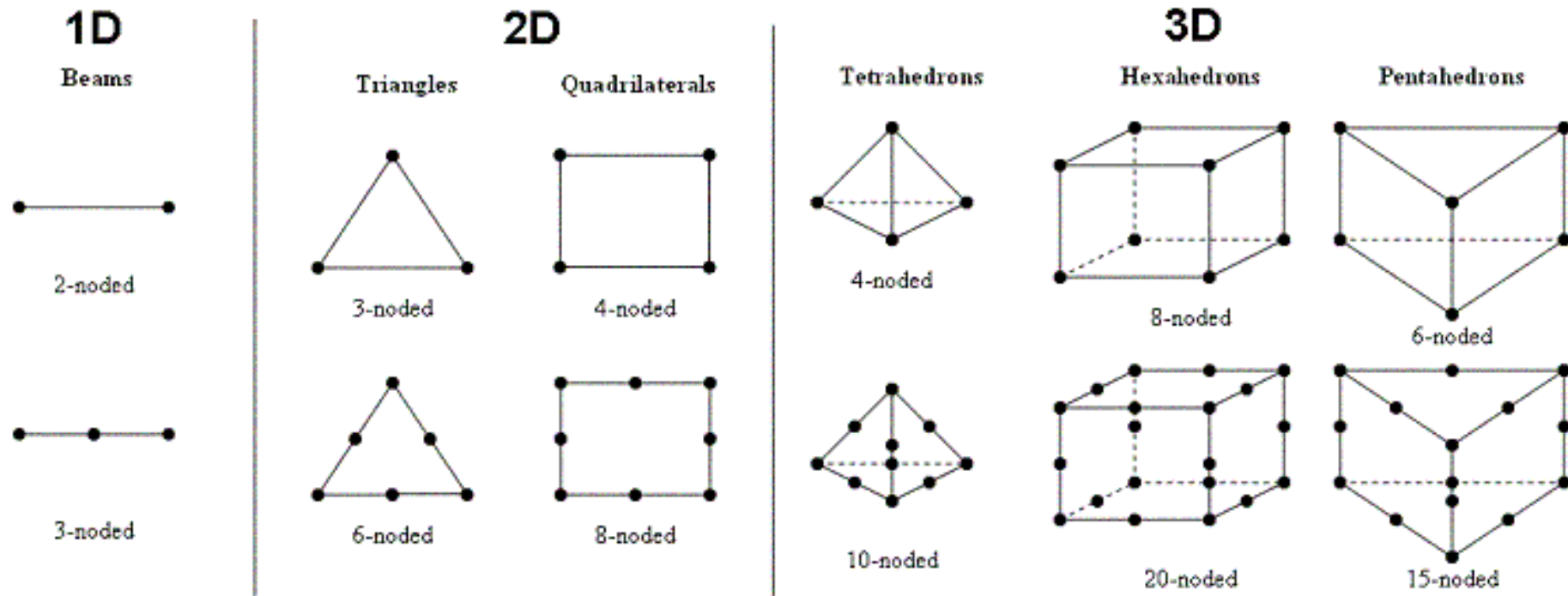
# Ανάλυση: μέθοδος ισοδυναμίου πλαισίου (ΜΙΠ)

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί θεώρηση συγκέντρωσης μαζών στις στάθμες των ορόφων που αποκλίνει σημαντικά από την πραγματικότητα. Στα κτήρια από λιθοδομή το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας προέρχεται από τους τοίχους επομένως η μάζα κατανέμεται καθ' ύψος της κατασκευής. Τέλος, καθίσταται προβληματική η προσομοίωση θολωτών τμημάτων, αψίδων και τρούλων.



# Ανάλυση: μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί την πλέον αναλυτική μέθοδο αποτίμησης των κτηρίων από λιθοδομή. Η προσομοίωση περιλαμβάνει την συσχέτιση κάθε μέλους (δοκού, τοίχου, θόλου) με αντίστοιχο είδος πεπερασμένου στοιχείου σε ένα ενιαίο δίκτυο.

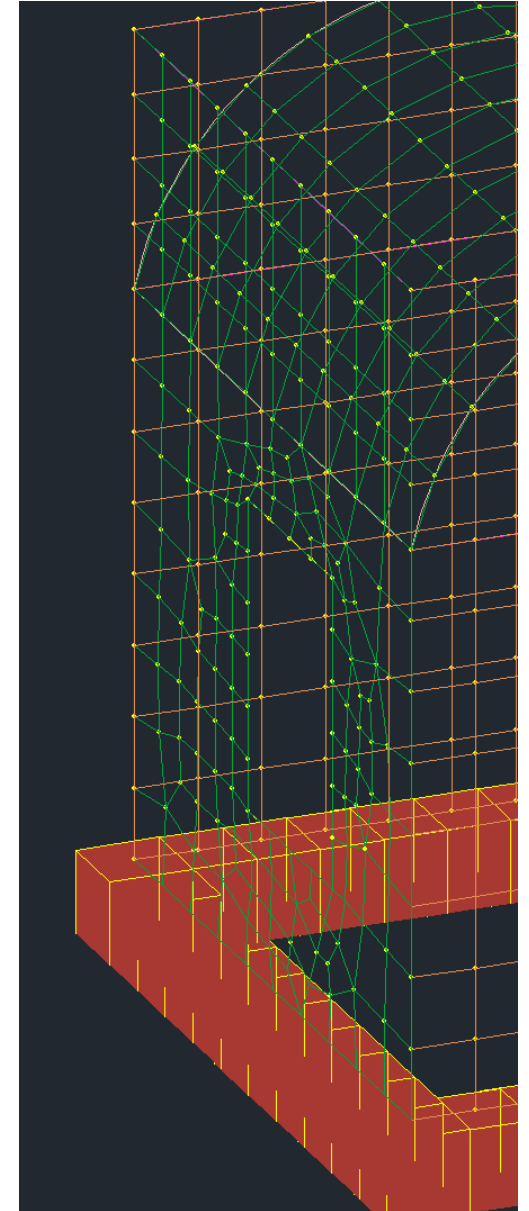
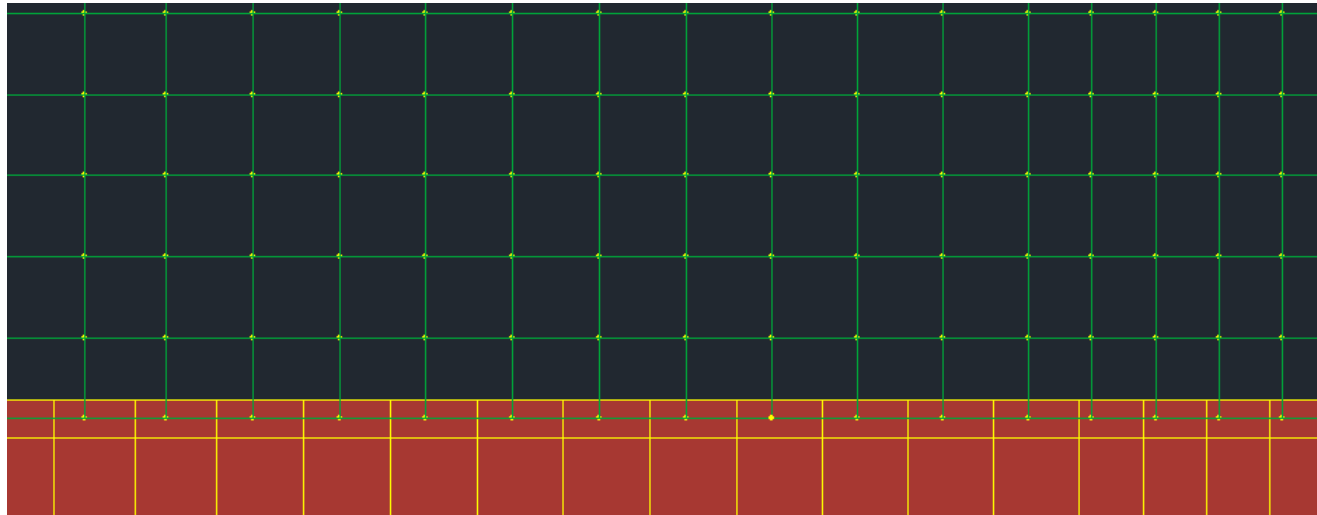




## Ανάλυση: Διακριτοποίηση

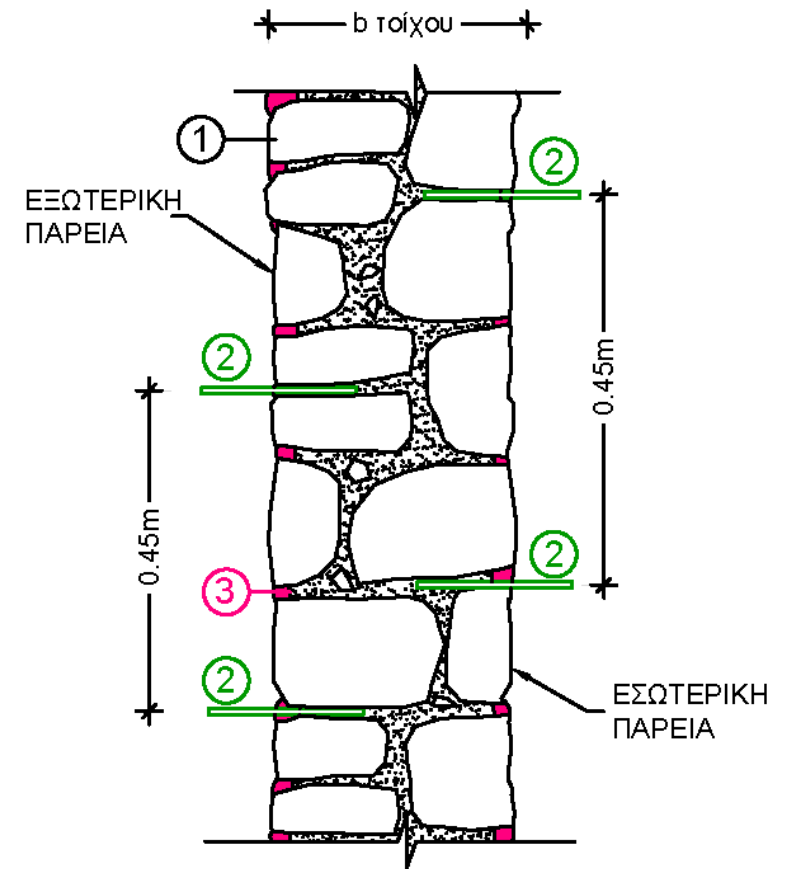
Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την διακριτοποίηση του δικτύου, το οποίο όμως πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία με την υπολογιστική απαίτηση του λογισμικού που χρησιμοποιείται.

Έτσι, επιλέγεται αραιότερη διακριτοποίηση σε περιοχές χωρίς ενδιαφέρον και πυκνότερη σε γωνίες, υπέρθυρα κλπ.



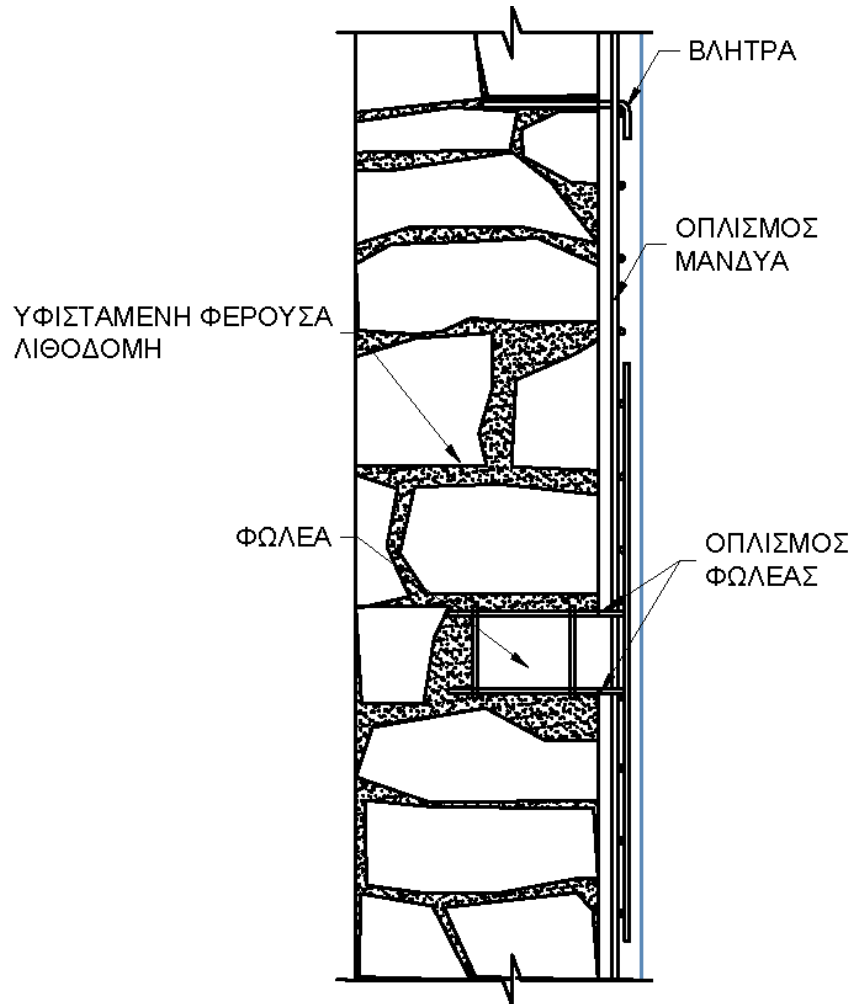
## Μέθοδοι ενίσχυσης: Ομογενοποίηση λιθοδομής με χρήση ενεμάτων & αρμολόγημα

- Συνολική αναβάθμιση της προς ενίσχυση περιοχής λιθοδομής με αποκατάσταση αφανών βλαβών
- Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και της πλαστιμότητας της λιθοδομής
- Συχνά μη εφαρμόσιμο στη Θήρα (μικρό πορώδες και υψηλή συνοχή υφιστάμενου κονιάματος)
- Αυξημένο κόστος εφαρμογής



1. Λιθοδόσωμα.
2. Διαφανείς σωληνίσκοι εισόδου, ελέγχου και εξαερισμού ενεμάτων.
3. Βαθύ αρμολόγημα



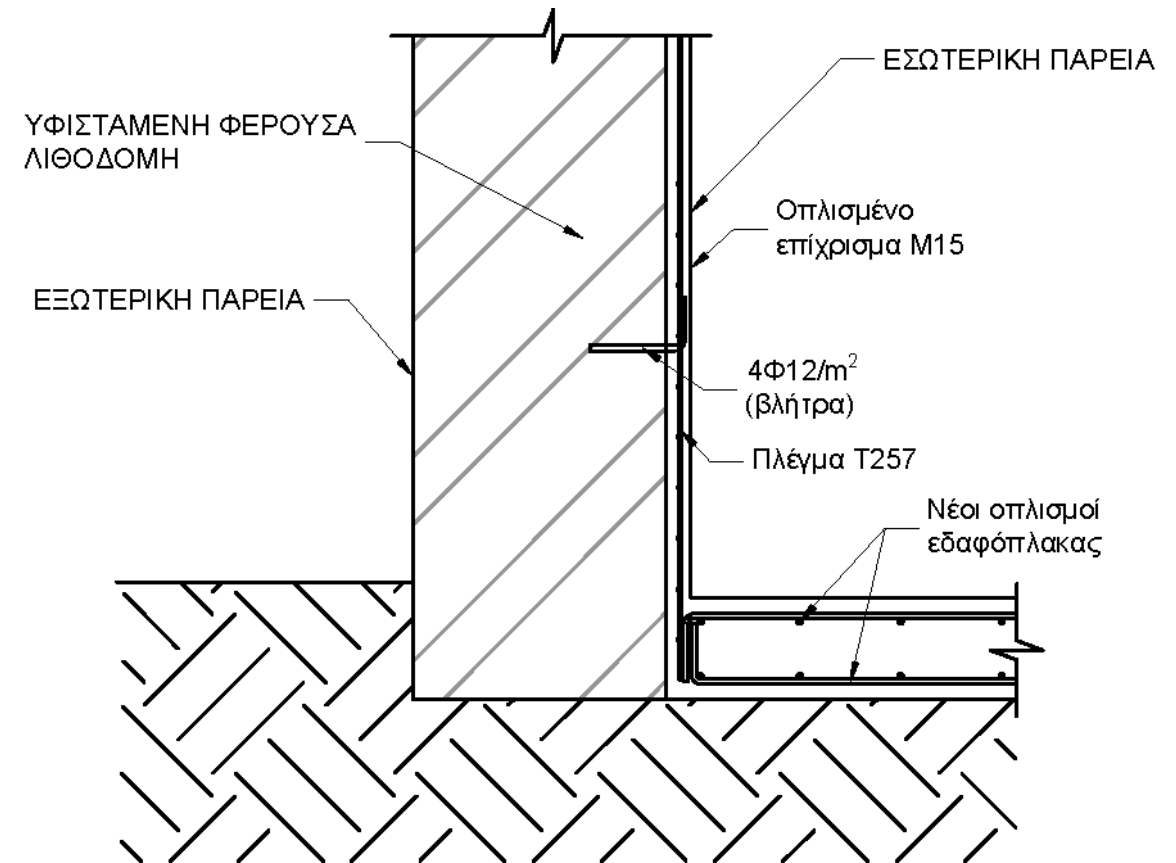


## Μέθοδοι ενίσχυσης: εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος

- Αύξηση της δυσκαμψίας των στοιχείων → Σχεδιασμός του μηχανισμού ανάληψης σεισμικών φορτίων
- Ακρίβεια στην αύξηση των αντοχών με τον έλεγχο ποιότητας, πάχους και ποσοστού οπλισμού του μανδύα
- Εκτεταμένη καθαίρεση αρχιτεκτονικών στοιχείων
- Εκσκαφές για τη δημιουργία θεμελίου
- Μείωση της ωφέλιμης επιφάνειας του κτηρίου
- Αύξηση της μάζας της κατασκευής

# Μέθοδοι ενίσχυσης: Εφαρμογή οπλισμένου επιχρίσματος

- Αύξηση αντοχής της τοιχοποιίας με ελάχιστη αύξηση στο πάχος της
- Η οικονομικότερη από της μεθόδους ενίσχυσης
- Δεν απαιτεί εξειδικευμένο συνεργείο και μηχανήματα
- Περιορισμένη δυνατότητα αύξησης της αντοχής του μέλους





# Άλλες μέθοδοι ενίσχυσης

- Εφαρμογή ελκυστήρων
  - Μείωση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων
  - Πλευρική εξασφάλιση των τοίχων
  - Συχνά μη εφαρμόσιμη λόγω ελεύθερου ύψους
- Εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ /FRP)
  - Αύξηση πλαστιμότητας πεσσών και υπέρθυρων
  - Ανθεκτικότητα στο χρόνο
  - Υψηλό κόστος και απαίτηση εξειδικευμένου συνεργείου
- Εφαρμογή ινοπλέγματος ανόργανης μήτρας (IAM /TRM)
  - Χαμηλό κόστος
  - Ανθεκτικότητα στο χρόνο
  - Περιορισμένη δυνατότητα αύξησης των αντοχών

# Εφαρμογή

Αρχοντικό κτήριο κατοικίας στο Μεγαλοχώρι Θήρας.

Έτος κατασκευής 1896, Υπόγειο επιφάνειας 200m<sup>2</sup> και Ισόγειο 165m<sup>2</sup>.

Είδος λιθοδομής είναι αργολιθοδομή επιχρισμένη.

Ιδιαιτερότητες: Υπόγειες κρύψες, ημικυλινδρικοί θόλοι, σκαφωτοί θόλοι και τοίχοι ισογείου που εδράζονται επί των ημικυλινδρικών θόλων του υπογείου.



## Μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας

Δεν πραγματοποιήθηκαν διερευνητικές εργασίες στο υπό μελέτη κτήριο, για λόγους παραδείγματος θα χρησιμοποιηθούν αποτελέσματα δοκιμών που έχουν πραγματοποιηθεί σε κτήριο στα Φηρά.

Στους παρακείμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θλίψης δοκιμών κονιάματος και λιθοσωμάτων.

Δοκίμια κονιάματος		
Σήμανση δοκιμίων	Θέση λήψης	Ανηγμένη θλιπτική αντοχή (MPa)
K1	Υπόγειο	4.88
K2	Υπόγειο	4.99
K3	Ισόγειο	6.23
K4	Ισόγειο	6.42
<b>M.O.</b>		<b>5.63</b>

Δοκίμια λιθοσωμάτων		
Σήμανση δοκιμίων	Θέση λήψης	Ανηγμένη θλιπτική αντοχή (MPa)
Λ1	Υπόγειο	74.13
Λ2	Υπόγειο	70.18
Λ3	Ισόγειο	87.45
Λ4	Ισόγειο	71.09
<b>M.O.</b>		<b>74.71</b>



# Μηχανικά χαρακτηριστικά

Βάσει των θεωρημένων αντοχών λιθοσώματος και κονιάματος εκτιμήθηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Θλιπτική αντοχή λιθοδομής (Τάσιος – Χρονόπουλος, 1985):

$$f_{wc} = \xi \left( \left( \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - \alpha \right) + \beta * f_{mc} \right) = 7.62 \text{ MPa}$$

Μέτρο ελαστικότητας:  $E \approx a * f_{wc} = 1000 * 7.62 = 7620 \text{ MPa}$ ,  $a = 1000$  (μέση αντοχή κονιάματος)

Εφελκυστική αντοχή παράλληλα και κάθετα στους αρμούς (Τάσιος 1986β):

$$f_{wt1} = \lambda * f_{mc} / 10 = 0.51 \text{ MPa} \text{ και } f_{wt2} = 2 f_{wt1} = 1.02 \text{ MPa}$$

Καμπτική αντοχή παράλληλα και κάθετα στους αρμούς (EC-6):

$$f_{\chi k1} = 0.10 \text{ MPa} \text{ και } f_{\chi k2} = 0.40 \text{ MPa}$$

Οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιήθηκαν καθώς είναι συντηρητικές, ενδεικτικά αναφέρεται η θλιπτική αντοχή λιθοδομής υπολογισμένη με τη σχέση του Ευρωκώδικα 6 για νέες κατασκευές

$$f_{wc} = k * (f_{bc})^a * (f_{mc})^\beta = 17.19 \text{ MPa}$$

# Παραδοχές ανάλυσης

## Μόνιμα φορτία

Ίδιο βάρος λιθοδομής  $26.00 \text{ kN/m}^3$

Ίδιο βάρος κίσηρης πλήρωσης θόλων  $10.00 \text{ kN/m}^3$

## Κινητά φορτία

Κινητό φορτίο οροφής Υπογείου  $2.00 \text{ kN/m}^2$

Κινητό φορτίο οροφής Ισογείου (μη βατό δώμα)  $1.00 \text{ kN/m}^2$

## Σεισμικά φορτία (EC-8 – ΚΑΔΕΤ)

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2  $\alpha = 0.24 \text{ g}$

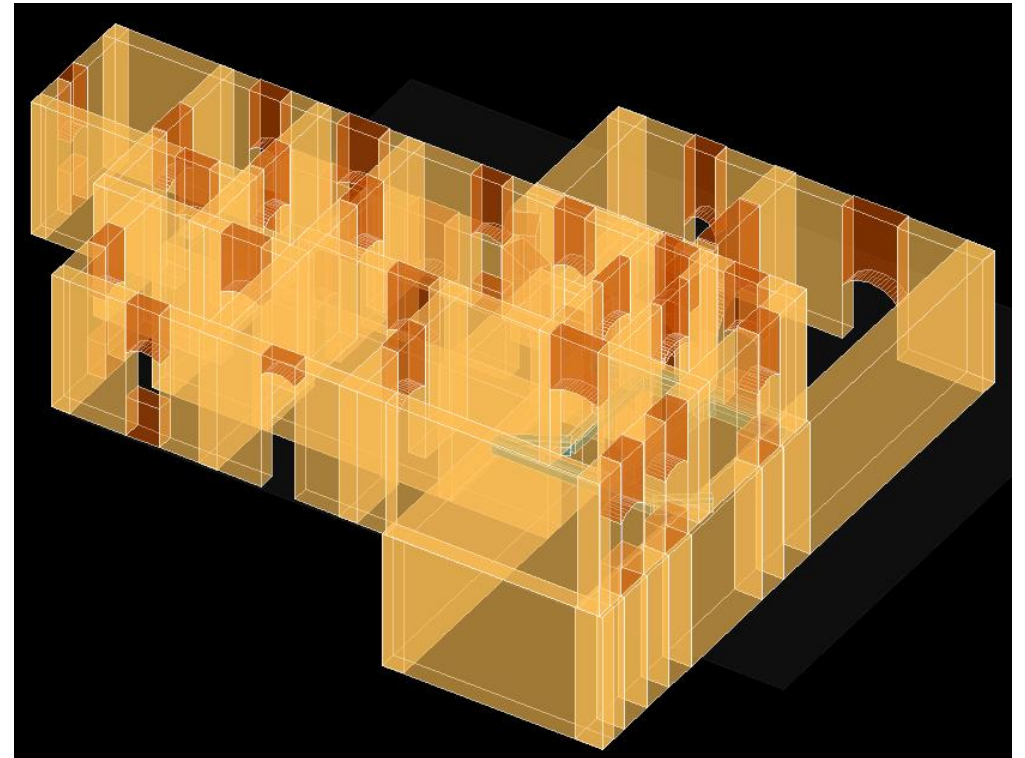
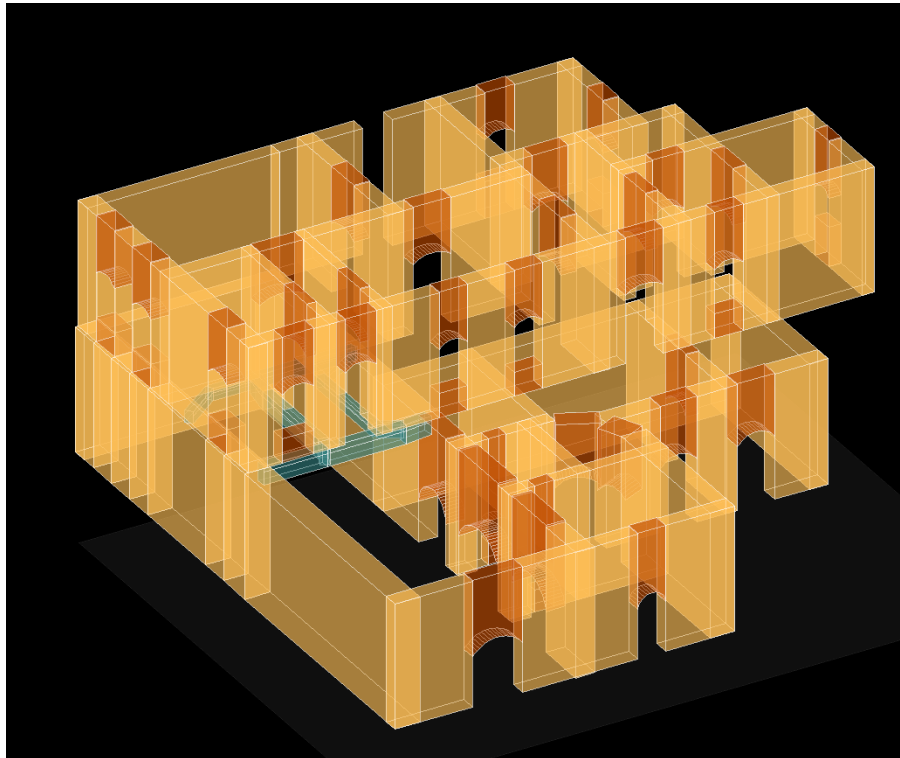
Στάθμη επιτελεστικότητας Γ2  $\alpha_g / \alpha_{g,ref} = 0.60$

Ενιαίος συντελεστής οριζόντιας συμπεριφοράς  $q^* = 2.10$

# Μέθοδος του ισοδύναμου πλαισίου

Για τη στατική ανάλυση του κτηρίου με τη μέθοδο του ισοδύναμου πλαισίου μορφώθηκε κατάλληλο προσομοίωμα στο λογισμικό ΡΑΦ του Τεχνικού Ομίλου Λογισμικού (ΤΟΛ).

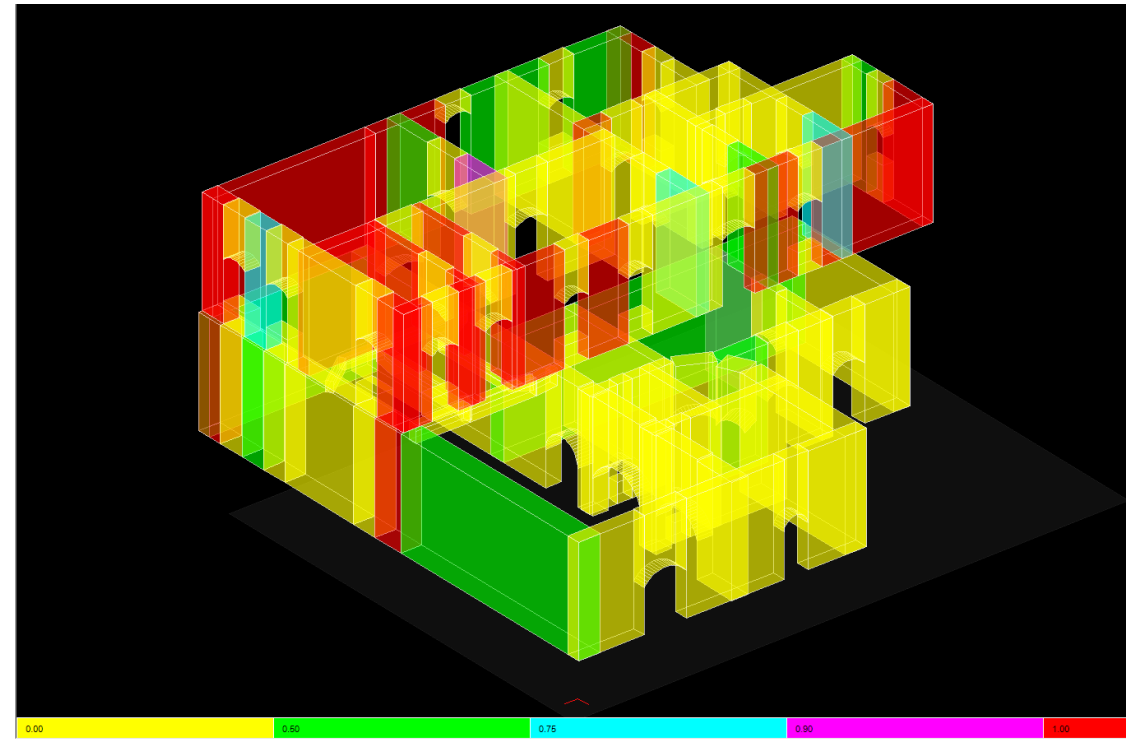
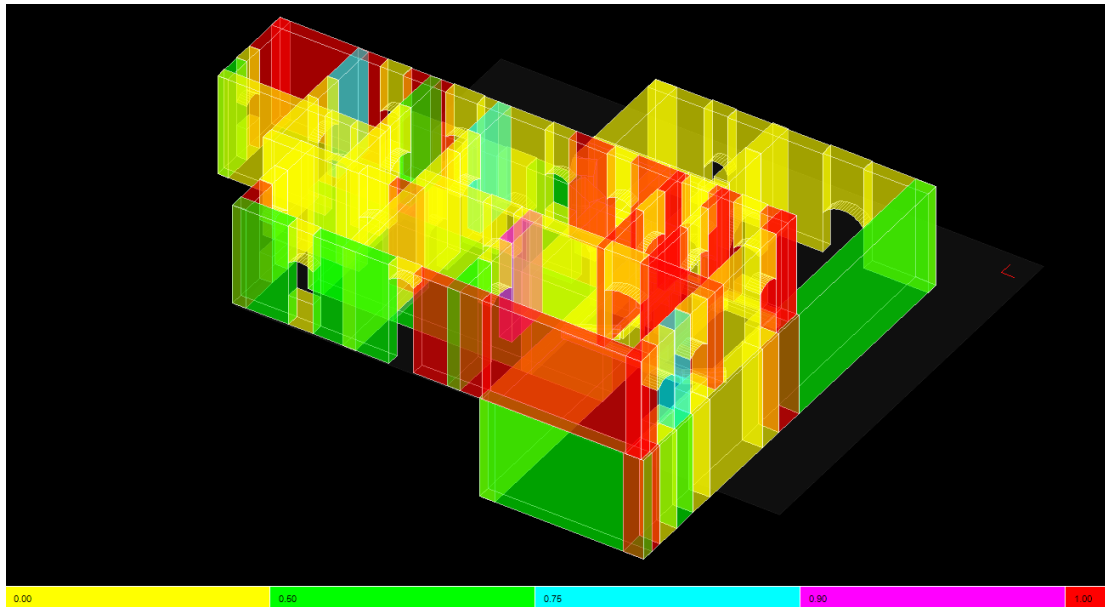
Στο λογισμικό, η προσομοίωση της φέρουσας τοιχοποιίας γίνεται μέσω ραβδόμορφων πλαισιακών στοιχείων. Καθώς το υπόγειο περικλείεται από έδαφος θεωρήθηκε αμετακίνητο με τα σεισμικά φορτία να επιβάλλονται μόνο στο ισόγειο.





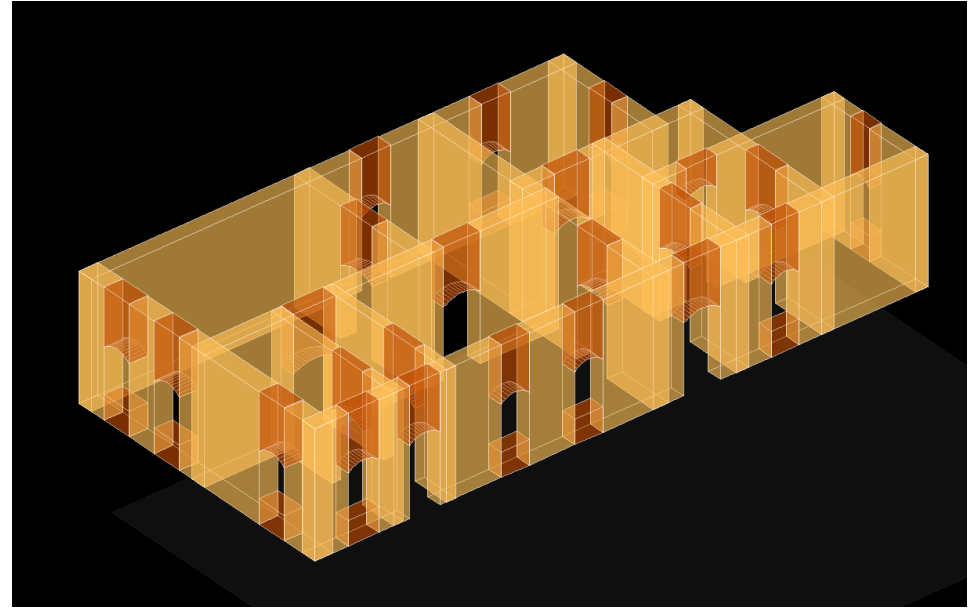
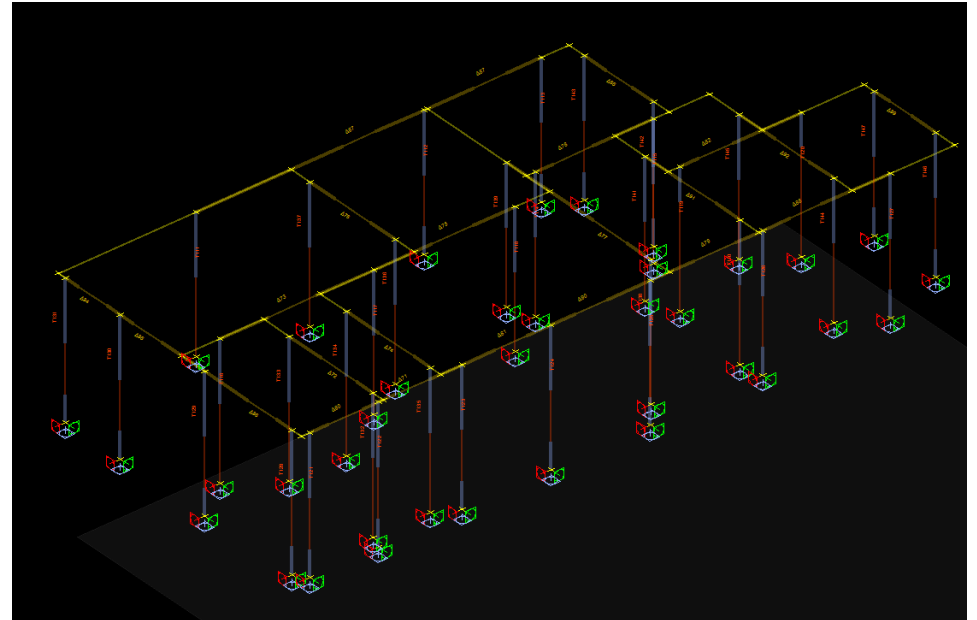
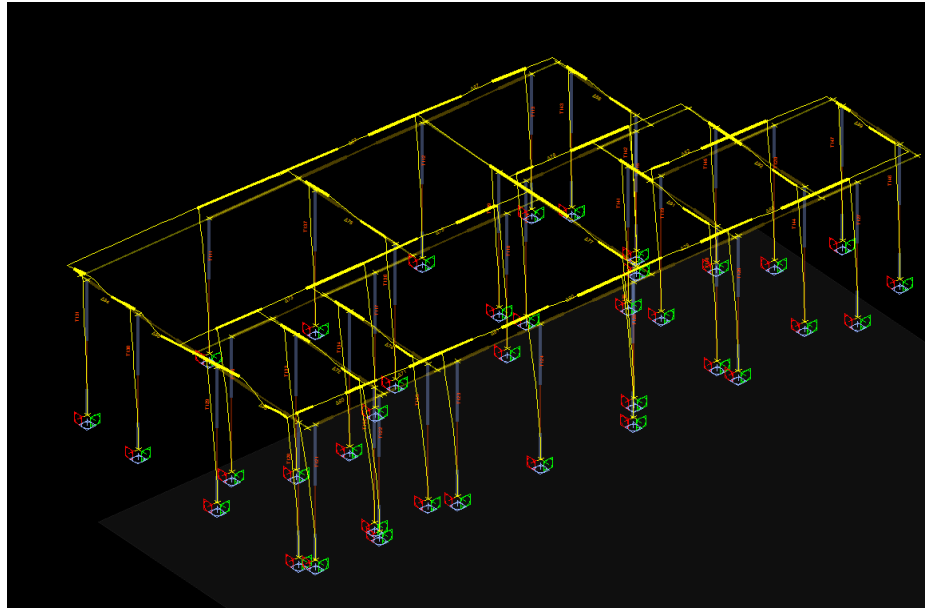
# Αποτελέσματα ανάλυσης

Καθώς το κτήριο έχει 2 στάθμες θεμελίωσης και «φυτευτούς» τοίχους αρκετοί από τους πεσσούς υπόκεινται σε εφελκυσμό και συνεπώς αστοχούν.



# Επίλυση ως Ισόγειο

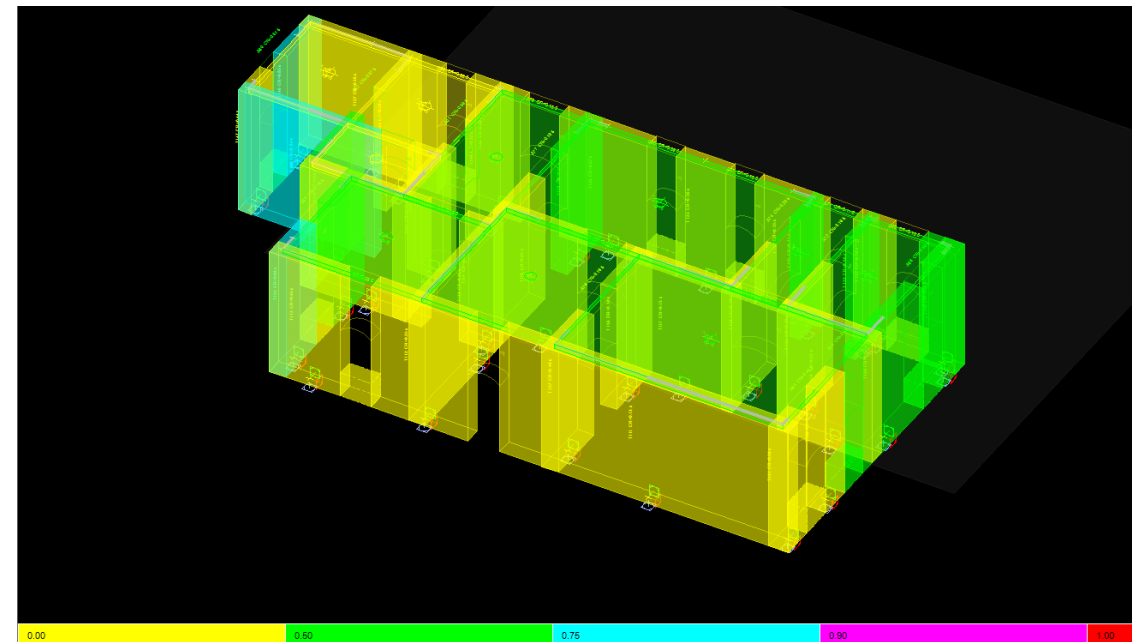
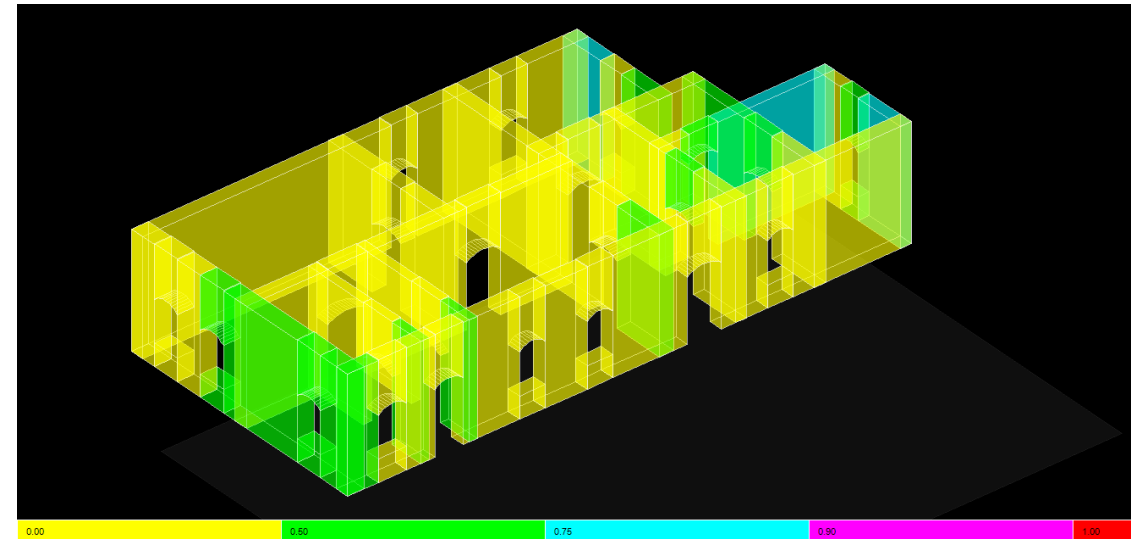
Με σκοπό να ελεγχθεί εάν οι ανεπάρκειες που εντοπίστηκαν στην προηγούμενη επίλυση οφείλονται στους «φυτευτούς» τοίχους, προσομοιώθηκε σε νέο μοντέλο μόνο το ισόγειο.



## Αποτελέσματα - Ισόγειο

Η επίλυση του ισόγειου κατέδειξε ότι οι πεσσοί και τα υπέρθυρα θα επαρκούσαν για την παραλαβή των φορτίων σε περίπτωση που ο φορέας ήταν ισόγειος και δεν υπήρχαν τοίχοι που να εδράζονται σε υποκείμενες καμάρες.

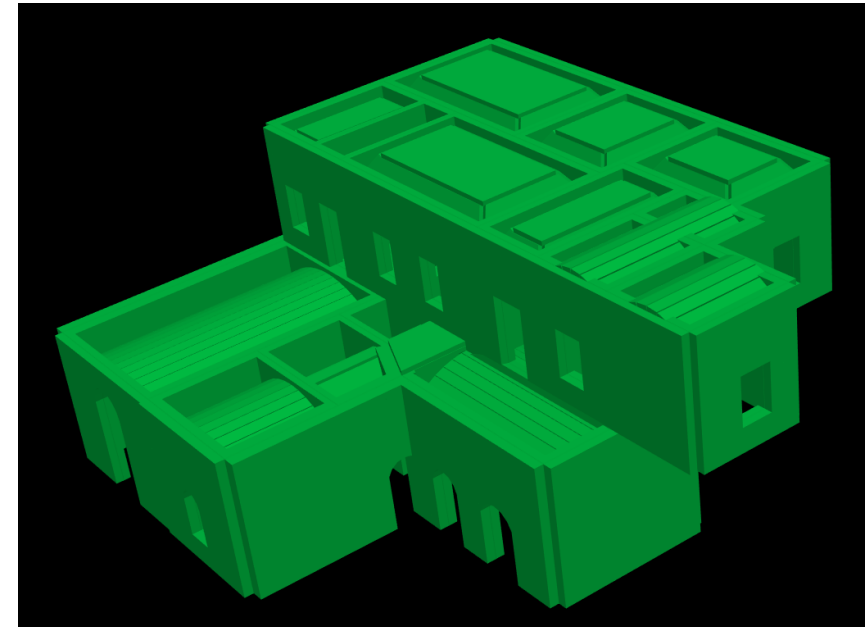
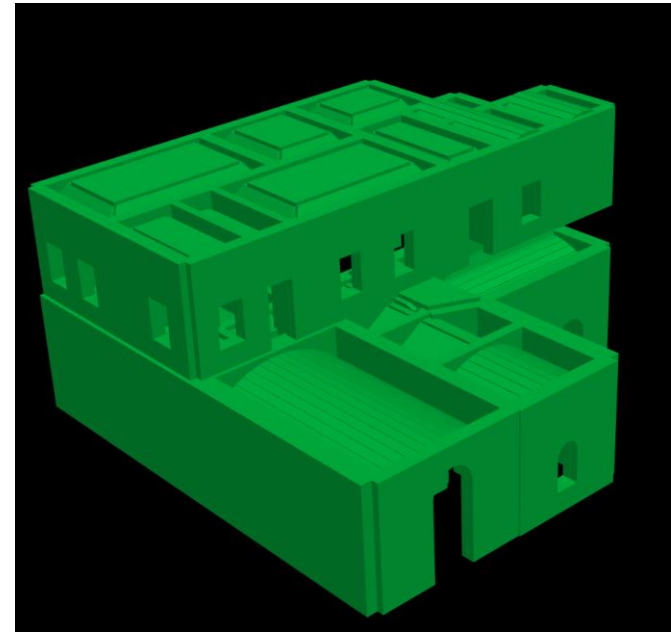
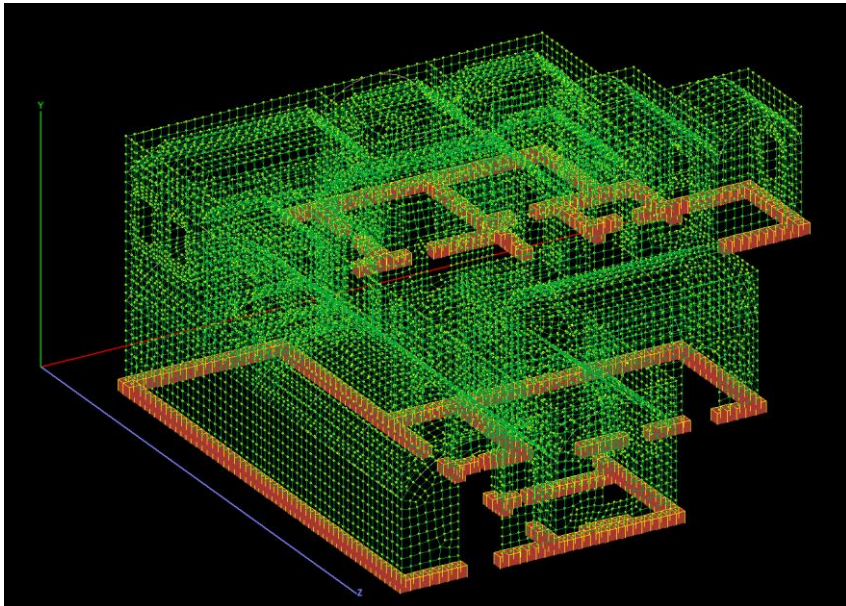
Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της ΜΙΠ θα πρέπει ο φορέας να επιλυθεί και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.





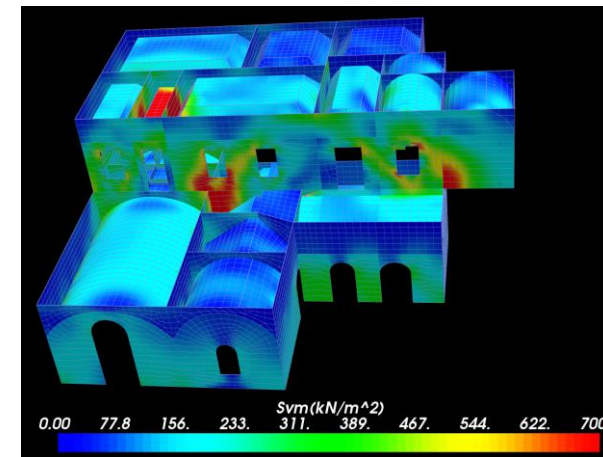
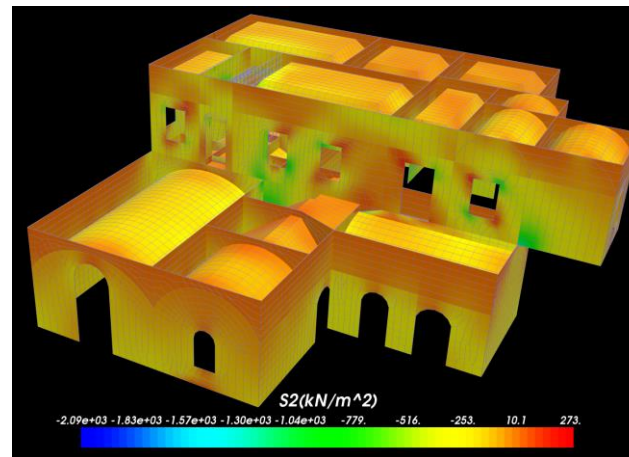
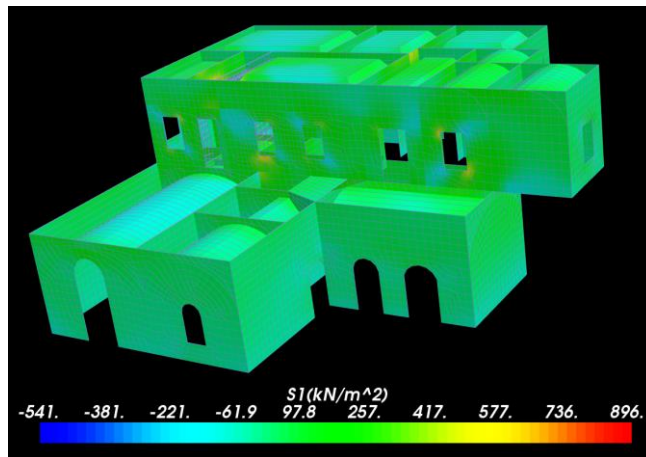
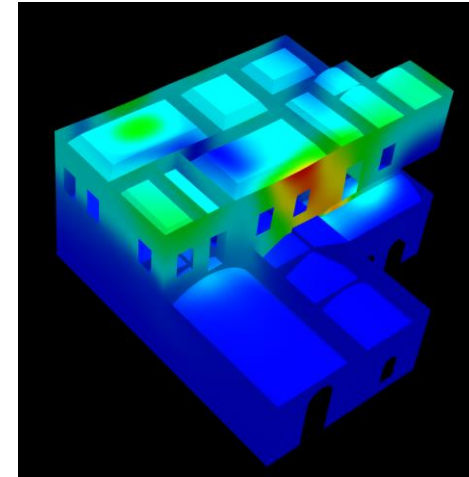
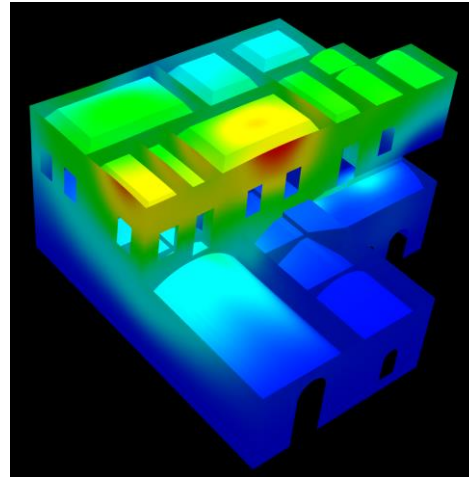
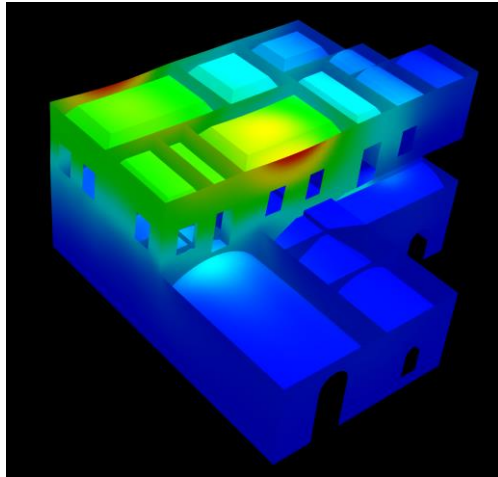
# Ανάλυση με χρήση της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

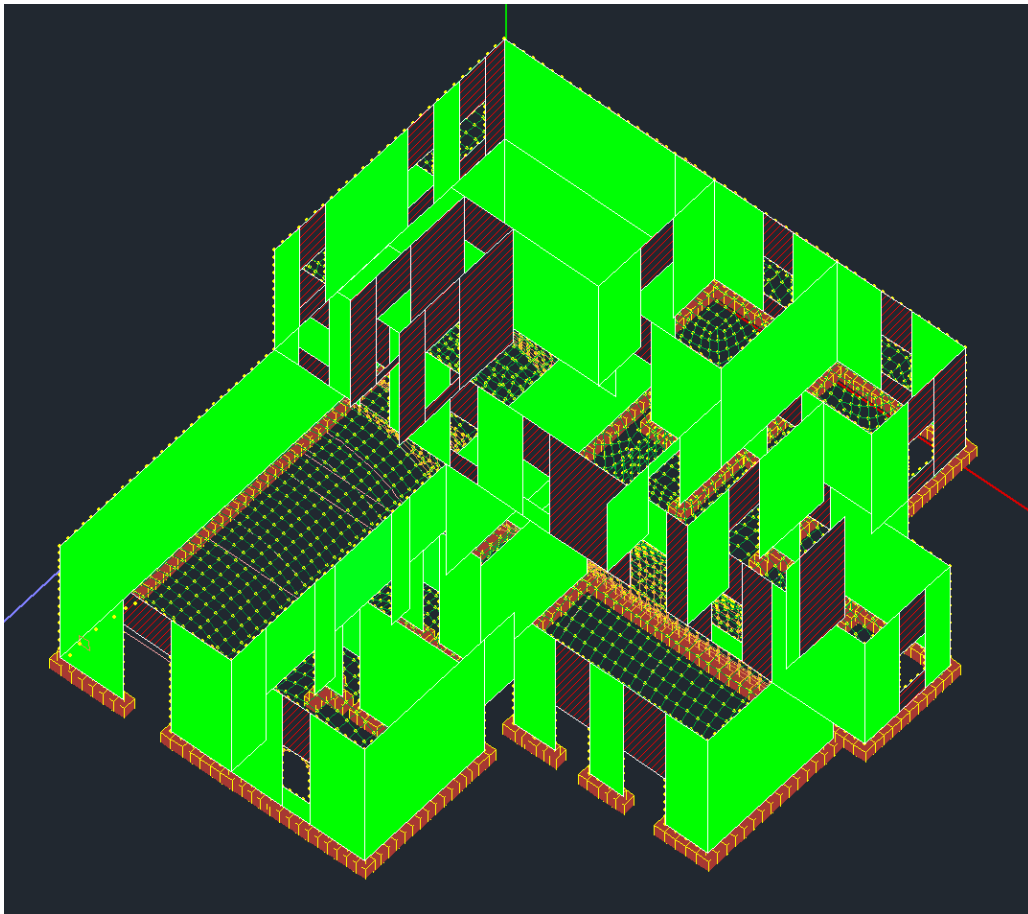
- Ο φορέας προσομοιώθηκε στο λογισμικό ScadaPro.
- Για την προσομοίωσή του έγινε χρήση δισδιάστατων επιφανειακών στοιχείων πακτωμένα στη θεμελίωση.
- Το υπόγειο θεωρήθηκε αμετακίνητο με τα σεισμικά φορτία να επιβάλλονται μόνο στο ισόγειο.



# Ιδιομορφές & μέγιστες τάσεις

Η πρώτη ιδιοπερίοδος είναι 0.05s, στις εικόνες παρουσιάζονται από αριστερά προς τα δεξιά οι 3 πρώτες ιδιομορφές (άνω) και οι περιβάλλουσες των τάσεων (κάτω).





## Αποτίμηση φορέα

Οι πεσσοί και τα υπέρθυρα ελέγχθηκαν έναντι κάμψης (εντός και εκτός επιπέδου) και διάτμησης σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΔΕΤ σε όρους παραμορφώσεων.

Οι ανεπάρκειες που εντοπίστηκαν οφείλονται σε εφελκυσμό του εκάστοτε μέλους, τόσο των πεσσών όσο και των υπέρθυρων. Τα μέλη με ανεπάρκεια παρουσιάζονται στην παρακείμενη εικόνα.

Για τον έλεγχο των θόλων έγινε χρήση του κριτηρίου αστοχίας Karantoni et al. (1993)

$$F = \alpha \cdot J_2 / f_w^2 + \lambda \cdot \sqrt{J_2 / f_w^2} + \beta \cdot I_1 / f_w^2 - 1$$

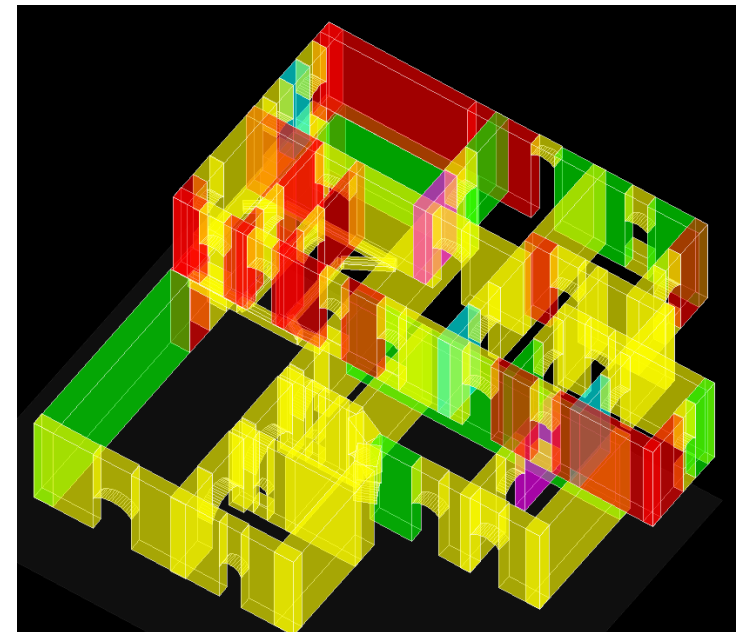
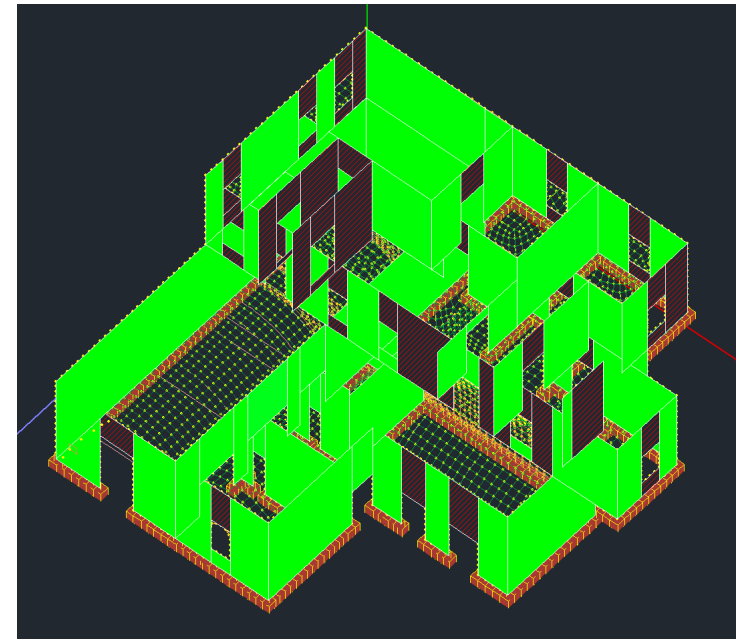
το οποίο κατέδειξε ότι όλοι οι θόλοι επαρκούν για την ανάληψη των προβλεπόμενων φορτίων.



# Σύγκριση μεθόδων ανάλυσης

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι σαφώς πιο κατάλληλη για την επίλυση του συγκεκριμένου πολύπλοκου φορέα, παρόλα αυτά όπως φαίνεται και στις εικόνες των ανεπαρκειών από κάθε μέθοδο τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα.

- Αρκετοί είναι οι πεσσοί που παρουσιάζουν ανεπάρκεια και στις δύο περιπτώσεις.
- Οι ανεπάρκειες οφείλονται σε εφελκυσμό και στις δύο περιπτώσεις.
- Βασική διαφορά αποτελεί ο έλεγχος των υπέρθυρων όπου στη ΜΙΠ παρουσιάζονται να επαρκούν καθώς ελέγχονται μόνο έναντι κάμψης και διάτμησης ενώ στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων καταδεικνύεται ότι εφελκύνονται και συνεπώς αστοχούν.



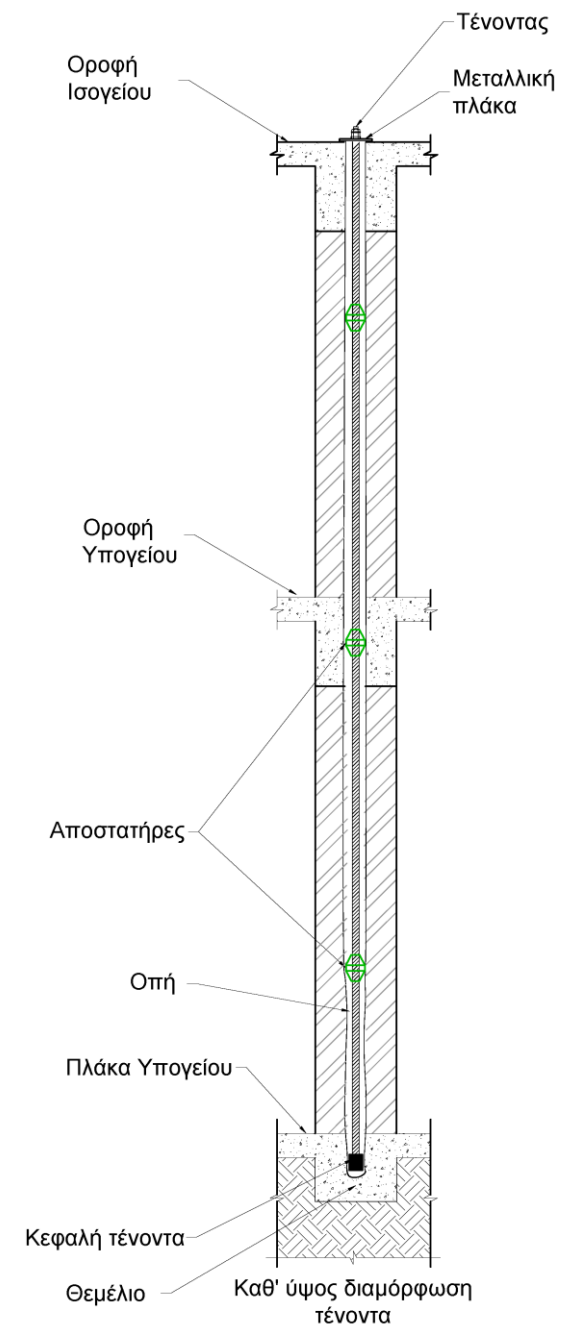
## Προτάσεις ενισχύσεων

Οι αναλύσεις κατέδειξαν ότι ο βασικός λόγος αστοχίας είναι η ύπαρξη εφελκυσμού σε πεσσούς και υπέρθυρα.

Για την άρση των ανεπαρκειών των υπέρθυρων προτείνεται η εφαρμογή μεταλλικών ελασμάτων ή δοκών κατάλληλα αγκυρωμένων.

Για την άρση των ανεπαρκειών των πεσσών προτείνονται τα παρακάτω βήματα με παράλληλες αναλύσεις:

1. Προσθήκη δύσκαμπτων πλαισίων Ο/Σ κάτω από τους «φυτευτούς» τοίχους ώστε να αρθεί η υποχώρηση των εδράσεων τους
2. Προσθήκη κατακόρυφης προέντασης στους τοίχους που αστοχούν (βλ. παρακείμενη εικόνα)
3. Εφαρμογή μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος



## Συμπεράσματα

1. Η θηραϊκή γη έχει συντελέσει στην κατασκευή κτηρίων από λιθοδομή με μεθόδους και τεχνοτροπίες που θα ήταν αδύνατες στην τον 19<sup>ο</sup> αιώνα χωρίς την ύπαρξη της.
2. Η σύνταξη και εφαρμογή ενός αναλυτικού προγράμματος διερευνητικών εργασιών που να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες του κτηρίου αποτελεί το βασικότερο βήμα προς τον στατικό επανέλεγχό του.
3. Ανάλογα με τον τύπο κάθε κτηρίου πρέπει να επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος αποτίμησής του η οποία ίσως δεν είναι εξ αρχής προφανής αλλά επιλέγεται κατόπιν αποτίμησης με περισσότερες της μίας μεθόδους. Λόγω της πολυπλοκότητας των κτηρίων της Θήρας είναι μάλλον βέλτιστη η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.
4. Η επιλογή της μεθόδου ενίσχυσης είναι πολυπαραγοντικό ζήτημα και θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον τύπο της αστοχίας, τις διαθέσιμες μεθόδους σε κάθε περιοχή αλλά και τυχόν απαιτήσεις αρμόδιων κρατικών υπηρεσιών.

σας ευχαριστώ για την προσοχή σας