

ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Καθώς ο άνθρωπος προσπαθούσε να φτιάξει τα πρώτα του οικοδομήματα χρησιμοποιούσε υλικά που του πρόσφερε η φύση ,όπως η πέτρα και έτσι κατόρθωσε να κατασκευάσει τις λίθινες κατοικίες. Άρα είναι λογικό που η τοιχοποιία είναι από τα αρχαιότερα δομικά συστήματα. Μέσα ,λοιπόν, στα τόσα χρόνια ύπαρξης αυτού του δομικού συστήματος είναι αναμενόμενο ότι υπήρξαν εξελίξεις, οι φυσικοί λίθοι αντικαταστάθηκαν από τεχνητά λιθοσώματα (π.χ. τούβλα),από τις χυτές τοιχοποιίες και τα τελευταία χρόνια από τις σπλισμένες τοιχοποιίες.

Τοιχοποιία ορίζεται μια έντεχνη σύνθεση λιθοσωμάτων τοποθετημένων κατά καθορισμένη διάταξη με ή χωρίς συνδετικό κονίαμα, ανεξάρτητα από το είδος των λίθων που χρησιμοποιούνται.

Παρ' ότι ,όπως προαναφέρθηκε, η τοιχοποιία είναι γνωστή και χρησιμοποιείται ως δομικό σύστημα από την αρχαιότητα, η συμπεριφορά και η απόκριση οικοδομημάτων από φέρουσα τοιχοποιία δεν είναι πλήρως γνωστή. Υπάρχουν, όμως, συγκεκριμένοι λόγοι που δικαιολογούν αυτή την μερική άγνοια. Αυτοί είναι:

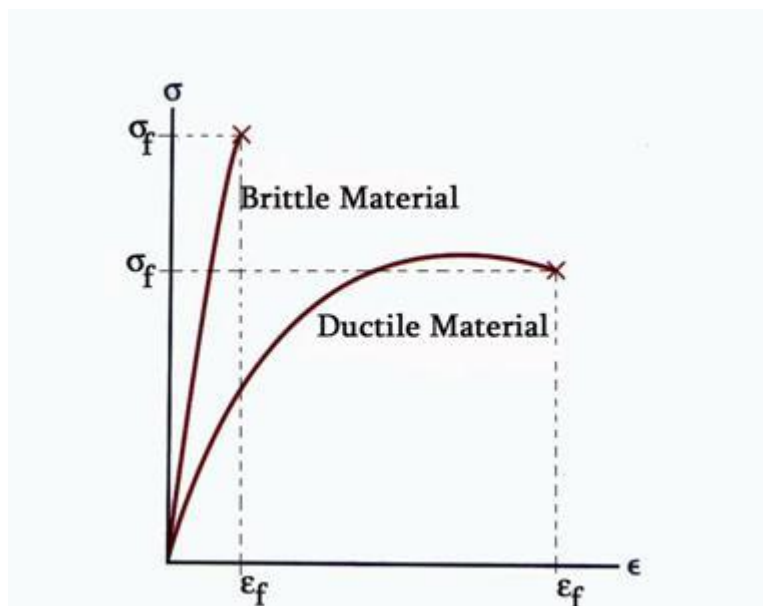
- Η τοιχοποιία είναι ένα σύστημα που ποικίλει γιατί μπορεί να αποτελείται από λίθους σε ποικιλία κατεργασίας, μεγεθών και σχημάτων αλλά και από κονιάματα σε ποικιλία σύνθεσης και αντοχής. Ταυτόχρονα και ο τύπος δόμησης(πώς πλέκονται τα λιθοσώματα μεταξύ τους) είναι παράγοντας πολυμορφίας οπότε το τελικό αποτέλεσμα, η τοιχοποιία, δεν μπορεί παρά να είναι ποικιλόμορφο. Απαιτείται ,λοιπόν, συστηματική έρευνα για τις επιμέρους φάσεις κατασκευής και για την συνεργασία των δύο επιμέρους υλικών καθώς και ανελλιπής διερεύνηση για τις επιμέρους παραμέτρους που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.
- Η τοιχοποιία έχει σχετικά χαμηλή αντοχή σε θλίψη , πολύ χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και ψαθυρή συμπεριφορά, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση των διατομών και επομένως στην αύξηση του κόστους της κατασκευής. Ταυτόχρονα τα νέα υλικά, σκυρόδεμα και χάλυβας, έχουν πιο όλκιμη συμπεριφορά κα καλύτερα χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα η τοιχοποιία να περιορισθεί στο ρόλο του υλικού πλήρωσης.

Πλέον οι περισσότερες κατασκευές δεν δομούνται με φέρουσα τοιχοποιία. Αυτό οφείλεται τόσο στην μερική άγνοια του αντικειμένου της όσο και στην ύπαρξη καλύτερων υλικών. Το γεγονός ότι πολλές κατασκευές έχουν υποστεί σοβαρές

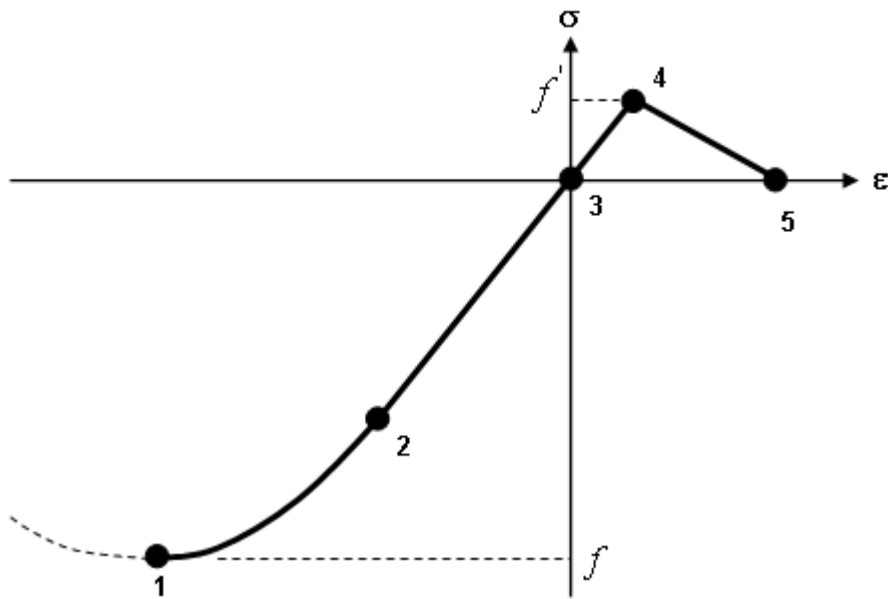
ζημιές ή και έχουν καταρρεύσει κατά τη διάρκεια σεισμών αποτελεί άλλον έναν λόγο που η τοιχοποιία έχει περιορισθεί και δεν χρησιμοποιείται ως φέρων οργανισμός. Αν, όμως, λάβει κανείς υπόψιν του ότι αυτές οι αστοχίες μπορεί να οφείλονται σε κακής ποιότητας υλικά, ελλιπή ή κακή τεχνική χτισίματος και έλλειψη συντήρησης θα καταλάβει ότι το τελευταίο γεγονός δεν θα έπρεπε να παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτή η έλλειψη νέων κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία έχει σαν επακόλουθο την μη εξοικείωση των μηχανικών με το συγκεκριμένο δομικό σύστημα και έτσι δημιουργείται η ανάγκη για τη μελέτη της συμπεριφοράς της.

Τα βασικά μειονεκτήματα της είναι:

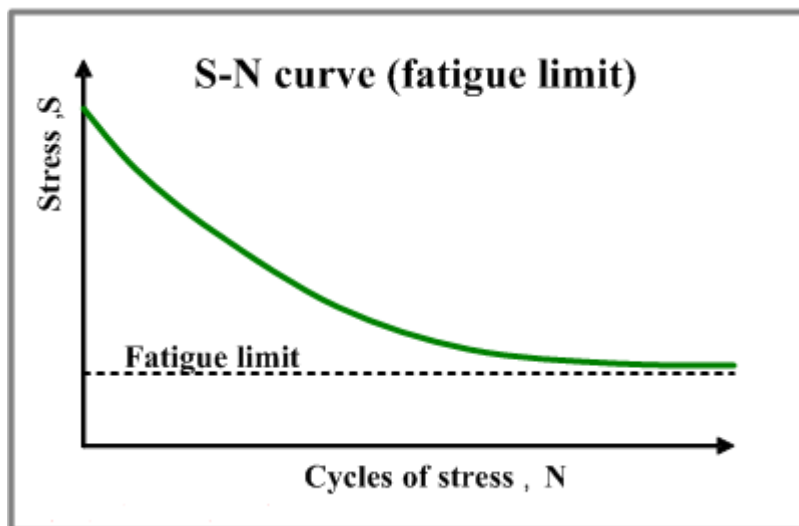
- Η ψαθυρή συμπεριφορά της
- Η σημαντική μείωση της αντοχής της στις ανακυκλικές φορτίσεις
- Η σχετικά μικρή θλιπτική της αντοχή, σε σύγκριση με αυτή του οπλισμένου σκυροδέματος
- Η πολύ μικρή εφελκυστική της αντοχή



Εικόνα 1 Σύγκριση ψαθυρού και όλκιμου υλικού



Εικόνα 2 Σύγκριση θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής



Εικόνα 3 Επιρροή των κύκλων φόρτισης στην αντοχή

ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Η τοιχοποιία αποτελείται από:

- Φυσικούς λίθους, δηλαδή πέτρες που προέρχονται από εξόρυξη και τεμαχισμό πετρωμάτων
- Τεχνητά λιθοσώματα, πιο συγκεκριμένα από ωμόπλινθους (πλίνθοι) , οπτόπλινθους (τούβλα) , τσιμεντόλιθους και λιθοσώματα από ελαφρά πορώδη υλικά
- Κονιάματα, που διακρίνονται σε κονιάματα αρμών, υποστρωμάτων και επιχρίσματα

Η συμπεριφορά των τοιχοποιιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων. Στις κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία τα κονιάματα των αρμών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του συνόλου και γι' αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι βασικοί τύποι των κονιαμάτων που συναντώνται, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Τα συστατικά των κονιαμάτων είναι η συνδετική κονία, διάφορα οργανικά ή ανόργανα πρόσθετα , αδρανή και το νερό. Οι αναλογίες ανάμιξης των συστατικών αυτών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο για τη συμπεριφορά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Η κονία μπορεί να είναι υδραυλική ή αερική. Υδραυλική κονία (υδραυλική άσβεστος, τσιμέντο) είναι η κονία η οποία πήζει και σκληραίνει με την παρουσία νερού με/ή χωρίς την παρουσία αέρα και παραμένει σκληρή ακόμα και κάτω από το νερό. Αερική κονία(αερική άσβεστος, γύψος) είναι η κονία η οποία πήζει μόνο με την παρουσία αέρα χωρίς νερό.

Τα διάφορα οργανικά ή ανόργανα πρόσθετα χρησιμοποιούνται για την βελτίωση των χαρακτηριστικών του κονιαματος. Τα πιο διαδεδομένα ανόργανα πρόσθετα είναι οι ποζολάνες , οι οποίες σε λεπτοαλεσμένη μορφή και με την παρουσία υγρασίας δημιουργούν συνδετικές ενώσεις. Οι ποζολάνες διακρίνονται σε φυσικές (θηραϊκή και μηλαϊκή γη) και σε τεχνητές (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, μετακαολίνης, λεπτοαλεσμένα θραύσματα κεραμικών). Οργανικά πρόσθετα αποτελούν πολλά υλικά , όπως οι ρευστοποιητές οι υπερρευστοποιητές, οι πλαστικοποιητές, οι επιταχυντές πήξης, οι επιβραδυντές και τα αερακτικά που το καθένα επιδρά θετικά στην βελτίωση κάποιας συγκεκριμένης ιδιότητας όπως η εργασιμότητα, η σκληρότητα, η ταχύτητα πήξης και η αύξηση των μηχανικών αντοχών.

Τέλος, φυσικά υλικά (χαλίκια , πέτρες και βότσαλα) ή βιομηχανικά υλικά (όπως διογκωμένος περλίτης και διογκωμένη άργιλος) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή. Σε παλαιότερες κατασκευές και ιστορικά μνημεία τα συνηθέστερα αδρανή είναι η άμμος, τα χαλίκια και τα θραύσματα κεραμικών.

ΕΙΔΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ(ΤΡΟΠΟΙ ΔΟΜΗΣΗΣ)

Ανάλογα με τον τρόπο δόμησης οι τοιχοποιίες διαιρούνται σε:

1. Λιθοδομές
2. Τοιχοποιίες από τεχνητά λιθοσώματα
3. Χυτές τοιχοποιίες
4. Οπλισμένες τοιχοποιίες

➤ **Λιθοδομές**

Είναι τοιχοποιίες που κατασκευάζονται από φυσικούς λίθους και διακρίνονται σε:

- Ξηρολιθοδομές ή ξηρολιθιές. Το χαρακτηριστικό αυτού του τρόπου δόμησης είναι ότι δεν χρησιμοποιείται συνδετικό κονίαμα. Προφανώς τα κενά πρέπει να είναι μικρά γι' αυτό και χρησιμοποιούνται και πλακοειδείς πέτρες για την κάλυψη τους. Είναι ο παλαιότερος τρόπος δόμησης και στις μέρες μας δεν χρησιμοποιείται πια.



Εικόνα 4 Ξηρολιθοδομή

- Αργολιθοδομές. Σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούνται αργοί λίθοι, δηλαδή ορυκτοί χωρίς καμία επεξεργασία (ή πολύ μικρή επεξεργασία) και συνδετικό κονίαμα.



Εικόνα 5 Αργολιθοδομή

- Λιθοδομές από ημίξεστους λίθους. Εδώ οι λίθοι υπόκεινται σε μερική επεξεργασία, δηλαδή επεξεργάζονται μερικές μόνο από τις έδρες τους. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι να επεξεργάζονται την εξωτερική έδρα του λίθου της εξωτερικής παρειάς ενώ η εσωτερική παρειά και ο υπόλοιπος όγκος της λιθοδομής να είναι από αργούς λίθους. Χρησιμοποιείται κονίαμα και σε αυτή τη κατηγορία



Εικόνα 6 Ημιλαξευτή λιθοδομή με λαξευμένους γωνιόλιθους

- Λιθοδομές από ξεστούς λίθους ή λαξευτή λιθοδομή. Σε αυτή την κατηγορία οι λίθοι λαξεύονται με προσοχή και παίρνουν συγκεκριμένο σχήμα και μέγεθος γιατί θα χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένη θέση. Αυτός είναι και ο λόγος που οι λίθοι είναι αριθμημένοι. Η αντοχή αυτών των τοιχοποιιών βασίζεται στην αλληλεμπλοκή των λίθων και παλαιότερα δεν χρησιμοποιούνταν κονίαμα. Στη σημερινή εποχή χρησιμοποιείται κονίαμα αλλά παίζει δευτερεύοντα ρόλο.



Εικόνα 7 Λαξευτή λιθοδομή

➤ **Τοιχοποιίες από Τεχνητά Λιθοσώματα**

Οι τοιχοποιίες σε αυτή την κατηγορία διακρίνονται ανάλογα με το είδος του λιθοσώματος:

- Τοιχοποιίες από ωμόπλινθους: Αυτή η μορφή τοιχοποιίας εμφανίζεται κυρίως σε αγροτικές περιοχές, ιδιαίτερα σε αυτές όπου οι λίθοι δεν είναι διαθέσιμοι. Οι ωμόπλινθοι είναι ουσιαστικά τούβλα από αργιλικό χώμα, άμμο και άχυρο που ψήνονται στον ήλιο. Συνδετικό κονίαμα αποτελεί η λάσπη. Παρά την φαινομενικά χαμηλή αντοχή τους, παρατηρήθηκε ότι κατασκευές από πέτρα και κατασκευές από χωμάτινους τοίχους του ίδιου ύψους είχαν την ίδια κίνηση κατά τη διάρκεια του σεισμού του Φεβρουαρίου του 1981.



Εικόνα 8 Ωμόπλινθοι

- Τοιχοποιίες από οπτόπλινθους: Οι οπτόπλινθοι είναι τα γνωστά και ευρέως διαδεδομένα τούβλα, η πρώτη ύλη των οποίων είναι η άργιλος, πηλός που ζυμώνεται με νερό και όσο είναι εύπλαστος διαμορφώνεται στο επιθυμητό μέγεθος

και σχήμα. Εν συνεχεία, αφήνονται να ξηραθούν και ψήνονται σε κλιβάνους. Στη εποχή μας υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία διαστάσεων , συνήθως διάτρητα.



Εικόνα 9 Τοιχοποιία από οπτόπλινθους

- Τοιχοποιίες από τσιμεντόλιθους: Οι τσιμεντόλιθοι είναι λίθοι που αποτελούνται από τσιμέντο, νερό ,αδρανή , άμμο και σκύρα ή παρλίτη ή κίσηρη. Η κατασκευή τους είναι πολύ εύκολη γι' αυτό και δεν υπάρχουν μονάδες παραγωγής στη χώρα μας με τυποποιημένα και ελεγμένα προϊόντα. Έχουν κακή θερμομονωτική ικανότητα και γι αυτό δεν χρησιμοποιούνται στις κατοικίες.



Εικόνα 10 Τοιχοποιία από τσιμεντόλιθους

➤ **Χυτή τοιχοποιία**

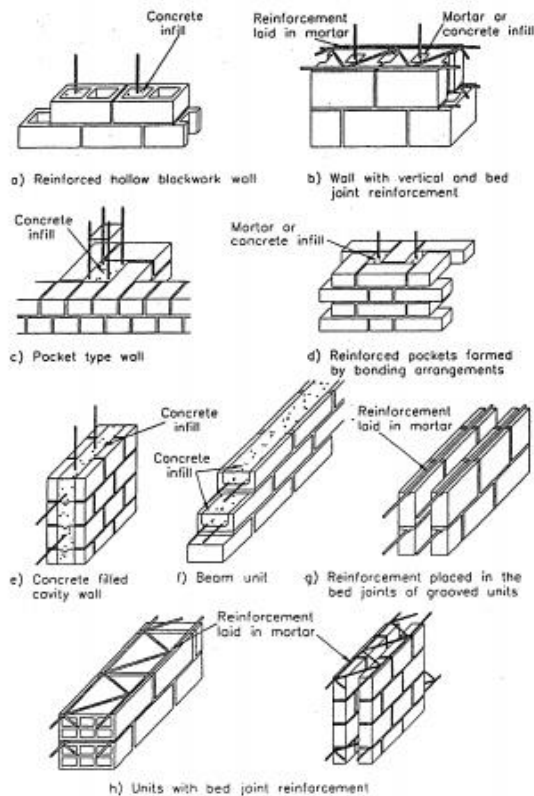
Η χυτή τοιχοποιία είναι ένα μονολιθικό στοιχείο που κατασκευάζεται μέσα σε καλούπια στα οποία χυτεύονται υλικά σε ρευστή κατάσταση τα οποία και αφήνονται να ξηραθούν, να σκληρύνουν και να λιθοποιηθούν. Το υλικό που, στις μέρες μας, προσφέρεται περισσότερο για αυτή την κατηγορία είναι το σκυρόδεμα, όμως ακόμα και αργιλικό χώμα με προσθήκη νερού και άμμου μπορεί να αποτελέσει ικανοποιητικό υλικό.



Εικόνα 11 Χυτή τοιχοποιία

➤ **Οπλισμένη τοιχοποιία**

Το χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι ότι τα λιθοσώματα τοποθετούνται έτσι ώστε να υπάρχει ο απαραίτητος χώρος για την τοποθέτηση οπλισμού στο σώμα της τοιχοποιίας. Ο οριζόντιος οπλισμός τοποθετείται σε οριζόντιους αρμούς ενώ ο κατακόρυφος είτε μέσα σε κατακόρυφες οπές των λιθοσωμάτων είτε σε κατάλληλες φωλιές.



Examples of the incorporation of reinforcement in masonry.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΩΝ-ΓΕΝΙΚΑ

Σε όλες τις περιπτώσεις τοιχοποιιών ,πλην των χυτών , πρέπει να εξασφαλίζονται ορισμένοι , οικοδομικοί και στατικοί, παράγοντες. Αυτοί είναι:

1. Να υπάρχει η μέγιστη δυνατή συνοχή των μελών της τοιχοποιίας (λιθοσώματα, κονίαμα και τυχόν σύνδεσμοι)
2. Μέσω της συνοχής να εξασφαλίζεται, κατά το δυνατόν, ομοιόμορφη κατανομή ενός δυναμικού φορτίου σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μάζα της τοιχοποιίας γίνεται.
3. Μέσω των προαναφερθέντων και των αντοχών των υλικών να αντιμετωπίζονται τόσο τα στατικά όσο και τα δυναμικά φορτία και αναπτύσσεται η μέγιστη δυνατή αντοχή της τοιχοποιίας χωρίς χαλάρωση της συνοχής ή της διαρροής της μάζας της.
4. Να εξασφαλίζεται η αντοχή τις τοιχοποιίας στις κλιματολογικές συνθήκες του έργου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

Επειδή , όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα λιθοσώματα έχουν πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν αυτά δεν έχουν κανονικό σχήμα, δηλαδή δεν είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, έτσι ώστε να τοποθετούνται κατάλληλα ώστε να εργάζονται πάντα σε θλίψη. Αν ,παραδείγματος χάριν, κάποιο λιθόσωμα εδραστεί αμφιέριστα τότε λόγω του κατακόρυφου φορτίου, που σίγουρα υπάρχει (ίδιο βάρος) , η κάτω ίνα τείνει εφελκυστεί. Ίδια είναι και η περίπτωση που το λιθόσωμα στηρίζεται σε ένα σημείο όπου λόγω στροφής εμφανίζεται δευτερεύουσα τάση κάμψης.



Εικόνα 12 Λανθασμένη στήριξη λιθοσωμάτων

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων η δόμηση των κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία έχει τους εξής κανόνες :

- Οι αρμοί εδράσεως των λίθων πρέπει να είναι κάθετοι προς την κατεύθυνση της δύναμης που φορτίζει κατά βάση την κατασκευή. Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις είναι αυτές που η τοιχοποιία καταπονείται από κατακόρυφα φορτία (ίδιο βάρος και ωφέλιμα φορτία) γι' αυτό και οι μεγάλες επιφάνειες των λιθοσωμάτων, οι κύριες έδρες, διατάσσονται οριζόντια. Σε περίπτωση όμως σεισμού η "δύναμη" είναι λοξή και έχει και συνιστώσα στην οριζόντια διεύθυνση που δημιουργεί προβλήματα.

- Οι κατακόρυφοι αρμοί πρέπει να διασταυρώνονται από στρώση σε στρώση, μετατεθειμένοι στο μισό περίπου μήκος του υποκείμενου λίθου με τρόπο τέτοιο ώστε ο κάθε λίθος να μεταφέρει τα φορτία στις παρακάτω στρώσεις ομοιόμορφα και σε αυξημένη επιφάνεια της τοιχοποιίας και να μην είναι στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο. Δηλαδή οι κατακόρυφοι αρμοί πρέπει να διασταυρώνονται, ή με άλλα λόγια τα λιθοσώματα πρέπει να πλέκονται μεταξύ τους. Αυτός ο κανόνας πρέπει να ισχύει σε όλες τις όψεις της τοιχοποιίας δηλαδή και κατά το πάχος της.



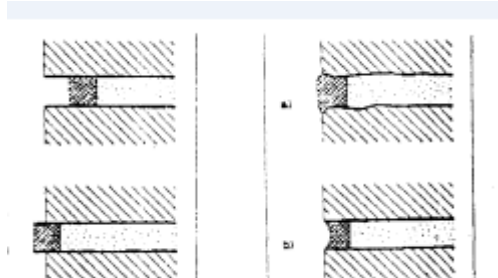
Εικόνα 13 Σωστή κατά το πάχος και σε όψη τοποθέτηση αντίστοιχα

- Στην περίπτωση συνάντησης ή διασταύρωσης των τοίχων είναι απαραίτητη η διαμόρφωση ισχυρού συμπλέγματος για την καλύτερη σύνδεση και την ενίσχυση της γωνίας της κατασκευής

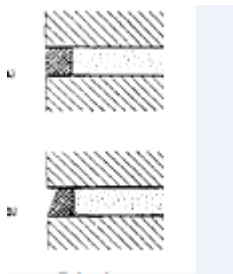
- Όλες οι πλευρές των λιθοσωμάτων εκτός από τις όψεις τους πρέπει να περιβάλλονται από το εκάστοτε κονίαμα, στην ποσότητα που χρειάζεται για να διαμορφωθεί ισχυρή συγκολλητική στρώση. Η μάζα του κονιάματος πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη μεταξύ όλων των λίθων. Γίνεται έτσι κατανοητό ότι τόσο η τοποθέτηση των λίθων όσο και η τοποθέτηση του κονιάματος πρέπει να είναι πολύ προσεκτική ώστε να μην υπάρχουν μεγάλα κενά μεταξύ των λιθοσωμάτων και το σύνολο να αποτελεί μια όσο το δυνατόν πιο συμπαγή μάζα.

- Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται και στην κατασκευή των αρμών στις όψεις των λιθοσωμάτων ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη στεγανοποίηση αυτών και η προστασία της κατασκευής από την υγρασία, ειδικά σε τοιχοποιίες που πρόκειται να μείνουν ανεπίχριστες. Σε αυτή τη περίπτωση, οι επιφάνειες δεν πρέπει να βρίσκονται ούτε πιο μέσα από την επιφάνεια της όψης των λίθων ούτε να

εξέχουν, πρέπει να είναι ομαλές και κατά το δυνατόν λείες ώστε να εξασφαλίζεται η αποστράγγιση των ομβρίων. Στις επιχρισμένες τοιχοποιίες το κονίαμα πρέπει να βρίσκεται πιο μέσα από την επιφάνεια της όψης των λίθων ώστε το κονίαμα του επιχρίσματος να εισχωρεί και αυτό στον αρμό, να προσκολλάται καλά και να γίνεται ενιαίο.



Εικόνα 14 Λάθος αρμοί



Εικόνα 15 Σωστοί αρμοί (πάνω- χωρίς επίχρισμα, κάτω -με επίχρισμα)

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Η τοιχοποιία χαρακτηρίζεται από :

- χαμηλή εφελκυστική αντοχή
- σχετικά χαμηλή θλιπτική αντοχή (συγκριτικά με άλλα υλικά)
- έντονα ανισότροπη συμπεριφορά
- ψαθυρή και ανεπαρκής συμπεριφορά σε οριζόντια φορτία

Με εξαίρεση , ίσως, την θλιπτική αντοχή τα άλλα τρία χαρακτηριστικά αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα για την τοιχοποιία ως φέρων οργανισμός. Αυτά τα μειονεκτήματα οφείλονται περισσότερο στη μέτρια συμπεριφορά της διεπιφάνειας που επηρεάζει το σύνολο της τοιχοποιίας παρά στον ψαθυρό χαρακτήρα του κονιάματος και των λίθων. Γι' αυτό και για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών πρέπει να η τοιχοποιία να θεωρείται σα συνδυασμός των δύο υλικών και να μην μελετάται το κάθε υλικό ξεχωριστά και μόνο του. Ο Ευρωκώδικας 6 (EC 6) επιβάλλει για την μελέτη μιας τοιχοποιίας να προσδιορίζονται με πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές :

- Θλιπτική αντοχή , f_c
- Διατμητική αντοχή, f_v
- Καμπτική αντοχή, f_b
- Σχέση τάσης- παραμόρφωσης, σ - ϵ

Εκτός από αυτά τα χαρακτηριστικά απαραίτητα για να γίνει ένας αριθμητικός έλεγχος είναι και :

- Το μέτρο ελαστικότητας E
- Το μέτρο διάτμησης G ή ο λόγος poisson ν
- Η εφελκυστική αντοχή, f_t ,
- Ο δείκτης πλαστιμότητας μ (ο οποίος είναι χαρακτηριστικό των τοίχων και όχι της εκάστοτε τοιχοποιίας)

Όλοι βέβαια οι υπολογισμοί των μηχανικών ιδιοτήτων γίνονται με πρότυπες δοκιμές σε δοκίμια με πρότυπες διαστάσεις που καθορίζονται από το EN 1052.

❖ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η τοιχοποιία μπορεί να θεωρηθεί θλιπτικό δομικό στοιχείο αφού η θλιπτική αντοχή είναι το μοναδικό μηχανικό χαρακτηριστικό που δεν είναι πολύ χαμηλό. Ως ψαθυρό υλικό η θραύση θα επέλθει αμέσως χωρίς προειδοποιήσεις με την είσοδο του υλικού στη διαρροή.

Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται από :

- την αντοχή του κονιάματος σε θλίψη f_{mc}
- την αντοχή των λιθοσωμάτων σε θλίψη και εφελκυσμό f_{bc} , f_{bt} αντίστοιχα
- τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά των λιθοσωμάτων και του κονιάματος (μέτρα ελαστικότητας E_b , E_m και οι λόγοι Poisson ν_b , ν_m αντίστοιχα
- το σύστημα και η ποιότητα δόμησης
- το πάχος των αρμών
- η υδροαπορροφητικότητα των λιθοσωμάτων

Λόγω της ανισοτροπίας των υλικών απαιτούνται πολλοί συνδυασμοί παραμέτρων για να βγει μια σχέση που να εκφράζει την θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση όπου η θλιπτική αντοχή του κονιάματος είναι μικρότερη από την θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων τότε η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας βρίσκεται ανάμεσα από τις δύο των συστατικών του, δηλαδή

$$f_{bc} > f_{wc} > f_{mc}$$

Ο υπολογισμός όμως της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας είναι δύσκολος και οι εκφράσεις που υπάρχουν είναι εμπειρικές και προσπαθούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια τα αποτελέσματα των πειραμάτων από τα οποία προήλθαν.

Σύμφωνα με το EN 1052-1 η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας προσδιορίζεται με δοκιμή πρέσας, στην οποία το κατακόρυφο φορτίο αυξάνεται με ομοιόμορφο ρυθμό. Δοκίμια αποτελούν είτε τοιχίσκοι από τουλάχιστον 1,5 λιθόσωμα μήκος και 3 λιθοσώματα ύψος είτε τοίχοι μήκους 1,0-1,8 m και ύψους 2,4-2,7 m . Πρέπει να ελεγχθούν τρία ίδια δοκίμια και να υπολογιστούν τα αποτελέσματα.

Όταν δεν υπάρχουν εργαστηριακά δεδομένα, μπορεί να υπολογιστεί η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μιας τοιχοποιίας (άοπλης) έμμεσα μέσω της

ανοιγμένης θλιπτικής αντοχής του κονιάματος και των λιθοσωματων. Ο Ευροκώδικας 6 δίνει ότι :

$$f_k = K * f_b^{0.7} * f_m^{0.3}$$

και για τοιχοποιίες με κονίαμα λεπτής στρώσης

$$f_k = K * f_b^{0.85}$$

όπου :

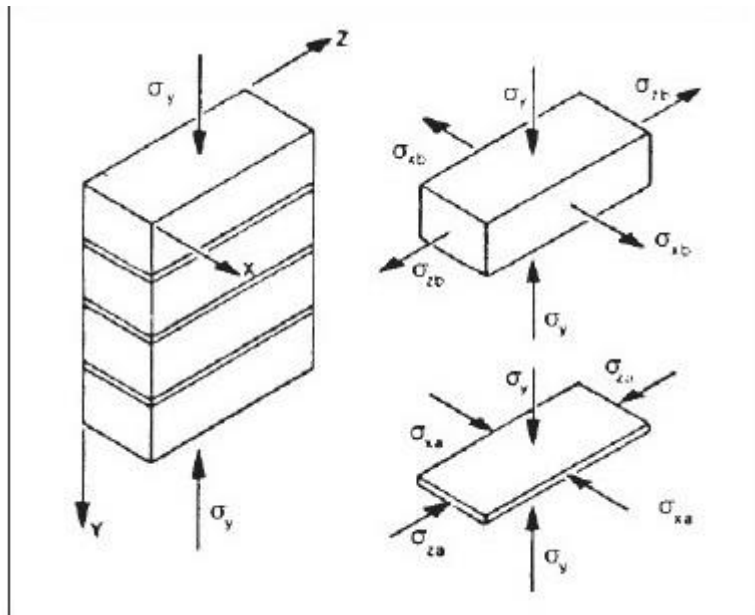
f_b : η θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων

f_m : η θλιπτική αντοχή του κονιάματος

K: σταθερά που εξαρτάται από το είδος του κονιάματος και των λιθοσωμάτων

Τα ψαθυρά υλικά που καταπονούνται από θλιπτικά φορτία η θραύση εξαρτάται πολύ από την εσωτερική δομή του υλικού. Έτσι, και στην τοιχοποιία, που είναι κατ' εξοχήν ψαθυρό υλικό, το " μονοπάτι " που θα ακολουθήσουν οι ρωγμές και θα σχηματίσουν τις επιφάνειες θραύσης εξαρτώνται από την εσωτερική της δομή. Έχει παρατηρηθεί ότι η αστοχία της τοιχοποιίας υπό θλίψη φέρει κατακόρυφες ρωγμές, εφόσον το φορτίο είναι κατακόρυφο, οι οποίες και διαπερνούν τα λιθοσώματα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το κονίαμα έχει μικρότερη θλιπτική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα έχει και μεγαλύτερο λόγο Poisson. Στην περίπτωση λοιπόν πρίσματος τοιχοποιίας που καταπονείται σε κατακόρυφη θλίψη και έχει οριζόντιους αρμούς, οι αρμοί του κονιάματος έχουν την τάση να διογκωθούν περισσότερο. Άρα στη διεπιφάνεια λιθοσώματος κονιάματος δημιουργούνται οριζόντιες διατμητικές τάσεις εφελκυστικές για το λιθόσωμα και θλιπτικές για το κονίαμα.



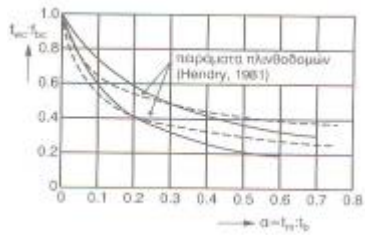
Εικόνα 16 Οριζόντιες τάσεις λόγω επιβολής κατακόρυφου φορτίου

Η σύνδεση όμως που έχουν επιβάλει κοινές παραμορφώσεις. Το λιθόσωμα υπόκειται άρα και σε εγκάρσιους εφελκυσμούς που μειώνουν την θλιπτική αντοχή του, ενώ το κονίαμα σε τριαξονική θλίψη που αυξάνει την θλιπτική αντοχή του. Άρα το λιθόσωμα θα αστοχήσει σε τάση μικρότερη της θλιπτικής αντοχής που θα είχε αν ήταν μόνο του, γι' αυτό λοιπόν η τοιχοποιία υπό θλίψη αστοχεί με κατακόρυφες ρωγμές που περνάνε μέσα από τα λιθοσώματα.

Πειραματικά αποτελέσματα και εμπειρικές σχέσεις δείχνουν ότι η αντοχή της τοιχοποιίας σε θλίψη τελικά εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες. Αυτοί είναι:

- Ο λόγος πάχους αρμού προς ύψος λιθοσώματος

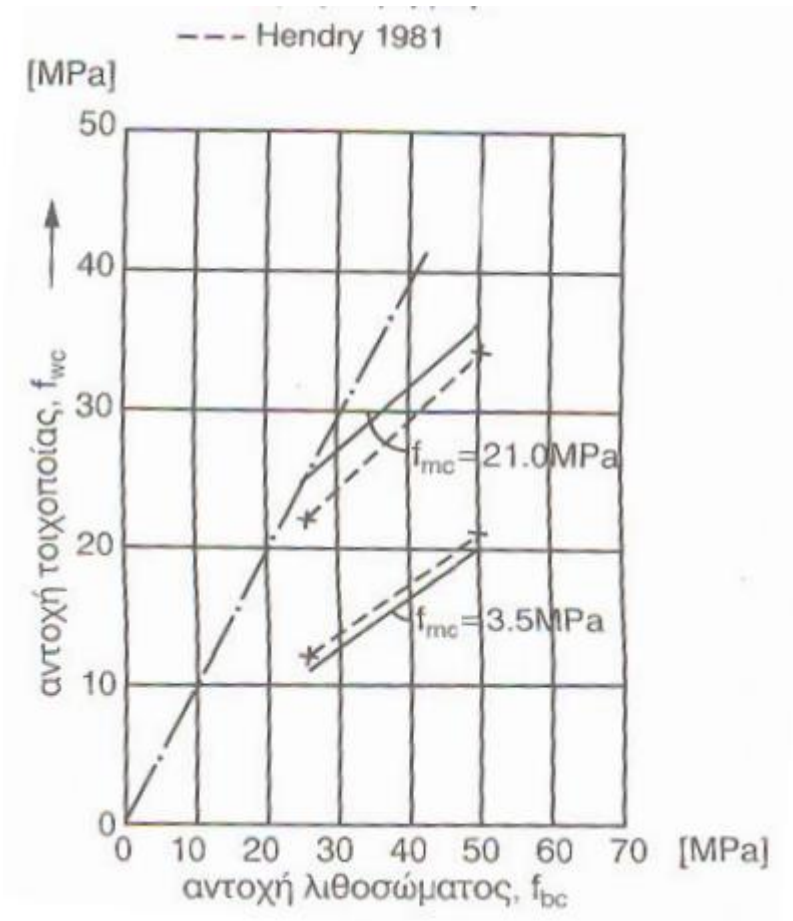
Πειράματα έχουν δείξει πως καθώς αυξάνει ο λόγος του πάχους του αρμού προς το ύψος του λιθοσώματος τόσο μειώνεται η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. (t_m το πάχος του αρμού και t_b το ύψος του λιθοσώματος)



Εικόνα 17 Επίδραση του λόγου t_m/t_b στην αντοχή της τοιχοποιίας

- Η θλιπτική αντοχή των υλικών της

Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας επιτυγχάνεται με την χρήση πολύ ισχυρού κονιάματος. Για να διπλασιαστεί η αντοχή της τοιχοποιίας πρέπει να πενταπλασιαστεί η αντοχή του κονιάματος. Βέβαια αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας επιτυγχάνεται και με αύξηση της αντοχής των λιθοσωμάτων.



Εικόνα 18 Επιρροή αντοχών κονιάματος και λιθοσώματος στην αντοχή της τοιχοποιίας

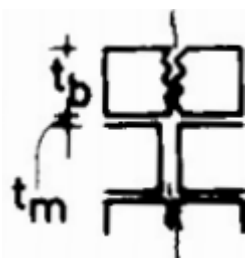
❖ Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας είναι πολύ μικρότερη από την θλιπτική. Ιδιαίτερη σημασία για την εφελκυστική αντοχή παίζει η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της εφελκυστικής δύναμης και των οριζόντιων αρμών.

Η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται γενικά από :

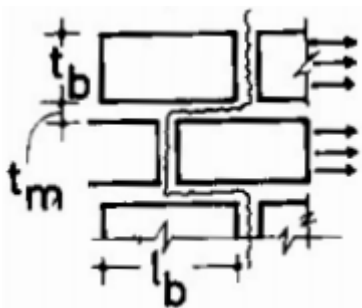
- την εφελκυστική αντοχή του κονιάματος
- την συνοχή μεταξύ λιθοσώματος και του κονιάματος
- την αντοχή των αρμών σε αποκόλληση

Θα μελετηθεί η περίπτωση που η εφελκυστική δύναμη είναι παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς της τοιχοποιίας. Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρούνται διάφοροι τύποι αστοχίας. Αν τα λιθοσώματα δεν έχουν επαρκή εφελκυστική αντοχή τότε η αστοχία θα επέλθει με εμφάνιση ρωγμών κάθετων στην διεύθυνση του εφελκυσμού και οι οποίες θα διαπεράσουν (σπάσουν) τα λιθοσώματα.



Εικόνα 19 Αστοχία λόγω χαμηλής αντοχής λιθοσώματος

Σε αντίθετη περίπτωση , όπου δηλαδή η εφελκυστική αντοχή του λιθοσώματος επαρκεί, η αστοχία συμβαίνει λόγω απώλειας συνοχής ανάμεσα από το κονίαμα και το λιθόσωμα. Σε αυτή την περίπτωση οι ρωγμές περνούν μέσα από τους αρμούς και δημιουργούν ένα χαρακτηριστικό " ζικ-ζακ".



Εικόνα 20 Αστοχία λόγω απώλειας συνοχής

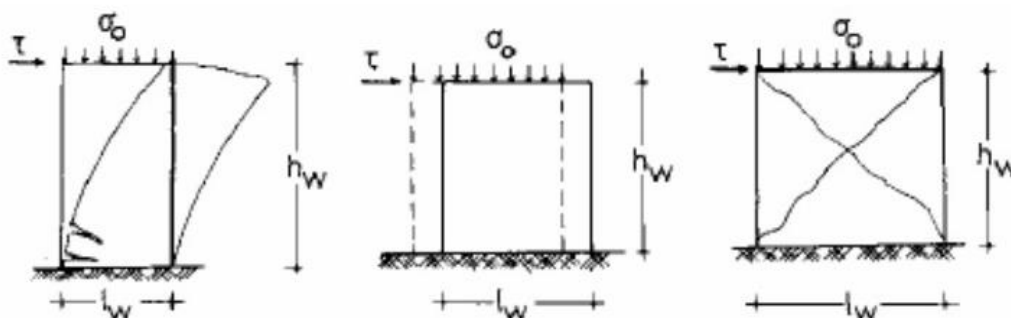
Πρέπει να σημειωθεί ότι η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που εξετάστηκε. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα επιτάσσουν

τον έμμεσο προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας μέσω διαγώνιας θλίψης.

❖ Αντοχή σε διάτμηση

Από τις σημαντικότερες εντάσεις που δρουν σε μια τοιχοποιία είναι η διάτμηση εντός του επιπέδου της σε συνδυασμό με κατακόρυφα φορτία που υπάρχουν έτσι και αλλιώς από το ίδιο βάρος. Ποτέ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει εντατική κατάσταση καθαρής διάτμησης καθώς το ίδιο βάρος είναι φορτίο από το οποίο δεν μπορεί να απαλλαγεί η τοιχοποιία. Έτσι στους αρμούς υπάρχει συνδυασμός διατμητικών και ορθών τάσεων.

Η απόκριση της τοιχοποιίας σε διάτμηση υπό την επίδραση και κατακόρυφων φορτίων εξαρτάται τόσο από τις διαστάσεις της όσο και από τον τρόπο έδρασης της. Ορίζεται ο λόγος διάτμησης α ως ο λόγος του ύψους του τοίχου h_w προς το πλάτος του τοίχου l_w , δηλαδή $\alpha = h_w / l_w$. Όταν ο λόγος αυτός είναι μικρότερος του 2 τότε έχουμε διατμητική αστοχία και σχηματισμό διαγώνιων ρωγμών, χθαμαλοί τοίχοι. Όταν ο λόγος είναι μεγαλύτερος του 2 οι τοίχοι είναι σχετικά εύκαμπτοι και η αστοχία είναι καμπτική. Τέλος μπορεί να υπάρχει και αστοχία που οφείλεται σε διατμητική ολίσθηση όταν ο συντελεστής τριβής στην έδραση του τοίχου είναι μικρός.



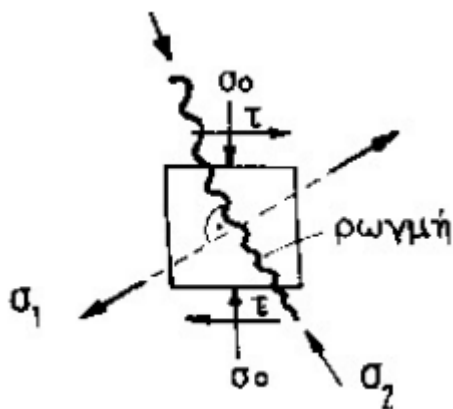
Εικόνα 21 Καμπτόμενος τοίχος- Διατμητική ολίσθηση-Διατμητικός τοίχος

Ο EN 1052-3 ορίζει τον τρόπο που μπορεί να υπολογιστεί η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας. Τα δοκίμια, που αποκαλούνται τριπλέτες και αποτελούνται από τρία λιθοσώματα και τους μεταξύ τους αρμούς, τοποθετούνται στην κατάλληλη διάταξη ώστε να διασφαλίζεται ότι στο κονίαμα αναπτύσσονται μόνο διατμητικές τάσεις. Πρέπει να ελεγχθούν τουλάχιστον πέντε δοκίμια.

Οι διάφορες μορφές αστοχίας αναλυτικά είναι:

- Θραύση λιθοσωμάτων περί το μέσο του τοίχου

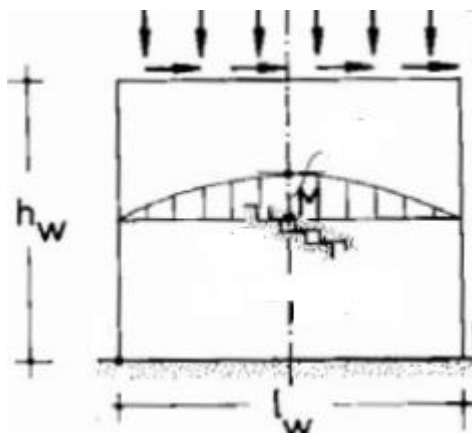
Η περίπτωση αυτή συμβαίνει όταν το λιθοσώμα αστοχεί θλιπτοδιατμητικά υπό διαξονική ετερόσημη ένταση από τον συνδυασμό διατμητικών και θλιπτικών τάσεων. Δημιουργείται ρωγμή κάθετα στον εφελκυσμό, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Εικόνα 22 Θλιπτοδιατμητική αστοχία λιθοσώματος

- Εμφάνιση διατμητικών ρωγμών περί το μέσο του τοίχου

Είναι η πιο συνηθισμένη περίπτωση και δείχνει ότι η τοιχοποιία καταπονείται έντονα από διάτμηση. Οι ρωγμές σχηματίζουν ένα "ζικ-ζακ" και περνάνε μέσα από τους αρμούς. Ο λόγος που επέρχεται αστοχία είναι η ολίσθηση του κονιάματος ως προς το λιθόσωμα, δηλαδή η μείωση της συνοχής μεταξύ του κονιάματος και του λιθοσώματος και έτσι επέρχεται αποκόλληση τόσο των οριζόντιων όσο και των κατακόρυφων αρμών. Αυτή η αστοχία συμβαίνει στο μέσο του τοίχου γιατί εκεί η ένταση είναι μέγιστη, αφού η θλίψη είναι σταθερή και η κατανομή των διατμητικών τάσεων είναι παραβολική και παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο μέσο.



Εικόνα 23 Κατανομή διατμητικών τάσεων και οι "ζικ-ζακ" ρωγμες

- Καμπτική αστοχία υπό μικρή κατακόρυφη θλιπτική τάση σ

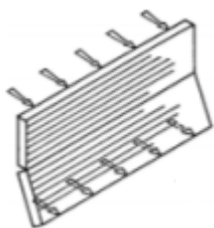
Στην περίπτωση που η κατακόρυφη τάση σ είναι μικρή προκαλείται καμπτική ρωγμή στη βάση του τοίχου στο "πίσω" μέρος, ενώ όλη τη θλιπτική δύναμη καλείται να την αναλάβει το "μπροστά" μέρος της βάσης. Λόγω του μικρού κατακόρυφου φορτίου η θλιβόμενη ζώνη είναι μικρή και έτσι υπάρχει περιθώριο για ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων που προκαλούν αυτές τις ρωγμές. Στη συνέχεια προκαλείται θλιπτική αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη.

- Καμπτική αστοχία υπό μεγάλη κατακόρυφη θλιπτική τάση σ

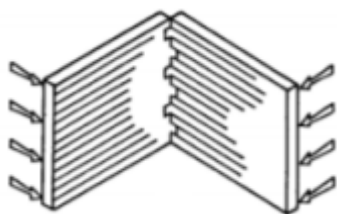
Σε αυτή την περίπτωση λόγω του μεγάλου θλιπτικού φορτίου η τοιχοποιία δεν προλαβαίνει να εξαντλήσει την εφελκυστική της αντοχή και αστοχεί από τη μεγάλη τιμή του θλιπτικού φορτίου. Με αυτό τον τρόπο η αστοχία θα επέλθει κατ' ευθείαν στη "μπροστά" μεριά της βάσης του τοίχου.

❖ **Αντοχή τοιχοποιίας σε κάμψη εκτός επιπέδου.**

Σε κάμψη εκτός επιπέδου η τοιχοποιία δεν έχει μεγάλη αντοχή. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις κάμψης της τοιχοποιίας, η μία εμφανίζει το επίπεδο θραύσης της κάθετα στους οριζόντιους αρμούς και η άλλη έχει το επίπεδο θραύσης της παράλληλο στους οριζόντιους αρμούς. Ουσιαστικά και αυτή η περίπτωση εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας σε κάμψη. Γνωρίζοντας ότι η εφελκυστική αντοχή είναι μικρή το συμπέρασμα της μικρής αντοχής σε κάμψη εκτός επιπέδου είναι λογικό. Μάλιστα, ο Ευροκώδικας 6 επιβάλλει να λαμβάνεται η αντοχή της τοιχοποιίας σε κάμψη εκτός επιπέδου ίση με μηδέν.



Εικόνα 24 Κάμψη εκτός επιπέδου με αστοχία παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς.



Εικόνα 25 Κάμψη εκτός επιπέδου με αστοχία κάθετα στους οριζόντιους αρμούς.

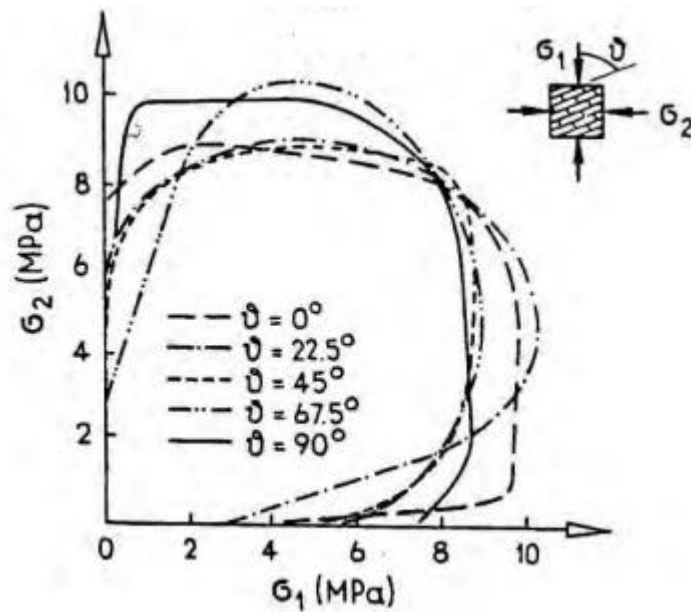
Στην πραγματικότητα οι αστοχίες των δύο παραπάνω εικόνων δεν υφίστανται λόγω της σύνδεσης του κάθε τοίχου με εγκάρσιους. Αυτή η σύνδεση, αν είναι επαρκής και καλή, αλλάζει την παραμορφωσιακή κατάσταση και την μορφή της αστοχίας.

❖ **Λυγισμός των παρειών της τοιχοποιίας**

Η κάμψη από θλίψη εκτός επιπέδου της τοιχοποιίας συνεπάγεται την αποκόλληση των παρειών της. Η τοιχοποιία διασπάται σε δύο ή περισσότερα κατακόρυφα ανεξάρτητα τμήματα. Ανάμεσα από τα τμήματα αυτά δημιουργούνται ανώμαλες επιφάνειες ασυνέχειας, η φορά των οποίων είναι παράλληλη στις

παραμορφωμένες παρειές. Τα τμήματα που δημιουργούνται μπορεί να έχουν την ίδια ή αντίθετη φορά.

Συμπερασματικά ένας φέρων τοίχος υπόκειται σε συνδυασμό δράσεων και είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα ανισότροπο υλικό γι' αυτό και η συμπεριφορά του δεν είναι πάντα προβλέψιμη. Πειράματα έχουν δώσει τις περιβάλλουσες αστοχίας τοίχων για διαξονική φόρτιση με μεταβλητή κλίση αρμών .



Εικόνα 26 Περιβάλλουσες αστοχίας για διαξονική φόρτιση με μεταβλητή κλίση αρμών

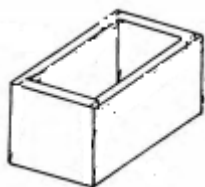
ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

Όταν η τοιχοποιία έχει ανοίγματα τότε δεν συμπεριφέρεται σαν ένα ενιαίο μονολιθικό σώμα κατά την καταπόνησή της από διάφορες δυνάμεις. Η μελέτη τέτοιας τοιχοποιίας ανάγεται στην μελέτη των τμημάτων που είναι μεταξύ των ανοιγμάτων και είναι ενιαία και μονολιθικά, οριζοντίως και κατακορύφως. Τα κατακόρυφα ενιαία τμήματα ονομάζονται πεσσοί και τα οριζόντια τμήματα στις στάθμες των πατωμάτων ονομάζονται ζώνες συνδετήριων δοκών ή απλά συνδετικές δοκοί.

Στην περίπτωση που μια τέτοιας μορφής τοιχοποιία υποστεί σεισμική δράση τότε έχουμε συγκέντρωση τάσεων στα ανοίγματα, πολλές φορές με τη δημιουργία ρωγμών που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής των στοιχείων σε εντός επιπέδου πλευρικές δράσεις. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές συστάσεις για τον σωστό σχεδιασμό και τη σωστή κατασκευή τοιχοποιιών με ανοίγματα που προσδιορίζουν τη σωστή κατά μήκος και κατά ύψος θέση των ανοιγμάτων ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος ρηγματώσεως και αστοχίας.

ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΗΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Στις πραγματικές κατασκευές η τοιχοποιία δεν είναι ανεξάρτητη και μόνη της αλλά αποτελεί μέρος της κατασκευής. Δηλαδή μια κατασκευή είναι "κιβωτοειδής", το οποίο δηλώνει την ύπαρξη τεσσάρων τοίχων για να σχηματιστεί ένα κιβώτιο. Η τοιχοποιία λοιπόν δεν εξετάζεται μεμονωμένη αλλά μαζί με την σύνδεση και την συνεργασία με τους εγκάρσιους τοίχους.



Εικόνα 27 Κιβωτοειδές

Μία από τις πιο καταστροφικές και σημαντικές δράσεις που δρουν πάνω σε μια κατασκευή είναι ο σεισμός. Ως τυχηματικό φυσικό φαινόμενο είναι πολύπλοκο, σύνθετο κι όχι τελείως γνωστό. Ο ερευνητής που θέλει να μελετήσει την απόκριση της κατασκευής του εξαιτίας της δράσης του σεισμού έχει πολλές δυσκολίες. Σαν

τυχηματική δράση , ανάλογα με την σεισμικότητα της περιοχής υπάρχει περισσότερη ή μικρότερη πιθανότητα μια κατασκευή να υποστεί δράσεις μικρές ή μεγάλες από έναν σεισμό.

Ο σεισμός πάνω στην κατασκευή συνήθως προσομοιώνεται με μια δύναμη, παρ' ότι είναι γνωστό ότι ο σεισμός στην πραγματικότητα είναι επιβολή μετατόπισης και ουδεμία σχέση έχει με επιβολή δύναμης. Αρκετές φορές η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού αγνοείται. Αυτό βέβαια είναι μεγάλο σφάλμα για έναν μελετητή που έχει μια κατασκευή από φέρουσα τοιχοποιία. Αυτό συμβαίνει γιατί, σε αντίθεση με τα κτίρια από σκυρόδεμα , ένα μεγάλο μέρος των μόνιμων κατακόρυφων φορτίων είναι το ίδιο βάρος της τοιχοποιίας (90% στην περίπτωση των λιθοδομών και το 60% στην περίπτωση των τοιχοποιιών από τεχνητά λιθοσώματα) το οποίο εξασφαλίζει μία συνεχόμενη θλίψη σε όλο το σώμα της τοιχοποιίας που διασφαλίζει την καλή συνοχή και την συνάφεια μεταξύ των λιθοσωμάτων και του κονιάματος και την αποκατάσταση της συνέχειας. Όταν λοιπόν η κατακόρυφη σεισμική δράση έχει φορά αντίθετη από αυτή της βαρύτητας αυτή αποδιοργανώνει το σώμα της τοιχοποιίας και μειώνει την αντοχή του στις εφελκυστικές τάσεις. Σε συνδυασμό με τη μικρή έτσι κι αλλιώς τιμή της εφελκυστικής αντοχής της η περαιτέρω μείωση μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε σεισμική φόρτιση.

Γενικά η σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία εξαρτάται από:

- τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των υλικών δόμησης που αποτέλεσαν την τοιχοποιία , αν και όπως έχει αναφερθεί είναι δύσκολη η εκτίμηση τους.
- το σύστημα δόμησης. Η συμπεριφορά της κατασκευής σε σεισμική δράση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συμμετρία ή όχι της κάτοψης, τον βαθμό σύνδεσης των εγκάρσιων τοίχων, τον τρόπο σύνδεσης των πατωμάτων και της στέγης με τους τοίχους.
- τον προσανατολισμό της κατασκευής ως προς την κύρια διεύθυνση του σεισμού

Η μελέτη μιας κατασκευής από φέρουσα τοιχοποιία σε σεισμική καταπόνηση έχει ποικίλα προβλήματα. Τα μηχανικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της φέρουσας τοιχοποιίας επηρεάζουν το μέγεθος αλλά και την κατανομή της σεισμικής δράσης τόσο καθ' ύψος όσο και μεταξύ των κατακόρυφων στοιχείων. Το ότι η μάζα της κατασκευής είναι κατανεμημένη καθ' ύψος, μάλιστα αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω, και όχι συγκεντρωμένη στους ορόφους , όπως στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, επηρεάζει την κατανομή των σεισμικών φορτίων και την απόκριση.

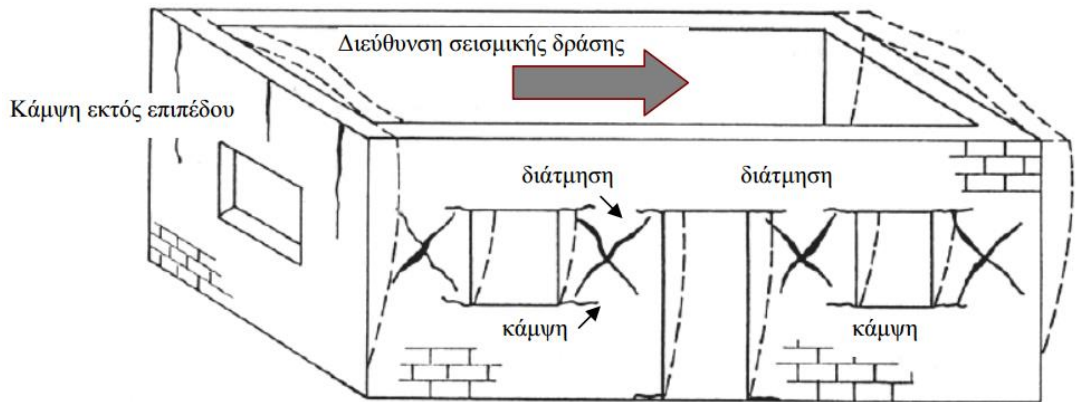
Οι φέροντες τοίχοι ανάλογα με τον προσανατολισμό τους ως προς την διεύθυνση του σεισμού μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους τοίχους που είναι παράλληλοι στη διεύθυνση του σεισμού και η δεύτερη κατηγορία τους τοίχους που είναι κάθετοι στην κύρια διεύθυνση του. Οι τοίχοι της πρώτης κατηγορίας είναι πολύ πιο άκαμπτοι και αντιστέκονται στο σεισμό, ενώ οι τοίχοι της δεύτερης κατηγορίας έχουν εύκαμπτη συμπεριφορά και είναι πιο ευάλωτοι στις δράσεις του σεισμού.

Οι τοίχοι της πρώτης κατηγορίας υποβάλλονται σε ανακυκλική και μεταβαλλόμενη καμτοδιατμητική καταπόνηση (η κάμψη είναι εντός επιπέδου τοιχοποιίας) , εξαιτίας της τέμνουσας δύναμης που δέχονται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αλλά πρέπει να τονιστεί, η κατασκευή σε μια σεισμική διέγερση υπόκειται σε επιβαλλόμενες μετατοπίσεις και όχι σε κάποια επιβολή δύναμης απλά η θεώρηση της δύναμης βοηθάει τον μελετητή στην ανάλυση.

Οι τοίχοι της δεύτερης κατηγορίας καταπονούνται από ανακυκλική και μεταβαλλόμενη κάμψη εκτός επιπέδου καθώς η σεισμική δράση είναι κάθετη σε αυτούς. Σε όλες τις τοιχοποιίες αλλά ιδιαίτερα σε όσες απουσιάζει το συνδετικό κονίαμα η κάμψη εκτός επιπέδου είναι κρίσιμη και μπορεί να φέρει ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως η εμφάνιση ρηγματώσεων στα σημεία σύνδεσης με τους εγκάρσιους τοίχους, η αποκόλληση ή ακόμα και η κατάρρευση τμημάτων ή ολόκληρου του τοίχου λόγω ανατροπής. Πιθανό είναι και να χαλάσει η ενότητα της τοιχοποιίας κατά το πάχος της, δηλαδή να αποκολληθούν οι δύο παρειές της. Αυτό συμβαίνει στις τριστρωτες τοιχοποιίες, δηλαδή αυτές που μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής παρειάς υπάρχει υλικό πλήρωσης όπως κεραμίδια, μικρά τούβλα, λάσπη που διακόπτει τη συνέχεια της, ή στις τοιχοποιίες που κατασκευάστηκαν από διαφορετικού τύπου και ποιότητας υλικά.

Εν κατακλείδι, σε μία κατασκευή οι πιθανοί τύποι βλαβών από σεισμική διέγερση είναι:

- Ρωγμές στις γωνίες και τις συμβολές των τοίχων
- Ρωγμές σε πρέκια και ποδιές ανοιγμάτων
- Ρωγμές μεταξύ τοίχων και δαπέδων/ στέγης
- Χιαστί ρωγμές σε τοίχους
- Εκτός επιπέδου καταρρεύσεις τοίχων
- Αποδιοργάνωση και κατάρρευση τοίχων ή και ολόκληρης της κατασκευής.



Εικόνα 28 Συνήθεις βλάβες σε περίπτωση σεισμού

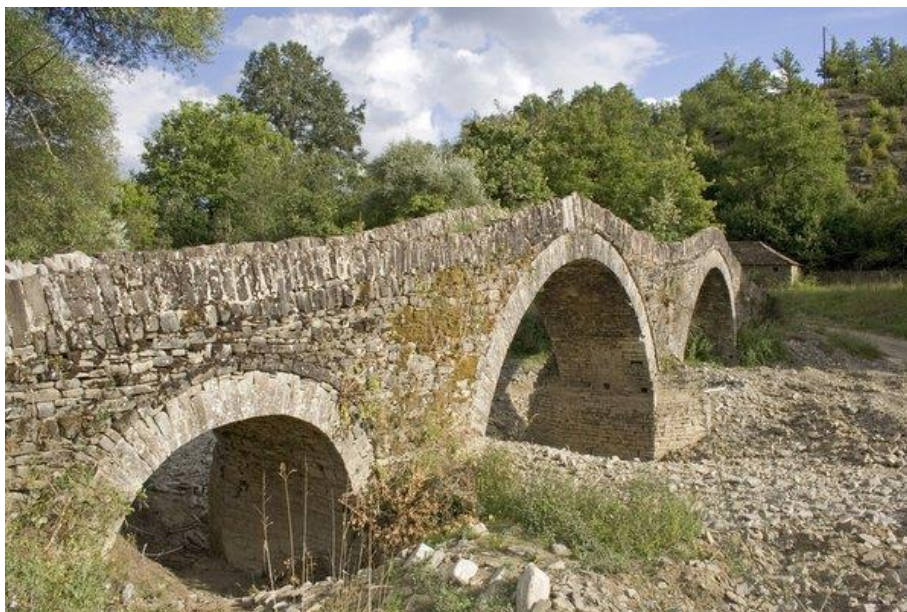
Από τις βλάβες που προκαλεί ο σεισμός σε μια κατασκευή είναι επακόλουθο ότι οι εγκάρσιοι τοίχοι στην βασική διεύθυνση του σεισμού καταπονούνται εντονότερα και είναι πιο ευπαθείς. Οι τοίχοι οι παράλληλοι είναι ισχυρότεροι. Ο σεισμός προφανώς σαν τυχηματική δράση μπορεί να έχει οποιαδήποτε διεύθυνση. Πρέπει λοιπόν να υπάρχει μια πολλή καλή σύνδεση μεταξύ των τοίχων για να προσφέρει στιβαρότητα ο εκάστοτε "άκαμπτος" τοίχος στον άλλο και έτσι να βελτιωθεί η απόκριση της κατασκευής και να αποφευχθούν ιδιαίτερες ζημιές. Η ύπαρξη διαφραγμάτων βοηθάει αυτή την καλή σύνδεση των τοίχων και επιτυγχάνει πιο ομοιόμορφη κατανομή της σεισμικής δράσης. Στην περίπτωση ναών δεν υπάρχει ύπαρξη διαφράγματος καθώς οι θόλοι, τα τόξα και οι τρούλοι που συνήθως σκεπάζουν ένα ναό δεν μπορούν να εξασφαλίσουν κάτι τέτοιο.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ: ΤΟΞΑ -ΘΟΛΟΙ- ΤΡΟΥΛΟΙ

Παρ' ότι ο ναός του Αγίου Φιλούμενου στεγάζεται από ξύλινη στέγη και έναν τρούλο κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά και στα τόξα και στους θόλους καθώς η ανάλυση του τρούλου ανάγεται σε ανάλυση τόξου, αλλά και οι θόλοι είναι ένα στοιχείο πολύ σύνηθες στους ναούς. Για το λόγο αυτό αναφέρονται παρακάτω οι βασικοί τρόποι λειτουργίας αυτών των φορέων, η γνώση και η κατανόηση των οποίων παίζει σημαντικό ρόλο για την κατανόηση των βλαβών και της απόκρισης του ναού.

ΤΟΞΑ

Τα τόξα είναι επίπεδοι φορείς που κατασκευάζονται από λιθοσώματα ή πλίνθους κατάλληλα παρατεταγμένους. Ανάλογα με τη γωνία τοποθέτησης των πλίνθων και το πάχος των αρμών υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατασκευής. Οι βασικές μορφές διαμόρφωσης είναι τρεις. Η πρώτη έχει ορθογωνικά λιθοσώματα και οι μεταξύ τους αρμοί είναι σφηνοειδείς. Η δεύτερη έχει σφηνοειδή λιθοσώματα ενώ οι αρμοί μεταξύ τους είναι ορθογωνικοί. Τέλος, η τρίτη έχει σφηνοειδή λιθοσώματα και σφηνοειδείς αρμούς μεταξύ τους. Η χρήση των τόξων για τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων χρησιμοποιείται από τους προϊστορικούς χρόνους.



Εικόνα 29 Το Καλογερίκο γεφύρι ή Πλακίδα στον ποταμό Αώο



Εικόνα 30 Ανακουφιστικό τόξο στον Άγ.Νικόλαο Οχιάς

Από στατική σκοπιά τα τόξα είναι επίπεδοι φορείς οι οποίοι μεταφέρουν τα κατακόρυφα φορτία μέσω δράσεων θόλου. Ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει η κορυφή (κλειδί), τα τόξα κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες , όπως παραβολικά, ημικυκλικά κ.ά. Εκτός από την πολυμορφία των τόξων, ιδιαίτερη πολυμορφία παρουσιάζουν και τα κλειδιά.

Η μορφή που έχει το τόξο έχει να κάνει σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα φορτία που καλείται να παραλάβει. Εάν ένα τόξο καταπονείται από το ίδιο βάρος του και πρόσθετα φορτία , πιο μεγάλα από το βάρος του, η καταλληλότερη μορφή είναι η παραβολική . Εάν το τόξο δέχεται ωθήσεις σε όλο το μήκος του (και πλευρικές) τότε κατάλληλο σχήμα είναι το ημικυκλικό. Στην περίπτωση που το τόξο δέχεται ένα μεγάλο πρόσθετο συγκεντρωμένο φορτίο στην κλείδα κατάλληλο σχήμα είναι του οξυκόρυφου τόξου. Αυτά προκύπτουν εύκολα αν γίνει ο παραλληλισμός του τόξου με ένα καλώδιο που κρέμεται στις δύο άκρες του. Το τόξο είναι ο καθρεπτισμός του καλωδίου, δηλαδή στραμμένο κατά 180° .

Επομένως, η θέση του εκάστοτε τόξου και τα φορτία που εκεί αναλαμβάνει επηρεάζουν κατά κόρον τη μορφή και το σχήμα του. Αυτό , φυσικά, έχει και τις εξαιρέσεις του, για παράδειγμα στις ιστορικές κατασκευές είτε λόγω άγνοιας των τεχνιτών είτε γιατί έγιναν αλλαγές που επηρέασαν το στατικό σύστημα η μορφή του τόξου δεν αντιπροσωπεύει τα φορτία που αναλαμβάνει. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι σε κάθε μελέτη ο μελετητής πρέπει να γνωρίζει και να είναι σίγουρος για το πώς μεταφέρονται τα φορτία και να μην μένει απλά στις ενδείξεις.

Οι δράσεις που δέχεται ένα τόξο μεταφέρονται στις στηρίξεις του ως μια δύναμη η οποία μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μια κατακόρυφη και μια οριζόντια. Η πορεία των θλιπτικών δυνάμεων, η γραμμή ωθήσεων δηλαδή, σχηματίζεται σε κάθε τόξο ανάλογα με την ακριβή θέση του τόξου και τα πραγματικά φορτία που δέχεται. Η μορφή της γραμμής ωθήσεων είναι δύσκολο να

εκτιμηθεί καθώς το τόξο δεν είναι μια μονολιθική κατασκευή και οι στηρίξεις του δεν είναι ακλόνητες.

Η μετακίνηση του κλειδιού ή η μετακίνηση των στηρίξεων είναι οι βασικοί τρόποι αστοχίας ενός τόξου. Σημαντικό ρόλο στην αντοχή του τόξου παίζει και η γωνία του τόξου, γιατί όσο πιο πεπλατυσμένο είναι το τόξο τόσο μεγαλύτερες οριζόντιες ωθήσεις ασκούνται στις στηρίξεις του. Άρα όσο μεγαλύτερα φορτία δέχεται ένα τόξο τόσο μεγαλύτερο βέλος θα πρέπει να έχει ώστε να μειώνονται οι οριζόντιες ωθήσεις. Στα πεπλατυσμένα τόξα ο συνηθέστερος τρόπος αστοχίας είναι λόγω μετακίνηση της κλείδας, ενώ στα τόξα με μεγάλο βέλος εκτός από το κλειδί κινδυνεύουν να αστοχήσουν και τα ακραία τέταρτα του εξωρραχίου, που αντιστοιχούν σε γωνία 60° με το βέλος του τόξου.

Ένα τόξο, θεωρητικά, δεν κινδυνεύει να αστοχήσει όσο η γραμμή ωθήσεων του δεν ξεπερνά το κεντρικό $1/3$ του ύψους της διατομής, καθώς σε αυτή την περίπτωση δεν δημιουργείται πουθενά αδρανής περιοχή λόγω εφελκυστικής ρηγμάτωσης. Ταυτόχρονα ένα τόξο είναι λόγω της υπερστατικότητας του δεν κινδυνεύει με τον σχηματισμό τριών (προφανώς μη συνευθιακών) αρθρώσεων καθώς μετατρέπεται σε ένα τριαρθρωτό ισοστατικό τόξο που λειτουργεί κανονικά. Οπότε για την αστοχία εκτός από σχηματισμό άρθρωσης στις στηρίξεις και στο κλειδί χρειάζεται και σχηματισμός κι άλλης άρθρωσης.

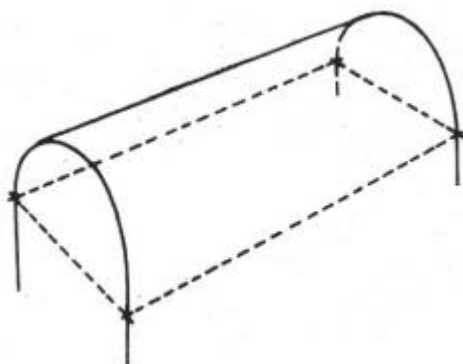
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η αστοχία ενός τόξου μπορεί να οφείλεται σε διαφορεική μετακίνηση της στήριξης του, η οποία προκαλεί μείωση της ευστάθειας και διατάραξη της θέσης της γραμμής ωθήσεων.

Η αποκατάσταση των τόξων, όπως και κάθε κατασκευής, πρέπει να λαμβάνει υπόψιν της τα αίτια των βλαβών. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η προσθήκη ενός ελκυστήρα στη γραμμή γένεσης του τόξου, και όχι στην κατασκευαστική γραμμή που συνήθως είναι χαμηλότερα, ώστε να αναλαμβάνει τις οριζόντιες συνιστώσες που φτάνουν στις στηρίξεις και να μην καταπονούνται αυτές. Τέλος, αναγκαία είναι και η επιδιόρθωση τυχών ρωγμών που υπάρχουν και η στερέωση των δομικών μελών καθώς μια σεισμική διέγερση είναι καταστροφικότερη σε μια ευάλωτη κατασκευή.

ΘΟΛΟΙ

Οι θόλοι είναι ουσιαστικά επάλληλα τόξα με βασική λειτουργία την στέγαση χώρων. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι να είναι κατασκευασμένοι από οπτόπλινθους, αλλά μερικές φορές κατασκευάζονται και από λιθωσώματα αρκετά στενά και κατάλληλα λαξευμένα. Με το σκεπτικό ότι οι θόλοι είναι επαλληλία τόξων γίνεται αντιληπτό ότι η κύρια καταπόνηση τους είναι από θλιπτικά φορτία, γι' αυτό και είναι σκόπιμο τα υλικά κατασκευής τους να έχουν επαρκή θλιπτική αντοχή.

Η πιο συνηθισμένη μορφή θόλων είναι η κυλινδρική, η οποία συναντάται σε πλήθος κατασκευών όπως ναοί, γέφυρες ακόμα και κατοικίες (όπου η ξύλινη στέγη δεν ήταν εφικτή λόγω έλλειψης της πρώτης ύλης).

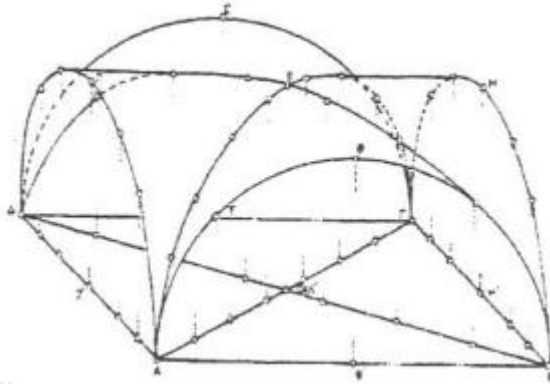


Εικόνα 31 Μορφή κυλινδρικού θόλου

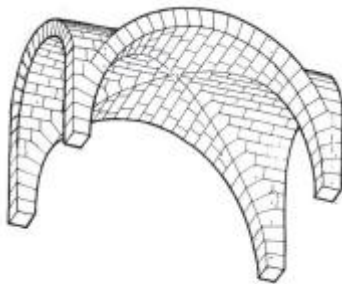
Αφού οι θόλοι αποτελούνται από τόξα σε σειρά, γίνεται αντιληπτό ότι οι θόλοι μεταφέρουν τα φορτία τους στους δύο περιμετρικούς τοίχους στους οποίους στηρίζονται. Η μορφή αστοχίας είναι αντίστοιχη των τόξων, δηλαδή πάλι είτε δημιουργούνται ρηγματώσεις στο κλειδί είτε λόγω μεγάλων πιέσεων στους τοίχους αστοχούν αυτοί. Αναμενόμενο είναι και στους θόλους η προσθήκη ελκυστήρων ανακουφίζει τα τους τοίχους στήριξης, ενώ η δυσκαμψία σε αυτούς μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη αντηρίδων στην εξωτερική τους παρειά.

Η τομή δύο ίδιων κυλινδρικών θόλων κάθετα ο ένας στον άλλο δημιουργεί το ρωμαϊκό σταυροθόλιο. Το πλεονέκτημα αυτής της κατασκευής είναι ότι για την στέγαση του χώρου δεν απαιτούνται περιμετρικοί τοίχοι αλλά μόνο τέσσερα υποστυλώματα στα σημεία στήριξης του. Μειονέκτημα αυτού του τρόπου είναι ότι προσφέρεται για στέγαση μόνο τετραγωνικών χώρων. Τα μετωπικά τόξα είναι ημικυκλικά. Παραλλαγή αυτού του τρόπου είναι το γοτθικό σταυροθόλιο όπου τα μετωπικά τόξα είναι οξυκόρυφα.

Εξέλιξη του ρωμαϊκού σταυροθολίου είναι το βυζαντινό σταυροθόλιο το οποίο προκύπτει από την κάθετη τομή δύο κυλινδρικών θόλων διαφορετικής διαμέτρου, ή μάλλον στις περισσότερες περιπτώσεις "βαρελοειδών" θόλων. Η κορυφή στο μέσο του σταυροθολίου είναι υψηλότερα απ' ότι η κορυφή των μετωπικών τόξων σε αυτές τις περιπτώσεις, κάτι το οποίο δεν θα συνέβαινε αν οι θόλοι ήταν κυλινδρικοί. Αυτή η εξέλιξη είχε σαν αποτέλεσμα να μπορούν να στεγαστούν πλέον και ορθογωνικοί χώροι.



Εικόνα 32 Ρωμαϊκό σταυροθόλιο



Εικόνα 33 Βυζαντινό σταυροθόλιο

Όπως έχει αναφερθεί ήδη η στήριξη των σταυροθολίων γίνεται μέσω τεσσάρων υποστυλωμάτων στις άκρες τους, οπότε όλα τα φορτία περνάνε απ' αυτά μέσω νευρώσεων του σταυροθολίου. Πολλές φορές αυτά τα φορτία είναι μεγάλα γι' αυτό γίνεται ενίσχυση των υποστυλωμάτων από ισχυρούς πεσσούς ή αντηρίδες.

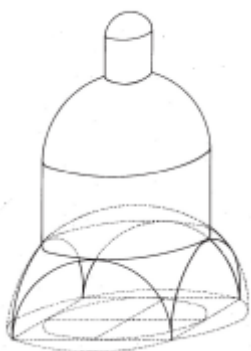
Η πιο συνηθισμένη μορφή αστοχίας όπως και στα τόξα είναι η ρηγμάτωση στην κορυφή και η μετακίνηση των στηρίξεων. Ελκυστήρες και αντηρίδες ανακουφίζουν και σε αυτή την περίπτωση την εντατική κατάσταση των στηρίξεων. Εδώ, όμως, είναι πιθανή και ρηγμάτωση στην περιοχή των νευρώσεων του θόλου όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων.

ΤΡΟΥΛΟΙ

Οι τρούλοι είναι κατασκευές οι οποίες προκύπτουν από την περιστροφή ενός τόξου γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του. Η μορφή αυτή έδωσε την δυνατότητα να στεγαστούν χώροι μεγαλύτερων διαστάσεων και έτσι να κατασκευαστούν πιο επιβλητικές κατασκευές. Συνήθως, κατασκευαστικά, οι τρούλοι αποτελούνταν από οριζόντιες στρώσεις πλίνθων με σφηνοειδείς αρμούς και είχαν ημισφαιρική μορφή. Βέβαια σε όλες αυτές τις κατασκευές που έχουν σωθεί υπάρχουν διάφορες παραλλαγές και διαφορετικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Ο μεγαλύτερος τρούλος από τοίχοποιία που έχει κατασκευαστεί είναι αυτός στο Πάνθεον της Ρώμης με άνοιγμα 43,6 m, από το 123 μ.Χ. Αντίστοιχα ο τρούλος που στεγάζει το μεγαλύτερο χώρο είναι αυτός της Αγίας Σοφίας στην

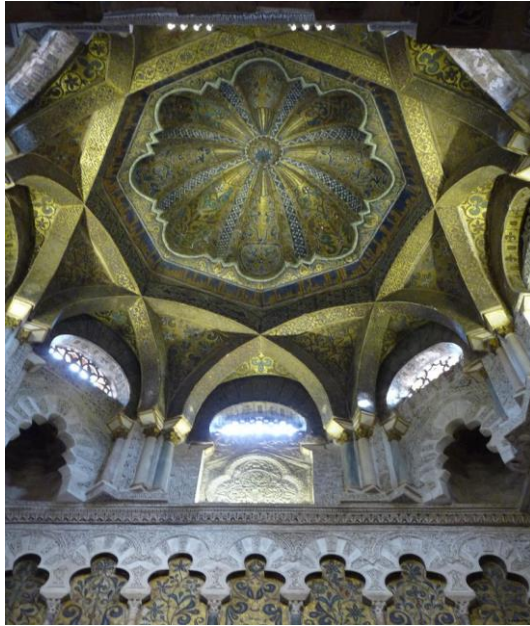
Κωσταντινούπολη με άνοιγμα 33 m (σε συνδυασμό με τους πλαϊνούς ημισφαιρικούς τρούλους) . Η επιτυχία του αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι δεν στηρίζεται σε τοιχοποιία αλλά μεταφέρει τα φορτία στο έδαφος μέσω πλευρικών τόξων και ημιχωνίων, τα οποία ελευθερώνουν τον υποκείμενο χώρο.

Οι τρούλοι παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία στους τρόπου στήριξης. Ο απλούστερος και πιο διαδεδομένος τρόπος είναι η στήριξη του σε ημικυκλική βάση, που όμως περιορίζει τον υποκείμενο χώρο στην διάμετρο του τρούλου. Κατά τους βυζαντινούς χρόνους αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε με τη χρήση συστημάτων τόξων και θόλων που έδωσαν τη δυνατότητα μεταφοράς των φορτίων σε περιμετρικούς τοίχους έξω από το περιγεγραμμένο τετράγωνο του τρούλου. Οι τέσσερις πλευρές του περιγεγραμμένου τετραγώνου καταλήγουν σε τέσσερα ημικυκλικά τόξα πάνω στα οποία στηρίζεται τελικά ο τρούλος , μέσω μιας οριζόντιας κυκλικής στεφάνης που εφάπτεται σε αυτά. Τα τμήματα μεταξύ των τόξων και της στεφάνης ονομάζονται σφαιρικά τρίγωνα. Τέτοιας μορφής είναι και ο τρούλος του ναού του Αγίου Φιλούμενου.



Εικόνα 34 Τρούλος στηριζόμενος σε ημικυκλικά τόξα

Ένας άλλος τρόπος αποφυγής της στήριξης του τρούλου σε ημικυκλική βάση , ο οποίος μάλιστα δίνει τη δυνατότητα για στέγαση ακόμα μεγαλύτερων χώρων, είναι ο οκταγωνικός τρούλος. Σε αυτόν τον τύπο το τετράγωνο του τρούλου , μέσω ημιχωνίων, μετατρέπεται σε οκτάγωνο και τα τελικά στηρίγματα του τρούλου είναι οκτώ αντί για τέσσερα.



Εικόνα 35 Οκταγωνική βάση τρούλου στην Μεσκίτα της Κόρδοβας

Ο τρούλος από στατική πλευρά ανήκει στην κατηγορία των κελυφών. Οι δυνάμεις που αναλαμβάνουν μεταφέρονται ακτινικά στη βάση τους, ενώ η πλήρης εντατική τους κατάσταση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή τους (ημικυλινδρικός ή πεπλατυσμένος) . Πιο συγκεκριμένα στους καθαρά κυλινδρικούς τρούλους όλο το σώμα τους βρίσκεται υπό διαξονικό εφελκυσμό και μόνο ένα μικρό τμήμα του κοντά στην περίμετρο καταπονείται από εφελκυσμό. Απ' την άλλη, οι πεπλατυσμένοι έχουν ισχυρότερες ωθήσεις προς τα έξω στη βάση τους, αλλά λόγω της γωνίας τους, δεν αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο κατώτερο τμήμα. Οι συνηθισμένες βλάβες στους τρούλους είναι ρηγματώσεις στους μεσημβρινούς ή στη βάση τους, όπως ήταν αναμενόμενο μιας εκεί αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις. Από τα πρώτα χρόνια κατασκευής τους έγιναν αντιληπτές αυτές οι πιθανές βλάβες, γι' αυτό και οι τεχνίτες από τα παλιά χρόνια τοποθετούσαν στη βάση τους δακτυλίους από κάποιο υλικό με μεγάλη εφελκυστική αντοχή όπως μέταλλο ή ξύλο. Πρόσθετο επισκευαστικό μέτρο αποτελεί η τοποθέτηση δακτυλίων από μέταλλο περιμετρικά, οι οποίοι περισφίγγουν την κατασκευή με αποτέλεσμα από τη μία να μην επιτρέπουν την προς τα έξω μετακίνηση του τρούλου και από την άλλη να απαγορεύουν την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων μιας και η περίσφιξη δημιουργούσε θλίψη ίση ή και μεγαλύτερη από τον εφελκυσμό που επρόκειτο να εμφανιστεί και έτσι όλο το σώμα του τρούλου είναι υπό καθεστός διαξονικής θλίψης. Τέλος, συνηθισμένη είναι και οι περίπτωση που τοποθετούνται ελκυστήρες στα τόξα που στηρίζουν τον τρούλο με επακόλουθο να μειώνονται οι οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται στους πεσσούς και να απαγορεύεται η μετακίνηση τους.

Συμπερασματικά , πρέπει να σημειωθεί ότι η λειτουργία και των τριών κατασκευών που αναφέρθηκαν δεν είναι τελείως γνωστή και κάθε περίπτωση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Οι συστάσεις και οι διάφοροι τρόποι αποκατάστασης δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται άκριτα , λόγω της διαφορετικότητας της κάθε κατασκευής , αλλά να λαμβάνονται υπόψη και να επιλέγεται κάθε φορά η βέλτιστη λύση.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ

Οι κυριότερες μέθοδοι ανάλυσης της τοιχοποιίας έναντι σεισμικών καταπονήσεων είναι:

- Μέθοδος πεσσών

Πρόκειται για μια απλή προσεγγιστική μέθοδο, η οποία εφαρμοζόταν ιδιαίτερα λόγω του ότι δεν χρειάζεται ηλεκτρονικό υπολογιστή για την χρήση της. Όταν οι κατασκευές διέθεταν διαφράγματα στο ύψος των ορόφων η επίλυση του κτιρίου γινόταν ανά όροφο με θεώρηση πεσσών πακτωμένων στις στάθμες των ορόφων. Σε αυτή τη μέθοδο ο σεισμός αντιπροσωπεύεται από επιβολή δύναμης. Η κατανομή της δύναμης στους πεσσούς γινόταν με βάση τη στιβαρότητα τους, λαμβάνοντας υπόψη και την εκκεντρότητα κέντρου μάζας και κέντρου ελαστικής στροφής. Εάν η κατασκευή δεν διέθετε διαφράγματα στις στάθμες των ορόφων γινόταν η θεώρηση πεσσών προβόλων με μήκος το συνολικό ύψος του κτιρίου (δυσμενέστερη περίπτωση). Λόγω της απλότητας της η μέθοδος παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα αφού δε δίνει πληροφορίες για τα οριζόντια φέροντα στοιχεία και ταυτόχρονα αδυνατεί να δώσει λύση εάν τα ανοίγματα δεν είναι διατεταγμένα στις ίδιες θέσεις σε όλους του ορόφους, δηλαδή σε κοινούς κατακόρυφους άξονες. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι ανάλυσης εξελίχθηκαν και έγιναν ακριβέστερες.

- Μέθοδος ισοδύναμου πλαισίου

Η μέθοδος αυτή προσομοιώνει την κατασκευή από τοιχοποιία με πλαισιωτές, αποτελούμενες από γραμμικά στοιχεία, εφαρμόζοντας και αυτή επιβολή δύναμης για να λάβει υπόψη της τη σεισμική διέγερση. Η ανάλυση αυτή γίνεται συνήθως σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και δίνει ακριβές λύσεις γιατί όντως οι μάζες είναι συγκεντρωμένες στις στάθμες των ορόφων. Στην περίπτωση όμως κατασκευών από τοιχοποιία το ίδιο βάρος της τοιχοποιίας αποτελεί σημαντικό ή και πρωτεύων ρόλο, μιας και αποτελεί το 60%- 90% του κατακόρυφου φορτίου. Στην πραγματικότητα τα κατακόρυφα φορτία αυξάνουν από πάνω προς τα κάτω με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η κατανομή της δύναμης καθ' ύψος. Έτσι πλέον η ακριβέστερη και ορθότερη μέθοδος είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση, φυσικά, του κατάλληλου λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή.

- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Σε αυτή τη μέθοδο ο φορέας διακριτοποιείται σε ένα συγκεκριμένο αριθμό στοιχείων, τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους και είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω των κόμβων τους στα σύνορα τους. Το σύνολο όλων των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα.

Με τα λογισμικά που χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία έχουμε τη δυνατότητα να επιβάλουμε σε μια κατασκευή την πραγματικότητα, δηλαδή να επιβάλουμε τις μετακινήσεις-επιταχύνσεις που επιβάλει ο σεισμός. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται υπό μορφή τάσεων και παραμορφώσεων στο σύνορο (ή και στο εσωτερικό) των στοιχείων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος για τον υπολογισμό των μετακινήσεων και των τάσεων στην κατασκευή.

Στις περισσότερες εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων σε τοιχοποιία ακολουθείται ελαστική ανάλυση, μέσω της οποίας γίνεται ο υπολογισμός των τάσεων σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο και με την σύγκριση αυτών των τιμών με τις αντοχές της τοιχοποιίας διαπιστώνεται αν η κατασκευή θα υποστεί βλάβες (υπέρβαση της αντοχής) ή όχι.

Η ακρίβεια της μέθοδο εξαρτάται από τον τύπο των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται και την πυκνότητα του δικτύου. Είναι αποδεδειγμένο ότι όσο πιο πυκνή είναι η διακριτοποίηση και όσο υψηλότερου βαθμού είναι η πολυωνυμική συνάρτηση που εκφράζει το πεδίο των μετατοπίσεων τόσο πιο πολύ το μοντέλο συγκλίνει στην ακριβή λύση. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εστιάζει στην βέλτιστη διακριτοποίηση του φορέα, δηλαδή στην επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό του δικτύου και στην ελαχιστοποίηση των βαθμών ελευθερίας . Ιδιαίτερη σημασία παίζει και η πύκνωση του δικτύου σε ορισμένα σημεία όπου εκ των προτέρων είναι γνωστό ότι θα υπάρχει συγκέντρωση τάσεων. Εάν δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές τέτοιες περιοχές συχνά επιβάλλονται μερικές επανάληψης ώστε στο τέλος να έχει διακριτοποιηθεί ορθά η κατασκευή στο σύνολο του όγκου της.

Σε κάθε περίπτωση προσομοίωσης ,βέβαια, η συμπεριφορά της κατασκευής εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής, τις διαστάσεις της , τις συνδέσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων , τα χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης κ.ά. Το υπολογιστικό προσομοίωμα αποτελεί εργαλείο για τον μελετητή με το οποίο προσπαθεί να ερμηνεύσει τον τρόπο με τον οποίο η κατασκευή μετατρέπει τις δράσεις σε τάσεις και εξασφαλίζει ευστάθεια.

Φυσικά όσο πιο ακριβής είναι η προσομοίωση μιας κατασκευής σε ένα μοντέλο τόσο περισσότερο η μελέτη με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει την πραγματικότητα.

Περιγραφή του προσομοιώματος

1. Αρχική γεωμετρία του προσομοιώματος

Η ανάλυση της κατασκευής έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος ABAQUS 6.11. Η τελική γεωμετρία του φορέα που εισήχθη στο πρόγραμμα προέκυψε ύστερα από λεπτομερή μελέτη των αρχιτεκτονικών σχεδίων. Στην αρχή σχεδιάστηκε το περίγραμμα της κάτοψης, όλες οι όψεις και ο τρούλος. Κατά την σχεδίαση των όψεων και του τρούλου έγιναν μερικές γεωμετρικές απλοποιήσεις που δεν επηρεάζουν την δυσκαμψία και την συμπεριφορά του φορέα με στόχο την μείωση της υπολογιστικής ισχύς που απαιτείται.

Στη συνέχεια οι όψεις της κατασκευής και ο τρούλος εισήχθησαν στο πρόγραμμα μέσω της σχεδιαστικής ενότητας CAE του ABAQUS. Στο μοντέλο αυτό απουσιάζει η ξύλινη στέγη η οποία και αυτή σχεδιάστηκε στο ABAQUS και ενώθηκε με την υπόλοιπη κατασκευή. Η σχεδιαστική ακρίβεια στη μεταφορά της κατασκευής στο ABAQUS είναι της τάξης των 5cm η οποία αναφέρεται στο εύρος των ανοιγμάτων και το πάχος των τοίχων και όχι στις συνολικές διαστάσεις στη κάτοψη της κατασκευής.

Τα στοιχεία του αριθμητικού μοντέλου που προσομοιάζουν την τοιχοποιία είναι τρισδιάστατα στερεά ενώ τα στοιχεία που προσομοιάζουν την ξύλινη στέγη είναι τρισδιάστατα στοιχεία δοκών.

2. Απόδοση μηχανικών ιδιοτήτων

Όλα τα υλικά έχουν θεωρηθεί ως ισότροπα. Οι μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας έχουν αποδοθεί με τη μέθοδο της ομογενοποίησης κατά την οποία η τοιχοποιία θεωρείται ένα ομογενές σύνθετο υλικό του οποίου οι ιδιότητες εξαρτώνται από τις ιδιότητες των υλικών που το αποτελούν. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στη μία έχει ληφθεί μέση αντοχή των λίθων $f_b = 10$ MPa (πορόλιθοι), μέση αντοχή κονιάματος $f_m = 0,5$ MPa και συντελεστής $K = 0.5$. Έτσι προκύπτει η μέση θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας βάση του EC6

$$f_{c,m} = K * f_b^{0.7} * f_m^{0.3} = 2,04 \text{ MPa}$$

Η εφελκυστική αντοχή της συντηρητικά θεωρείται ότι είναι το 10% της θλιπτικής, δηλαδή

$$f_{t,m} = 200 \text{ KPa}$$

Στην άλλη έχει ληφθεί μέση αντοχή των λίθων $f_b = 80$ MPa (ασβεστολιθικά λιθοσώματα), μέση αντοχή κονιάματος $f_m = 10$ MPa και συντελεστής $K = 0.5$. Έτσι προκύπτει η μέση θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας βάση του EC6

$$f_{c,m} = K * f_b^{0.7} * f_m^{0.3} = 21.43 \text{ MPa}$$

Η εφελκυστική αντοχή της συντηρητικά θεωρείται ότι είναι το 10% της θλιπτικής, δηλαδή

$$f_{t,m}=2.1 \text{ MPa}$$

Το μέτρο ελαστικότητας αυτής και στις δύο περιπτώσεις θεωρείται συντηρητικά ίσο με 2 GPa. ($E=2 \text{ GPa}$).

Όσον αφορά την ξύλινη στέγη επιλέχτηκε συγκολλητή ξυλεία GL28.

ΣΥΓΚ. ΞΥΛΕΙΑ			
strength class			L28
ρmean	g/m ³	k	4
			10
f _{v,k}	/mm ²	N	3
			3
f _{m,k}	/mm ²	N	2
			8.0
f _{t,90,k}	/mm ²	N	0
			.45
f _{c,0,k}	/mm ²	N	2
			7.0
f _{c,90,k}	/mm ²	N	6
			.0
f _{t,0,k}	/mm ²	N	2
			1.0
E _{0,mean}	/mm ²	N	1
			2000
G _{mean}	/mm ²	N	7
			50
E _{0,05}	/mm ²	N	9
			600

Επειδή η ξυλεία χρησιμοποιήθηκε σαν στέγη είναι προφανές ότι η πυκνότητα δεν παραμένει σταθερή για όλη την επιφάνεια της στέγης, δηλαδή ανάλογα με την επιφάνεια που καλύπτει η κάθε ομάδα ξύλων προσαρμόζεται και η πυκνότητα τους ώστε να λαμβάνεται σωστά υπόψη το ίδιο βάρος και τα κινητά φορτία που την επιβαρύνουν. Οι διαστάσεις της κάθε ομάδας ξύλων επιλέχτηκαν ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια κάμψης, διάτμησης και παραμόρφωσης στη στατική φόρτιση .

3. Έδαφος θεμελίωσης- Συνοριακές Συνθήκες

Η κατασκευή εδράζεται σε μία στρώση σκληρού αργιλικού εδάφους δεκάδων μέτρων με V_{s30} περί τα 300, δηλαδή σε ένα έδαφος κατηγορίας C . Τα επιταχυνσιογραφήματα τα οποία θα αναφερθούν αργότερα και χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της κατασκευής προέρχονται από καταγραφές επίσης σε εδάφη κατηγορίας C. Οπότε ο ρόλος του εδάφους στην σεισμική καταπόνηση παραμερίζεται ,αφού ουσιαστικά έχει συμπεριληφθεί στην ίδια τη φόρτιση, και η κατασκευή εδράζεται σε σταθερή βάση που ταλαντώνεται μόνο σύμφωνα με την χρονοϊστορία του κάθε επιταχυνσιογραφήματος. Δηλαδή ο ναός στο προσομοίωμα πακτώνεται στο έδαφος απαγορεύοντας όλες τις μετακινήσεις προς όλες τις διευθύνσεις μέσω αρθρωτών στηρίξεων.

4. Διακριτοποίηση προσομοιώματος

Η διακριτοποίηση έγινε με την τεχνική free mesh που παρέχει το ABAQUS. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τετραεδρικά για την τοιχοποιία ενώ γραμμικά για την ξύλινη στέγη. Η μέγιστη απόσταση των κόμβων ήταν 40 cm ώστε να υπάρχουν κατά το πάχος της τοιχοποιίας τουλάχιστον 2 στοιχεία και να γίνεται σωστά η κατανομή της έντασης.

Ανάλυση

Εισαγωγή

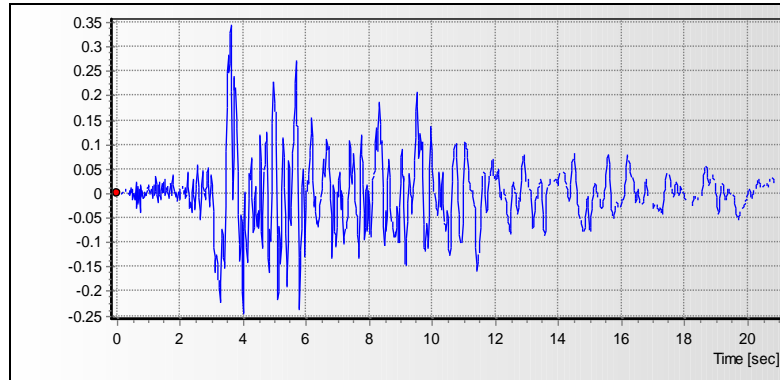
Αναπτύχθηκαν , λοιπόν, λεπτομερή προσομοιώματα για τον έλεγχο της κατασκευής τόσο υπό στατική όσο και υπό δυναμική. Στη στατική φόρτιση γίνεται έλεγχος οριακής κατάστασης αστοχίας (Ο.Κ.Α.) με συνδυασμό φορτίσεως : $1.35 \times$ Μόνιμα φορτία (G , τα οποία είναι *ι.β. τοιχοποιίας, ι.β. Επικάλυψης, ι.β. δοκού, ι.β. σανιδώματος*) $+ 1.50 \times$ Κινητά φορτία (Q) (χαρακτηριστική τιμή επικρατέστερης δράσης, στην περίπτωση της κατασκευής το χιόνι) $+ 1.50 \times \psi_o \times$ Λοιπές Μεταβλητές δράσεις (Q) ($\psi_o = 0,7$ για τα υπόλοιπα κινητά φορτία, στην περίπτωση της κατασκευής ο άνεμος)

Όσο αναφορά τη δυναμική φόρτιση ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε προκύπτει από τον εξής συνδυασμό φορτίσεων : $1.00 \times$ Μόνιμα φορτία ($G_{\text{μόνιμα}}$, τα οποία είναι *ι.β. τοιχοποιίας, ι.β. Επικάλυψης, ι.β. δοκού, ι.β. σανιδώματος*) $+ 0.60 \times$ Κινητά φορτία ($Q_{\text{κινητά}}$, η ανεμοπίεση) \pm Σεισμός $E(X+Y+Z)$

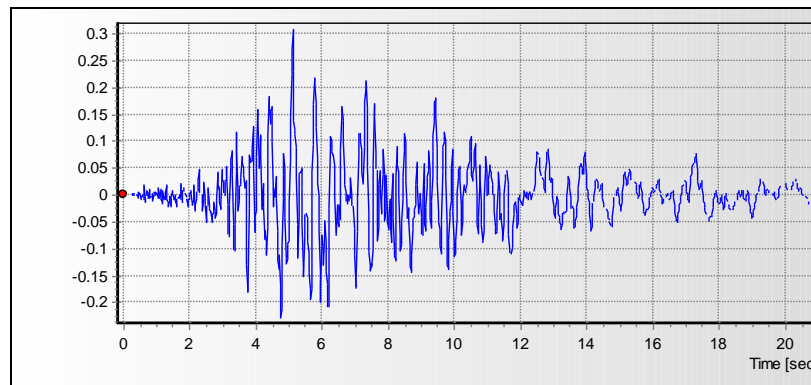
Αξίζει να σημειωθεί ακόμα μια φορά ότι το κάθε φορτίο μετατρέπεται από δύναμη σε μάζα και εισέρχεται στο πρόγραμμα σαν πυκνότητα υλικού.

Ο έλεγχος της κατασκευής σε δυναμική φόρτιση θα πραγματοποιηθεί με ανάλυση με χρονοϊστοορίες για την οποία η παράγραφος §3.2.3: «Εναλλακτικές προσομοιώσεις της σεισμικής δράσης του EC8 – Μέρος 1», αναφέρει ότι απαιτούνται κατ' ελάχιστο τρία επιταχυνσιογραφήματα που να δρουν ταυτόχρονα στην κατασκευή. Σύμφωνα με την παραπομπή της §3.2.3.1.3 «Καταγραφές επιταχυνσιογραφήματων» στην παράγραφο §3.2.3.1.2, για ένα χωρικό μοντέλο απαιτούνται τουλάχιστον τρεις συνιστώσες ανά διεύθυνση, δηλαδή, εν τέλει, για τον έλεγχο της κατασκευής χρειάζονται τρεις ομάδες των τριών συνιστωσών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πέντε ομάδες επιταχυνσιογραφήματων από τον σεισμό του Northridge (USA, 1994). Η περιοχή του ναού ανήκει στη ζώνη II του EC8 και το έδαφος στην κατηγορία C ($T_B=0,2s$ και $T_C=0,6s$) . Τα επιταχυνσιογραφήματα επιλέχτηκαν ώστε τα φάσματα απόκρισης να περικλείονται κατά το δυνατόν στο χώρο μεταξύ της μέσης τιμής του φάσματος του EC8 και της μέσης τιμής συν μια τυπική απόκλιση. Έτσι επιλέχτηκαν τα εξής επιταχυνσιογραφήματα :

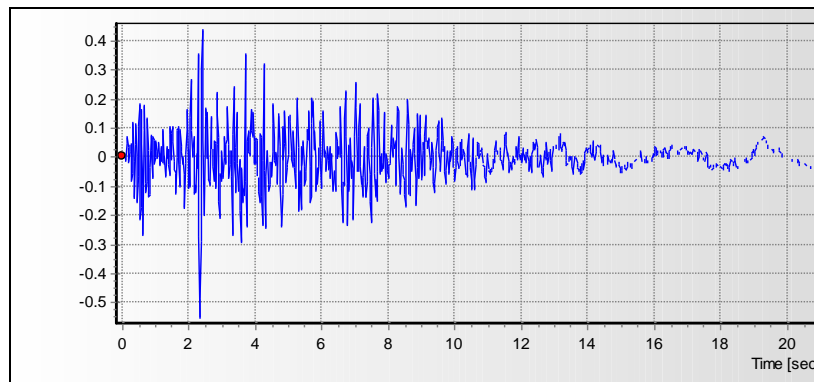
- Arleta:



1η συνισταμένη: Arleta 090 (τοποθέτηση στη Χ διεύθυνση του προσομιώματος)



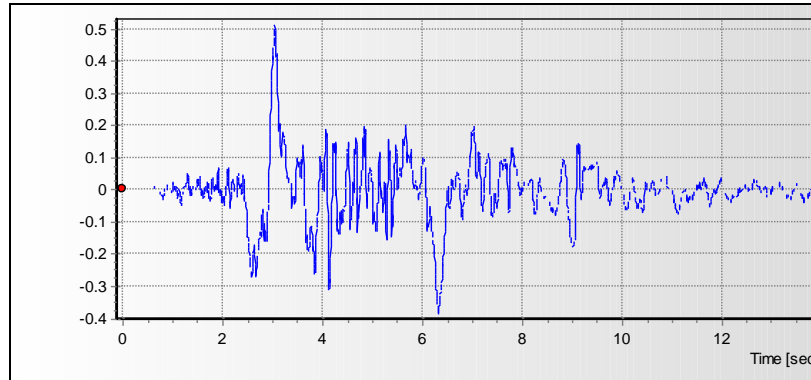
2η συνισταμένη: Arleta 360 (τοποθέτηση στη Ζ διεύθυνση του προσομιώματος)



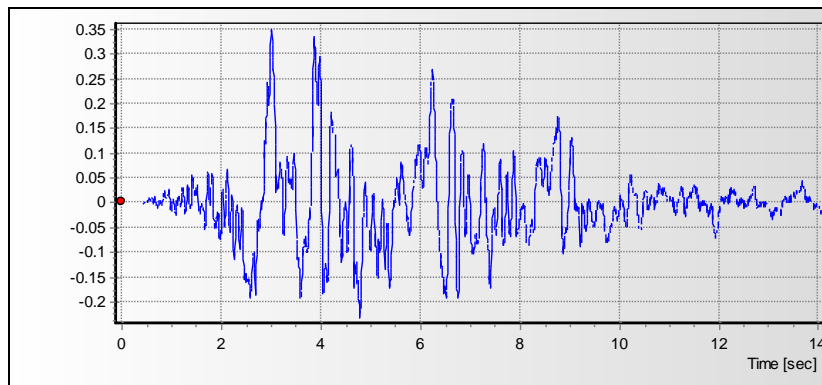
3η συνισταμένη: Arleta UP (τοποθέτηση στη Υ διεύθυνση του προσομιώματος)

Σχήμα 1 Χρονοϊστορίες στη Χ, Υ και Ζ διεύθυνση της καταγραφής Arleta

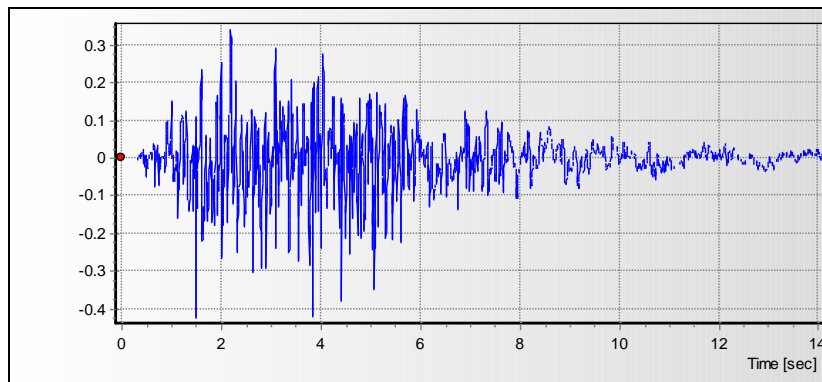
- LA DAM :



1η συνισταμένη: LA Dam 064 (τοποθέτηση στη X διεύθυνση του προσομιώματος)



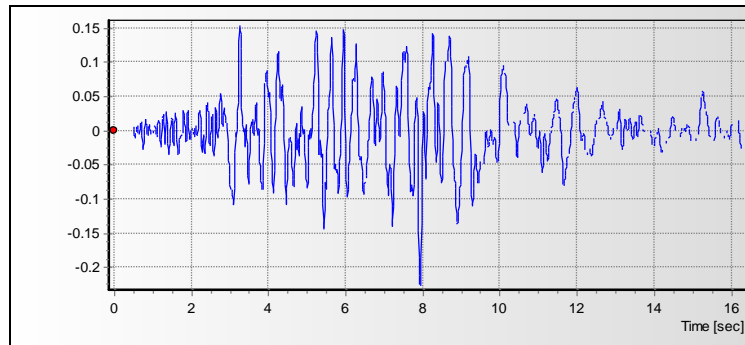
2η συνισταμένη: LA Dam 334 (τοποθέτηση στη Z διεύθυνση του προσομιώματος)



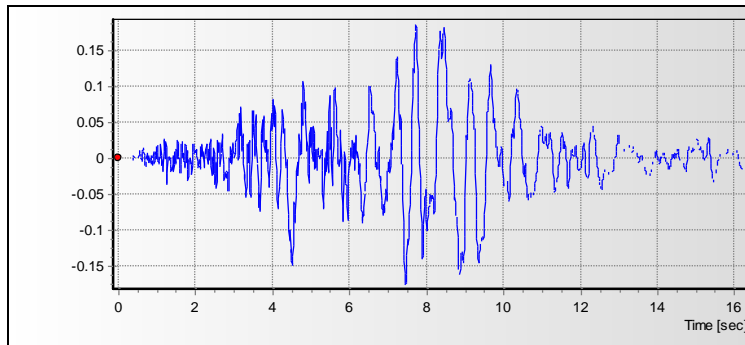
3η συνισταμένη: LA Dam UP (τοποθέτηση στη Y διεύθυνση του προσομιώματος)

Σχήμα 2 Χρονοϊστορίες στη X, Y και Z διεύθυνση της καταγραφής LA Dam

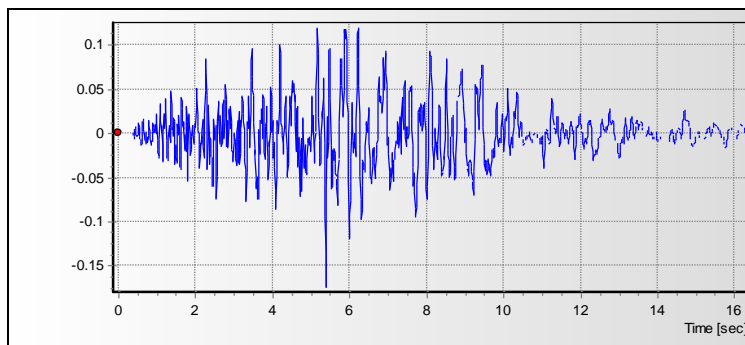
- LA Chalon Rd:



1η συνισταμένη: LA Chalon Rd 070 (τοποθέτηση στη X διεύθυνση του προσομιώματος)



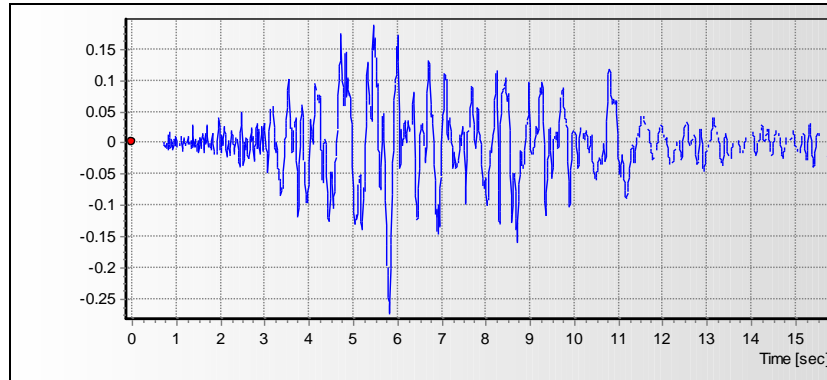
2η συνισταμένη: LA Chalon Rd 160 (τοποθέτηση στη Z διεύθυνση του προσομιώματος)



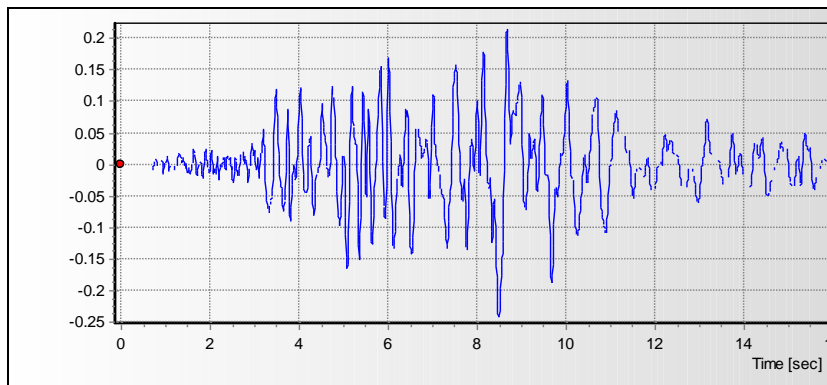
3η συνισταμένη: LA Chalon Rd UP(τοποθέτηση στη Y διεύθυνση του προσομιώματος)

Σχήμα 3 Χρονοϊστορίες στη X, Y και Z διεύθυνση της καταγραφής LA Chalon Rd

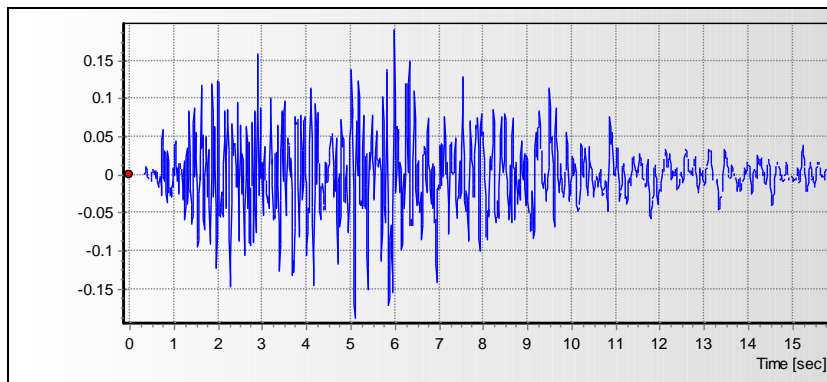
- LA Faring Rd:



1η συνισταμένη: LA Faring Rd 000 (τοποθέτηση στη X διεύθυνση του προσομιώματος)



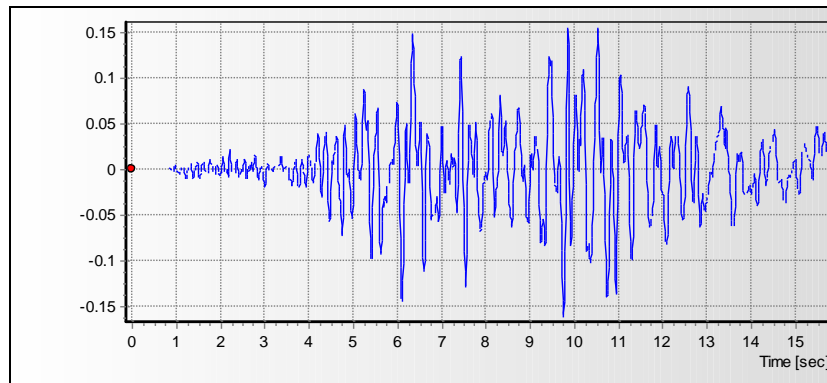
2η συνισταμένη: LA Faring Rd 090 (τοποθέτηση στη Z διεύθυνση του προσομιώματος)



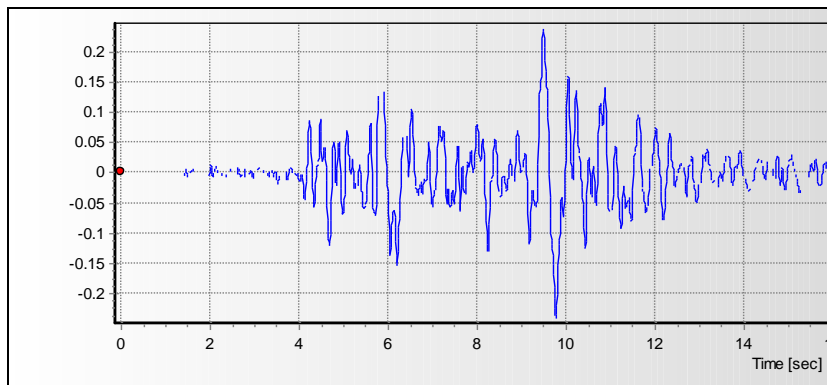
3η συνισταμένη: LA Faring Rd UP (τοποθέτηση στη Y διεύθυνση του προσομιώματος)

Σχήμα Χρονοϊστορίες στη X, Y και Z διεύθυνση της καταγραφής LA Faring Rd

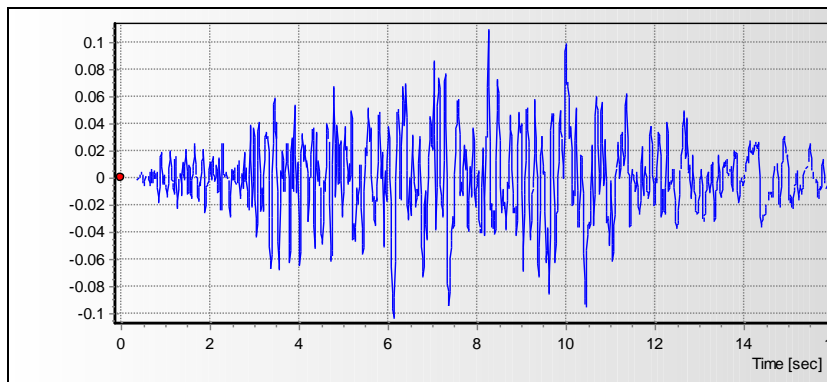
- LA Fletcher:



1η συνισταμένη: LA Fletcher 144 (τοποθέτηση στη Χ διεύθυνση του προσομιώματος)



2η συνισταμένη: LA Fletcher 234 (τοποθέτηση στη Ζ διεύθυνση του προσομιώματος)



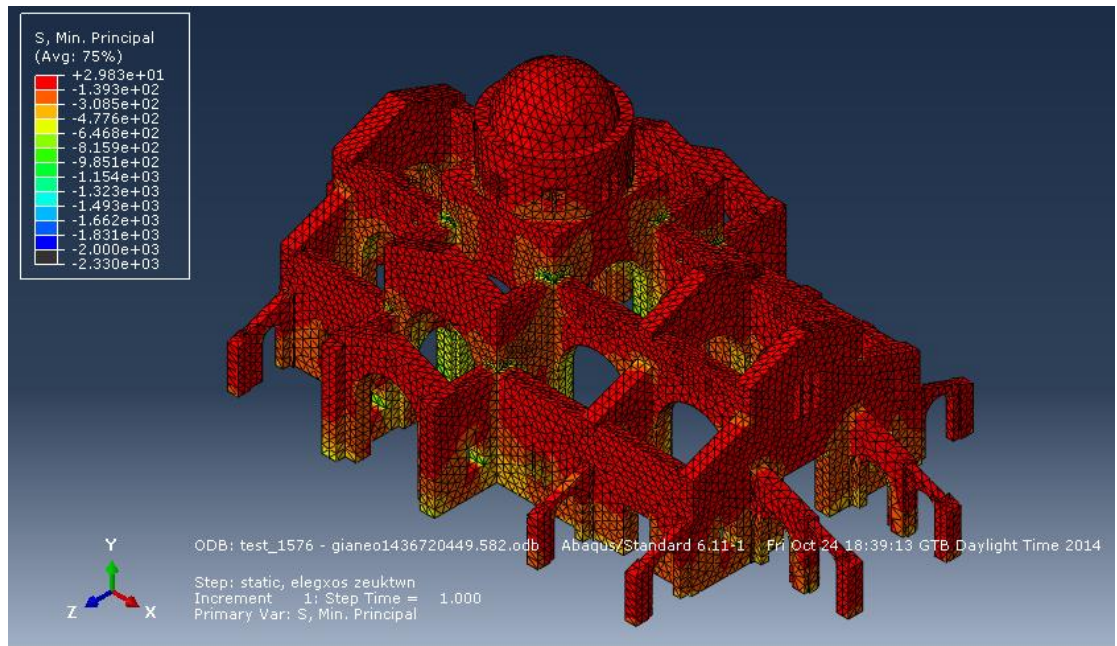
3η συνισταμένη: LA Fletcher UP (τοποθέτηση στη Υ διεύθυνση του προσομιώματος)

Σχήμα 5 Χρονοϊστορίες στη Χ, Υ και Ζ διεύθυνση της καταγραφής LA Fletcher

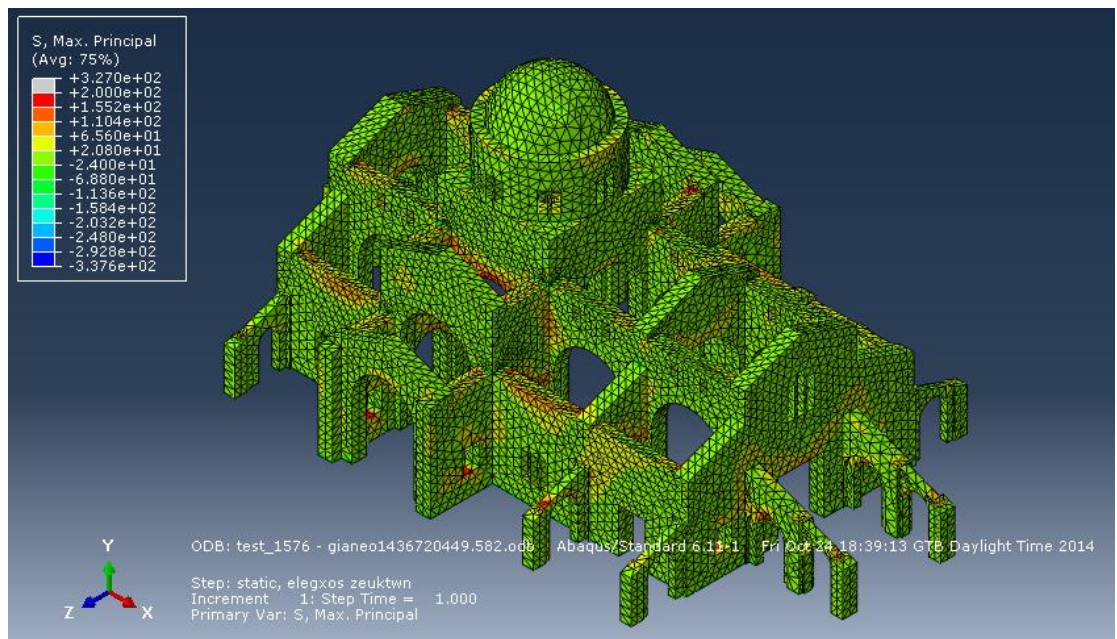
Στατικός Έλεγχος

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση στο ABAQUS με τη φόρτιση που αναφέρθηκε προηγουμένως και όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα της ανάλυσης η κατασκευή δεν έχει κάποιο πρόβλημα στη στατική φόρτιση.

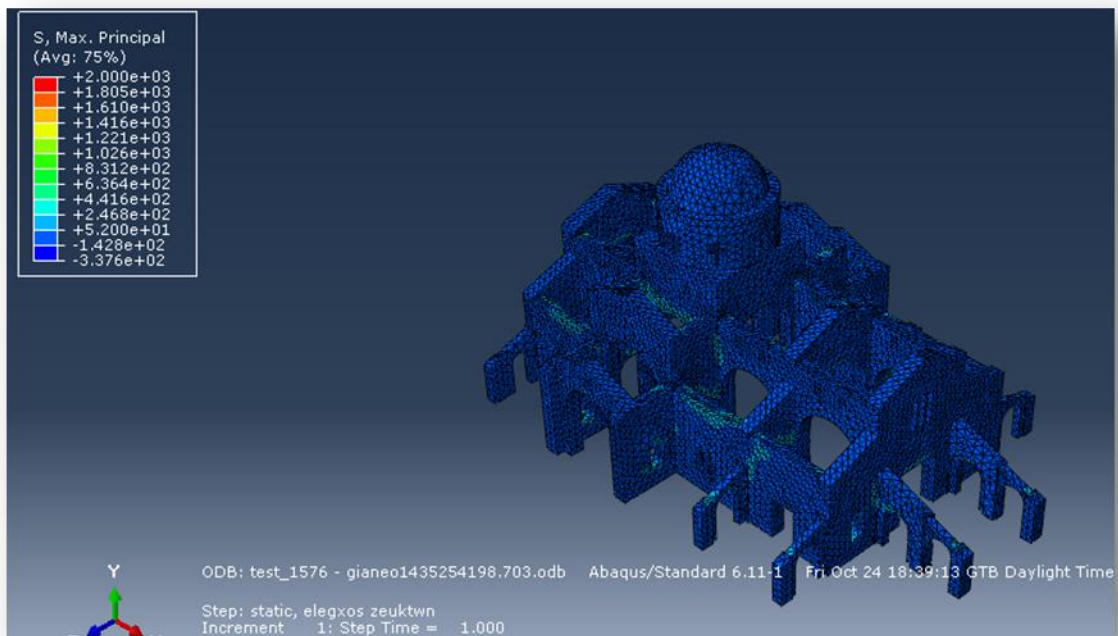
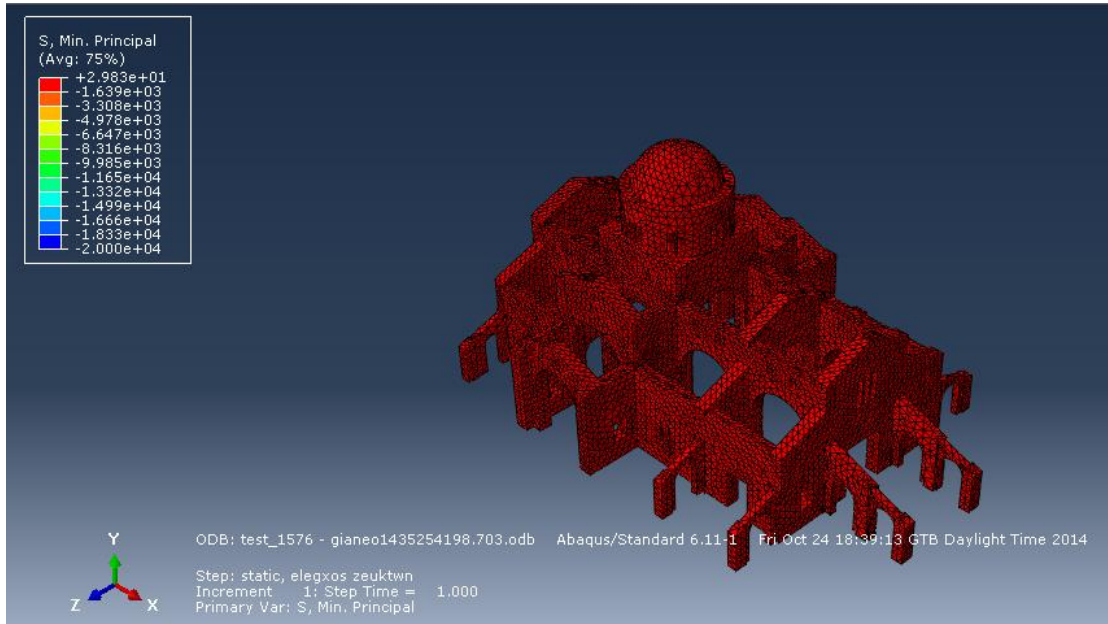


Εικόνα 36 Ελάχιστες κύριες τάσεις



Εικόνα 37 Μέγιστες κύριες τάσεις

Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000 ΚΡα



Εικόνα Έλεγχος ελάχιστων και μεγίστων κυρίων τάσεων αντίστοιχα.

Υπολογισμός ιδιομορφών

Ο υπολογισμός των ιδιομορφών έγινε με την μέθοδο Lanczos. Υπολογίστηκαν οι ιδιομορφές που απαιτούνται για να ταλαντώνεται το 90% της συνολικής δρώσας μάζας τόσο κατά την διεύθυνση X όσο και κατά την διεύθυνση Y. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην συνολική δρώσα μάζα δεν συνυπολογίστηκε η μάζα που υπάρχει από το έδαφος του κτιρίου μέχρι σε ύψος 0,5 m , καθώς θεωρείται ότι αυτό το τμήμα της κατασκευής δεν ταλαντώνεται καθώς είναι πολύ κοντά στην στήριξη. Η μάζα αυτή βρέθηκε ότι είναι 76,95 Mgr και η συνολική μάζα του κτιρίου είναι 1477,28 Mgr. Οι μάζες αυτές υπολογιστήκαν με απλές στατικές αναλύσεις με πυκνότητα που προκύπτει για φορτίο $1 \cdot G + 0 \cdot Q$ στο κάτω μισό μέτρο και σε όλη την κατασκευή αντίστοιχα. Άρα η μάζα που πρέπει να ταλαντώνεται από το σύνολο των ιδιομορφών πρέπει να είναι $90\% \cdot (1477.28 - 76.95) = 1260,3$ Mgr. Έτσι , λοιπόν, αποδείχτηκε ότι για την ανάλυση χρειάζονται 150 ιδιομορφές. Τα παρακάτω αποκόμματα από τα αρχεία dat του ABAQUS αποδεικνύουν την ορθότητα των προηγουμένων(για λόγους συντομίας φαίνονται οι 15 πρώτες ιδιομορφές και το σύνολο της δρώσας μάζας) :

TOTAL MASS OF MODEL

1477.284

TOTAL MASS OF MODEL

76.95141

Εικόνα 38 Συνολική μάζα κατασκευής

Εικόνα 39 Μάζα της κατασκευής
μέχρι ύψος 0,5m

E F F E C T I V E M A S S

MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT
1	4.59053E-03	1.28226E-05	0.99250
2	5.24302E-02	1.99662E-04	6.25899E-02
3	4.13857E-03	9.60769E-06	3.04614E-02
4	7.62133E-03	1.31274E-05	4.08166E-03
5	2.95074E-04	2.45040E-09	2.04426E-04
6	1.26933E-04	1.10467E-07	6.09331E-04
7	4.58786E-07	2.89208E-07	6.87186E-04
8	1.91207E-05	2.81747E-07	6.45760E-04
9	7.27646E-05	1.11782E-07	8.86350E-05
10	6.34421E-06	7.31404E-09	9.50355E-05
11	805.93	0.13423	1.06416E-03
12	0.83790	1.01090E-04	2.13966E-06
13	1.17934E-02	1.53319E-06	3.02357E-08
14	2.4986	3.19824E-04	6.58645E-06
15	6.43944E-04	4.03705E-04	797.85
TOTAL	1208.1	640.11	1196.2

Εικόνα 40 Οι 15 πρώτες ιδιομορφές και το σύνολο της δρώσας μάζας για τις 150 πρώτες

Η μικρή απόκλιση μέχρι τα 1260,3 Mgr θεωρήθηκε αμελητέα και δεν έγινε καμία διόρθωση ή προσαύξηση της επιτάχυνσης του σεισμού.

Δυναμική Ανάλυση με Χρονοϊστορίες

Η δυναμική ανάλυση έγινε με τη χρήση των χρονοϊστοριών των επιταχυνσιογραφήμάτων. Έτσι χρησιμοποιούνται οι συνιστώσες των επιταχύνσεων που αναφέρονται στα εισαγωγικά του κεφαλαίου. Όπως φαίνεται και παραπάνω χρησιμοποιούνται όλες οι συνιστώσες του σεισμού (η X διεύθυνση είναι η οριζόντια παράλληλη στη μεγάλη πλευρά της κατόψεως, η Y διεύθυνση είναι η κατακόρυφη και η Z είναι η οριζόντια παράλληλη στη μικρή πλευρά της κατόψεως). Σε όλα τα αποτελέσματα θα φαίνονται οι διευθύνσεις X,Y,Z για την αποφυγή παρερμηνεύσεων. Αξίζει να σημειωθεί πως σε όλες τις αναλύσεις η απόσβεση ζήλφθηκε σταθερή και ίση με $\zeta=5\%$ και πως όπως ειπώθηκε και παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν οι 150 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής.

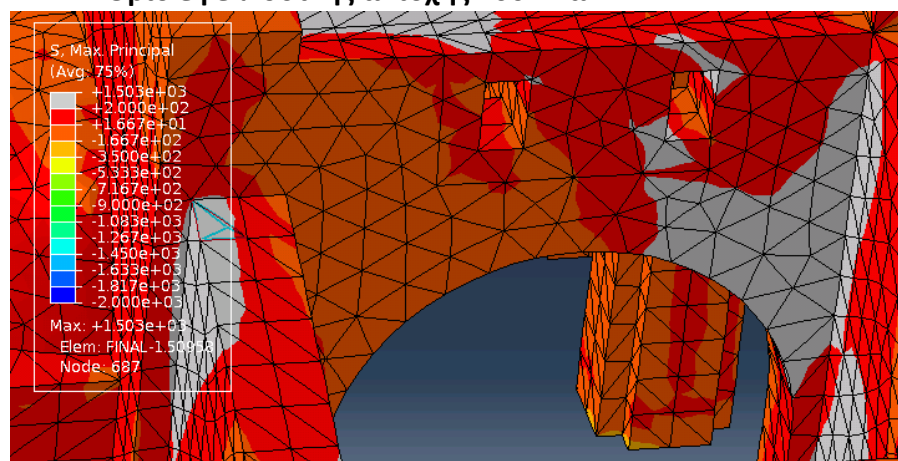
Αποτελέσματα αναλύσεων

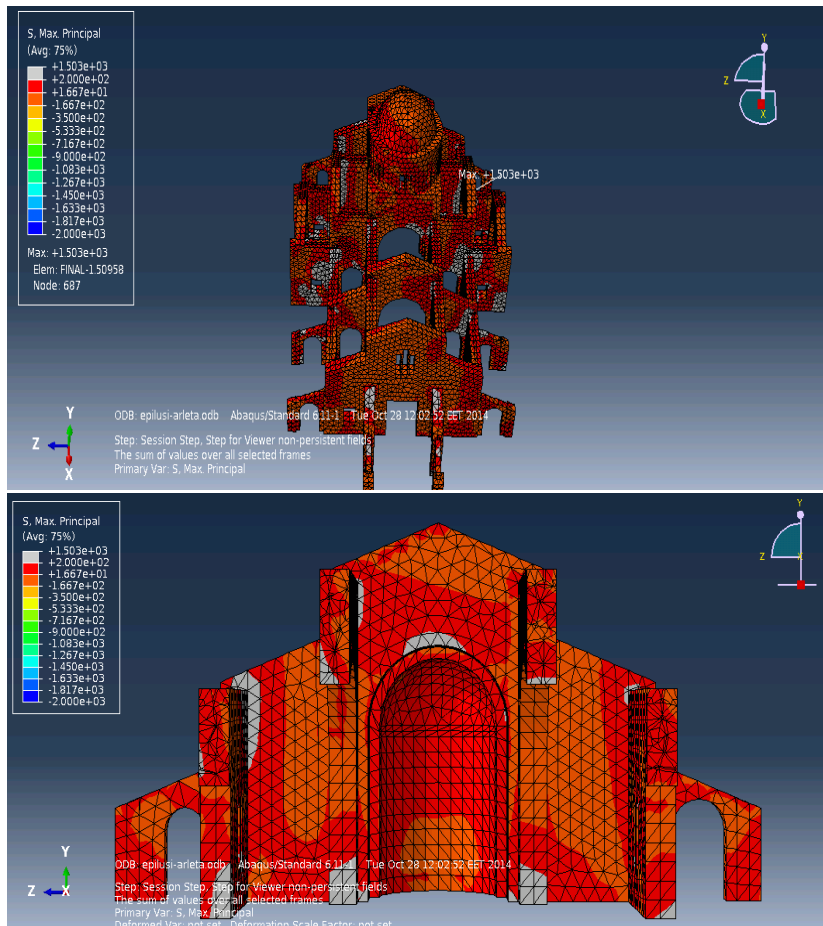
Για την διαπίστωση της κατάστασης της κατασκευής ύστερα από τη φόρτιση της με τα σεισμικά φορτία θα γίνει έλεγχος κύριων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στο κύριο σώμα της τοιχοποιίας. Θυμίζουμε εδώ ότι τα όρια για την θλιπτική τάση είναι τα 2000 KPa ή 20 MPa και την εφελκυστική τάση τα 200 KPa ή 2 MPa αντίστοιχα.

- **Arleta**

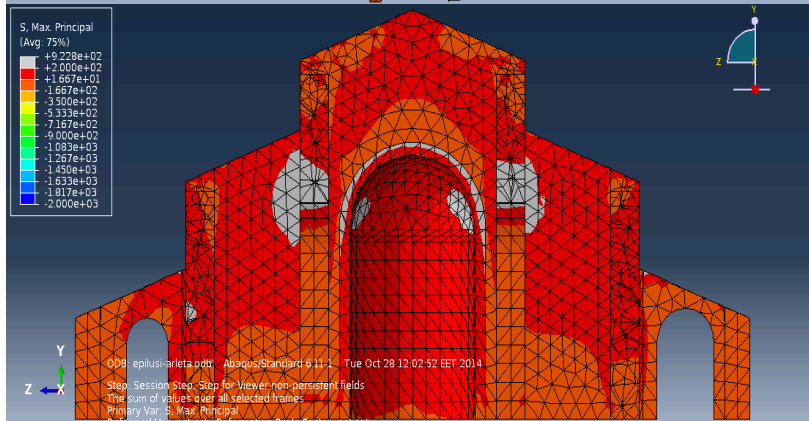
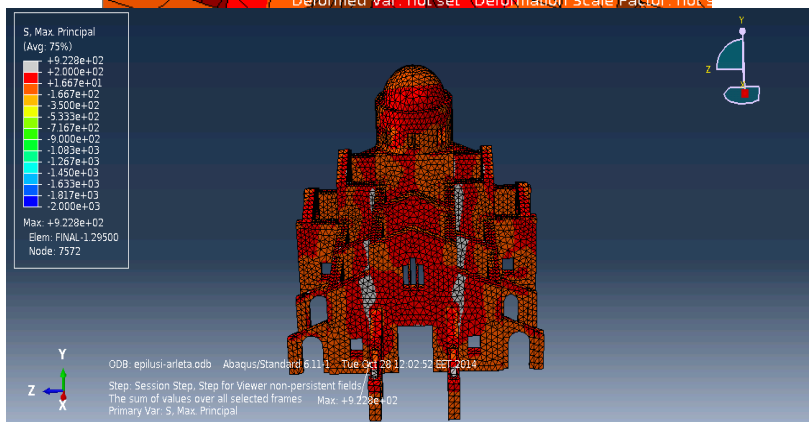
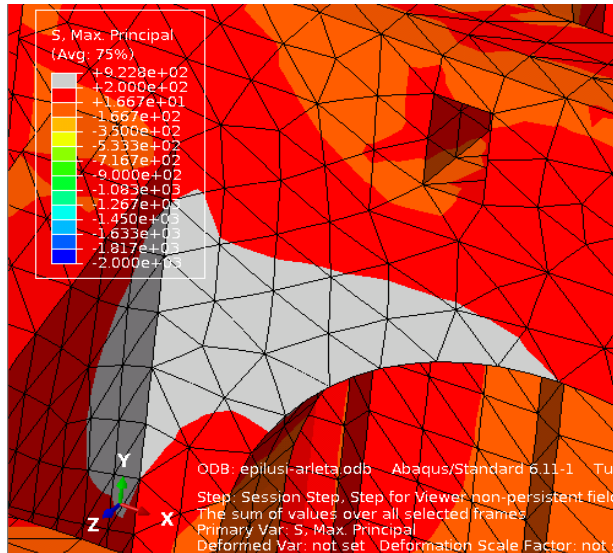
Τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν ,όπως φαίνονται παραπάνω, έχουν συνολική διάρκεια 39,98 s και η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων δίνεται ανά 0,2 s. Τα αποτελέσματα της φόρτισης φαίνονται στις παρακάτω εικόνες από το ABAQUS, οι οποίες έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να εκφράζουν τις δυσμενέστερες χρονικές στιγμές της φόρτισης :

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 KPa





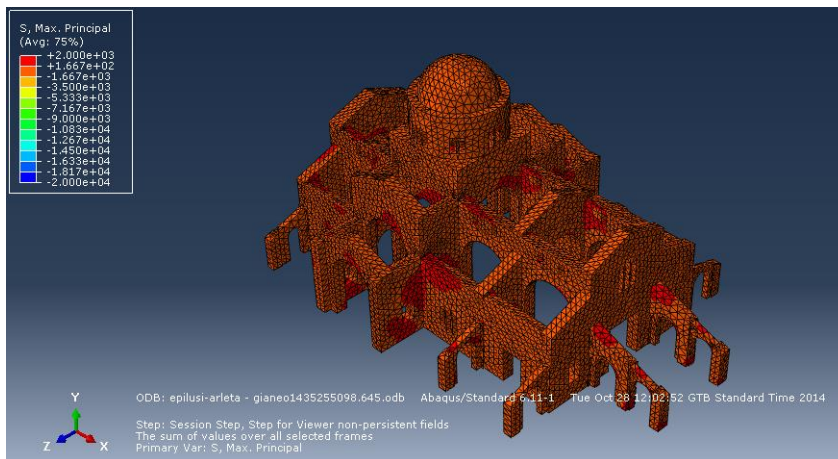
Εικόνα 41 Αποτελέσματα κατά την χρονική στιγμή 3.8s μετά την έναρξη της φόρτισης



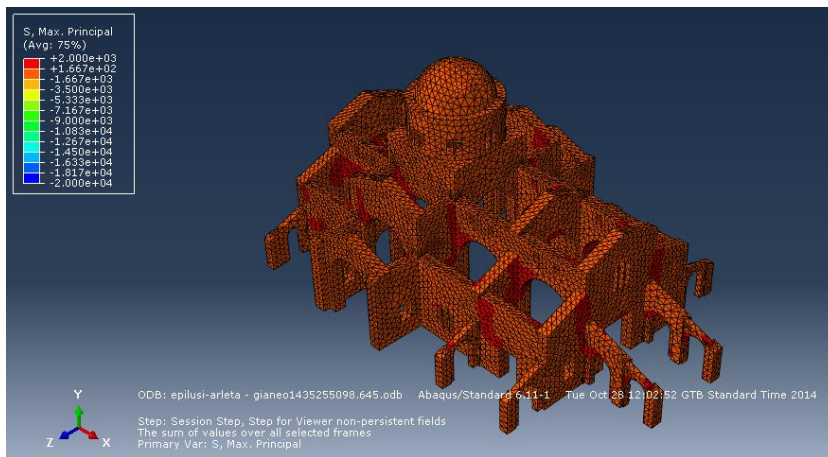
Εικόνα 42 Αποτελέσματα την χρονική στιγμή 5,4 s μετά την έναρξη της φόρτισης.

Παρατηρείται ότι η φόρτιση δημιουργεί προβλήματα στις τοιχοποιίες με ανοίγματα, στα τόξα καθώς και στο ιερό, καθώς η φόρτιση δημιουργεί τάσεις οι οποίες υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας.

Όριο εφελκυστικής τάσης 2000 ΚΡα



Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 3,8s από την έναρξη της φόρτισης



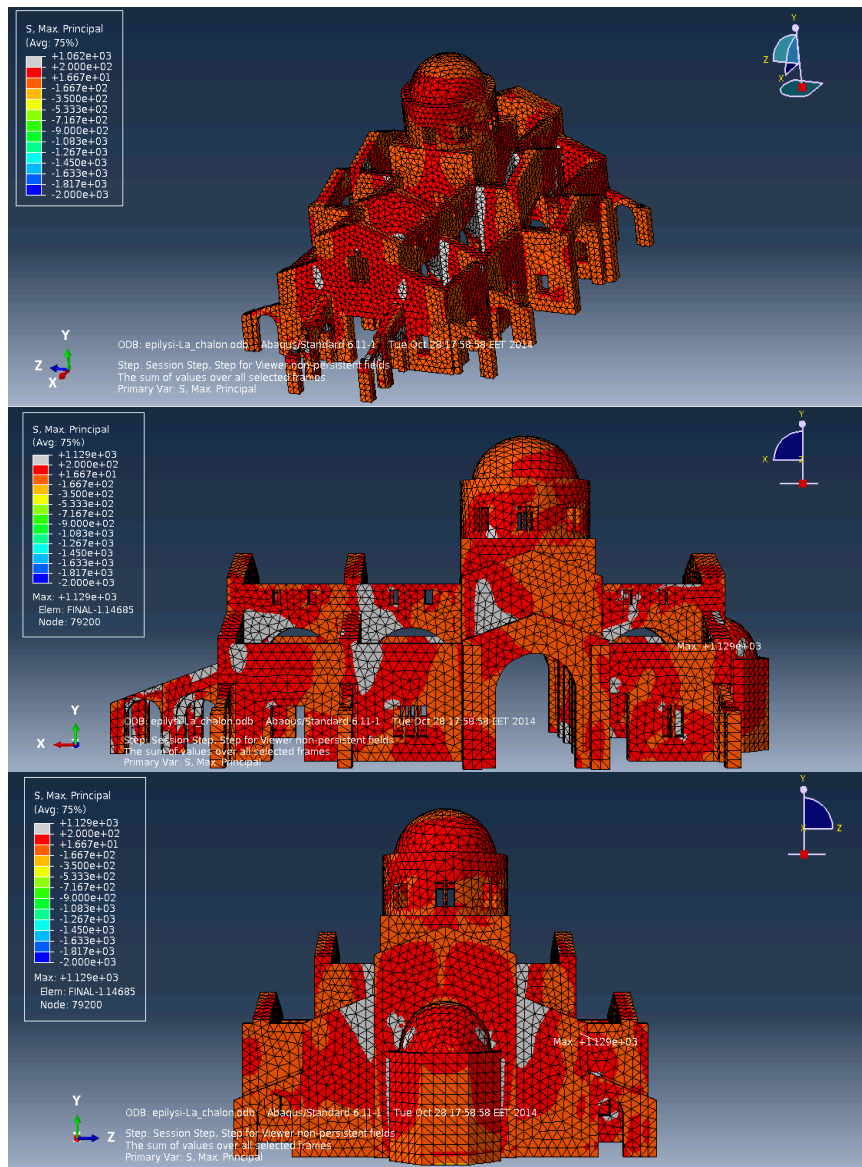
Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 5,4s από την έναρξη της φόρτισης

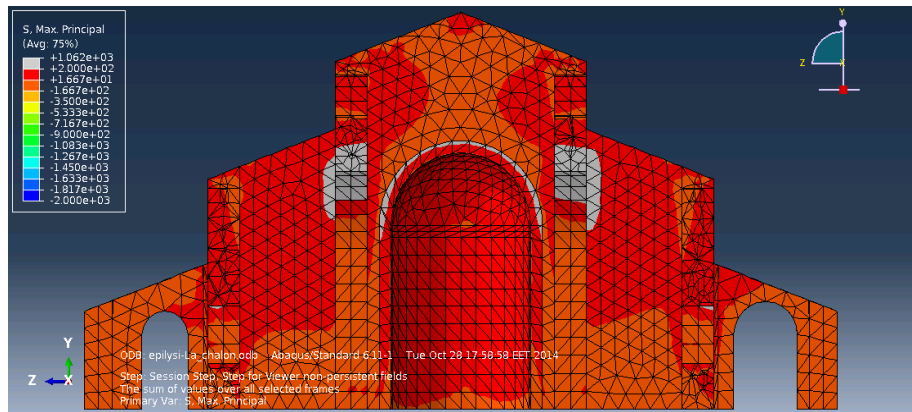
Είναι πεντακάθαρο ότι ο ναός δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα στον ερχομό της σεισμικής διέγερσης καθώς όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες από τα όρια που έχουν τοποθετηθεί δεν υπάρχει σε κανένα κομμάτι του ναού υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής.

➤ La Chalon

Τα επιταχυνσιογραφήματα έχουν συνολική διάρκεια 31,07 s και οι τιμές της επιτάχυνσης δίνονται ανά 0,01 s . Οι παρακάτω εικόνες από το ABAQUS παρουσιάζουν τις επιδράσεις της σεισμικής φόρτισης στην κατασκευή. Τα αποτελέσματα είναι σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή η οποία είναι η δυσμενέστερη.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα

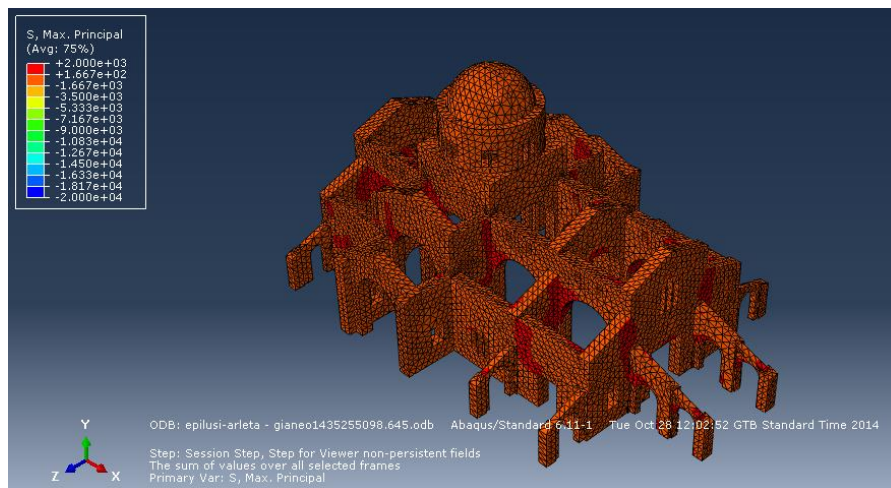




Εικόνα 43 Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 6,4s από την αρχή της φόρτισης

Παρατηρείται ότι υπάρχει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής στα τόξα στα μέρη της τοιχοποιίας με ανοίγματα καθώς και στην ένωση των πλευρικών τμημάτων του ναού με το κύριο τμήμα του ναού.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000ΚΡα



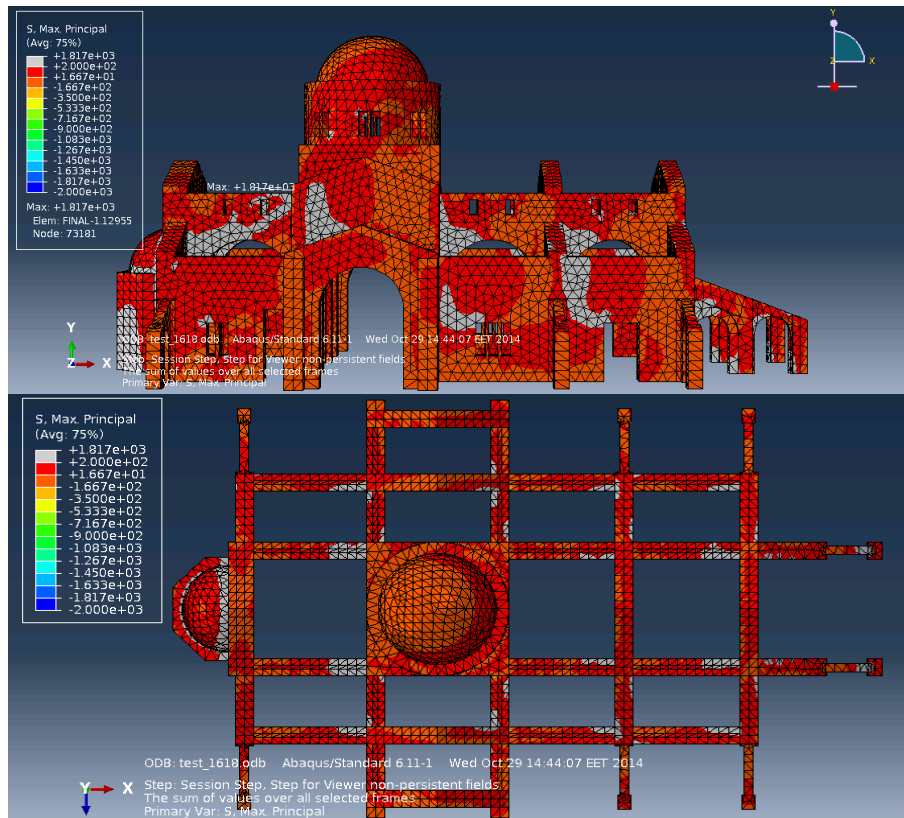
Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 6,4s από την έναρξη της φόρτισης

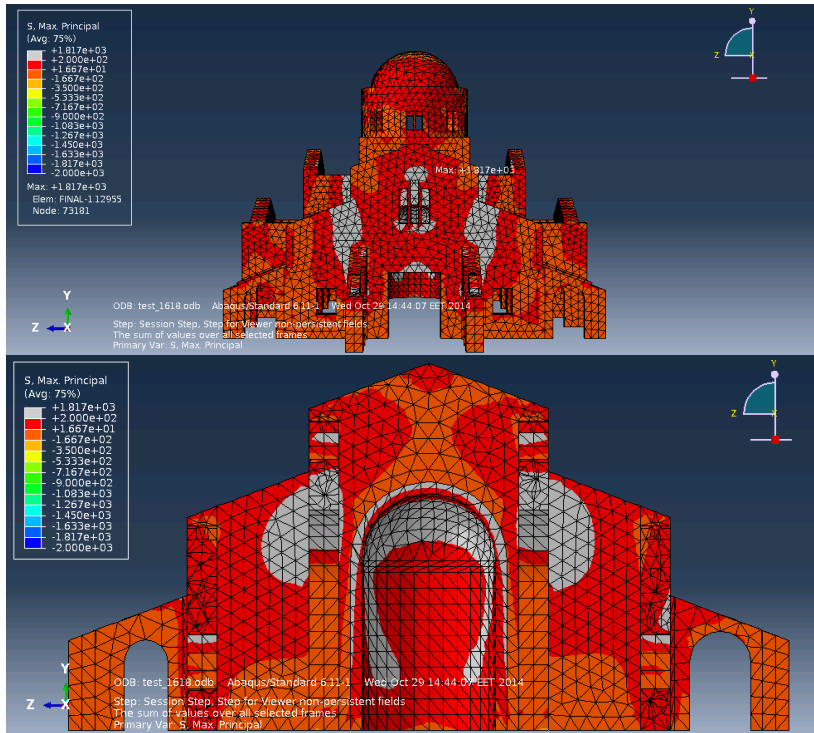
Από τα όρια φαίνεται ότι ούτε σε αυτή τη σεισμική διέγερση ο ναός αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα γιατί δεν υπάρχει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής σε κανένα τμήμα του ναού.

➤ La Fletcher

Τα επιταχυνσιογραφήματα έχουν συνολική διάρκεια 29,98 s και οι τιμές τις επιτάχυνσης δίνονται ανά 0,1 s . Παρουσιάζονται στη συνέχεια φωτογραφίες από το ABAQUS που δείχνουν τα προβλήματα που δημιουργήσε η φόρτιση στη κατασκευή. Τα στιγμιότυπα είναι σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή που οι ζημιές είναι εντονότερες.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα

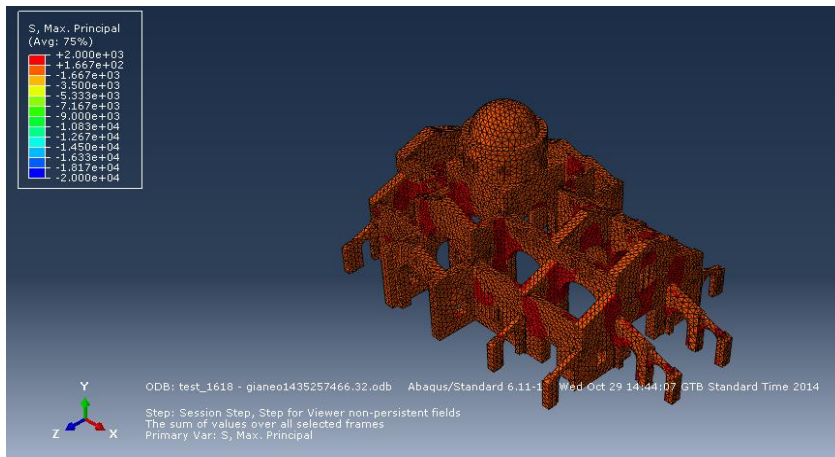




Εικόνα 44 Αποτελέσματα κατά τη χρονική στιγμή 10.3 s από την έναρξη της φόρτισης.

Οι πρώτες φωτογραφίες δείχνουν τη γενικότερη καταπόνηση της κατασκευής με ζημιές στο ιερό, στις τοιχοποιίες, στις συνδέσεις και στα τόξα. Οι δύο τελευταίες φωτογραφίες δείχνουν τις εκτεταμένες ζημιές στο τόξο πίσω από τον τρούλο το οποίο καταρρέει καθώς η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπερβλήθηκε σε όλο το πάχος της και σχεδόν σε όλο το ύψος της διατομής.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000ΚΡα



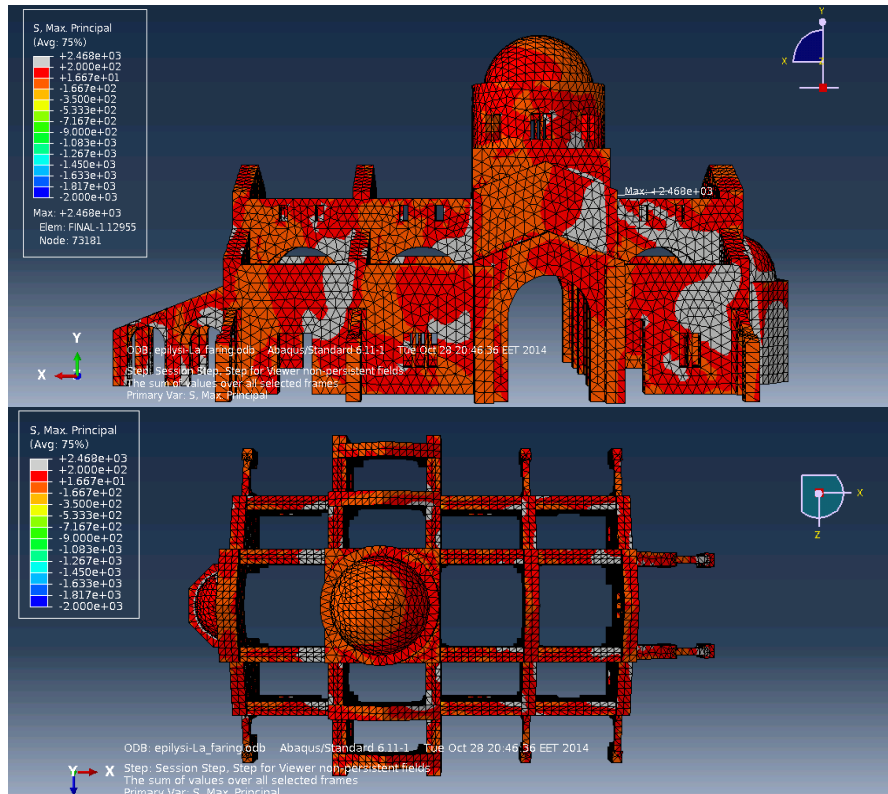
Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 10.3s από την έναρξη της φόρτισης

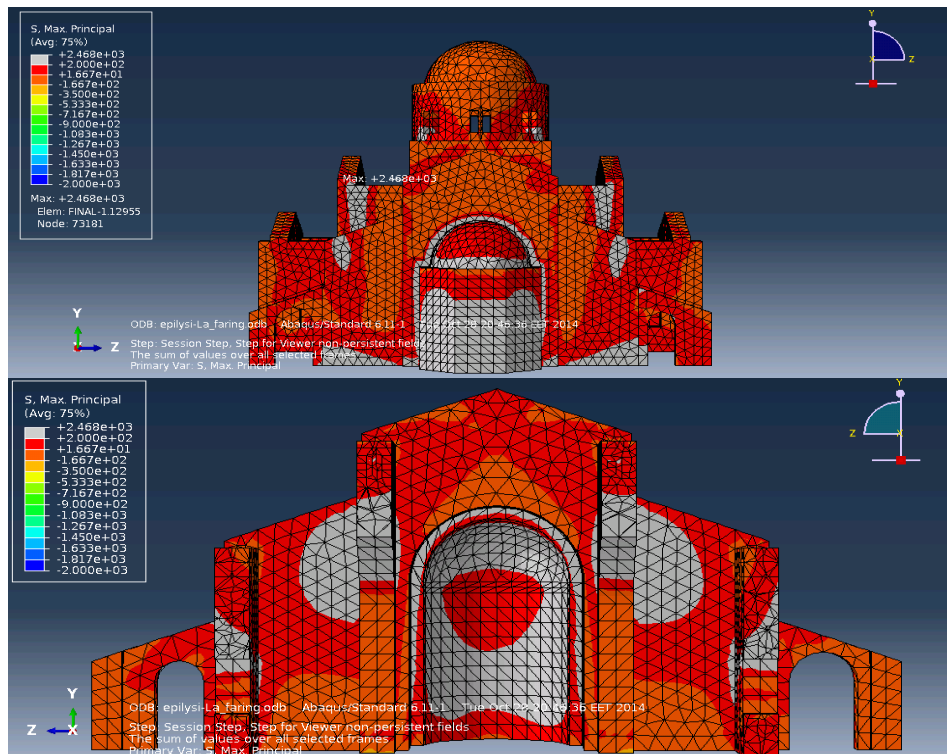
Η διέγερση από το επιταχυνσιογράφημα δεν προκαλεί ζημιές στην κατασκευή μιας και από ότι φαίνεται από τα όρια των τάσεων δεν προκαλεί κάποια υπέρβαση στο όριο της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας.

➤ La Faring

Η συνολική διάρκεια των επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 29,98 s και οι επιταχύνσεις δίνονται ανά 0,1 s . Οι φωτογραφίες από το ABAQUS παρουσιάζουν την απόκριση της κατασκευής σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή που οι ζημιές ήταν εντονότερες.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα

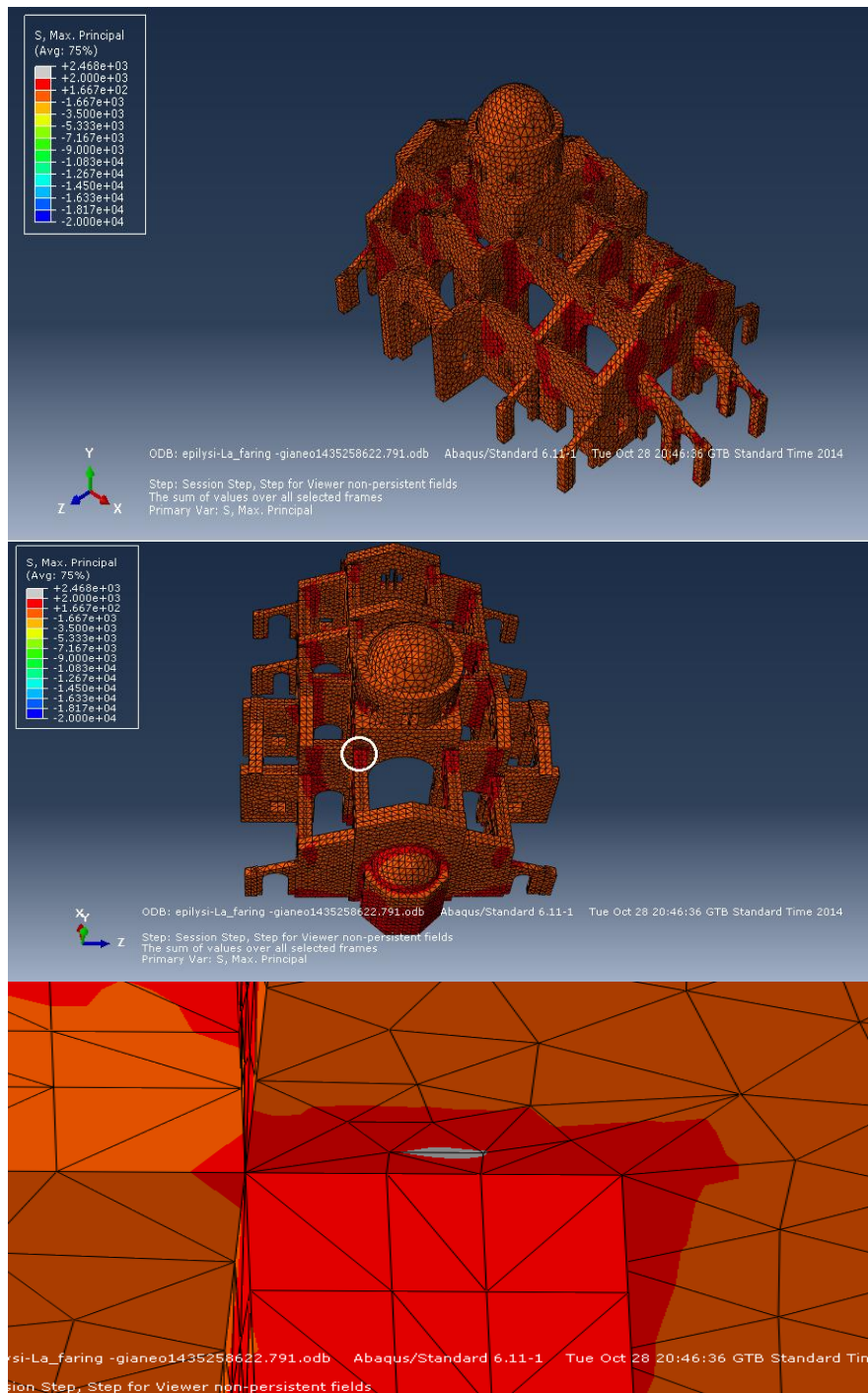




Εικόνα 45 Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 5,8 s μετά την έναρξη της φόρτισης.

Οι ζημιές επικεντρώνονται στις τοιχοποιίες με ανοίγματα στα τόξα και στο ιερό. Παρατηρείται ότι το ιερό έχει βλάβες και στην εσωτερική και στην εξωτερική παρειά του με αποτέλεσμα την κατάρρευση του. Έντονες ζημιές, σε όλο το πάχος του, με αποτέλεσμα πιθανόν την κατάρρευση του φαίνονται και στο τόξο μπροστά από το ιερό.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000ΚΡα



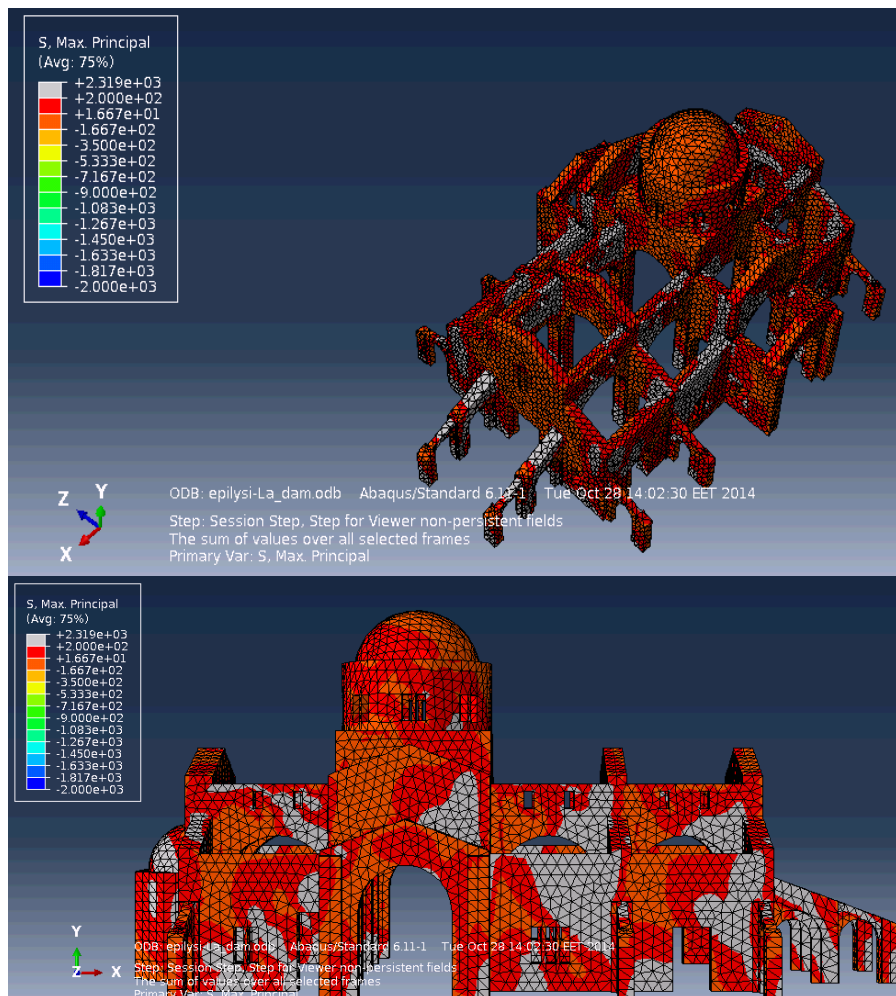
Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 5,8s από την έναρξη της φόρτισης

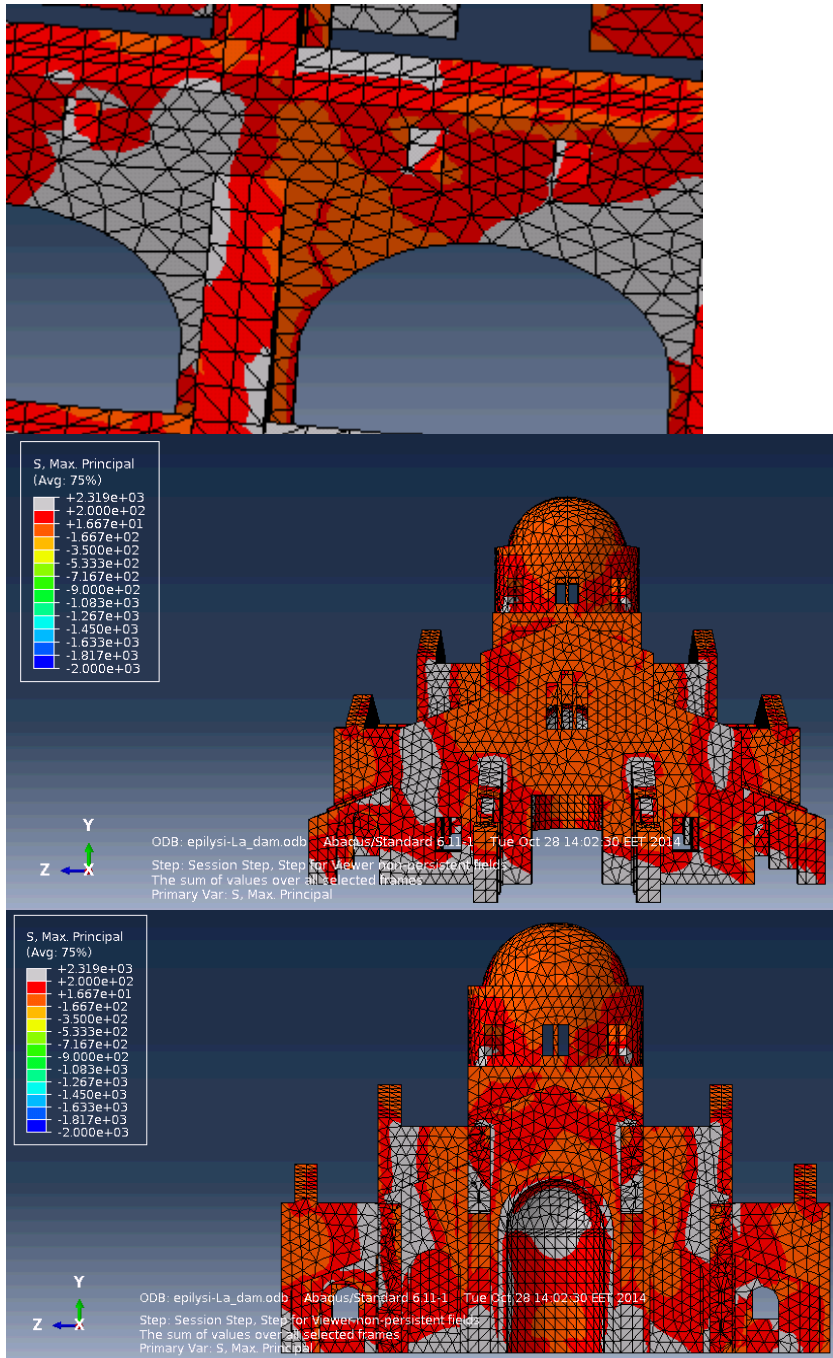
Από τις φωτογραφίες του ABAQUS φαίνεται ότι υπάρχει μια υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας κατά 400 ΚΡα περίπου. Όμως, με μια πιο προσεκτική ματιά γίνεται εμφανές ότι η υπέρβαση αυτή είναι ασήμαντη αφού η περιοχή στην οποία συμβαίνει είναι πάρα πολύ μικρή και σε καμία περίπτωση δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα στην κατασκευή. Ουσιαστικά αποτελεί μια μαθηματική υπέρβαση που καμία ζημιά δεν προκαλεί στο ναο.

- **La Dam**

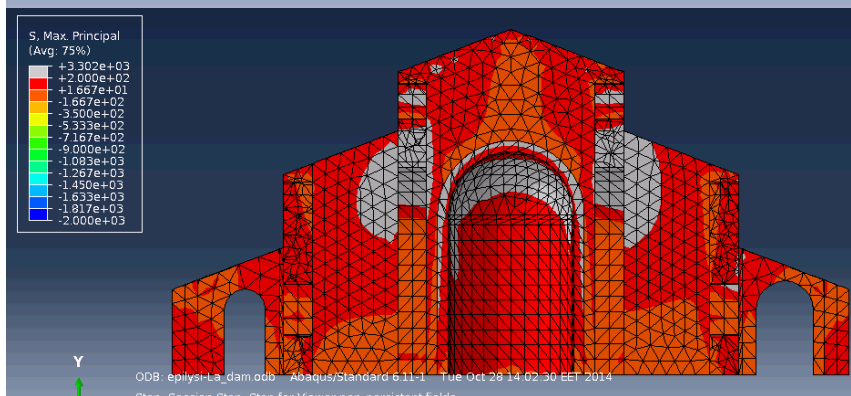
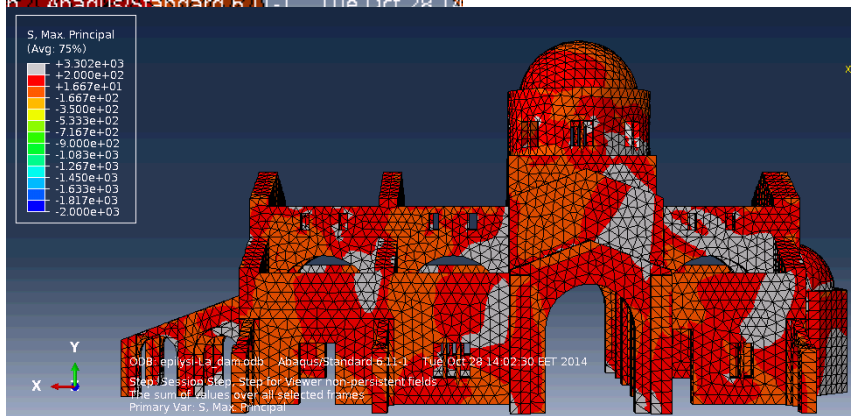
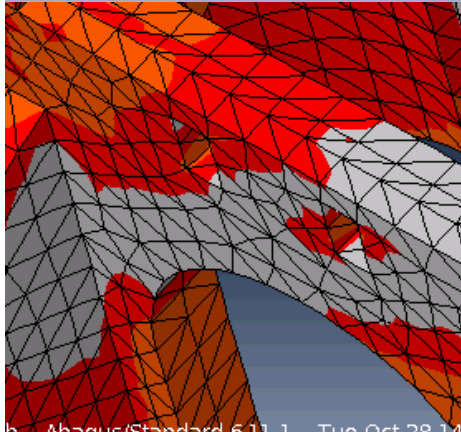
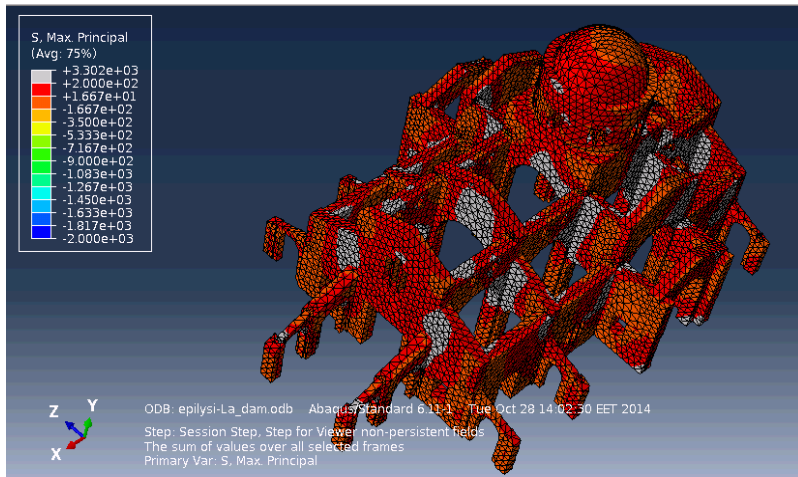
Τελευταία διέγερση στη κατασκευή είναι τα επιταχυνσιογραφήματα από το σταθμό La dam. Αυτά έχουν συνολική διάρκεια 26,57 s και οι επιταχύνσεις δίνονται ανά 0,005 s . Αυτά τα επιταχυνσιογραφήματα αποδείχθηκαν τα καταστροφικότερα για την κατασκευή όπως αποδεικνύουν και οι φωτογραφίες από το ABAQUS που επισυνάπτονται. Οι φωτογραφίες αυτές επιλέχτηκαν ώστε να δείχνουν τις δυσμενέστερες χρονικές στιγμές .

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα

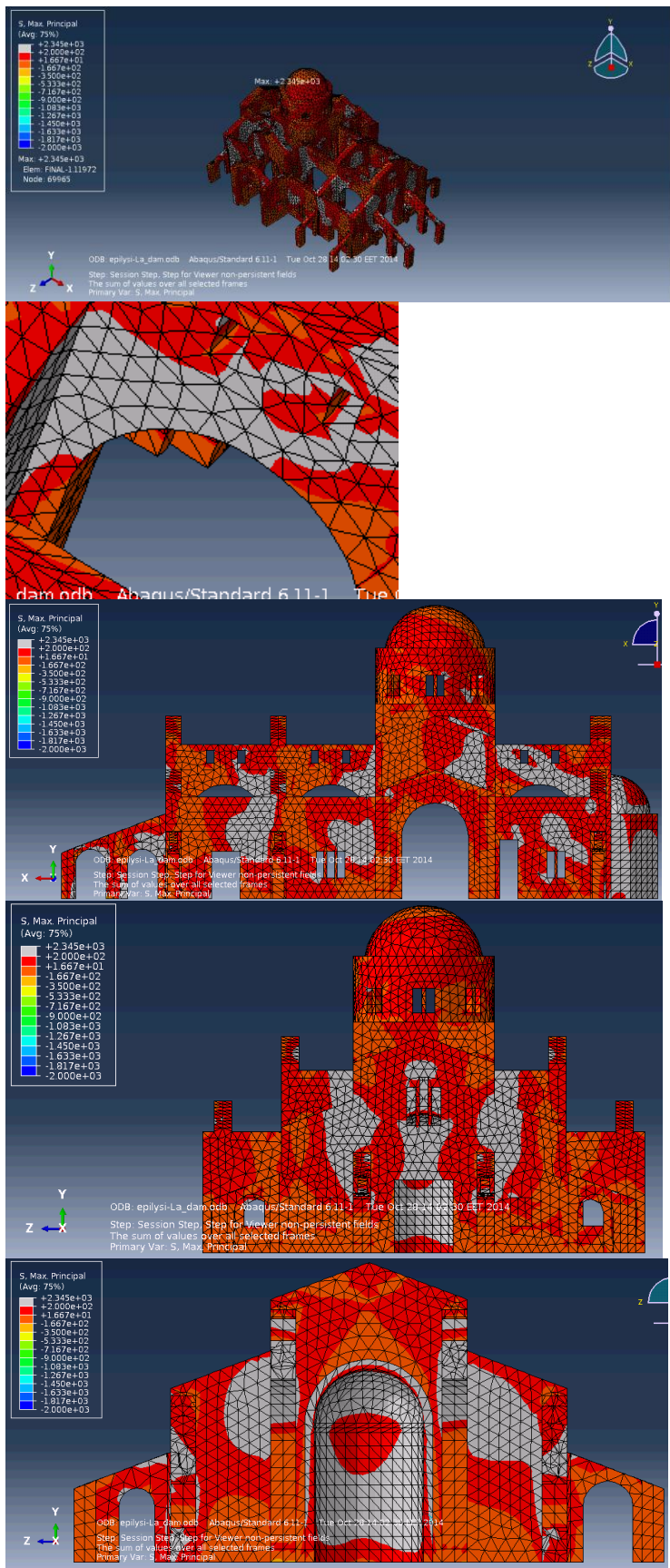




Εικόνα 46 Αποτελέσματα κατά την χρονική στιγμή 3 s μετά την έναρξη της διέγερσης.



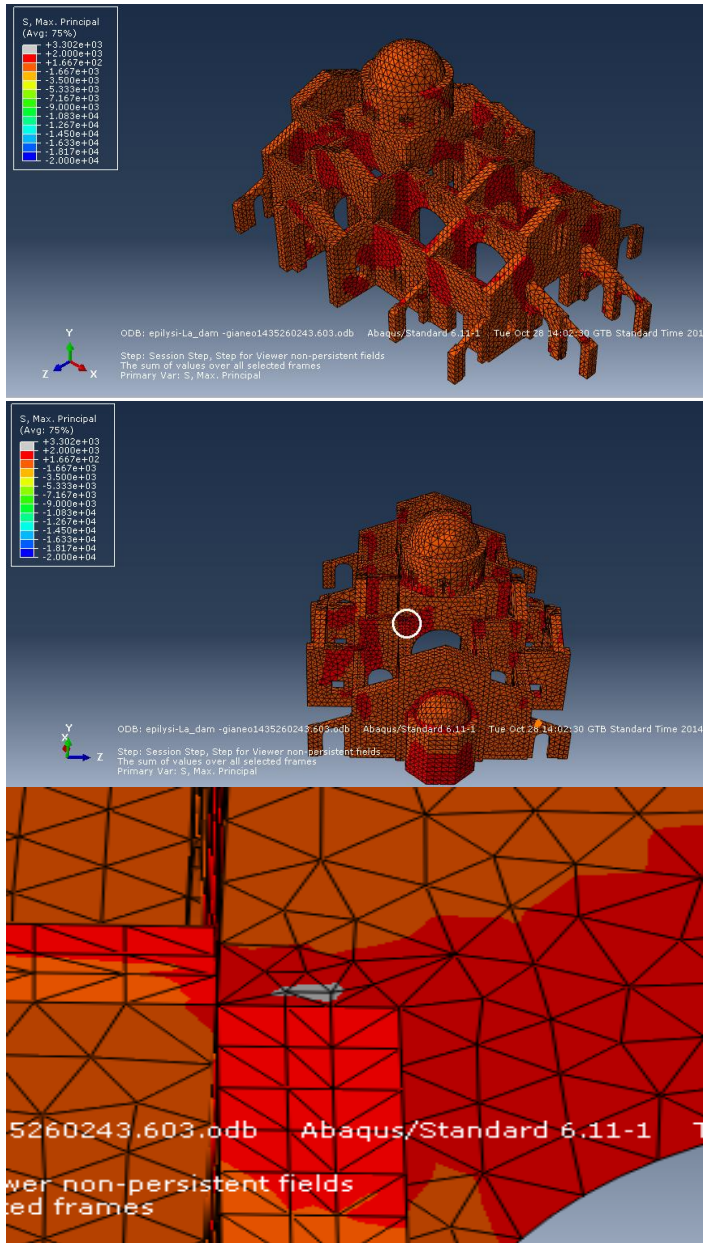
Εικόνα 47 Αποτελέσματα κατά την χρονική στιγμή 5,45 s από την έναρξη της διέγερσης.



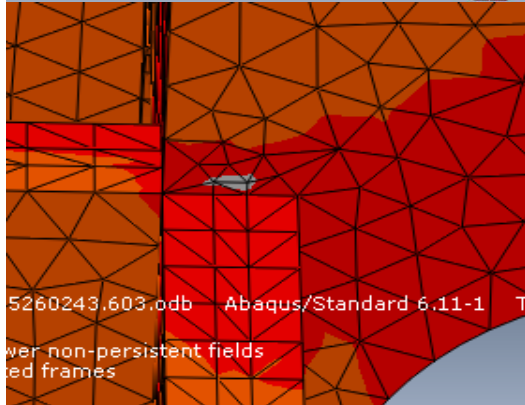
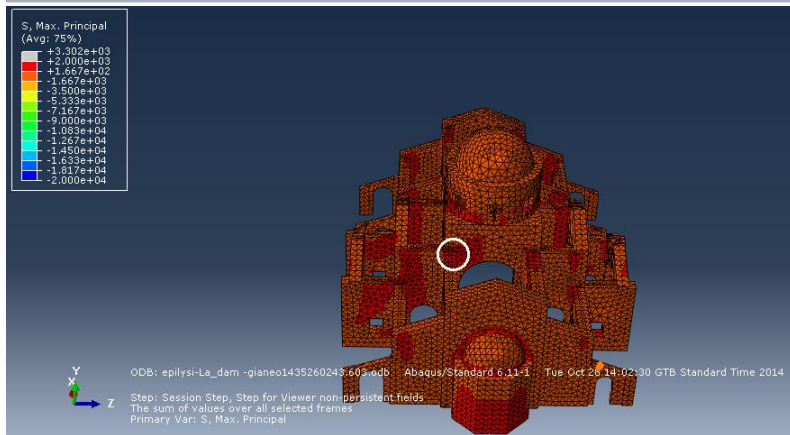
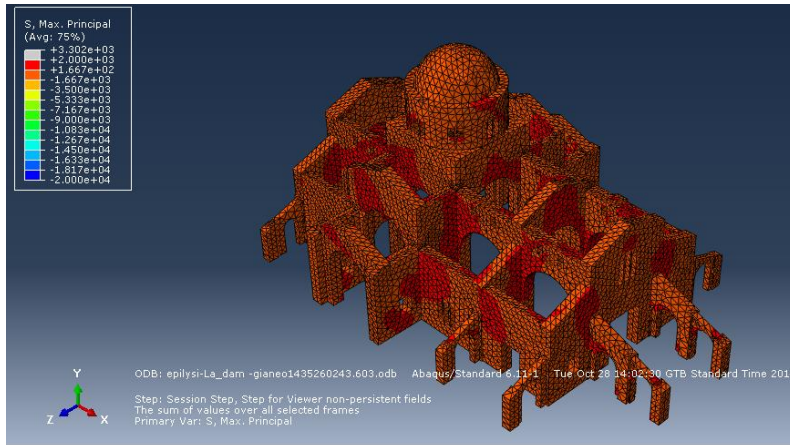
Εικόνα 48 Αποτελέσματα κατά την χρονική στιγμή 6,3 s από την έναρξη της διέγερσης.

Οι φωτογραφίες αποκαλύπτουν σοβαρές ζημιές σε όλη την κατασκευή που θα έχουν σαν αποτέλεσμα την πιθανή κατάρρευση της κατασκευής, καθώς υπάρχουν έντονες βλάβες στο ιερό, στον τρούλο, στις τοιχοποιίες και στα τόξα.

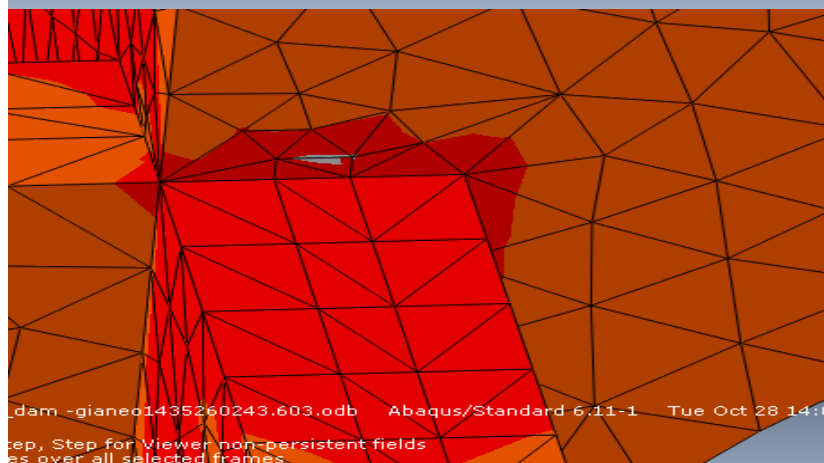
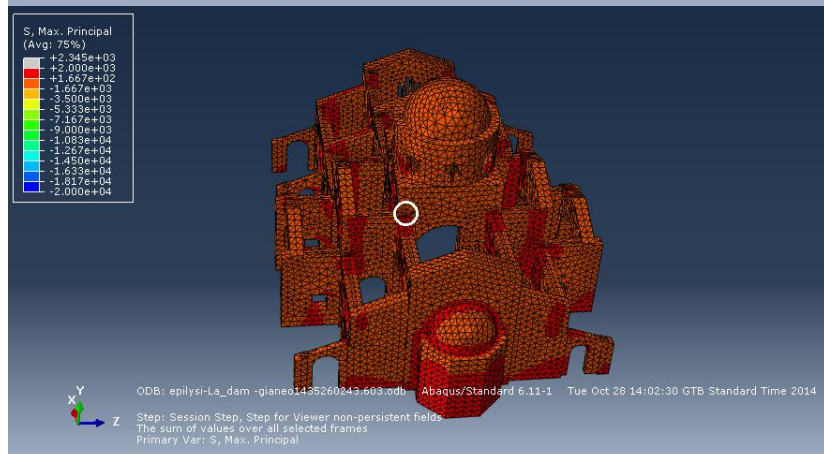
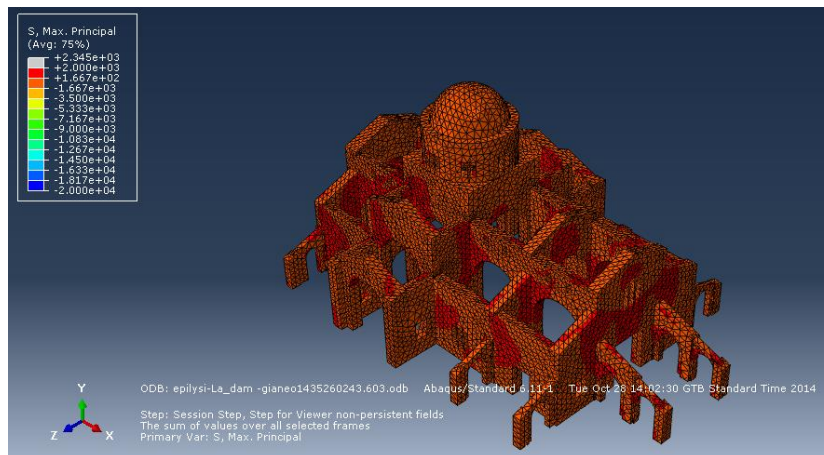
Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000ΚΡα



Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 3s από την έναρξη της φόρτισης



Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 5.45s από την έναρξη της φόρτισης



Εικόνα Αποτελέσματα τη χρονική στιγμή 6.3s από την έναρξη της φόρτισης

Σε όλες αυτές τις χρονικές στιγμές υπάρχει υπέρβαση του ορίου της εφελκυστικής τάσης που αντέχει η τοιχοποιία. Όμως, όπως και στη διέγερση από το σταθμό του La Faring, έτσι και εδώ το πρόβλημα είναι καθαρά μαθηματικό, αφού και σε αυτή τη περίπτωση η περιοχή του «προβλήματος» είναι αμελητέα και είναι σίγουρο πως η κατασκευή δεν θα αντιμετωπίσει προβλήματα κατά τη φόρτιση της.

Συμπεράσματα- Πρόταση βελτίωσης

Στην περίπτωση της εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα οι αναλύσεις έδειξαν ότι η κατασκευή έχει έντονα προβλήματα. Όλοι οι συνδυασμοί επιταχύνσεων δημιουργούν προβλήματα και εκτεταμένες ζημιές στην κατασκευή με αποκορύφωμα τα επιταχυνσιογραφήματα από τον σταθμό του La Dam. Είναι λοιπόν, βέβαιο ότι πρέπει να υπάρξει κάποια βελτίωση της κατασκευής για να προχωρήσει η ανέγερση της. Στην περίπτωση που εφελκυστική αντοχή είναι 2 ΜΡα ο ναός δεν αντιμετωπίζει προβλήματα.

Οι προτάσεις λύσης είναι τρεις:

1. Ξύλινοι θλιπτήρες σε συνδυασμό με μεταλλικούς ελκυστήρες στα τόξα
2. Στρώση 30 cm από άοπλο σκυρόδεμα στο πάνω μέρος της τοιχοποιίας για να μοιραστούν καλύτερα οι τάσεις στο ύψος της κατασκευής και να «δεθεί» η περίμετρος της κατασκευής.
3. Συνδυασμός των δύο πρώτων λύσεων

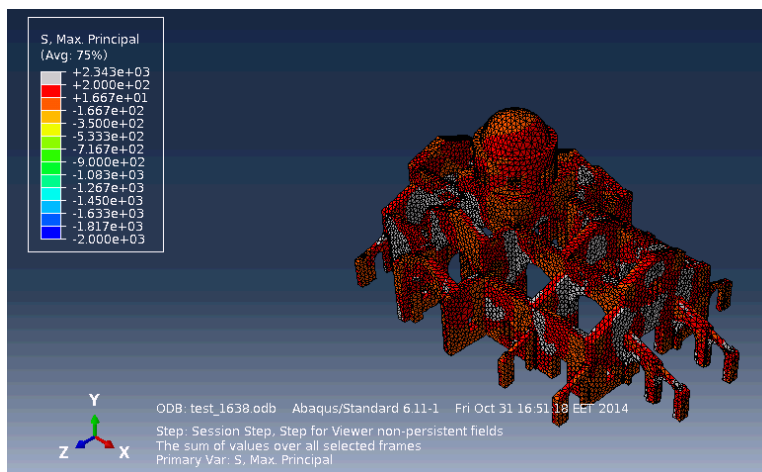
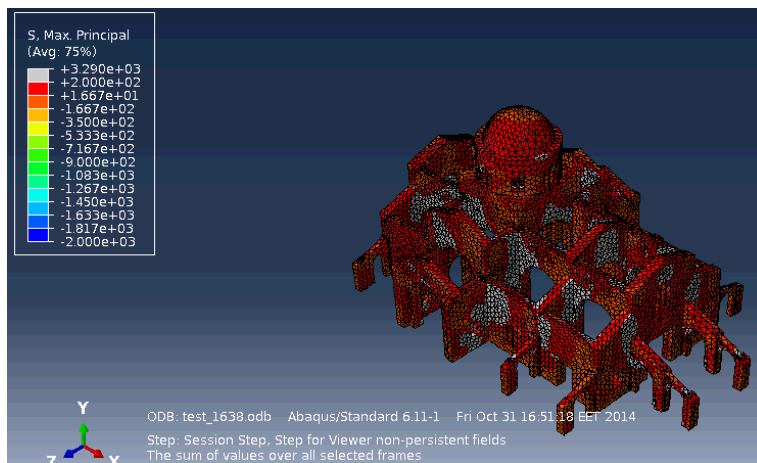
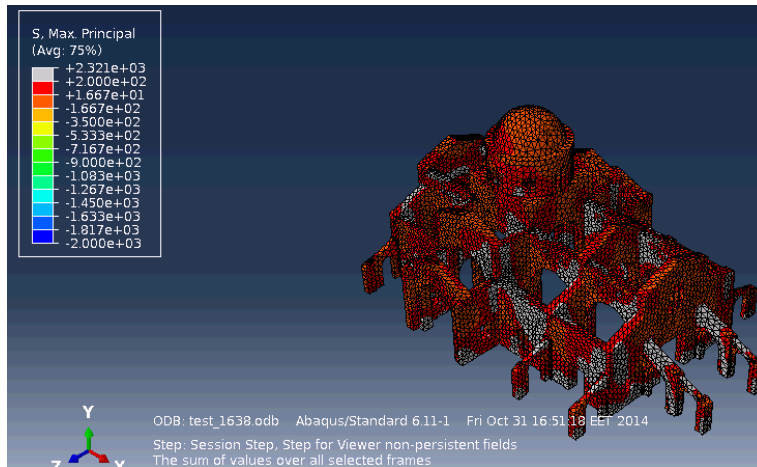
Οι προτάσεις λύσης θα εφαρμοστούν και θα ελεγχθούν σε διέγερση από τα επιταχυνσιογραφήματα του La Dam και για τα δύο όρια της εφελκυστικής αντοχής, παρ' ότι για εφελκυστική αντοχή 2 ΜΡα η κατασκευή δεν αντιμετωπίζει προβλήματα.

➤ Ξύλινοι θλιπτήρες σε συνδυασμό με μεταλλικούς ελκυστήρες

Οι ελκυστήρες στα τόξα είναι μια ανακουφιστική ένεση για την παραλαβή των τάσεων καθώς αναλαμβάνουν τις οριζόντιες αντιδράσεις στις στηρίξεις με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνονται οι ίδιες οι στηρίξεις.

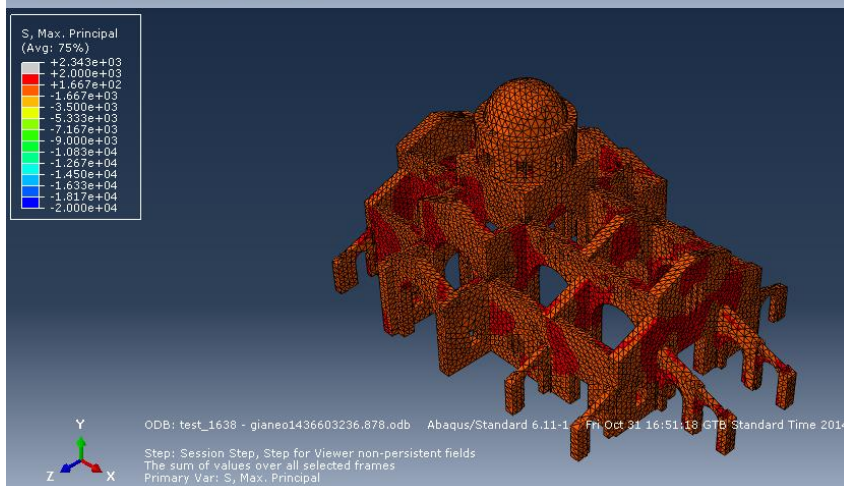
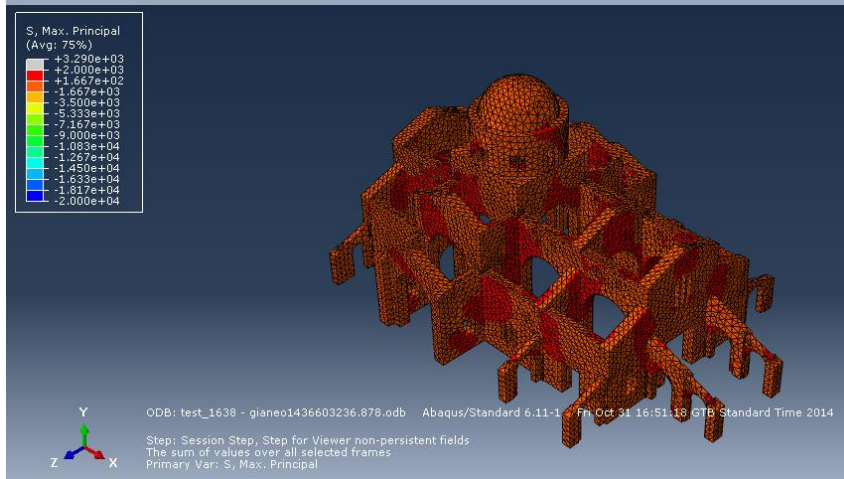
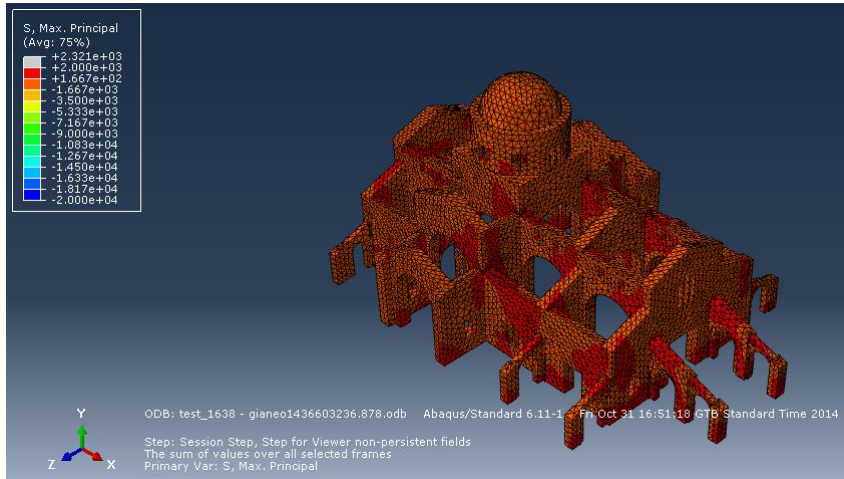
Στη λύση αυτή υπάρχει ένα πρόβλημα. Αυτό είναι ότι οι αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με το ABAQUS είναι ελαστικές με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εμφανιστεί η ευεργετική δράση των ελκυστήρων-θλιπτήρων η οποία θα φαινόταν σε πλαστική ανάλυση καθώς εκεί θα φαινόταν πως αναλαμβάνουν τις δυνάμεις οι ελκυστήρες-θλιπτήρες και εμποδίζουν την κατάρρευση του τόξου. Ενδεικτικά παρουσιάζονται φωτογραφίες για τις ίδιες χρονικές στιγμές που παρουσιάστηκαν για τη διέγερση του La Dam για να φανεί η πλήρης ταύτιση αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό δεν θα ασχοληθούμε και με την διαστασιολόγησή τους, η οποία όμως θα γίνει στην συνδυαστική πρόταση λύσης με ένα τέχνασμα.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα



Εικόνα 49 Αποτελέσματα κατά τις χρονικές στιγμές 3 s 5.45 s και 6,3 s από την έναρξη της διέγερσης.

Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000 ΚΡα



Εικόνες αποτελέσματα κατά τις χρονικές στιγμές 3 s 5.45 s και 6,3 s από την έναρξη της διέγερσης.

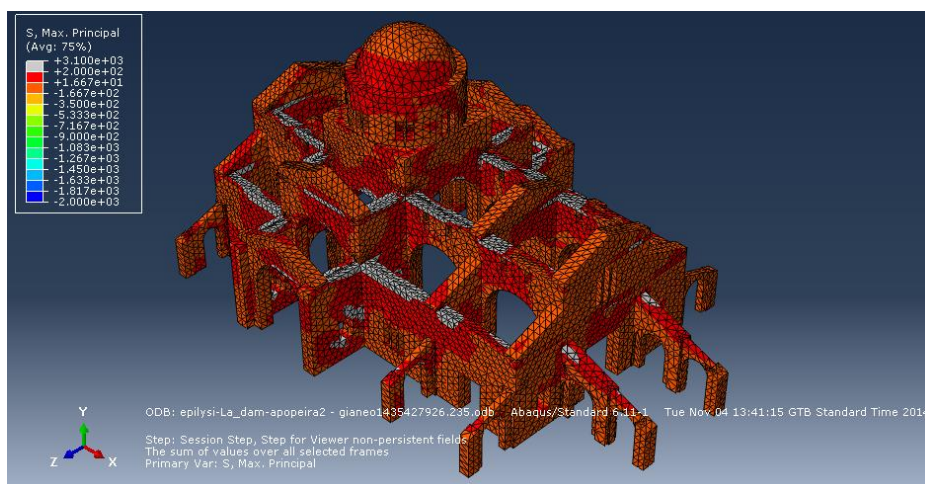
➤ Στρώση από άοπλο Σκυρόδεμα

Η λογική της ενίσχυσης αυτής είναι απλή. Το μοναδικό σημείο του ναού το οποίο καταπονείται εκτός από το ίδιο βάρος του είναι η οροφή στην οποία ασκείται και το κινητό φορτίο. Έτσι, αποφασίστηκε να ενισχυθούν τα πρώτα 30 cm κάτω από την ξύλινη στέγη και να αντικατασταθεί η τοιχοποιία από άοπλο σκυρόδεμα με σκοπό να αναληφθούν πιο ομοιόμορφα οι επιπλέον τάσεις που αναπτύσσονται λόγω του κινητού φορτίου με αποτέλεσμα μια πιο ήπια κατανομή αυτών καθ' ύψος της κατασκευής. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα τυπικό σκυρόδεμα C30/37 με μία πυκνότητα $2,4 \text{ kgf/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E= 30 \text{ GPa}$ και λόγο poisson $\nu=0,2$. Το τελικό βάρος της κατασκευής είναι $1506,841 \text{ Mgr}$ δηλαδή το «ωφέλιμο» βάρος το οποίο ταλαντώνεται έχει μια μεταβολή της τάξης του $((1506.841-76,95)-(1477,28-76,95))/1400.33=0.02=2\%$ η οποία θεωρείται πολύ μικρή για να επηρεάσει τον αριθμό των ιδιομορφών που χρειάζονται για την ανάλυση. Γι' αυτό εκτελείται πάλι ανάλυση με χρήση των 150 πρώτων ιδιομορφών με τη μέθοδο Lanczos για την διέγερση του La Dam και τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω αποκόμματα από το ABAQUS.

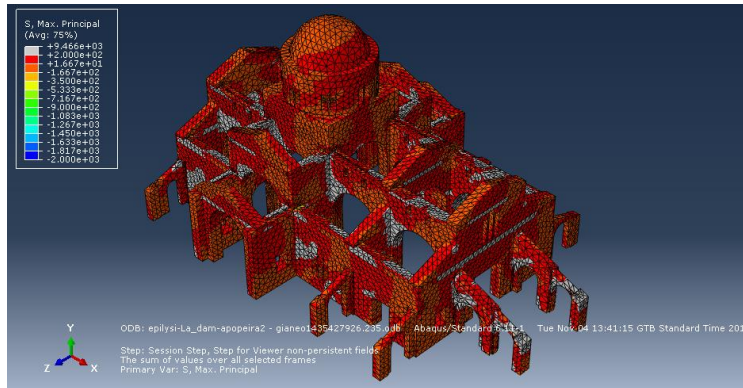
Όριο εφελκυστικής αντοχής 200 ΚΡα

Η ενίσχυση αυτή είχε εμφανή αλλαγή στην απόκριση της κατασκευής. Αυτό γίνεται αμέσως αντιληπτό καθώς αλλάζουν οι χρονικές στιγμές που η κατασκευή έχει πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα :

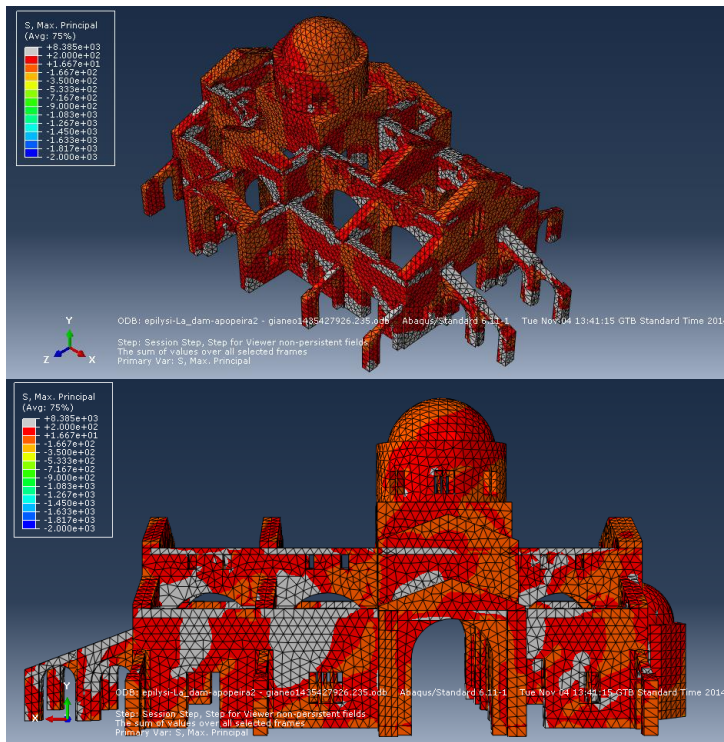
i. Στη χρονική στιγμή 5,45 s η κατασκευή δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα και οι υπερβάσεις των τάσεων είναι ως επί το πλείστον στις περιοχές που υπάρχει σκυρόδεμα και το όριο είναι στην πραγματικότητα πολύ μεγαλύτερο ($4,5 \text{ MPa}$)

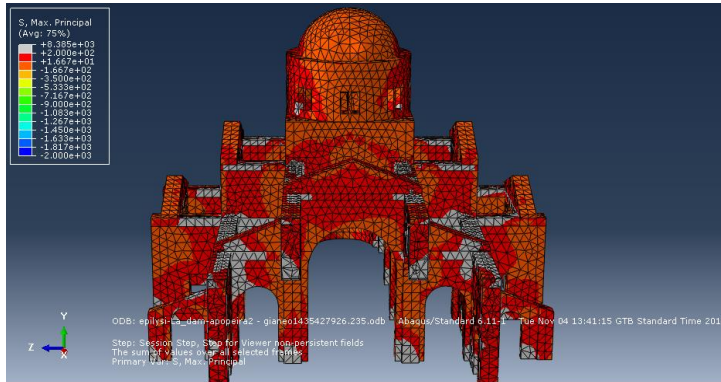


ii. Στη χρονική στιγμή 6,3 s υπάρχει αισθητή βελτίωση της κατάστασης με υπερβάσεις τάσεων που πλέον είναι κατά βάση επιφανειακές και δεν δείχνουν να οδηγούν στην κατάρρευση της κατασκευής.

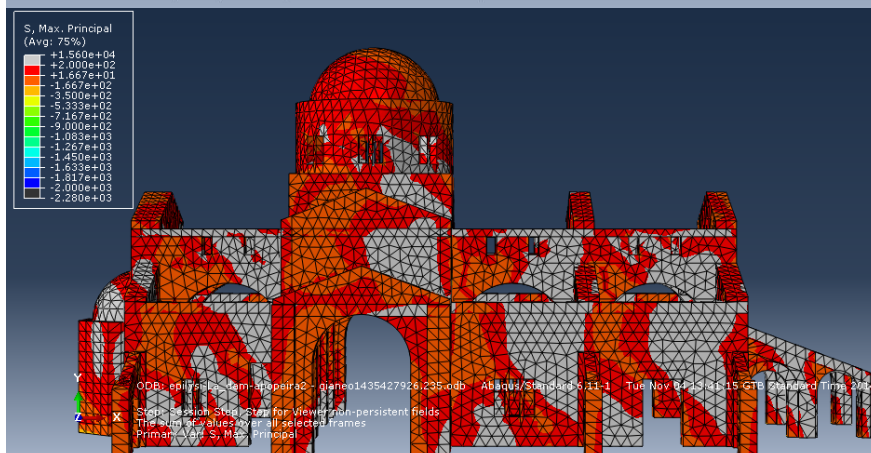
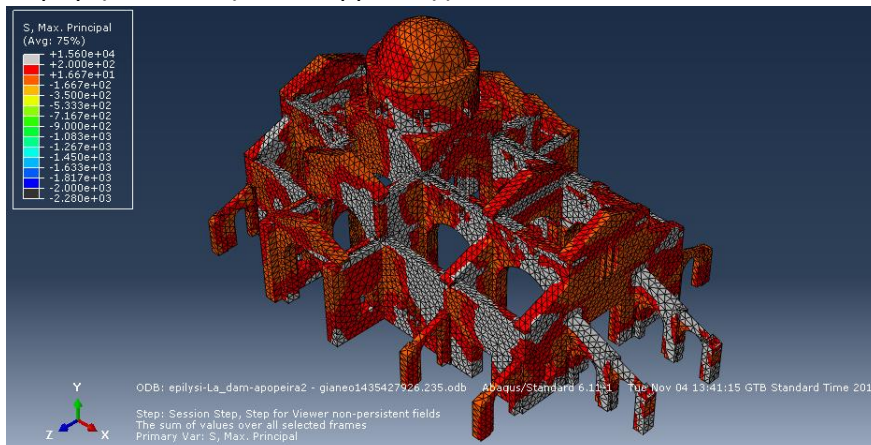


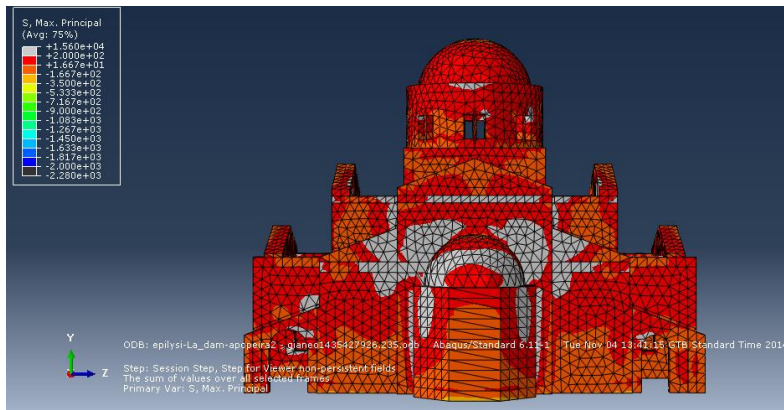
iii. Τη χρονική στιγμή 3,0 s η κατασκευή είναι σε κρίσιμη κατάσταση. Οι υπερβάσεις στις τάσεις είναι εκτενείς αλλά σε ορισμένα μόνο σημεία, κυρίως στα τόξα στα οποία θα τοποθετηθούν στην επόμενη πρόταση λύσης ελκυστήρες-θλιπτήρες, καταλαμβάνουν όλο το πάχος της διατομής, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης.



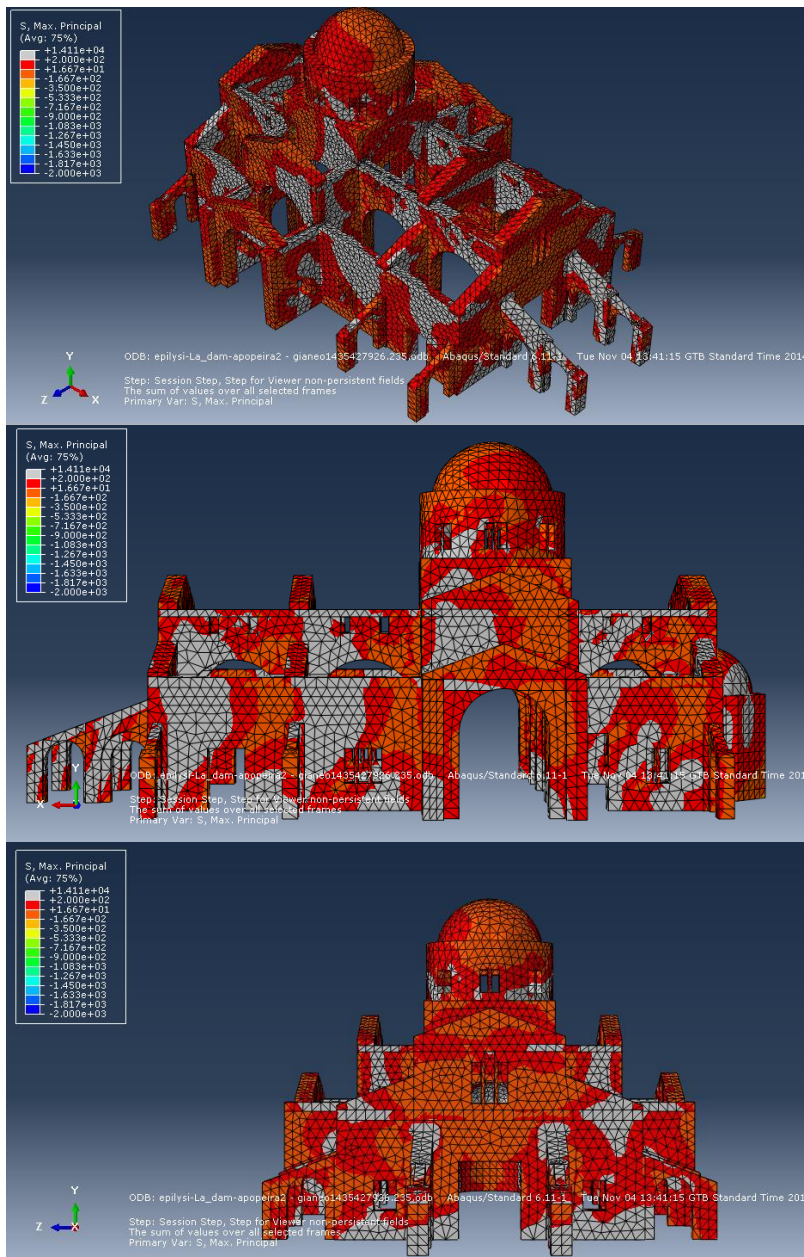


iv. Όμως σε αντίθεση με την μη ενισχυμένη κατασκευή υπάρχουν δύο κρισιμότερες χρονικές στιγμές. Σε αυτές, 4,25 s και 4,7 s, οι υπερβάσεις στο ανώτατο όριο είναι εκτενείς και καθολικές σε πολλά σημεία, όχι μόνο στα τόξα αλλά ακόμα και στον τρούλο στον οποίο δεν είχαμε σοβαρό πρόβλημα πριν την ενίσχυση, με αποτέλεσμα οι ζημιές οι οποίες είναι να προκληθούν να δημιουργούν σοβαρή πιθανότητα κατάρρευσης.



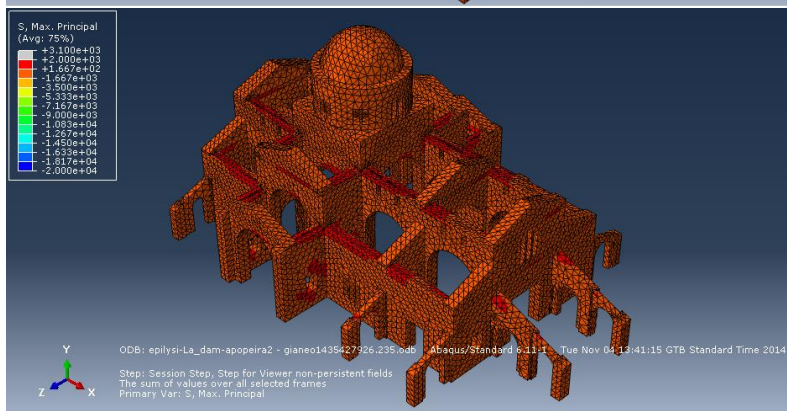
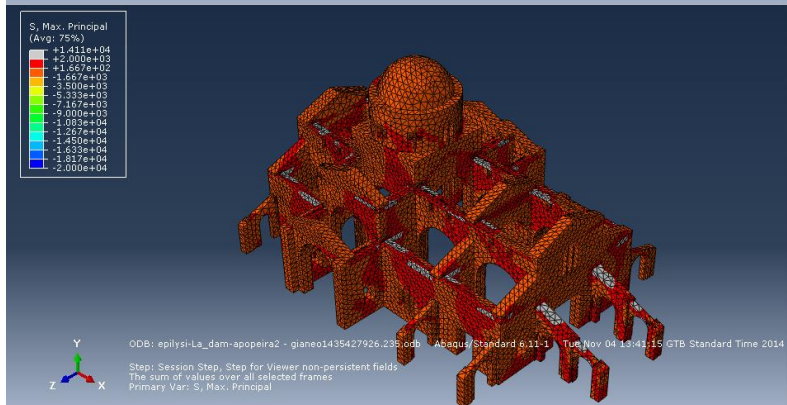
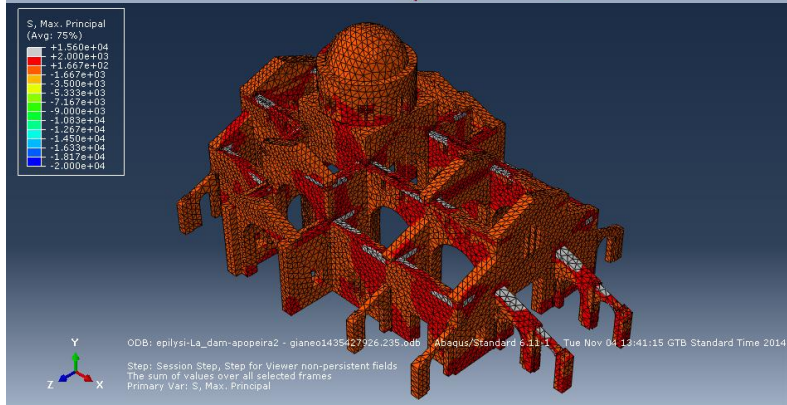
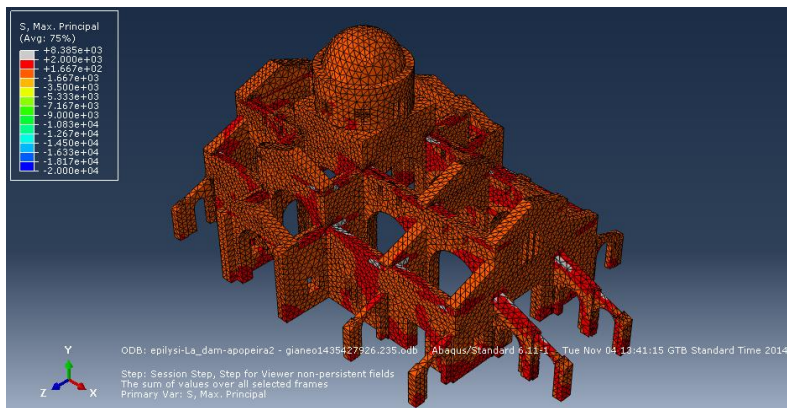


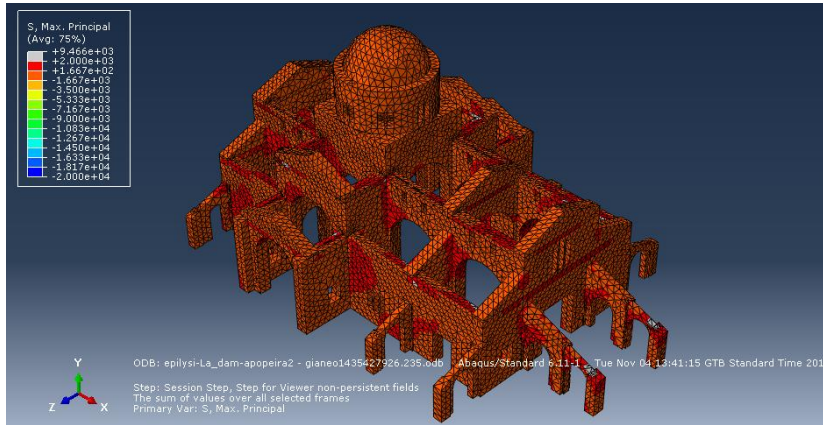
Εικόνα 50 Χρονική στιγμή 4,25 s μετά την έναρξη της διέγερσης



Εικόνα 51 Χρονική στιγμή 4,7 s μετά την έναρξη της διέγερσης

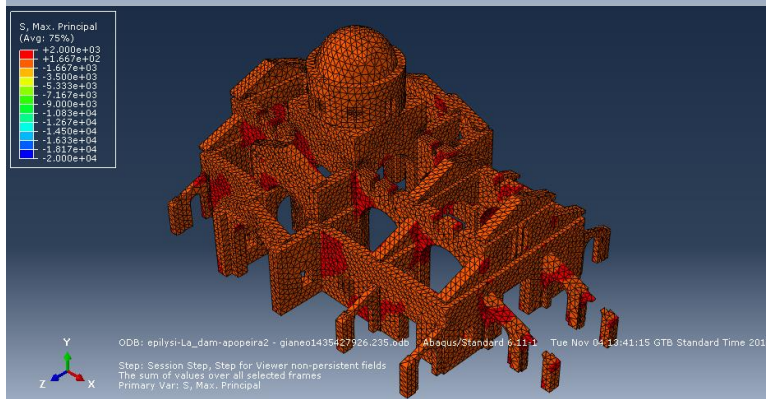
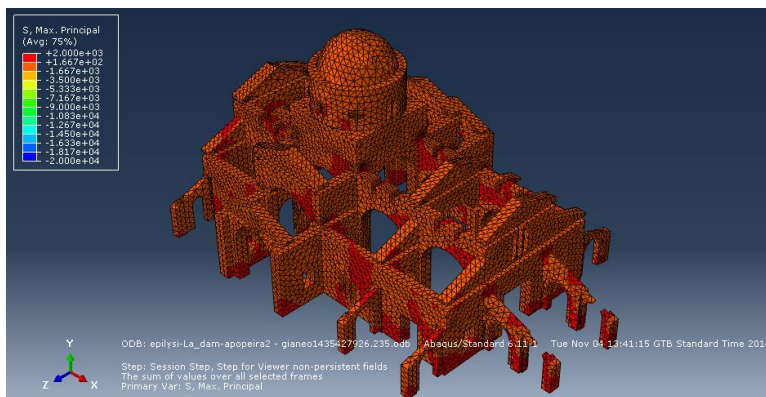
Όριο εφελκυστικής αντοχής 2000ΚΡα

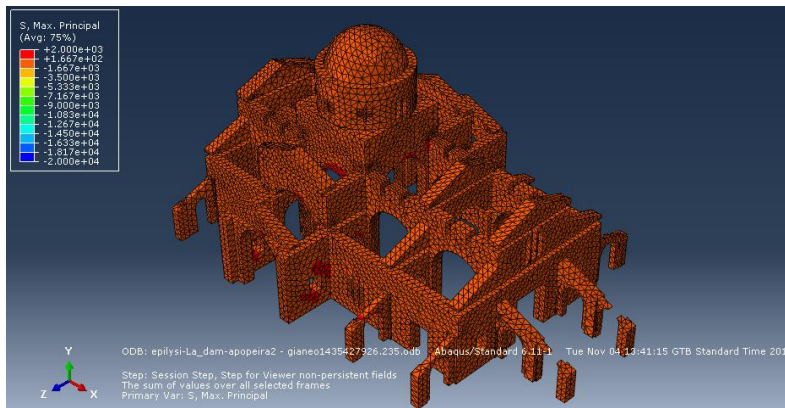




Εικόνα Αποτελέσματα κατά τις χρονικές στιγμές 3,0 s, 4.25 s, 4.7 s, 5.45 s, 6.3 s από την αρχή της διέγερσης.

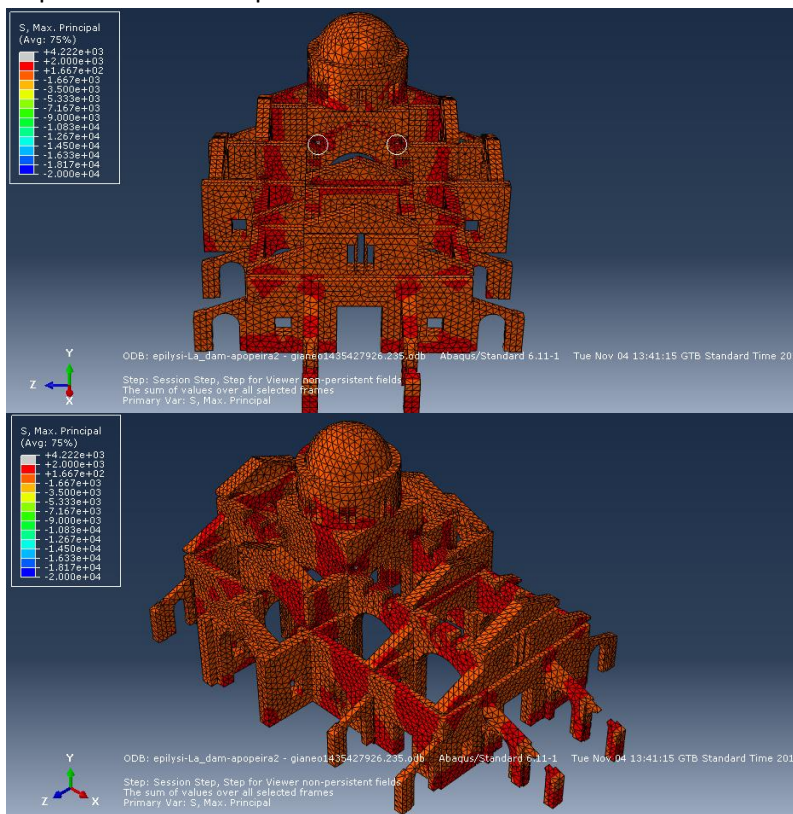
Είναι φανερό ότι οι υπερβάσεις στην τάση είναι περιορισμένες. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά τις χρονικές στιγμές 3,0 s, 5.45 s και 6.3 s οι υπερβάσεις περιορίζονται στην περιοχή του σκυροδέματος και είναι μεμονωμένες χωρίς να δημιουργούν κινδύνους. Αυτό φαίνεται στα παρακάτω αποκόμματα που έχει αφαιρεθεί από το σώμα του ναού η περιοχή του σκυροδέματος και η υπόλοιπη κατασκευή είναι εντός των ορίων της εφελκυστικής αντοχής .

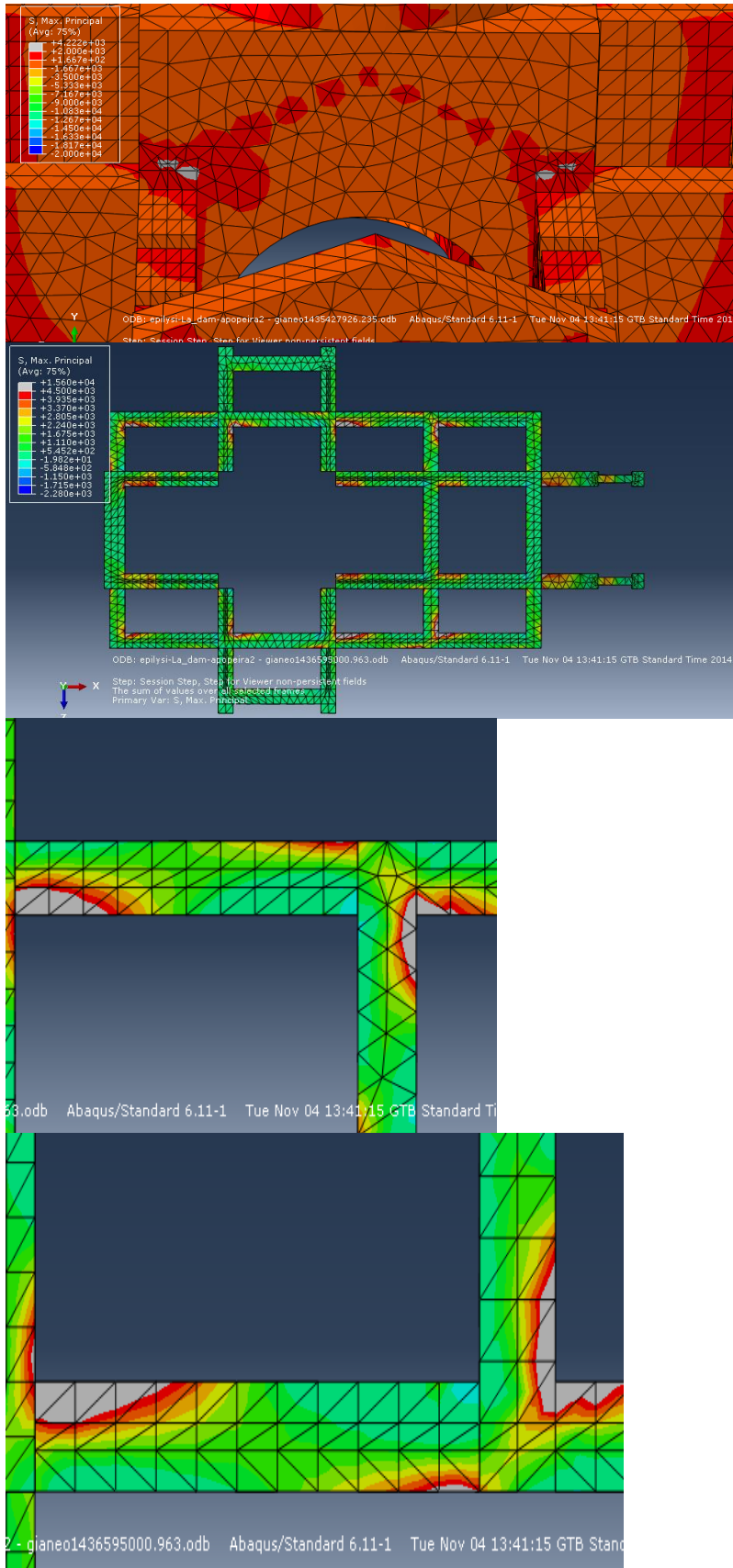




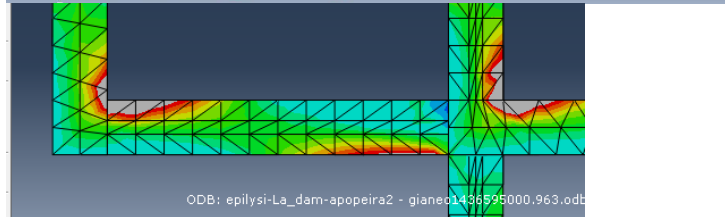
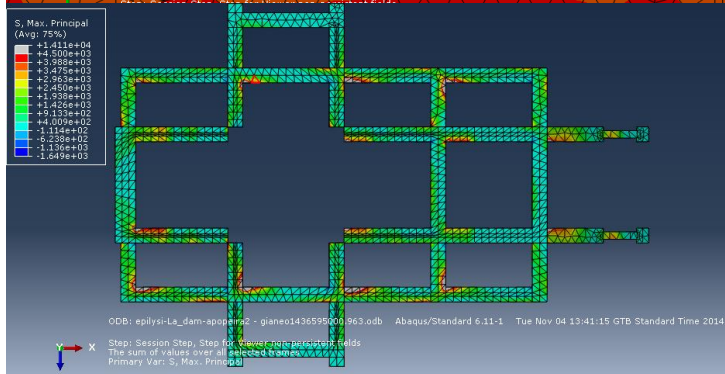
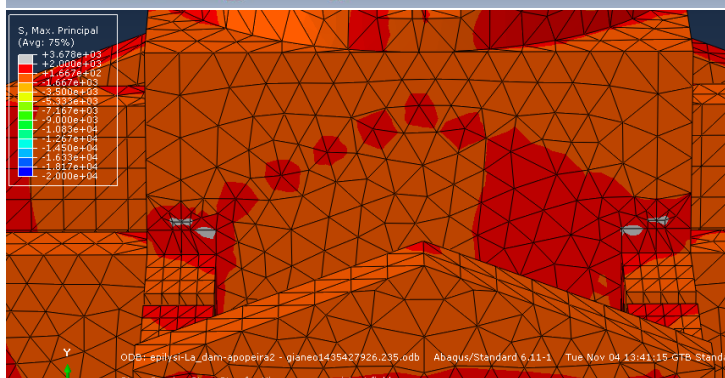
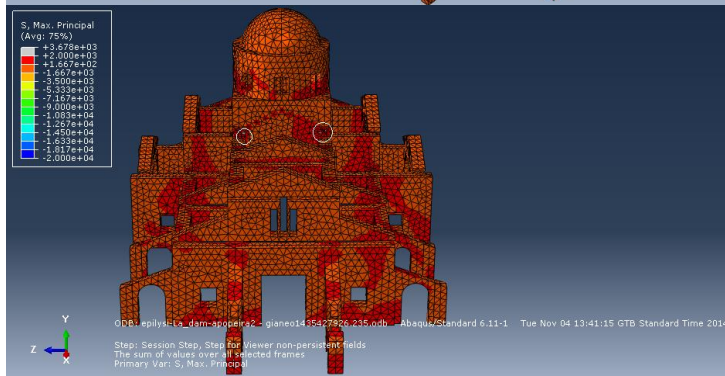
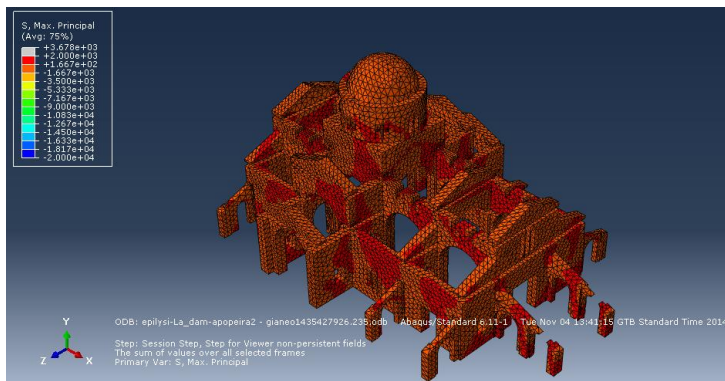
Εικόνα 52 Αποτελέσματα κατά τη στιγμή 3,0 s, 5,45 s και 6,0 s αντίστοιχα από την έναρξη της διέγερσης.

Ενώ όσον αφορά τις χρονικές στιγμές 4,25 s και 4,7 s παρ' ότι η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής δεν περιορίζεται μόνο στην περιοχή του σκυροδέματος, η περιοχή, όμως, που εκτείνεται στο σώμα της φέρουσας τοιχοποιίας είναι ασήμαντη και δεν προκαλεί εκτεταμένες ζημιές που να θέτουν πρόβλημα κατάρρευσης στην κατασκευή. Επιπλέον, όσον αφορά την περιοχή του σκυροδέματος παρ' ότι εμφανίζονται υψηλές τάσεις η υπέρβαση του ορίου δεν καταλαμβάνει ολόκληρη τη διατομή και έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα ούτε σε αυτή την περιοχή. Προς επαλήθευση αυτών επισυνάπτονται τα παρακάτω αποτελέσματα:





Εικόνα Αποτελέσματα κατά τη στιγμή 4,25 s από την έναρξη.

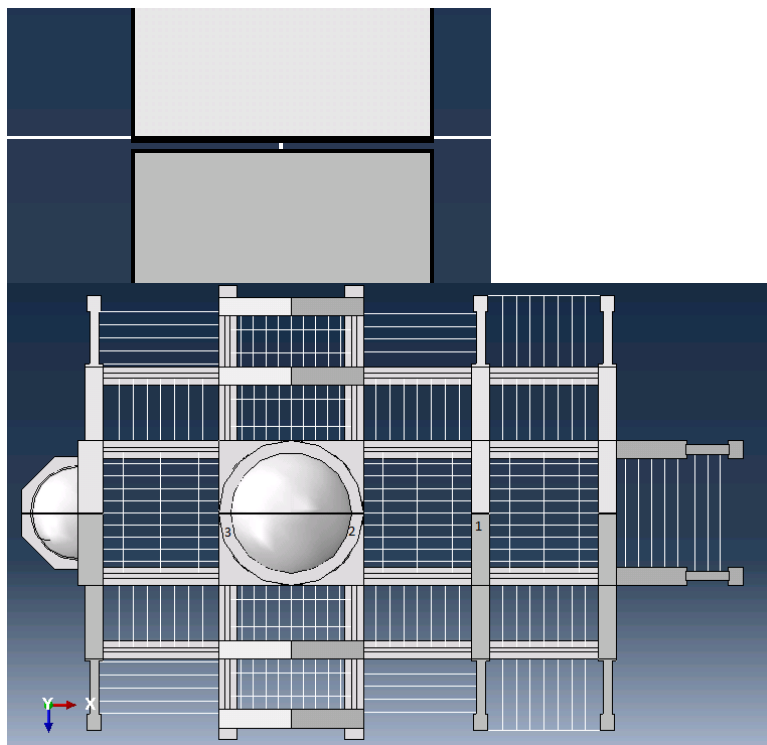


Εικόνα Αποτελέσματα κατά τη χρονική στιγμή 4,7 s από την έναρξη της διέγερσης.

➤ **Στρώση από άοπλο Σκυρόδεμα σε συνδυασμό με Ξύλινους θλιπτήρες και μεταλλικούς ελκυστήρες.**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι ελκυστήρες-θλιπτήρες αποτελούν ένα ανακουφιστικό μέτρο στην περίπτωση των τόξων. Αυτό γιατί αναλαμβάνουν τις οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται στη βάση του τόξου. Όπως όμως και στην πρώτη περίπτωση, δεν είναι δυνατόν να εμφανιστούν οι ευεργετικές τους δράσεις γιατί η ανάλυση είναι ελαστική και έτσι οι ελκυστήρες-θλιπτήρες δεν αναλαμβάνουν την δύναμη που θα αναλάμβαναν στην πραγματικότητα και δεν φαίνεται η ρηγμάτωση της φέρουσας τοιχοποιίας που σταθεροποιείται από την ενεργοποίησή τους. Για αυτό το λόγο όμως πρέπει να βρεθεί η δύναμη που θα αναλάβουν για να διαπιστωθεί αν η διατομή επαρκεί. Έτσι θα γίνει χρήση ενός τεχνάσματος, δηλαδή θα γίνει μία μικρή τομή στο σώμα της κατασκευής έτσι ώστε το μοναδικό στοιχείο που θα ενώνει τα δύο μέλη της να είναι οι ελκυστήρες-θλιπτήρες. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει γνωστή η δύναμη που θα αναλάβουν οι ελκυστήρες-θλιπτήρες, αφού έτσι κι αλλιώς και στην πραγματικότητα οι ελκυστήρες-θλιπτήρες θα αναλάβουν δύναμη όταν υπάρξει μετατόπιση δηλαδή η δομή του τόξου έχει αρχίσει να χάνεται. Κατά τα άλλα οι αναλύσεις δεν έχουν καμία δόση αλήθειας στα αποτελέσματά τους γι' αυτό και δεν επισυνάπτονται ξανά αποτελέσματα από το ABAQUS.

a) **ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ-ΘΛΙΠΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΙ ΣΤΗ ΜΙΚΡΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ**

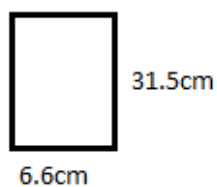


Εικόνα 53 Στις φωτογραφίες από το ABAQUS φαίνεται αυτή η τομή που αναγκάζει τους ελκυστήρες-θλιπτήρες να αναλάβουν δύναμη.

Το ABAQUS δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστεί η φόρτιση σε κάθε χρονική στιγμή του κάθε ελκυστήρα. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν μέσω EXCELL και τα μέγιστα μεγέθη φαίνονται παρακάτω. Η αρίθμηση φαίνεται στη φωτογραφία παραπάνω. Να σημειωθεί ότι λόγω της διεύθυνσης του ναού σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων αλλά και με την ανάλυση που έγινε για αυτά τα δεδομένα στα αποτελέσματα με + συμβολίζεται ο εφελκυσμός του ελκυστήρα ενώ με – η θλίψη των θλιπτήρων ενώ τα μεγέθη αναφέρονται σε KN.

Αριθμός ελκυστήρα- θλιπτήρα	1	2	3
Μέγιστος εφελκυσμός	43,85	51,13	53,7
Μέγιστη θλίψη	-32,73	-19,33	-19,67

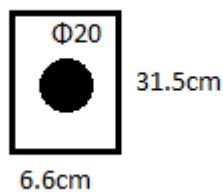
Η διατομή του ξύλινου θλιπτήρα που χρησιμοποιήθηκε είναι 6,6*31,5 σε cm δηλαδή



και οι ιδιότητες του

ΣΥΓΚ. ΞΥΛΕΙΑ		
strength class		GL28
ρ_{mean}	g/m ³	410
$f_{v,k}$	N/mm ²	3
$f_{m,k}$	N/mm ²	28.0
$f_{t,90,k}$	N/mm ²	0.45
$f_{c,0,k}$	N/mm ²	27.0
$f_{c,90,k}$	N/mm ²	6.0
$f_{t,0,k}$	N/mm ²	21.0
$E_{0,mean}$	N/mm ²	12000
G_{mean}	N/mm ²	750
$E_{0,05}$	N/mm ²	9600

Ενώ στο κέντρο του υπάρχει ένας χαλύβδινος ελκυστήρας $\Phi 20$ με μέτρο ελαστικότητας $E = 200\text{GPa}$, τάση διαρροής $f_{yk}=500\text{MPa}$. Δηλαδή η διατομή του θλιπτήρα-ελκυστήρα έχει την εξής μορφή:



Το εμβαδό του ελκυστήρα είναι $A_{μετ} = \pi \cdot R^2 = 3.14 \cdot 1.0^2 = 3,14\text{ cm}^2$

Άρα η δύναμη που μπορεί να αναλάβει ο ελκυστήρας είναι $F = A \cdot f_{yd} = 3,14 \cdot 50 / 1.15 = 136,59\text{ kN} > F_t$

Άρα ο μεταλλικός ελκυστήρας δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα να αναλάβει τη σεισμική διέγερση.

Όσον αφορά τον θλιπτήρα:

Το ενεργό εμβαδό το οποίο αναλαμβάνει τη δύναμη είναι : $A_{net} = b \cdot h - A_{μετ} = 6,6 \cdot 31,5 - 3,14 = 204,76 \text{ cm}^2$

Άρα η μέγιστη θλιπτική τάση που καταπονείται το ξύλο είναι : $\sigma_t = F/A = 32,7 / 204,76 \cdot 10000 = 1597 \text{ KPa} = 1,6 \text{ MPa}$

Θεωρώντας τροποποιητικό συντελεστή $K_{mod} = 0,5$ και συντελεστή ασφαλείας ξύλου $\gamma_M = 1,3$ προκύπτει ότι:=

$$F_{c,d} = K_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M = 0,5 \cdot 27 / 1,3 = 10,38 \text{ MPa}$$

$$I_y = b \cdot h^3 / 12 - \pi \cdot R_{μετ}^4 / 4 = 6,6 \cdot 31,5^3 / 12 - 3,14 / 4 = 17189,95 \text{ cm}^4$$

$$I_z = h \cdot b^3 / 12 - \pi \cdot R_{μετ}^4 / 4 = 31,5 \cdot 6,6^3 / 12 - 3,14 / 4 = 753,89 \text{ cm}^4$$

$$i_y = (I_y / A_{net})^{0,5} = 9,16 \text{ Άρα } \lambda_y = 420 / 9,16 = 45,85$$

$$i_z = (I_z / A_{net})^{0,5} = 3,69 \text{ Άρα } \lambda_z = 420 / 3,69 = 113,82$$

Άρα:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_y / \pi \cdot (f_{c,0,k} / E_{0,05})^{0,5} = 0,77$$

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_z / \pi \cdot (f_{c,0,k} / E_{0,05})^{0,5} = 1,92$$

$$\beta_c = 0,1$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,82$$

$$k_{c,y} = (k_y + (k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2)^{0,5})^{-1} = 0,91$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 2,42$$

$$k_{c,z} = (k_z + (k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2)^{0,5})^{-1} = 0,26$$

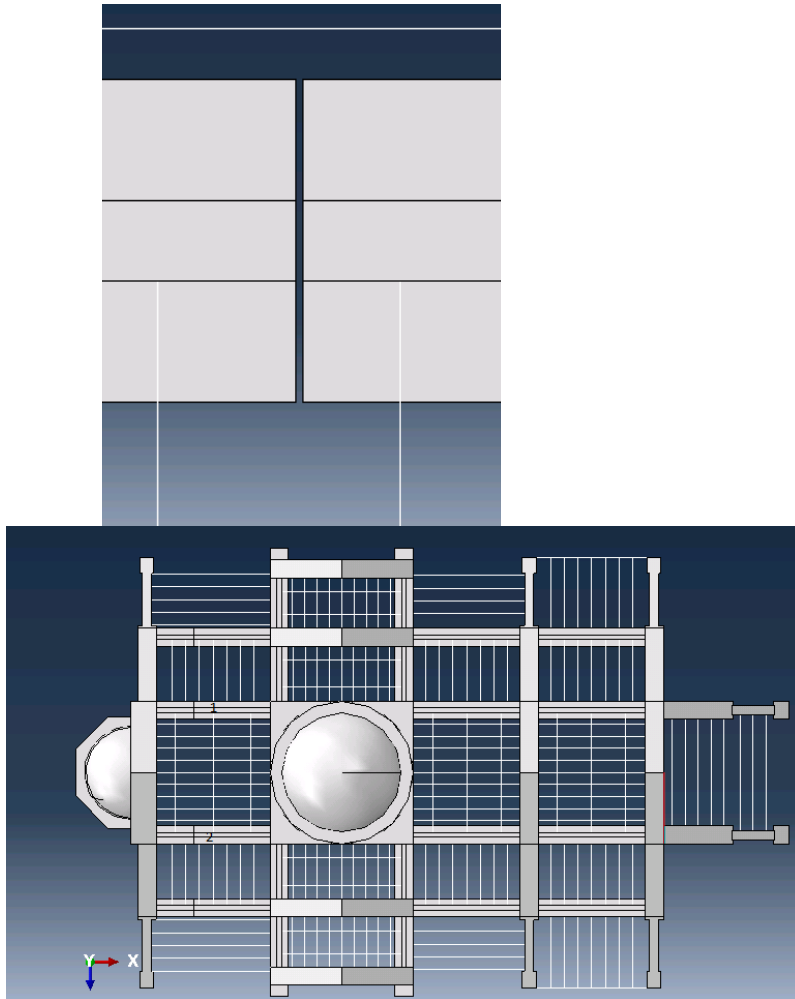
Άρα

$$\sigma_t / (k_{c,y} \cdot f_{t,d}) = 0,16 < 1$$

$$\sigma_t / (k_{c,z} \cdot f_{t,d}) = 0,59 < 1$$

Είναι λοιπόν εμφανές ότι ούτε οι θλιπτήρες αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα.

b) ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ-ΘΛΙΠΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΙ ΣΤΗ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ



Όπως και στον υπολογισμό της άλλης διεύθυνσης έτσι και σε αυτή μέσω του ABAQUS υπολογίστηκε η εφελκυστική και η θλιπτική δύναμη που καταπονεί τον κάθε ελκυστήρα-θλιπτήρα κάθε χρονική στιγμή, ενώ μετά από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με το EXCELL υπολογίζεται η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που καταπονεί τους ελκυστήρες και η μέγιστη θλιπτική δύναμη που καταπονεί τους θλιπτήρες λαμβάνοντας υπόψη και τη φόρτιση λόγω του ίδιου βάρους. Η διατομή

των ελκυστήρων-θλιπτήρων και οι ιδιότητες τους είναι ίδιες με αυτές της άλλης διεύθυνσης για λόγους απλότητας και ομοιομορφίας. Άρα:

Αριθμός ελκυστήρα	1	2
Μέγιστη εφελκυστική δύναμη	80,09	70,12
Μέγιστη θλιπτική δύναμη	-58,2	-56,12

Το εμβαδό του ελκυστήρα είναι $A_{μετ} = \pi * R^2 = 3.14 * 1.0^2 = 3,14 \text{ cm}^2$

Άρα η δύναμη που μπορεί να αναλάβει ο ελκυστήρας είναι $F = A * f_{yd} = 3,14 * 50 / 1.15 = 136,59 \text{ KN} > F_t$

Άρα ο μεταλλικός ελκυστήρας δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα να αναλάβει τη σεισμική διέγερση.

Όσον αφορά τον θλιπτήρα:

Το ενεργό εμβαδό το οποίο αναλαμβάνει τη δύναμη είναι : $A_{net} = b * h - A_{μετ} = 6.6 * 31.5 - 3,14 = 204.76 \text{ cm}^2$

Άρα η μέγιστη θλιπτική τάση που καταπονείται το ξύλο είναι : $\sigma_t = \sigma F / A = 58,2 / 204,76 * 10000 = 2842,35 \text{ KPa} = 2,8 \text{ MPa}$

Θεωρώντας τροποποιητικό συντελεστή $K_{mod} = 0.5$ και συντελεστή ασφαλείας ξύλου $\gamma_M = 1,3$ προκύπτει ότι:

$$f_{t,d} = K_{mod} * f_{t,0,k} / \gamma_M = 0.5 * 27 / 1.3 = 10,38 \text{ MPa}$$

$$I_y = b * h^3 / 12 - \pi * R_{μετ}^4 / 4 = 6,6 * 31,5^3 / 12 - 3,14 / 4 = 17189,95 \text{ cm}^4$$

$$I_z = h * b^3 / 12 - \pi * R_{μετ}^4 / 4 = 31.5 * 6.6^3 / 12 - 3.14 / 4 = 753.89 \text{ cm}^4$$

$$i_y = (I_y / A_{net})^{0.5} = 9.16 \text{ Άρα } \lambda_y = 420 / 9.16 = 45,85$$

$$i_z = (I_z / A_{net})^{0.5} = 3.69 \text{ Άρα } \lambda_z = 420 / 3.69 = 113,82$$

Άρα:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_y / \pi * (f_{c,0,k} / E_{0.05})^{0.5} = 0,77$$

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_z / \pi * (f_{c,0,k} / E_{0.05})^{0.5} = 1,92$$

$$\beta_c = 0.1$$

$$k_y = 0.5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,82$$

$$k_{c,y} = (k_y + (k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2)^{0.5})^{-1} = 0,91$$

$$k_z=0.5*(1+\beta_c*(\lambda_{rez,z}-0.3)+\lambda_{rez,z}^2)=2,42$$

$$k_{c,z}=(k_z+(k_z^2-\lambda_{rez,z}^2)^{0.5})^{-1}=0,26$$

Άρα

$$\sigma_t/(k_{c,y}*f_{t,d})=0,29<1$$

$$\sigma_t/(k_{c,z}*f_{t,d})=0,997<1$$

Άρα έστω και οριακά ούτε οι θλιπτήρες αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα, συνυπολογίζοντας και μια μικρή αντοχή που θα προσφέρει το τόξο το οποίο τώρα δεν βοηθάει καθόλου λόγω της τομής.

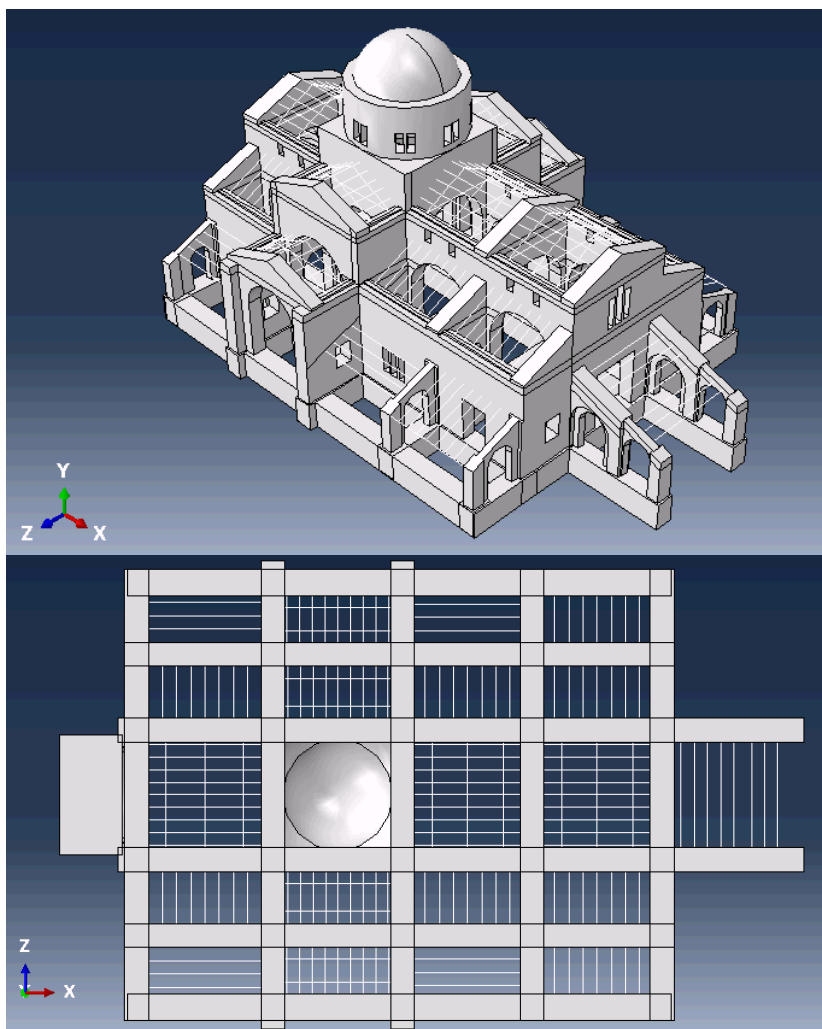
Έλεγχος μετατοπίσεων

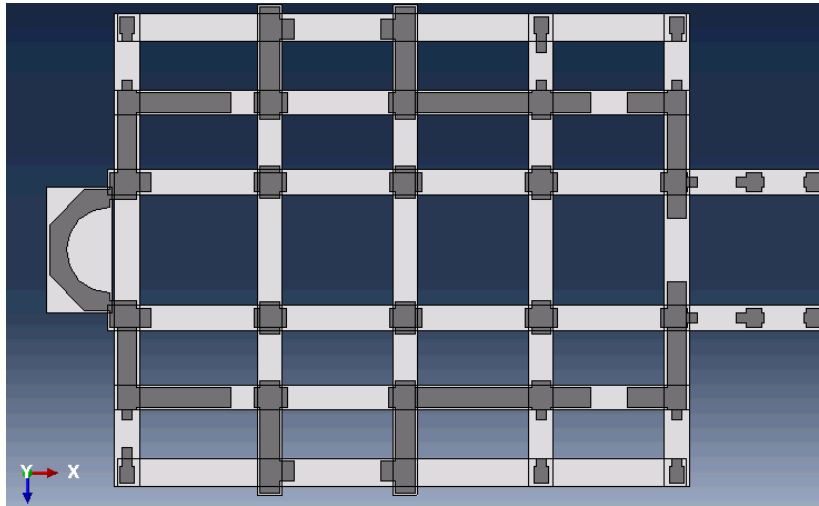
Για την πληρότητα των ελέγχων θα γίνει και ένας έλεγχος μετατοπίσεων στις γενέσεις των τόξων ώστε να υπολογιστούν οι γωνιακές παραμορφώσεις (drift) των κολόνων για να επιβεβαιωθεί ότι είναι εντός ορίων.

Περίπτωση	U1	U3	Ύψος	Drift1	Drift3	Έλεγχος
Arleta	2,01 mm	2.52 mm	3.9	0.52‰	0.65‰	2.7%
La Chalon	0,64 mm	1.5 mm	3.9	0.16‰	0.38‰	2.7%
La Faring	5.21 mm	2.22 mm	3.9	1.34‰	0.57‰	2.7%
La Fletcher	5.12 mm	1.24 mm	3.9	1.31‰	0.32‰	2.7%
La Dam- Χωρίς Ενίσχυση	2.68 mm	1.93 mm	3.9	0.69‰	0.49‰	2.7%
La Dam- Με Ενίσχυση	1.62 mm	1.21 mm	3.9	0.42‰	0.31‰	2.7%

Πρόταση θεμελίωσης

Τέλος θα γίνει μια νύξη στη θεμελίωση της κατασκευής. Η πρόταση είναι να κατασκευαστούν «πεδιλοδοκοί» βάθους 1,5 m και κάτοψης 20 cm μεγαλύτερη από την κάτοψη της τοιχοποιίας και στις δύο διευθύνσεις. Το υλικό είναι και αυτό τοιχοποιία με ιδιότητες όπως της υπόλοιπης τοιχοποιίας, δηλαδή μέτρο ελαστικότητας $E = 2 \text{ GPa}$ και αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό 20 MPa ή 2 MPa και 2 MPa ή 200 KPa αντίστοιχα. Οι φωτογραφίες από το ABAQUS διευκρινίζουν τη γεωμετρία της θεμελίωσης.

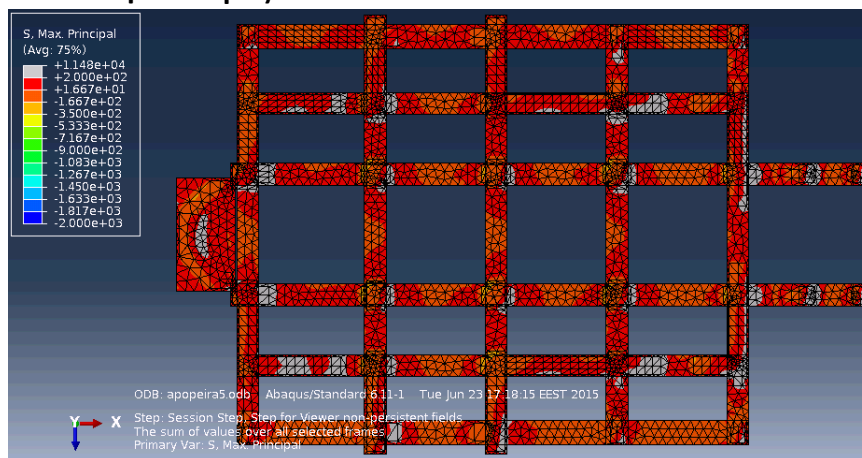


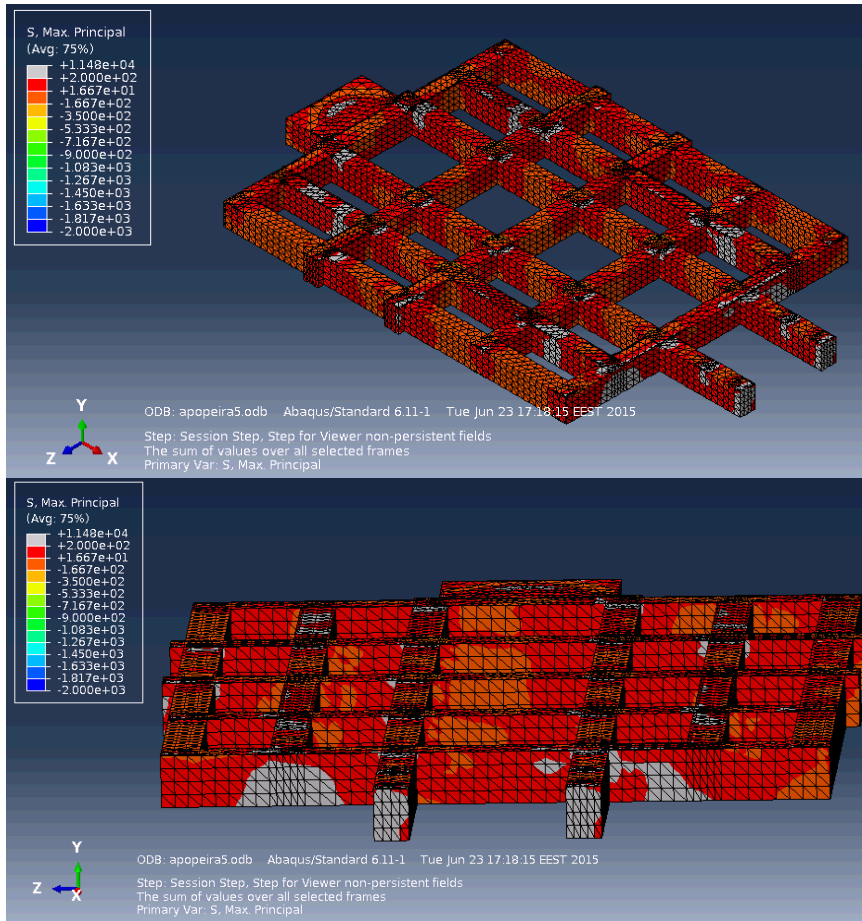


Η κατασκευή στην τελική της μορφή , δηλαδή με τους ελκυστήρες-θλιπτήρες και τις στρώσεις από σκυρόδεμα, υποβλήθηκε σε διέγερση από τα επιταχυσιογραφήματα του La Dam και τα αποτελέσματα για τη θεμελίωση φαίνονται στα παρακάτω αποκόμματα τα οποία αναφέρονται στις δυσμενέστερες χρονικές στιγμές.

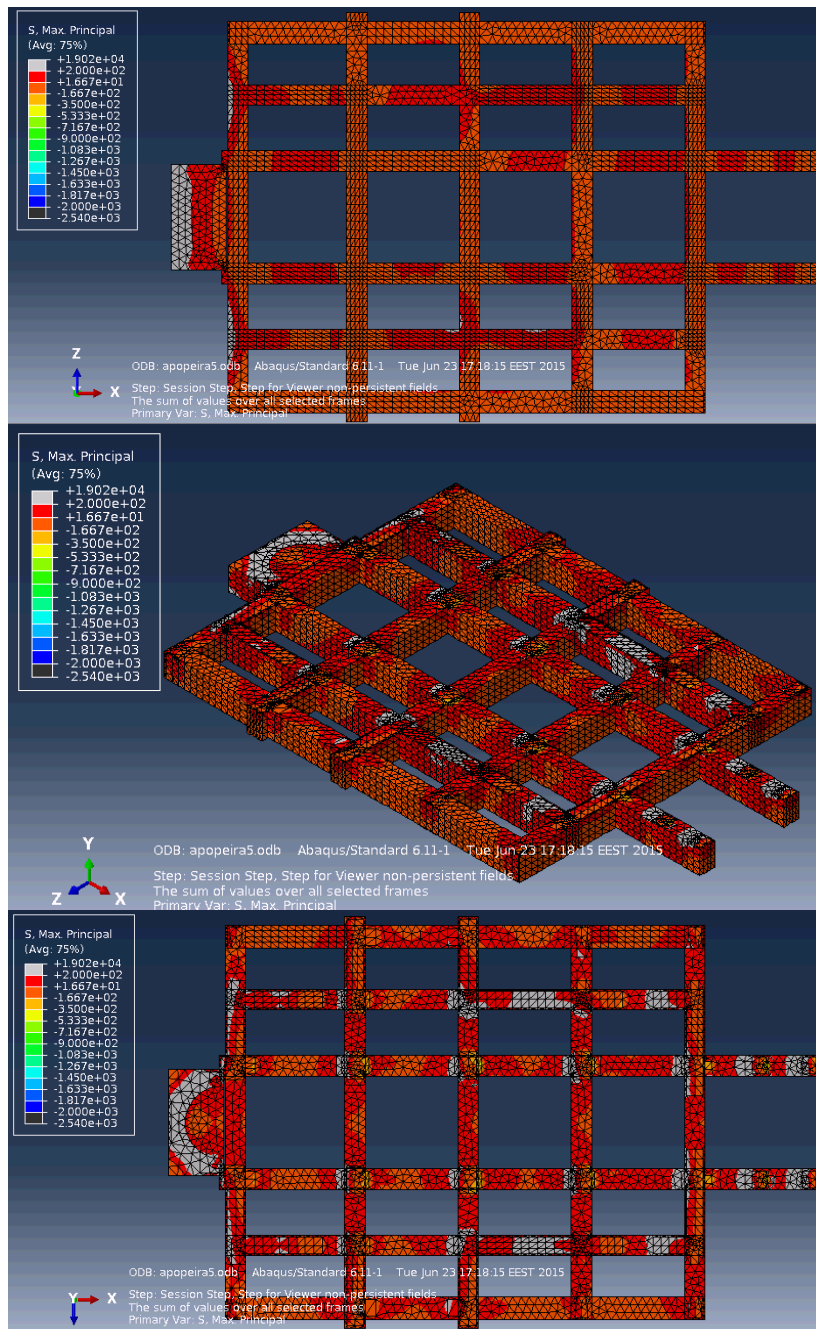
Όριο αντοχής σε εφελκυσμό και θλίψη 200 ΚΡα και 2000 ΚΡα

Εφελκυσμός





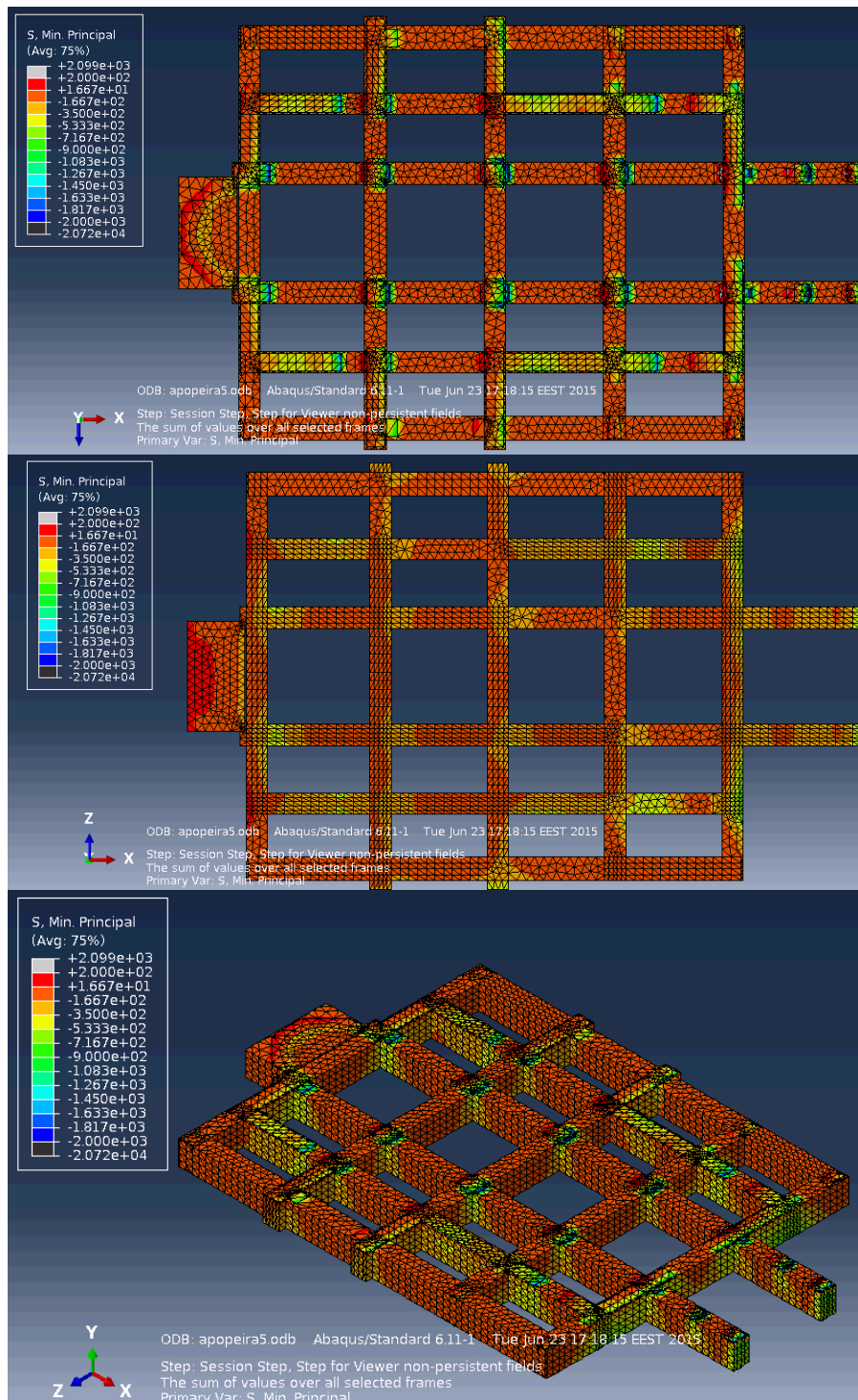
Εικόνες για αποτελέσματα για τη χρονική στιγμή 3,0 s από την έναρξη της διέγερσης



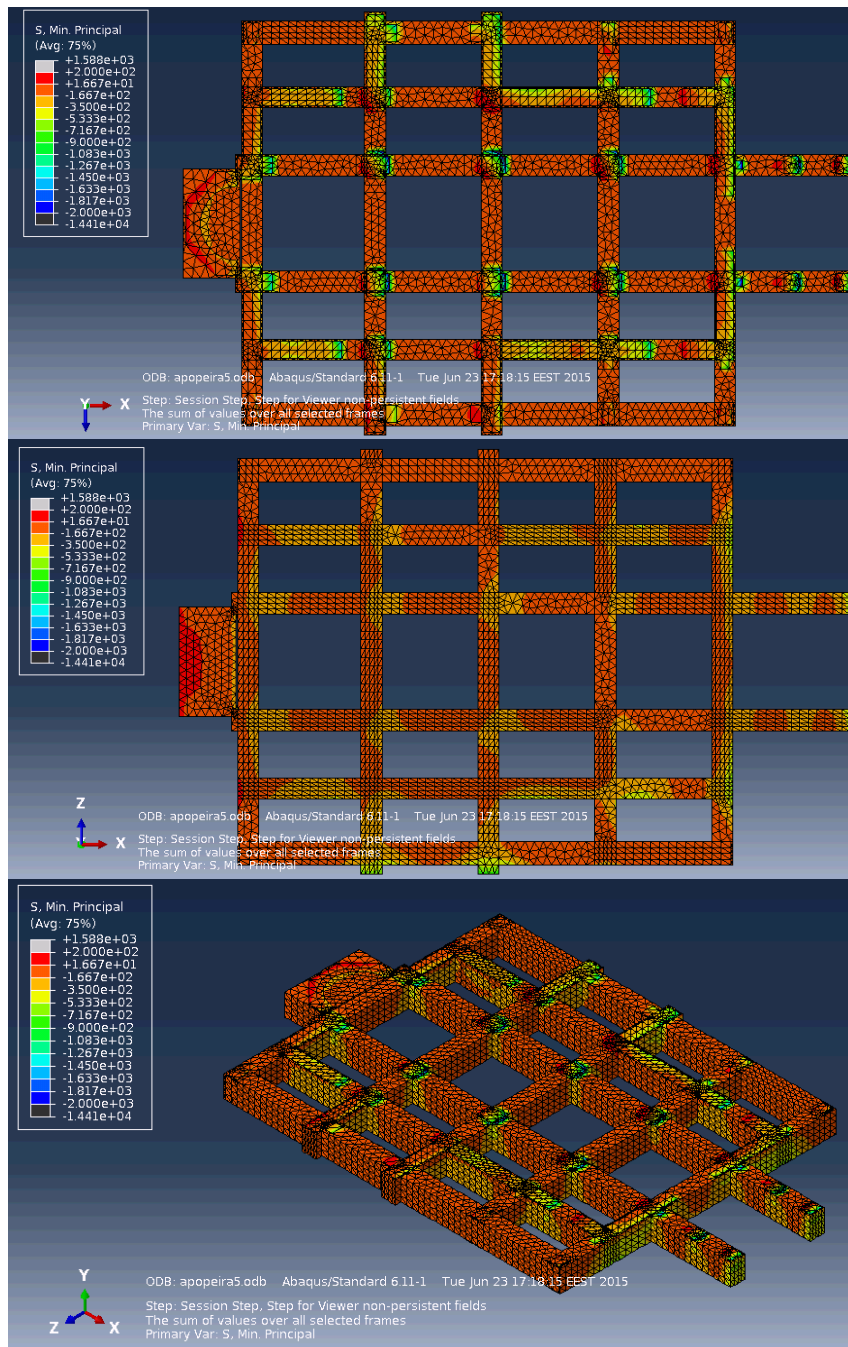
Εικόνες για αποτελέσματα για τη χρονική στιγμή 4,35 s από την έναρξη της διέγερσης.

Από τα αποκόμματα φαίνεται ότι υπάρχει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας σε μερικές εκτεταμένες περιοχές που σε ορισμένα σημεία καταλαμβάνουν όλο το πλάτος της διατομής με αποτέλεσμα η κατασκευή να κινδυνεύει από σοβαρές βλάβες.

Θλίψη



Εικόνες για αποτελέσματα κατά τη χρονική στιγμή 4,35 s από την έναρξη της διέγερσης.

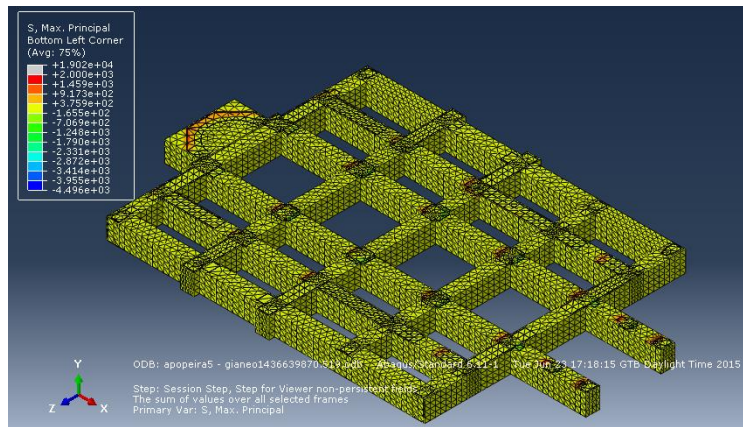
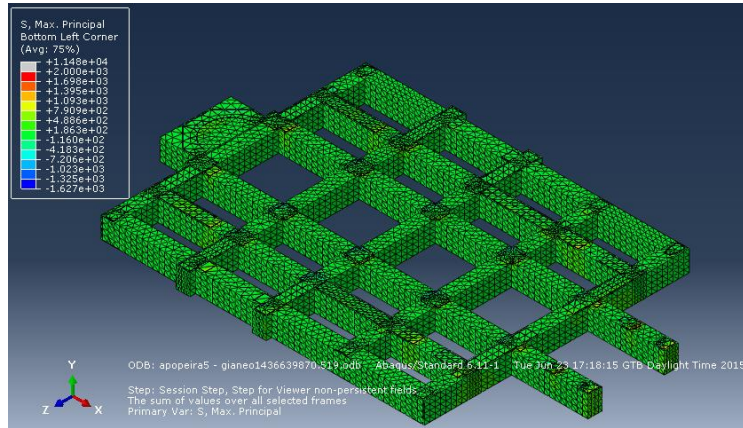


Εικόνες για αποτελέσματα κατά τη χρονική στιγμή 5,1 s από την έναρξη της διέγερσης.

Όσον αφορά τη θλίψη, υπάρχει και εδώ υπέρβασης της αντοχής. Όμως, τα σημεία είναι περιορισμένα και δεν εκτείνονται σε μεγάλες επιφάνειες ούτε καταλαμβάνουν ολόκληρο πλάτος διατομής με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα.

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό και θλίψη 2 ΜΡα και 20 ΜΡα

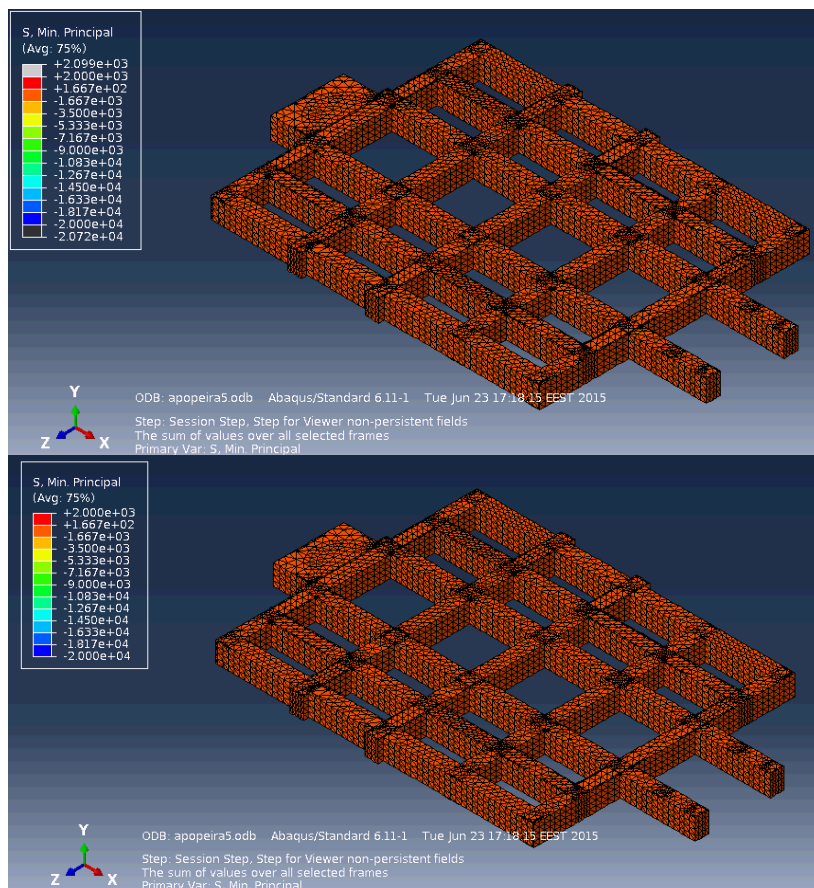
Εφελκυσμός



Εικόνες για αποτελέσματα κατά τις χρονικές στιγμές 3.0s και 4.35s αντίστοιχα

Με όριο εφελκυστικής αντοχής τοιχοποιίας στα 2 ΜΡα είναι φανερό ότι η θεμελίωση δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα να ανταποκριθεί επιτυχώς στη διέγερση αφού δεν υπερβαίνεται σε κανένα σημείο η αντοχή της.

Θλίψη



Εικόνες για αποτελέσματα κατά τις χρονικές στιγμές 4,35 s και 5.1 s αντίστοιχα από την έναρξη της διέγερσης.

Τα αποκόμματα από το ABAQUS κάνουν σαφές ότι με όριο θλιπτικής αντοχής στα 20 MPa η θεμελίωση δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα και ανταποκρίνεται άψογα στη διέγερση.

Τελικό συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνουν ένα σαφές μήνυμα όσον αφορά τη κατασκευή του ναού. Σημαντικότερη παράμετρος για τον έλεγχο της κατασκευής αποτελεί η ποιότητα των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση χαμηλής ποιότητας κονιάματος σε συνδυασμό με χαμηλή αντοχή λιθοσωμάτων η κατασκευή αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα με κίνδυνο κατάρρευσης. Η προσθήκη ξύλινων θλιπτήρων και μεταλλικών ελκυστήρων μπορεί να ενισχύσει τα τόξα καθώς αυτοί αναλαμβάνουν τις οριζόντιες δυνάμεις που τα καταπονούν στις στηρίξεις και δυσκολεύουν τη πιθανή μετατόπιση των στηρίξεών τους που οδηγεί στην κατάρρευση. Σε μελλοντική διερεύνηση του θέματος απαιτείται βέβαια πλαστική ανάλυση για να γίνει πλήρως εμφανή η ευεργετική τους δράση όταν τα τόξα ξεκινάνε να πλαστικοποιούνται. Η στρώση άοπλου σκυροδέματος αλλάζει τη συμπεριφορά του ναού και ενώ έχει ευεργετική δράση στις δυσμενείς χρονικές στιγμές δημιουργεί άλλες εξίσου δύσκολες εντατικές καταστάσεις για τον ναό. Παρά το γεγονός αυτό όμως κρίνεται απαραίτητη για να δημιουργηθεί μια περιμετρική ισχυρή στρώση που, σε συνδυασμό ειδικά με τους ελκυστήρες-θλιπτήρες, μπορεί ίσως να δώσει μια στιβαρότητα στο ναό και να αποφευχθεί η κατάρρευση. Όμως υπάρχουν κάποια θέματα που πρέπει να μελετηθούν στο μέλλον όπως εάν η διαφορετική συστολή ξηράνσεως μεταξύ τοιχοποιίας και σκυροδέματος δημιουργεί επιπλέον πρόβλημα ή μήπως χρειάζεται και οπλισμός για να αναλαμβάνει αυτός τις εφελκυστικές τάσεις και να μην ρηγματώνεται το σκυρόδεμα καθόλου. Αντιθέτως, στην περίπτωση της καλής ποιότητας κονιάματος και ισχυρών λιθοσωμάτων η κατασκευή δείχνει ότι αναλαμβάνει τη διέγερση χωρίς να υποστεί ζημιές και οι βελτιώσεις έχουν πιο πολύ βοηθητικό ρόλο χωρίς να είναι και αναγκαίες. Τέλος, η πρόταση θεμελίωσης, με τις «πεδιλοδοκούς», εντείνει την τελική άποψη ότι η σημαντικότερη μεταβλητή που θα επηρεάσει την κατασκευή είναι η αντοχή της φέρουσας τοιχοποιίας, αφού ενώ στη χαμηλή ποιότητα υλικών έχουμε υπερβάσεις τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν στην αστοχία στην υψηλή ποιότητα η θεμελίωση δεν αντιμετωπίζει κανένα απολύτως πρόβλημα. Βέβαια σε κάποια μελλοντική διερεύνηση του θέματος πρέπει να μελετηθεί αν οι τάσεις που δημιουργεί η θεμελίωση στο έδαφος είναι ανεκτές ή πρέπει να γίνει κάποια εξυγίανση του.

Βιβλιογραφία

- « Αντισεισμικός σχεδιασμός κτηρίων από τοιχοποιία» Miha Tomazevic, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2004
- «Βοηθητικές σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας», Δ. Παπασταματίου, Ι. Ψυχάρης, Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1996
- «Dynamics of structures» Anil K. Chopra, 2nd edition, Prentice Hall 2001
- «Earthquakes- A primer», Bruce A. Bolt, University of California, Berkeley
- «Εισαγωγή στο θέμα της φέρουσας τοιχοποιίας» κείμενο Θεοδόση Π. Τάσιου, Περιοδικό ΣΠΜΕ (Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος), δελτίο 268, Οκτώβριος 1999
- Ευρωκώδικας 6, ENV 1996 « Design of masonry structures »
- Ευρωκώδικας 8, ENV 1998 «Design of structures for earthquake resistance»
- «Κατασκευές από τοιχοποιία» Φ. Καραντώνη, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2004
- «Πειραματική αντοχή υλικών» Ι. Πρασιανάκης, Β. Κωνσταντέλλος, Ι. Μήλιος, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
- «Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας» Π.Γ. Καρύδης, Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1991
- «Σημειώσεις για το μάθημα Προχωρημένη μηχανική της Τοιχοποιίας, ωπλισμένης και άοπλης», Ελισάβετ Βιντζηλαίου, Ε.Μ.Π., Τομέας Δομοστατικής, ΠΜΣ, «Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών», Ιανουάριος 1998
- «Τάσεις, παραμορφώσεις, μέτρα ελαστικότητας» Κ. Λαμπρόπουλος, Διδακτικές σημειώσεις διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών « Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης», 2005
- «Τοιχοποιία και συναφείς κατασκευές, Οικοδομική», Μέρος Α, Κ. Η. Μπίρης, Αθήνα 1997