



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ
ΜΕΣΩ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ»**

Πετροπούλου Ρουμπίνη

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: ΜΟΥΖΑΚΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
Αναπληρωτής καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς προσομοιώματος κατασκευής από τοιχοποιία μέσω μη γραμμικών αναλύσεων»

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ:

Πετροπούλου Ρουμπίνη

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Μουζάκης Χαράλαμπος , Αναπληρωτής καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2022-23

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα άτομα που διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας.

Καταρχάς, ευγνωμονώ θερμά τον καθηγητή κ. Χαράλαμπο Μουζάκη, επιβλέπων μου και αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη που μου παρείχε.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την διδάκτωρ κα. Καράπιττα Λουτσιά για την βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η καθοδήγησή και η υποστήριξής της είναι ανεκτίμητες και αισθάνομαι βαθύτατη ευγνωμοσύνη για τη συνεισφορά της.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην κα. Λυδία Πανουτσουλου, διδακτορική φοιτήτρια του τμήματος, η οποία γενναιόδωρα μοιράστηκε τις γνώσεις της. Η καθοδήγηση, η υπομονή και η προθυμία της να βοηθήσει ήταν αξιοθαύμαστες.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την ακλόνητη υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς προσομοιώματος κατασκευής από τοιχοποιία μέσω μη γραμμικών αναλύσεων. Ειδικότερα, γίνεται μελέτη των πειραματικών δεδομένων που έχουν προκύψει από το ερευνητικό πρόγραμμα «Διερεύνηση μηχανικής συμπεριφοράς πλινθοπερίκλειστης βυζαντινής τοιχοποιίας με ή χωρίς εσωτερικό διάκοσμο και τρόπων επισκευής της, με εφαρμογή στο καθολικό της Ι.Μ.Δαφνίου», το οποίο εκπονήθηκε από τη Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης του Υπουργείου Πολιτισμού σε συνεργασία με το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το δοκίμιο που κατασκευάστηκε υποβλήθηκε σε σεισμικές καταπονήσεις με σκοπό την εξέταση της σεισμικής του απόκρισης.

Στην παρούσα εργασία, εκτελείται προσομοίωση του συγκεκριμένου δοκιμίου μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων «Abaqus» ούτως ώστε να υπολογιστεί η σεισμική του συμπεριφορά.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται, αρχικά, μια μικρή εισαγωγή στις θολωτές κατασκευές, με έμφαση στα σταυροθόλια και στην ευαισθησία που αυτά εμφανίζουν στις σεισμικές καταπονήσεις. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της περίκλειστης τοιχοποιίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο, περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή του πειράματος που εκτελέσθηκε στην σεισμική τράπεζα. Ειδικότερα, περιγράφονται οι ιδιότητες των υλικών και η γεωμετρία του δοκιμίου, οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων μέτρησης, οι επιβαλλόμενες σεισμικές δοκιμές, καθώς και η σεισμική απόκριση της κατασκευής στο τέλος αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, λαμβάνει χώρα η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Με χρήση του λογισμικού DADiSP, επιτυγχάνεται μείωση του θορύβου των υπό μελέτη σημάτων. Προσδιορίζεται η μεταβολή των ιδιοσυχνοτήτων κατά την διάρκεια των σεισμικών δοκιμών. Γίνεται μελέτη των επιταχύνσεων και μετατοπίσεων σε συγκεκριμένες θέσεις της κατασκευής. Υπολογίζονται οι σχετικές μετακινήσεις και γωνιακές παραμορφώσεις στις κρίσιμες περιοχές του δοκιμίου.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην προσομοίωση της κατασκευής μέσω προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά, η προσομοίωση γίνεται μέσω ελαστικής ανάλυσης (Abaqus Standard) και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τα πειραματικά δεδομένα. Εν συνεχεία, εκτελούνται δυο μη γραμμικά ελαστικές αναλύσεις (Abaqus Explicit), όπου στη δεύτερη έχουν μειωθεί οι αντοχές των υλικών του σταυροθολίου. Ακολουθεί η σύγκριση των δεδομένων των ανελαστικών αναλύσεων τόσο μεταξύ τους όσο με τα πειραματικά και με τα γραμμικά ελαστικά αποτελέσματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν.

ABSTRACT

The subject of this master thesis is the investigation of the seismic response of masonry, through nonlinear analyses of a specimen consisting of a brick made cross-vault which rests on two parallel piers, made of three-leaf stone masonry. Specifically, the study focuses on the experimental data derived from the research program "Investigation of mechanical behavior of three-leaf byzantine masonry, with or without mosaics, and ways of restoration: application on Dafni Monastery" conducted by the Hellenic Ministry of Culture in association with the Laboratory of Concrete Structures and the Laboratory of Earthquake Engineering of the National Technical University of Athens. The constructed specimen was subjected to seismic loading to examine its seismic response.

In this thesis, the simulation of the specific specimen is performed using the finite element program "Abaqus" to calculate its seismic behavior.

Chapter 1 begins with a brief introduction to vaulted structures, focusing on groin vaults and their sensitivity to seismic loading. Subsequently, the basic characteristics of the enclosed masonry construction are presented.

Chapter 2 includes a detailed description of the experiment conducted in the seismic laboratory. Specifically, it describes the properties of the materials, the geometry of the specimen, the placement of measuring instruments, the imposed seismic tests and the seismic response of the construction at the end of these tests.

Chapter 3 focuses on the experimental data processing. The measured seismic response signals are filtered through the DADiSP software. Also, is determined the variation of natural frequencies during the seismic tests. The accelerations and displacements at specific positions of the construction are studied, and the relative displacements and inter story drift in critical areas of the specimen are calculated.

Chapter 4 addresses the simulation of the construction using the finite element program Abaqus. Initially, the simulation is performed through elastic analysis (Abaqus Standard), and the results are compared with the experimental data. Subsequently, two nonlinear elastic analyses (Abaqus Explicit) are conducted, with reduced material strengths in the second analysis. A comparison of the results of the nonlinear analyses is performed, both among themselves as well as with the experimental and linear elastic data.

Chapter 5 provides a summary of the key conclusions derived from the study.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. ΘΟΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	1
1.2. ΣΤΑΥΡΟΘΟΛΙΟ.....	1
1.3. ΠΕΡΙΚΛΕΙΣΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΛΙΑ.....	4
1.4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΚΛΕΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΛΙΑΣ.....	4
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	7
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I.....	8
2.2.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I.....	8
2.2.2. ΥΛΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I (ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΙΘΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΪΑΜΑΤΟΣ).....	9
2.2.3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	10
2.3. ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	12
2.4. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΡΩΓΜΩΝ.....	13
3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	15
3.1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΘΟΥΡΥΒΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	15
3.1.1. ΜΕΙΩΣΗ ΘΟΥΡΥΒΟΥ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	15
3.1.2. ΜΕΙΩΣΗ ΘΟΥΡΥΒΟΥ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	15
3.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	16
3.3. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΚΟΡΥΦΗΣ A1X.....	19
3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ A2X/A3X.....	20
3.5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ D17 & D18.....	21
3.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ D17/D18.....	23
3.7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ RD17 & RD18.....	25
3.8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ RD17/η & RD18/η.....	26
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	27
4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I.....	27
4.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	28
4.3. ΈΛΕΓΧΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ Fx, Fy.....	28
4.4. ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ABAQUS STANDARD.....	29
4.4.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ A1X ΚΑΙ A2X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	29
4.4.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ D17X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	34
4.4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ A1X, A2X, A3X.....	35
4.5. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ABAQUS EXPLICIT.....	36
4.5.1. ΔΟΚΙΜΗ I.....	37
4.5.1.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ A1X ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ D17X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	37
4.5.1.2. ΘΕΣΕΙΣ ΘΡΑΨΕΩΝ.....	41
4.5.2. ΔΟΚΙΜΗ II.....	45
4.5.2.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ A1X ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ D17X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	45
4.5.2.2. ΘΕΣΕΙΣ ΘΡΑΨΕΩΝ.....	49
4.5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ I & II.....	54
4.5.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ-ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ I & II.....	55
5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	63

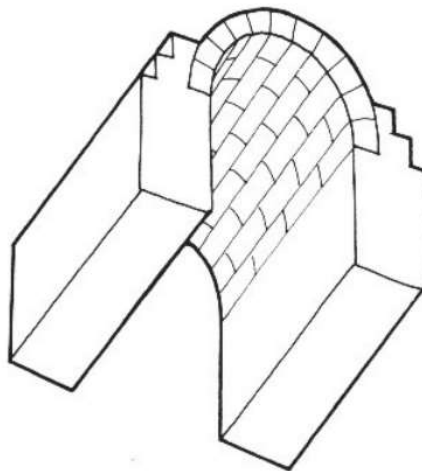
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υπό μελέτη προσομοίωμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μία κατασκευή από περικόλειστη τοιχοποιία και σταυροθόλιο από οπτοπλινθοδομή. Για λόγους πληρότητας γίνεται αναφορά στις θολωτές κατασκευές και ειδικότερα στα σταυροθόλια, στη φέρουσα τοιχοποιία και ειδικότερα στην περικόλειστη με περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς αυτής.

1.1. ΘΟΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι θολωτές κατασκευές εντοπίζονται σε πολλούς πολιτισμούς ήδη από την προϊστορική εποχή. Έχουν αποτελέσει σημείο αναφοράς σε θρησκευτικούς χώρους λατρείας, αρχαίους τάφους, ακόμη και σε πρωτόγονα κτίσματα. Οι διαστάσεις και η αρχιτεκτονική τους ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή, τη χρονολογική περίοδο, την τεχνοτροπία καθώς και των ιδιοτήτων των δομικών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί. Ενδεικτικά, αναφέρονται δύο βασικές κατηγορίες γεωμετρικού σχηματισμού της επιφάνειας θολωτών κατασκευών: γεωμετρική επιφάνεια που δημιουργείται από την περιστροφή τμήματος τόξου περί κατακόρυφο άξονα και από την μετακίνηση τμήματος τόξου κατά μήκος οριζόντιου επιπέδου.

Η σημαντική, όμως, ανάπτυξη και εφαρμογή των θολωτών κατασκευών έλαβε χώρα κατά τη ρωμαϊκή εποχή, καθώς η χρήση τους επεκτάθηκε ως κατασκευαστικά και μορφολογικά στοιχεία. Κυρίως, αξιοποιήθηκαν για την αναβάθμιση της αρχιτεκτονικής των εσωτερικών χώρων κτιρίων, μία πτυχή που απασχολούσε ιδιαίτερος τη ρωμαϊκή αρχιτεκτονική. Ειδικότερα, οι θολωτές κατασκευές παρέχουν τη δυνατότητα να γεφυρώνονται πολύ μεγαλύτερα ανοίγματα σε σύγκριση με το προγενέστερο ελληνικό σύστημα της δοκού επί στύλων, ενώ ταυτόχρονα συμβάλουν στην αύξηση του ύψους των εσωτερικών χώρων. Στο σχήμα 1.1. αναπαρίσταται ένας ρωμαϊκός θόλος, παραλληλόγραμμης κάτοψης.

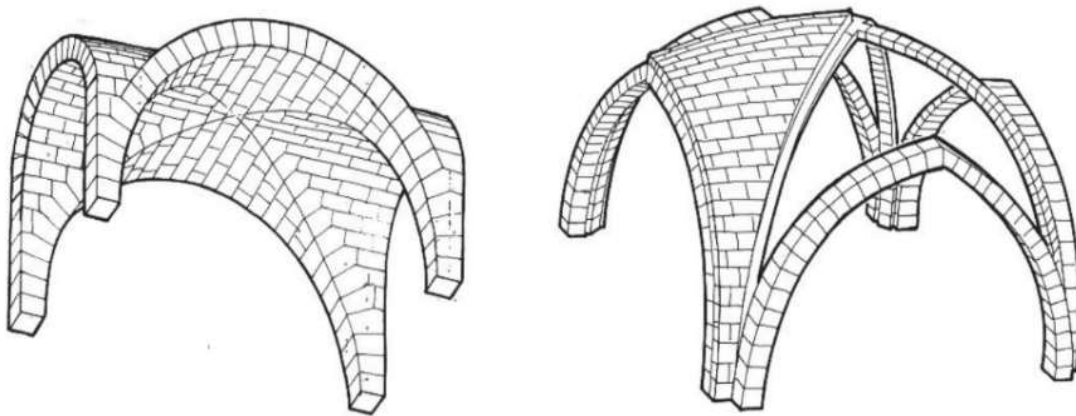


Σχήμα 1.1. Ρωμαϊκός θόλος, παραλληλόγραμμης κάτοψης

1.2. ΣΤΑΥΡΟΘΟΛΙΟ

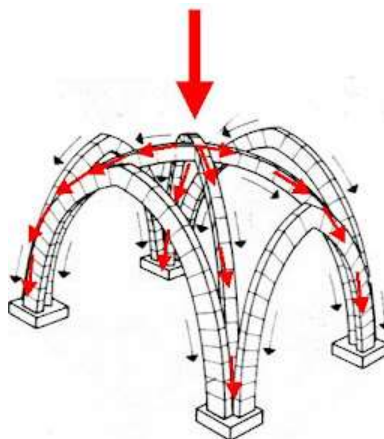
Η χρήση του σταυροθολίου στην αρχιτεκτονική ξεκινά από τη ρωμαϊκή εποχή, όπου χρησιμοποιούταν για τη στέγαση τετραγώνων ή σχεδόν τετραγώνων χώρων μέσω της αλληλοτομίας ημικυλινδρικών επιφανειών. Κατά τη βυζαντινή εποχή, η στέγαση χώρων με σταυροθόλιο εξαπλώνεται και εμφανίζεται

σε διάφορες παραλλαγές. Όσον αφορά τη δυτική μεσαιωνική αρχιτεκτονική, το σταυροθόλιο παρουσιάζει ευρεία χρήση, λόγω της συμμετρικότητας ως προς τη στατική του συμπεριφορά, καθώς και της ευελιξίας στη διαμόρφωση του εσωτερικού χώρου που παρείχε η στήριξη επί υποστυλωμάτων αντί συμπαγούς τοιχοποιίας. Επιπλέον, η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται και από την εφαρμογή του οξυκόρυφου τόξου ως μέσου αναφοράς για τη χάραξη του σταυροθολίου, «υψίκορμη αρχιτεκτονική». Γενικά, το σταυροθόλιο εξελίχθηκε γεωμετρικά με την προσθήκη επιπλέον νευρώσεων διατεταγμένων ακτινωτά περί του άξονα στήριξης, διαμορφώνοντας διαφορετικά ύψη στις απολήξεις των τόξων. Στις εικόνες που ακολουθούν (σχήμα 1.2) παρουσιάζονται, αριστερά, σταυροθόλιο βυζαντινού τύπου και δεξιά, σταυροθόλιο γοθτικού τύπου.



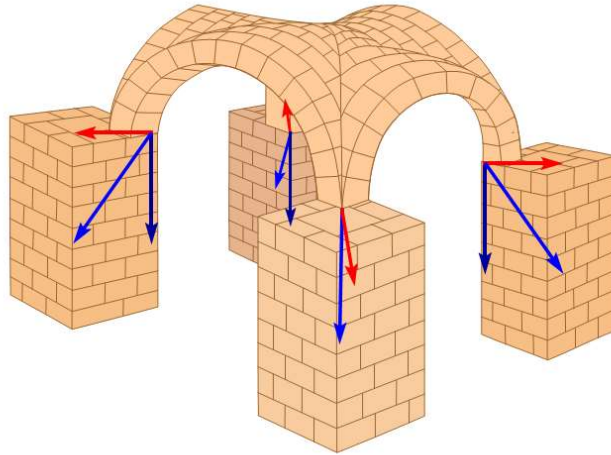
Σχήμα 1.2. Αριστερά, σταυροθόλιο βυζαντινού τύπου. Δεξιά, σταυροθόλιο γοθτικού τύπου.

Σε ένα τυπικό σταυροθόλιο, οι τάσεις των κατακόρυφων φορτίων του ίδιου βάρους, μεταφέρονται από το κέντρο προς τα εξωτερικά στοιχεία του θόλου και μοιράζονται στις τέσσερις γενέσεις των τόξων. Προφανώς και στις θέσεις αυτές, τα φορτία βρίσκονται υπό κάποια κλίση, δεν είναι δηλαδή απολύτως κατακόρυφα. Στο σχήμα 1.3. παρουσιάζεται η μεταφορά των φορτίων αυτών για την περίπτωση ενός γοθτικού σταυροθολίου.



Σχήμα 1.3. Μεταφορά τάσεων κατακόρυφων φορτίων ίδιου βάρους σε γοθτικού τύπου σταυροθόλιο.

Στο σχήμα 1.4. που ακολουθεί, φαίνεται η μεταφορά των δυνάμεων από τις βάσεις των τόξων στις στηρίξεις (σε σταυροθόλιο βυζαντινού τύπου). Ειδικότερα, η πλάγια δύναμη αναλύεται σε μία κατακόρυφη και μια οριζόντια συνιστώσα. Στις θέσεις αυτές υπάρχει απαίτηση υποσυλωμάτων σημαντικής διατομής, ώστε να παραλάβουν τα κρίσιμα φορτία.



Σχήμα 1.4. Μεταφορά πλάγιας δύναμης από τις βάσεις των τόξων στις στηρίξεις σε βυζαντινού τύπου σταυροθόλιο.

Οι τέσσερις πλευρές του χώρου μπορούν να είναι ανοικτές ή να καλύπτονται με μεγάλα παράθυρα. Επομένως, τα σταυροθόλια έχουν πλεονεκτήματα έναντι των απλών θόλων, καθώς παρέχουν βελτιωμένο φυσικό φωτισμό του εσωτερικού χώρου.

Όσον αφορά τη σεισμική απόκριση των σταυροθολίων, αυτή είναι σημαντική τόσο σε τοπική όσο και σε γενική κλίμακα. Σε τοπική κλίμακα, η κατάρρευσή τους μπορεί να προκαλέσει ζημιές και τραυματισμούς. Σε γενική κλίμακα, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το μηχανισμό κατάρρευσης ολόκληρου του κτιρίου, καθώς αποτελούν βαριά οριζόντια στοιχεία (σε σύγκριση με ξύλινα πατώματα) που κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων δύναται να παράγουν μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις στους πλευρικούς τοίχους. Για αυτούς τους λόγους, η αξιολόγηση της σεισμικής ευαισθησίας των σταυροθολίων είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των μνημείων.

1.3. ΠΕΡΙΚΛΕΙΣΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Ο όρος «περίκλειστη τοιχοποιία» ή διαφορετικά «τρίστρωτη» αναφέρεται σε ένα σύστημα αποτελούμενο από δύο εξωτερικές στρώσεις λιθοσωμάτων και ενδιάμεσα, στον πυρήνα, από το υλικό πλήρωσης – μικρές, δηλαδή, πέτρες με κονίαμα, τοποθετημένο χωρίς καμία συμπύκνωση. Η τρίστρωτη τοιχοποιία συνιστά τον πιο σύνηθες τρόπο δόμησης φέρουσας τοιχοποιίας ιστορικών κατασκευών του Ελλαδικού χώρου. Στο σχήμα 1.5. που ακολουθεί, παρουσιάζεται η φωτογραφία μιας υπό κατασκευή περίκλειστης τοιχοποιίας, η οποία προέρχεται από τις σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Προχωρημένη Μηχανική της Τοιχοποιίας»



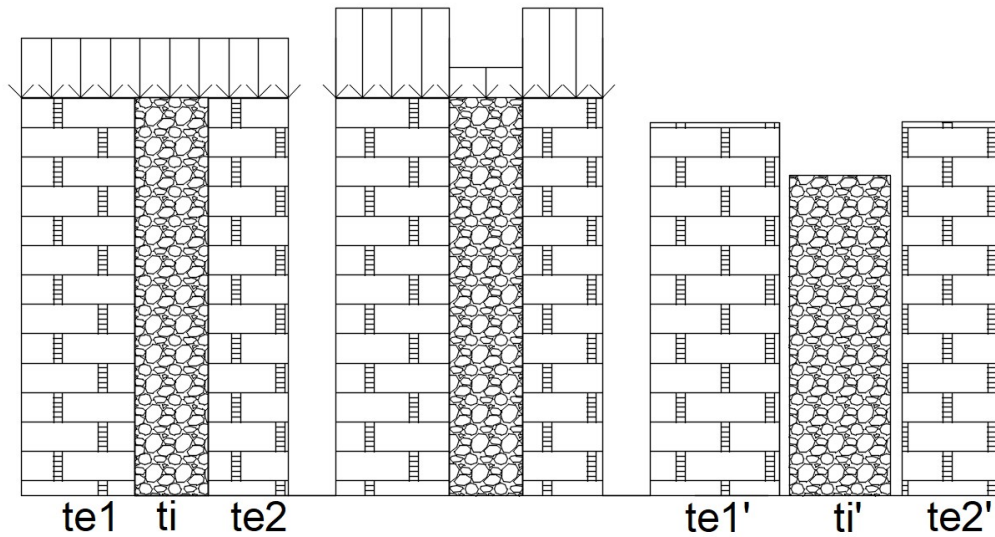
Σχήμα 1.5. Φωτογραφία περίκλειστης τοιχοποιίας

1.4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΚΛΕΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.

Η τοιχοποιία, γενικά, χαρακτηρίζεται ως ένα ανομοιογενές, ανισότροπο και ψαθυρό υλικό. Ακόμη, παρουσιάζει υψηλή θλιπτική αντοχή, σε αντίθεση με την αντίστοιχη εφελκυστική, η οποία δίνει πολύ μικρές τιμές. Επιπροσθέτως, η αστοχία της τοιχοποιίας οφείλεται στην αστοχία του ισχυρού υλικού (λιθοσώματος) και όχι στην αστοχία του ασθενούς υλικού (κονίαμα).

Στην περίπτωση της περίκλειστης τοιχοποιίας, αρχικά, θεωρείται ότι το θλιπτικό κατακόρυφο φορτίο κατανέμεται με ομοιόμορφο τρόπο ως προς το συνολικό πάχος αυτής. Οι δύο εξωτερικές παρειές, αποτελούμενες από λιθοσώματα, λαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό του φορτίου. Αντιθέτως, το υλικό πλήρωσης του πυρήνα βρίσκεται υπό χαμηλή θλιπτική τάση. Λόγω, όμως, της μεγαλύτερης παραμορφωσιμότητας που εμφανίζεται στο ασθενές γέμισμα, τόσο ως προς τον οριζόντιο όσο και ως

προς τον κατακόρυφο άξονα, ασκούνται οριζόντιες τάσεις επί των εξωτερικών φύλλων του συστήματος. Συνεπώς, οι εξωτερικές παρειές λαμβάνουν ταυτόχρονα οριζόντιες τάσεις και ισχυρές κατακόρυφες. Η πιθανή αστοχία της συνάφειας μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων οδηγεί σε αστοχία των εξωτερικών παρειών λόγω εκτός επιπέδου κάμψης. Η παραπάνω περιγραφή παρουσιάζεται και στο σχήμα 1.6 που ακολουθεί:



Σχήμα 1.6. Συμπεριφορά περικλειστης τοιχοποιία σε ομοιόμορφα κατακατόρυφο φοερτίο.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Μονή Δαφνίου, ή αλλιώς Μονή Κοιμήσεως της Θεοτόκου (σχήμα 2.1.), όπου βρίσκεται στις παρυφές του άλσους Χαϊδαρίου Αττικής, κατατάσσεται σε ένα από τα σημαντικότερα μνημεία της Βυζαντινής περιόδου και χαρακτηρίζεται ως μνημείο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς, καθώς από το 1990 προστατεύεται από την UNESCO.



Σχήμα 2.1. Φωτογραφία από το Προαύλιο της Μονής Δαφνίου.

Υστέρα από τις βλάβες που προκλήθηκαν στο μνημείο λόγω του καταστροφικού σεισμού της Αθήνας στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 εντάσεως $M_s=5.9$, το Ελληνικό Υπουργείο Πολιτισμού ενεργοποίησε μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων ούτως ώστε να διερευνηθεί η δυναμική συμπεριφορά του μνημείου και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την επισκευή του.

Στα πλαίσια αυτών των ερευνών έλαβε χώρα το ερευνητικό πρόγραμμα «Διερεύνηση μηχανικής συμπεριφοράς πλινθοπερίκλειστης βυζαντινής τοιχοποιίας με ή χωρίς εσωτερικό διάκοσμο και τρόπων επισκευής της, με εφαρμογή στο καθολικό της Ι. Μ. Δαφνίου», το οποίο εκπονήθηκε από τη Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης του Υπουργείου Πολιτισμού σε συνεργασία με το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τμήμα του ερευνητικού προγράμματος αποτέλεσε η κατασκευή πειραματικού μοντέλου και η καταπόνησή του μέσω σεισμικών διεγέρσεων. Οι δοκιμές που έγιναν επί της σεισμικής τράπεζας κατανέμονται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το υπό μελέτη δοκίμιο (Δοκίμιο Ι) υποβάλλεται σε κλιμακωτά αυξανόμενης έντασης σεισμικές διεγέρσεις μέχρι το όριο αστοχίας του. Εν συνεχεία, κατά το δεύτερο στάδιο του πειράματος, στο αρχικό δοκίμιο γίνεται τοπική αποκατάσταση των ρωγμών του

(Δοκίμιο II) και επαναλαμβάνεται η διαδικασία σεισμικών καταπονήσεων του πρώτου σταδίου. Τέλος, στο τρίτο στάδιο του πειράματος, το ρηγματωμένο δοκίμιο II επισκευάζεται εφαρμόζοντας καθολικά ένεμα υψηλής διεισδυτικότητας (Δοκίμιο III) και υποβάλλεται ξανά σε σεισμικές διεγέρσεις μέχρι το σημείο αστοχίας.

Για τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μελέτη μόνο του πρώτου σταδίου του πειράματος (Δοκίμιο I).

2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I

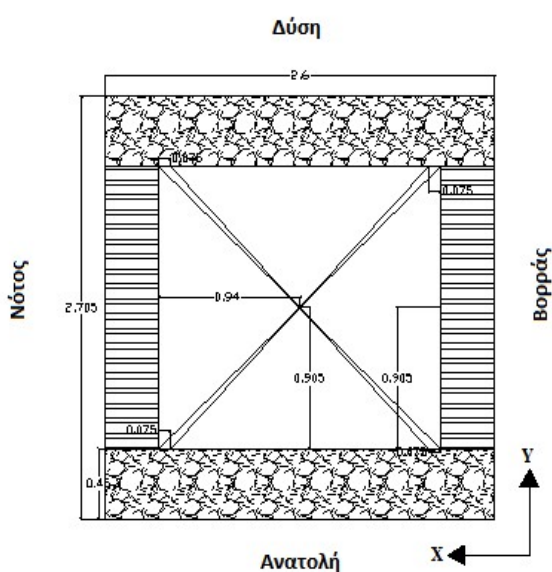
2.2.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I

Το δοκίμιο I αποτελείται από δύο παράλληλους οπτοπλίνθινους τοίχους, κατασκευασμένους σύμφωνα με το πλινθορίκλειστο σύστημα, στους οποίους στηρίζεται ένα σταυροθόλιο. Ο τύπος δόμησης και οι ιδιότητες της τοιχοποιίας έχουν επιλεγεί βάσει αυτών που απαντώνται στην Ι.Μ. Δαφνίου. Λόγω του περιορισμού των διαστάσεων του σεισμικού προσομοιωτήρα σε 4.00m x 4.00m, το δοκίμιο σχεδιάστηκε υπό κλίμακα 2:3. Ακόμη, για την εξασφάλιση συνθηκών πάκτωσης μεταξύ δοκιμίου και σεισμικού προσομοιωτήρα, η κατασκευή του δοκιμίου έγινε επί μεταλλικής βάσης (μεταλλικές δοκοί ΗΕΒ300) και, ύστερα, αυτή στερεώθηκε στη σεισμική τράπεζα μέσω 36 κοχλιών (Μ30, ποιότητα 8.8).

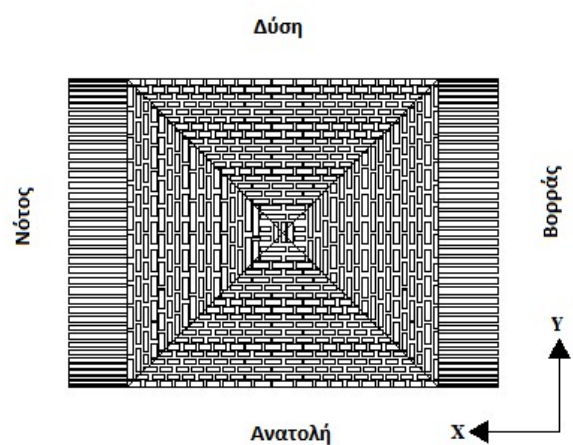
Ακολουθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου I:

- Κάτοψη δοκιμίου I: 2.705m x 2.60m
- Συνολικό ύψος (κατά προσέγγιση): 3.12m
- Συνολικό πάχος τριστρωτης τοιχοποιίας: 0.45m

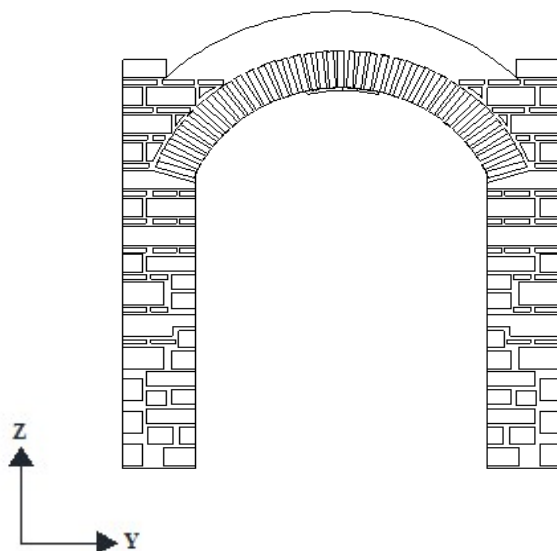
Τα κάτωθι σχήματα (σχήμα 2.2. έως 2.5) αναπαριστούν την κάτοψη και τις όψεις του υπό μελέτη δοκιμίου. Οι άξονες που παρουσιάζονται συμπίπτουν με τους αντίστοιχους άξονες του σεισμικού προσομοιωτήρα όταν έλαβαν χώρα οι σεισμικές διεγέρσεις.



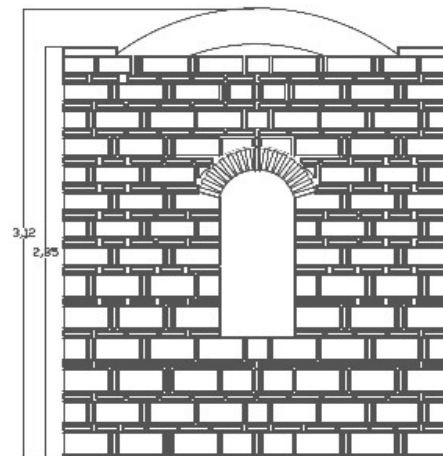
Σχήμα 2.2. Κάτοψη δοκιμίου,



Σχήμα 2.3. Άνοψη οροφής δοκιμίου



Σχήμα 2.4.. Βόρεια και νότια όψη δοκιμίου



Σχήμα 2.5. Ανατολική και δυτική όψη δοκιμίου

2.2.2. ΥΛΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ι (ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΙΘΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ)

Ο κογχλιάτης λίθος (fossiliferous marl limestone) και ο συμπαγής αμμόλιθος (solid sandy marl sandstone) αποτελούν τους επικρατέστερους τύπους λιθοσωμάτων που εντοπίζονται στην ΙΜ. Δαφνίου. Για την κατασκευή του δοκιμίου επιλέχθηκε τραβερτίτης (travertine) καθώς παρουσιάζει παραπλήσια μηχανικά χαρακτηριστικά με τους ανωτέρω λίθους (Πίνακας 2.1). Επίσης, οι οπτόπλινθοι της τοιχοποιίας του μνημείου μετρήθηκε ότι είχαν αντοχή 15 Μρα, οπότε για το δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν συμπαγείς οπτόπλινθοι μέσης θλιπτικής αντοχής 17 Μρα.

Πίνακας 2.1: Μηχανικά χαρακτηριστικά λίθων τοιχοποιίας Ι.Μ. Δαφνίου και δοκιμίου

Τύπος λίθου	Θλιπτική αντοχή (Μρα)	Πυκνότητα (g/cm ³)
Κογχλιάτης	23	1,97
Συμπαγής αμμόλιθος	21,8	1,93
Τραβερτίτης	25	2,1

Η σύνδεση των λίθων της τοιχοποιίας στο δοκίμιο επιτυγχάνεται με κονίαμα άσβεστης ποζολάνης με προσμίξεις πυριτικής ποταμίσις άμμου και γαρμπίλι ασβέστη μέγιστης διαμέτρου 1.5-2.0 cm. Στον πίνακα 2.2. που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι πειραματικοί υπολογισμοί της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής του του κονιάματος.

Πίνακας 2.2: Θλιπτικές και καμπτικές αντοχές κονιάματος.

Μήνες	Θλιπτική αντοχή (Μρα)	Αντοχή σε κάμψη (Μρα)
1	3,59	1,17
3	4,35	1,58
6	4,74	1,96
9	4,77	1,83
12	3,61	1,54

Τόσο η εξωτερική όσο και η εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας κατασκευάστηκαν από λίθους τραβερτίτη μεγάλου μεγέθους. Το ενδιάμεσο γέμισμα υλοποιήθηκε με το ίδιο κονία και με λιθοσώματα 0.20m έως 0.50m.

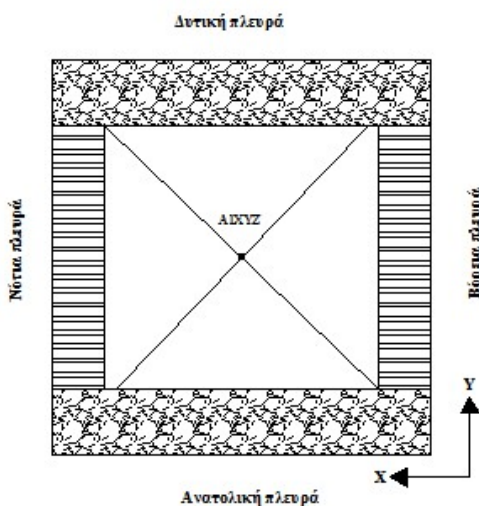
2.2.2.1 Πειραματικός προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων τοιχοποιίας

2.2.3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

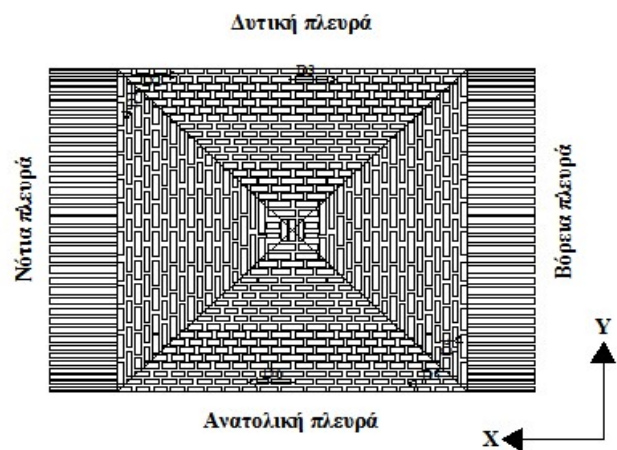
Στο δοκίμιο I τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης της σεισμικής συμπεριφοράς του (επιταχυνσιόμετρα και βελόμετρα) σε διάφορες θέσεις, όπως:

- τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στην κορυφή του σταυροθολίου, συμβολισμός: A1
- επιταχυνσιόμετρα στο ύψος των τοξωτών παραθύρων.
- Βελόμετρα και επιταχυνσιόμετρα στη γένεση των τόξων του σταυροθολίου, συμβολισμοί: A2, D17 και A3, D18. Τοποθετημένα σε ύψος 1.97 m.

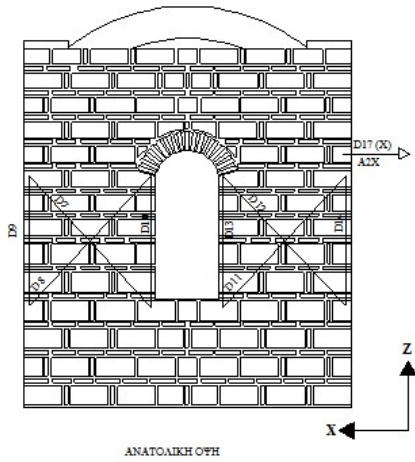
Στα σχήματα 2.8 έως 2.15, φαίνονται οι θέσεις όπου τοποθετήθηκαν τα όργανα των μετρήσεων στο δοκίμιο I.



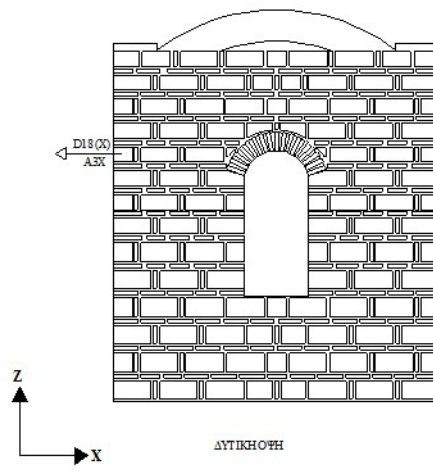
Σχήμα 2.8. Κορυφή σταυροθολίου



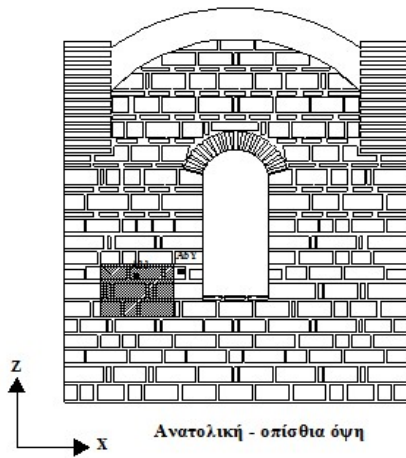
Σχήμα 2.9. Άνοψη σταυροθολίου



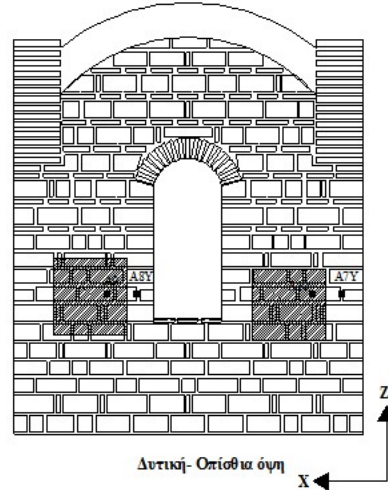
Σχήμα 2.10. Εξωτερική ανατολική όψη



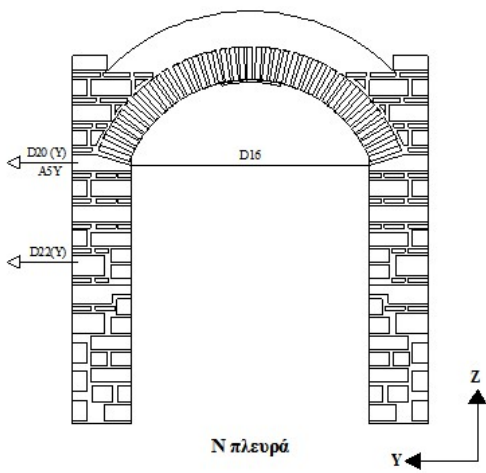
Σχήμα 2.11. Εξωτερική δυτική όψη



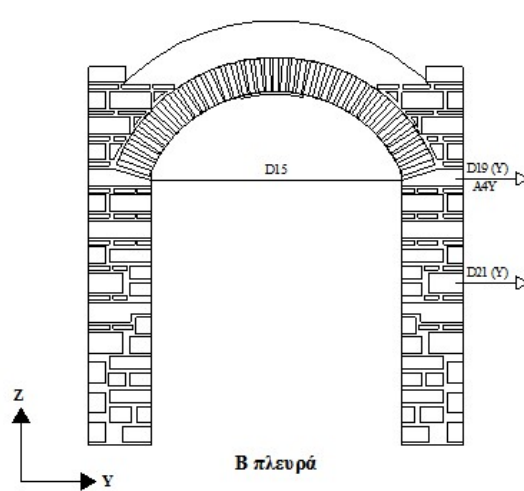
Σχήμα 2.12. Εσωτερική ανατολική όψη



Σχήμα 2.13. Εσωτερική δυτική όψη



Σχήμα 2.14. Εσωτερική νότια όψη



Σχήμα 2.15. Εσωτερική βόρεια όψη

2.3 ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.

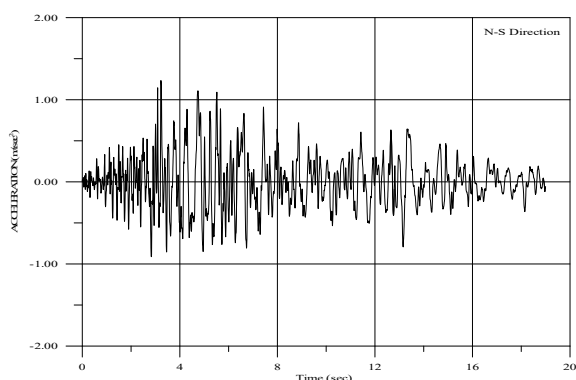
Αρχικά, το δοκίμιο υποβλήθηκε μέσω του σεισμικού προσομοιωτήρα σε διέγερση λευκού θορύβου ούτως ώστε προσδιοριστούν τα δυναμικά του χαρακτηριστικά, δηλαδή η ιδιοσυχνότητα f και ο λόγος απόσβεσης ζ σε κάθε διεύθυνση. Η χρονοϊστορία λευκού θορύβου είχε περιεχόμενο συχνοτήτων από DC-50Hz και σταθερή επιτάχυνση 0,020g. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από τη διέγερση αυτή παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.5: Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμίου I

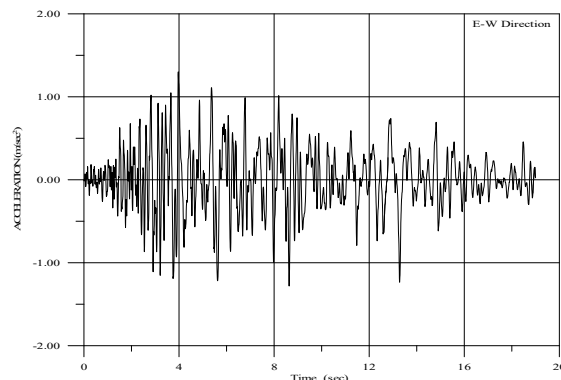
Διεύθυνση	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Απόσβεση (%)
X	12.30	1
Y	5,96	2

Εν συνεχεία, το δοκίμιο I υποβλήθηκε σε σεισμικές διεγέρσεις. Ειδικότερα, έγινε χρήση των χρονοϊστοριών του σεισμού Irpinia ($M_s=6,9$), που συνέβη 23/11/1980 στη Νότια Ιταλία στην περιοχή Campano-Lucano-Arenines και είχε διάρκεια 90 sec. Επιλέχθηκε το πρώτο τμήμα των χρονοϊστοριών (έως 40sec) και εισήχθη στο σεισμικό προσομοιωτήρα ως διέγερση βάσης με συχνότητα 200 Hz και τελική διάρκεια 24 sec.

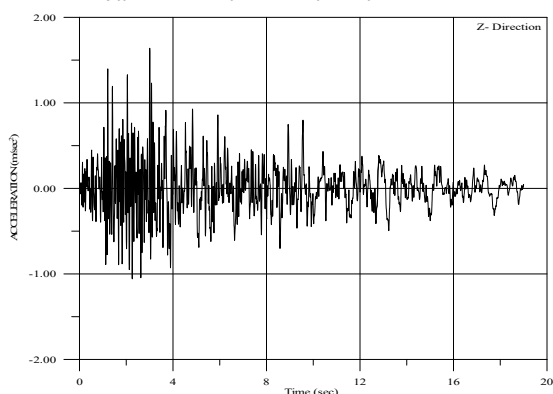
Στα σχήματα 2.16, 2.17 και 2.18, φαίνονται οι χρονοϊστορίες του σεισμού Irpinia, που χρησιμοποιήθηκαν ως διέγερση βάσης κατά X, Y, Z.



Σχήμα 2.16. : Χρονοϊστορία Irpinia κατά X



Σχήμα 2.17. : Χρονοϊστορία Irpinia κατά Y



Σχήμα 2.18. : Χρονοϊστορία Irpinia κατά Z

Οι διαδοχικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6:

Πίνακας 2.6 : Σεισμικές δοκιμές δοκίμιου I

Αριθμός δοκιμής	Διεύθυνση διέγερσης	Περιγραφή διέγερσης
1	Υ	Διέγερση λευκού θορύβου
2	Χ	Διέγερση λευκού θορύβου
3	Ζ	Διέγερση λευκού θορύβου
4	Χ	30% σεισμού Irpinia
5	Χ	50% σεισμού Irpinia
6	Χ	75% σεισμού Irpinia
7	Χ	100% σεισμού Irpinia
8	Χ	125% σεισμού Irpinia
9	Χ	150% σεισμού Irpinia
10	Χ	175% σεισμού Irpinia
11	Χ	200% σεισμού Irpinia
12	Χ	250% σεισμού Irpinia
13	Χ	300% σεισμού Irpinia
14	Χ	350% σεισμού Irpinia
15	Χ	400% σεισμού Irpinia
16	Χ	450% σεισμού Irpinia
17	Χ	500% σεισμού Irpinia
18	Χ/Υ	50% σεισμού Irpinia
19	Χ/Υ	100% σεισμού Irpinia
20	Χ/Υ	150% σεισμού Irpinia
21	Χ	200% σεισμού Irpinia
22	Χ/Υ	150% σεισμού Irpinia

Οι πειραματικές καταγραφές μετακινήσεων και επιταχύνσεων των σημείων στην κορυφή του σταυροθολίου και στη γένεση των τόξων όπου μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, όπου γίνεται και η σύγκριση με τα αριθμητικά αποτελέσματα.

2.4. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΡΩΓΜΩΝ

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής 10, δηλαδή στο 175% της έντασης του σεισμού Irpinia, εμφανίστηκαν οι πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο I. Όσο αυξανόταν η ένταση της διέγερσης βάσης κατά τη διεύθυνση Χ, τόσο επιδειωνόταν η κατάσταση των ρωγμών. Εν συνεχεία εκτελέστηκαν οι διαξονικές διεγέρσεις με αποτέλεσμα το δοκίμιο να παρουσιάσει εκτεταμένες βλάβες. Κατά την ολοκλήρωση των σεισμικών διεγέρσεων, στο δοκίμιο είχαν εμφανιστεί οριζόντιες ρωγμές στην ανατολική και δυτική όψη, αποκόλληση του σταυροθολίου, ρωγμές στα τόξα της νότιας και βόρειας όψης καθώς επίσης, υπήρχαν 15 mm απόκλιση από την κατακόρυφο.

Στα ακόλουθα σχήματα (2.19 έως 2.24) παρουσιάζονται οι βλάβες στο δοκίμιο:



Σχήμα 2.19. Οριζόντιες ρωγμές στην ανατολική όψη



Σχήμα 2.20. Οριζόντιες ρωγμές στη δυτική όψη



Σχήμα 2.21. Αποκόλληση σταυροθολίου στη νότια



Σχήμα 2.22. Αποκόλληση σταυροθολίου στη βόρεια όψη



Σχήμα 2.23. Ρωγμές στο σταυροθόλιο εσωτερικά



Σχήμα 2.24. Ρωγμές στο σταυροθόλιο εσωτερικά εξωτερικά

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

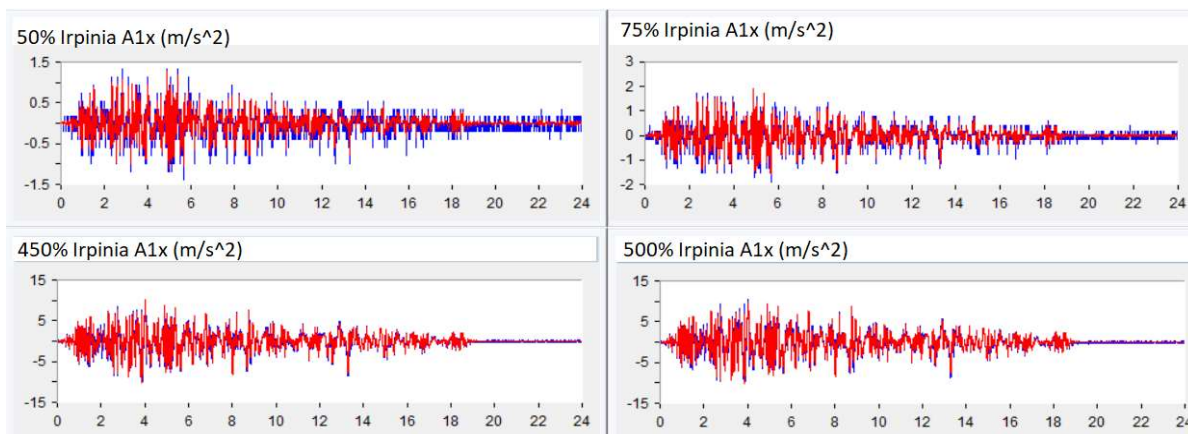
Στην παρούσα εργασία, αρχικά, μελετήθηκαν τα σήματα που προέκυψαν εκ των πειραματικών δοκιμών 5 έως 17, δηλαδή από το 50% έως το 500% της μονό-αξονικής έντασης κατά x του σεισμού Irpinia. Ειδικότερα, εξετάστηκαν: η χρόνο-ιστορία επιταχύνσεων ως προς τη x διεύθυνση της κορυφής του σταυροθολίου A1x, και οι αντίστοιχες χρόνο-ιστορίες επιταχύνσεων και μετατοπίσεων στις γενέσεις των τόξων αυτού A2x, D17, A3x, D18.

3.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ.

3.1.1. ΜΕΙΩΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Μέσω του λογισμικού επεξεργασίας σημάτων DADisp, εφαρμόζονται ψηφιακά φίλτρα άπειρης κρουστικής απόκρισης (IIR), με στόχο τη μείωση του θορύβου στα διαγράμματα των επιταχύνσεων. Ο σχεδιασμός των φίλτρων γίνεται με τη μέθοδο του Butterworth. Αρχικά, χρησιμοποιείται το βαθυπερατό φίλτρο Butterworth(1, 200.0, 25.0, 3.0, 40.0, 30.0), το οποίο διατηρεί τις συχνότητες που είναι μικρότερες των 25 Hz. Εν συνεχεία, εφαρμόζεται το υψιπερατό φίλτρο Butterworth(2, 200.0, 0.15, 3.0, 40.0, 0.1) που διατηρεί συχνότητες μεγαλύτερες των 0.15 Hz.

Στο σχήμα 3.1. που ακολουθεί παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τα διαγράμματα των χρονιστοριών των δοκιμών 50%, 75%, 450% και 500% του σεισμού Irpinia για τις επιταχύνσεις της κορυφής. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο σήμα πριν την επεξεργασία του το κόκκινο στο φιλτραρισμένο σήμα.



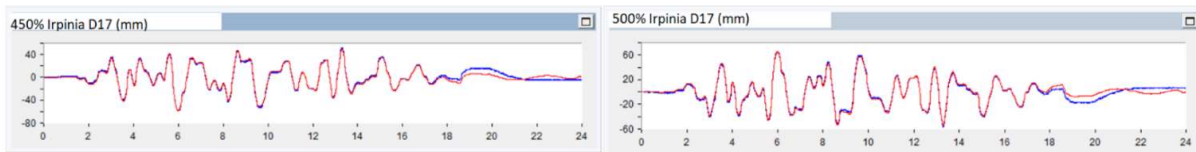
Σχήμα 3.1. Μείωση θορύβου επιταχύνσεων κορυφής A1x, 50%, 75%, 450% & 500% σεισμικού φορτίου Irpinia.

Προφανώς, η παρουσία του θορύβου είναι εντονότερη για τις μικρότερες τιμές της σεισμικής έντασης, στην προκυμμένη περίπτωση για 50% και 75%, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του φορτίου δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των αρχικών και των επεξεργασμένων σημάτων.

3.1.2. ΜΕΙΩΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην περίπτωση των μετατοπίσεων γίνεται, αρχικά, χρήση του υψιπερατού φίλτρου Butterworth(2, 200.0, 0.15, 3.0, 40.0, 0.1) και ύστερα, εφαρμόζεται το βαθυπερατό φίλτρο Butterworth(1, 200.0, 25.0, 3.0, 40.0, 30.0).

Στο σχήμα 3.2. παρουσιάζονται οι χρόνο-ιστορίες του Irpinia 450% και 500% των μετατοπίσεων D17 και D18. Το σήμα με το μπλε χρώμα είναι το αρχικό και με το κόκκινο το επεξεργασμένο.



Σχήμα 3.2. Μείωση θορύβου μετατοπίσεων D17, 450% & 500% σεισμικού φορτίου Irpinia

3.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.

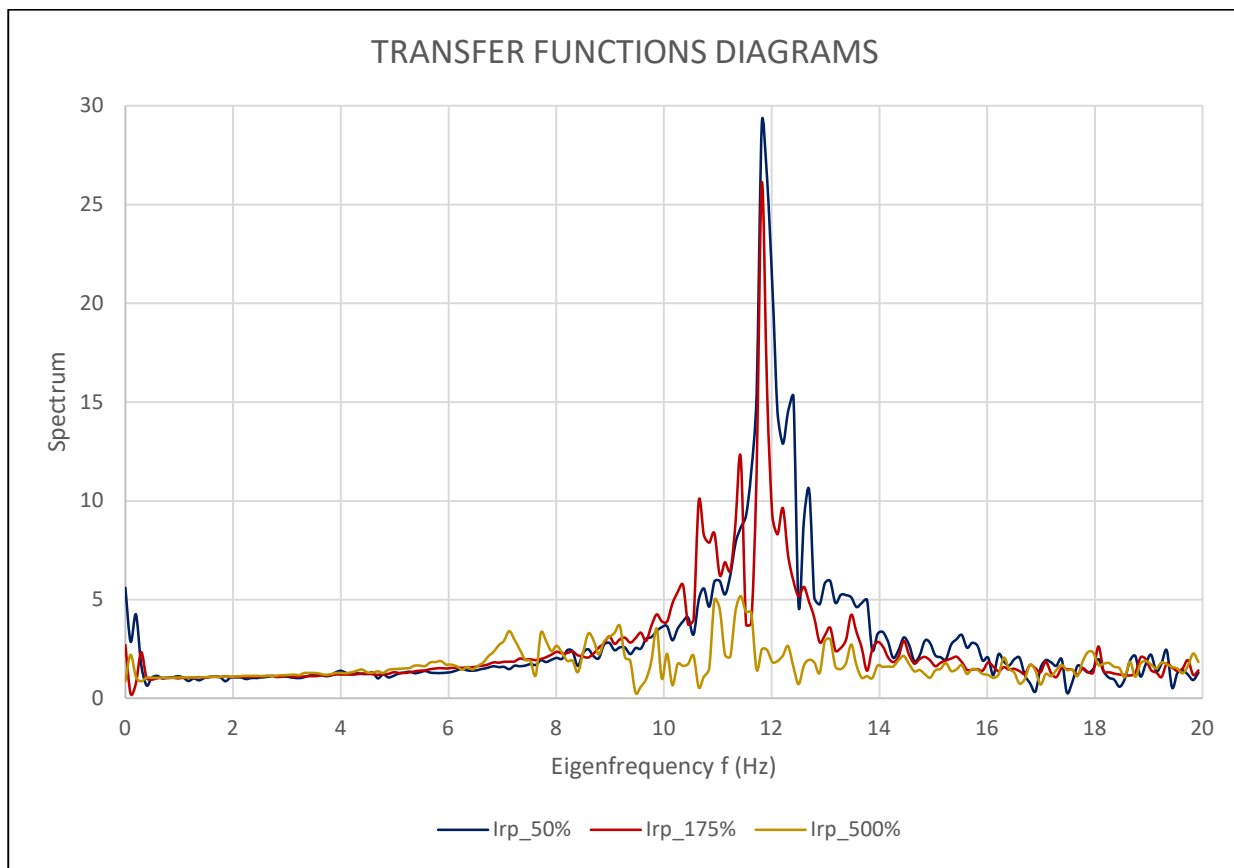
Κατά την αύξηση της έντασης του σεισμικού φορτίου που επιβάλλεται στο υπό μελέτη δοκίμιο, εμφανίζεται σταδιακή πτώση της τιμής των μέγιστων ιδιοσυχνοτήτων. Ειδικότερα, στον πίνακα 3.1. παρατηρείται πως στο 50% του σεισμού Irpinia η ιδιοσυχνότητα βρίσκεται στα 11.86 Hz. Στο 175% που εμφανίζονται οι πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο, η τιμή είναι $f = 11.82$ Hz και εξακολουθεί να έχει πτωτική πορεία έως $f = 10.94$ Hz για το 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia. Να σημειωθεί ότι από τον έλεγχο του λευκού θορύβου είχε προκύψει ιδιοσυχνότητα, ως προς τη διεύθυνση x , ίση με 11.80 Hz.

Πίνακας 3.1 : Τιμή ιδιοσυχνότητας f για κάθε δοκιμή (κατά x).

Δοκιμή διέγερσης Irpinia κατά x	f (Hz)
50%	11.86
75%	11.86
100%	11.82
125%	11.82
150%	11.82
175%	11.82
200%	11.80
250%	11.44
300%	11.51
350%	10.94
400%	10.94
450%	10.94
500%	10.94

Η μεταβλητότητα που παρατηρείται είναι αναμενόμενη, διότι, με την αύξηση του σεισμικού φορτίου, το σύστημα απομακρύνεται από την ελαστική περιοχή. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση της απόσβεσης και την μείωση των ιδιοσυχνοτήτων.

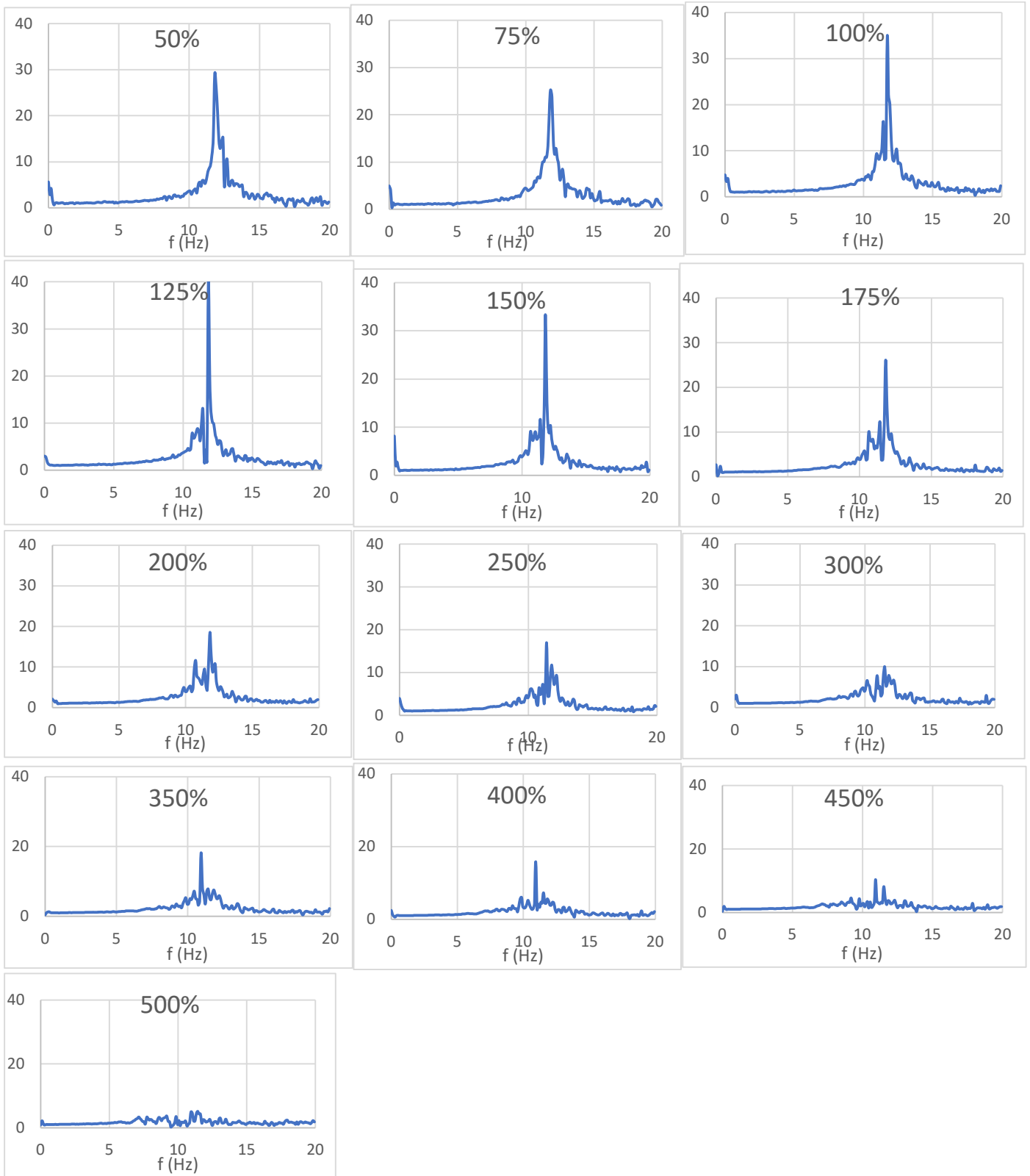
Ακολουθούν, στο σχήμα 3.3., τα διαγράμματα των συναρτήσεων μεταφοράς για τις περιπτώσεις 50%, 175% και 500%.



Σχήμα 3.3. Διαγράμματα συναρτήσεων μεταφοράς για τις περιπτώσεις 50%, 175% και 500%.

Παρατηρείται, ότι τα διαγράμματα των συναρτήσεων μεταφοράς, στις αρχικές δοκιμές, έχουν μία μέγιστη τιμή για τη συχνότητα f . Όσο, όμως, η ένταση του σεισμού αυξάνεται, εμφανίζονται περισσότερες κορυφές στο διάγραμμα και το σύστημα, σταδιακά, χάνει τη γραμμική του συμπεριφορά. Αυτό, παραδείγματος χάριν, διαφαίνεται έντονα στο 500% *I*_{rpinia} όπου υπάρχουν αρκετές σημαντικές κορυφές συχνοτήτων. Ακόμη, στη συγκεκριμένη δοκιμή, είναι αξιοσημείωτη και η μείωση του εύρους (κατακόρυφος άξονας σχήματος) σε σχέση με τις δύο προηγούμενες. Συνεπώς, σύμφωνα με τα διαγράμματα, η προσομοίωση του πειράματος μέσω γραμμικά ελαστικών αναλύσεων δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα έως και το 175% του σεισμού *I*_{rpinia}, όπου και εμφανίζονται οι πρώτες ρωγμές. Οι υπόλοιπες δοκιμές πρέπει να αναλυθούν με μη γραμμικές μεθόδους.

Για λόγους πληρότητας, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4, τα διαγράμματα των συναρτήσεων μεταφοράς όλων των δοκιμών που εξετάστηκαν.

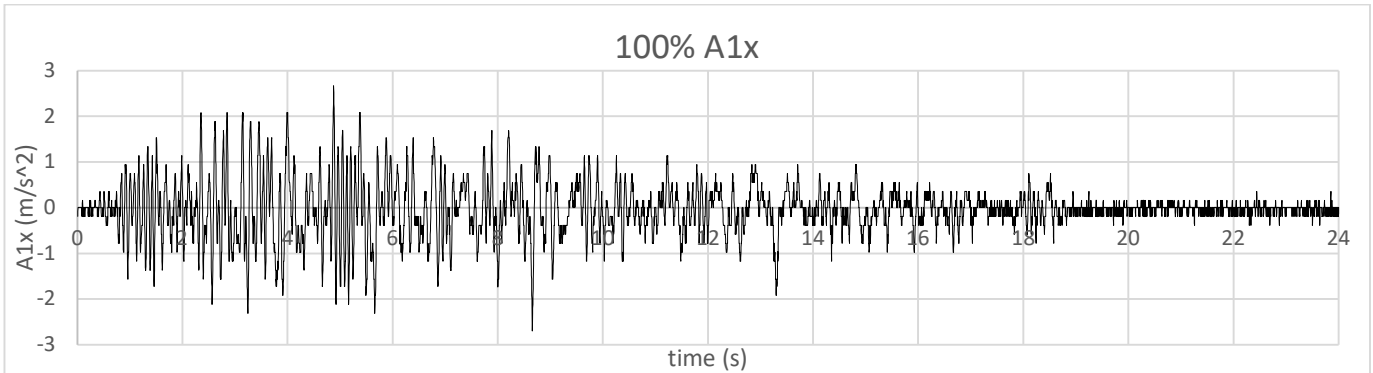


Σχήμα 3.4. Διαγράμματα συναρτήσεων μεταφοράς από το 50% έως το 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia.

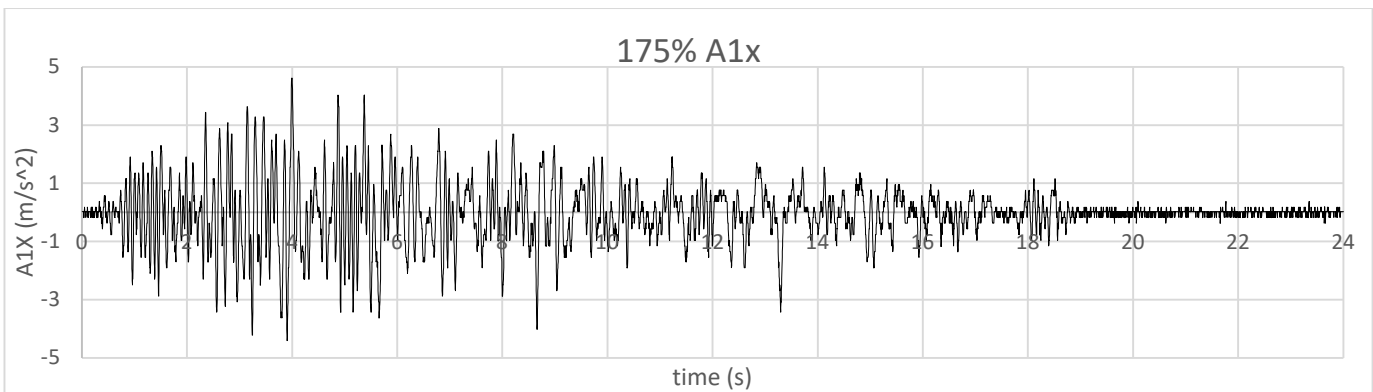
3.3. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΚΟΡΥΦΗΣ A1X

Παρουσιάζονται, ενδεικτικά, στα σχήματα 3.5, 3.6, και 3.7 τρεις από τις πειραματικές αποκρίσεις των επιταχύνσεων για την κορυφή της κατασκευής A1x. Ειδικότερα, έχουν επιλεγθεί οι εξής δοκιμές του Iripinia (κατά x):

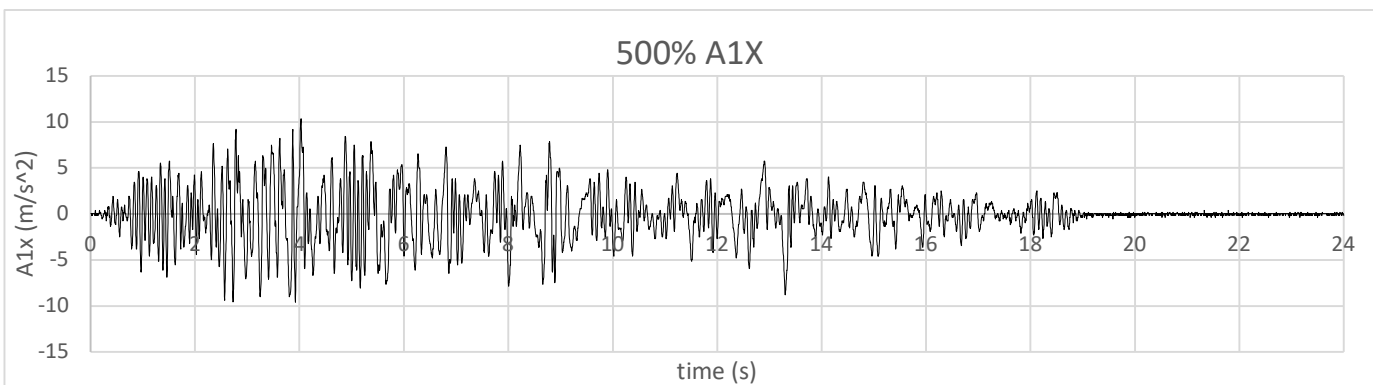
- το 100%, όπου η κατασκευή θεωρείται ότι βρίσκεται, ακόμη, στην ελαστική της περιοχή
- το 175%, όπου παρατηρούνται οι πρώτες ρωγμές.
- το 500%, όπου εμφανίζονται εκτεταμένες βλάβες.



Σχήμα 3.5. A1x για το 100% του Iripinia



Σχήμα 3.6. A1x για το 175% του Iripinia



Σχήμα 3.7. A1x για το 500% του Iripinia

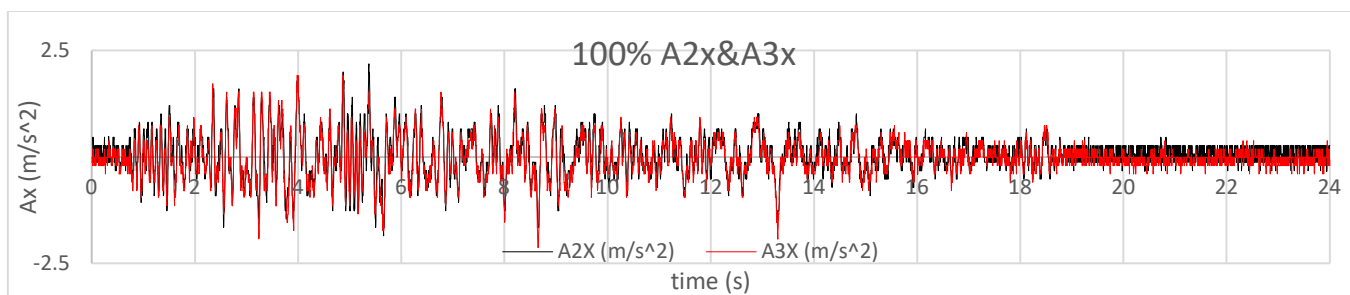
Στον παρακάτω πίνακα 3.2, παρουσιάζονται οι τιμές των μέγιστων επιταχύνσεων κορυφής.

Πίνακας 3.2 : Μέγιστες επιταχύνσεις κορυφής A1x

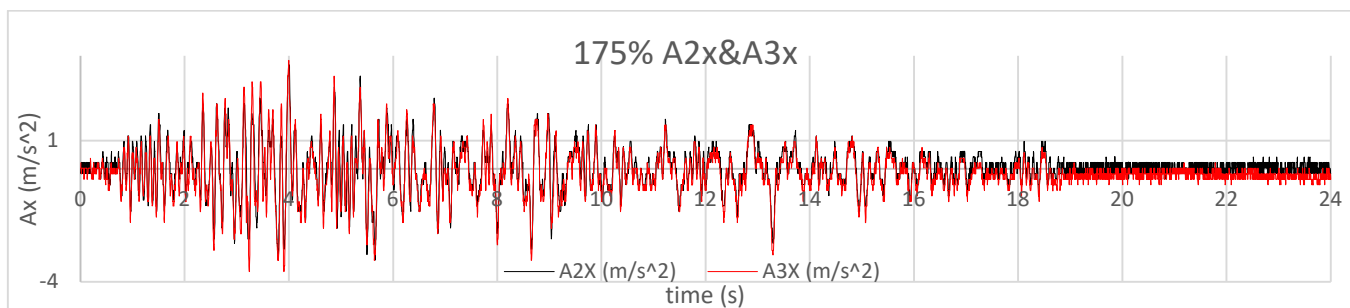
Δοκιμή	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%	250%	300%	350%	400%	450%	500%
max A1x (m/s ²)	1.37	1.92	2.70	3.11	3.82	4.61	5.78	7.85	9.26	8.37	9.19	9.97	10.34

3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ A2X/A3X

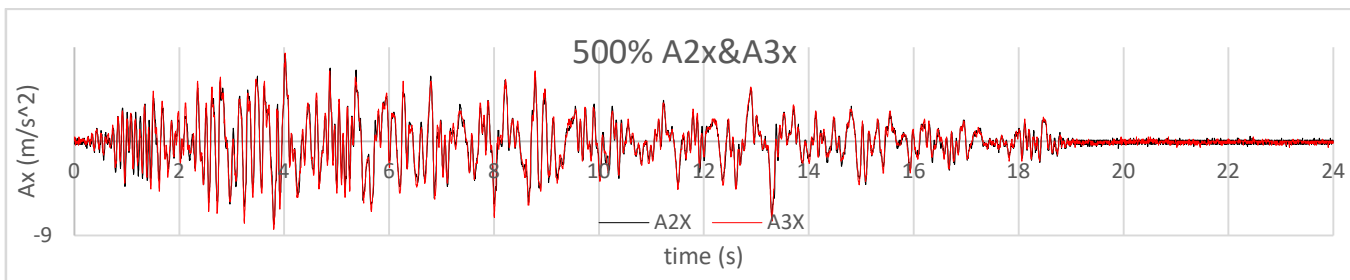
Είναι ενδιαφέρον, να γίνει σύγκριση των χρονιόστοριών των επιταχύνσεων που έχουν καταγραφεί στους πεσσούς της ανατολικής και δυτικής όψης, A2x και A3x. Λόγω της συμμετρίας του φορέα ως προς τις θέσεις αυτές, αναμένεται να υπάρχει ταύτιση μεταξύ των επιταχυνσιογραφημάτων. Στα παρακάτω διαγράμματα (σχήματα 3.8, 3.9, 3.10) παρουσιάζονται οι A2x και A3x, για το 100%, 175% και 500% του Iripinia (κατά x).



Σχήμα 3.8. Σύγκριση χρονιόστοριών A2X/A3X για το 100% του Iripinia



Σχήμα 3.9. Σύγκριση χρονιόστοριών A2X/A3X για το 175% του Iripinia



Σχήμα 3.10. Σύγκριση χρονιόστοριών A2X/A3X για το 500% του Iripinia

Στον παρακάτω πίνακα 3.3, παρουσιάζονται οι τιμές των μέγιστων επιταχύνσεων στους πεσούς της ανατολικής και της δυτικής όψης.

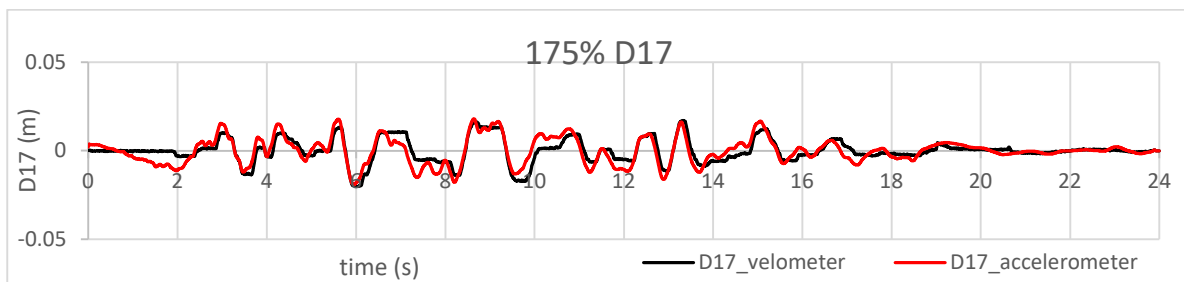
Πίνακας 3.3 : Μέγιστες επιταχύνσεις A2x & A3x

Δοκιμή	50%	75%	100%	125%	150%	175%	200%	250%	300%	350%	400%	450%	500%
max A2x (m/s ²)	0.98	1.59	2.19	2.4	2.94	3.68	4.58	5.92	6.84	6.87	7.15	7.63	8.36
max A3x (m/s ²)	1.19	1.59	2.13	2.57	3.36	3.83	4.83	6.18	7.02	6.85	7.31	8.44	8.47

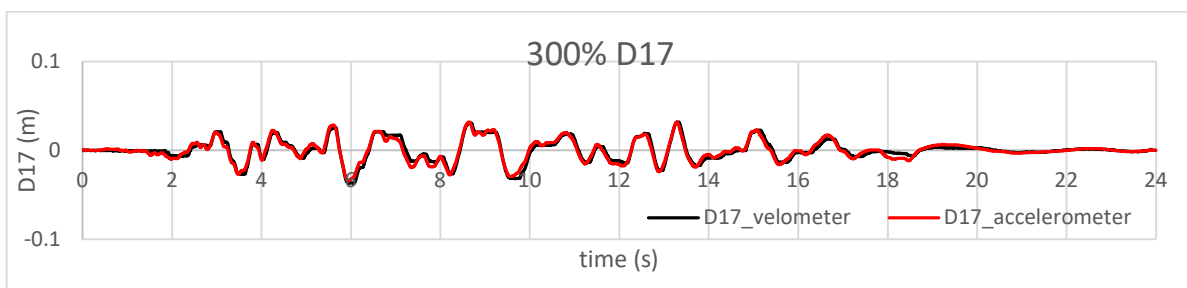
3.5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ D17& D18

Παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση των μετατοπίσεων που μετρήθηκαν από τα βελομέτρα D17, D18 με τις μετατοπίσεις που προκύπτουν από διπλή ολοκλήρωση των A2x, A3x.

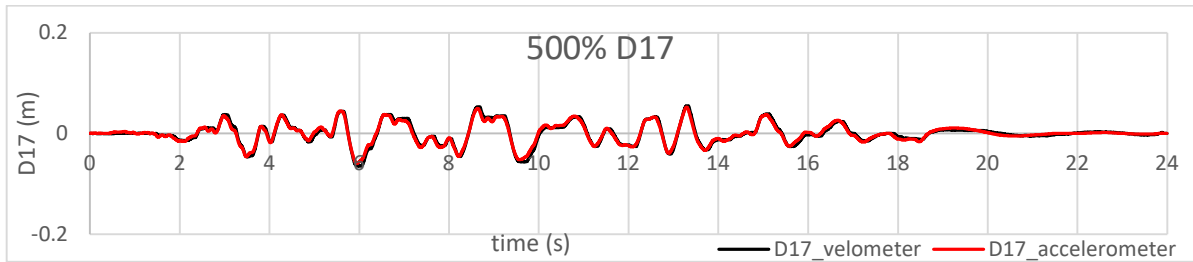
Τα παρακάτω διαγράμματα, σχήματα 3.11, 3.12, 3.13, αντιστοιχούν στις δοκιμές 175%, 300% και 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia κατά x για τη θέση D17.



Σχήμα 3.11. Σύγκριση δεδομένων μετατόπισης D17 μεταξύ βελομέτρου και επιταχυνσιομέτρου για το 175% του Irpinia

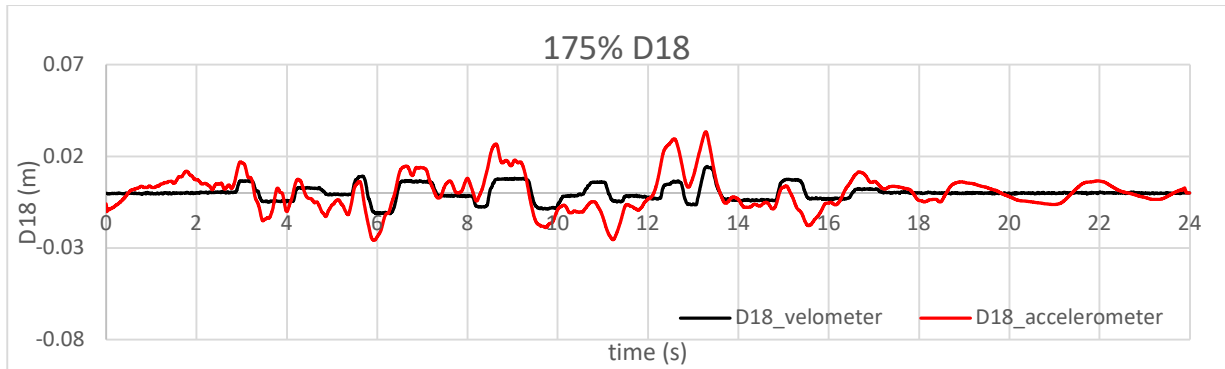


Σχήμα 3.12. Σύγκριση δεδομένων μετατόπισης D17 μεταξύ βελομέτρου και επιταχυνσιομέτρου για το 300% του Irpinia

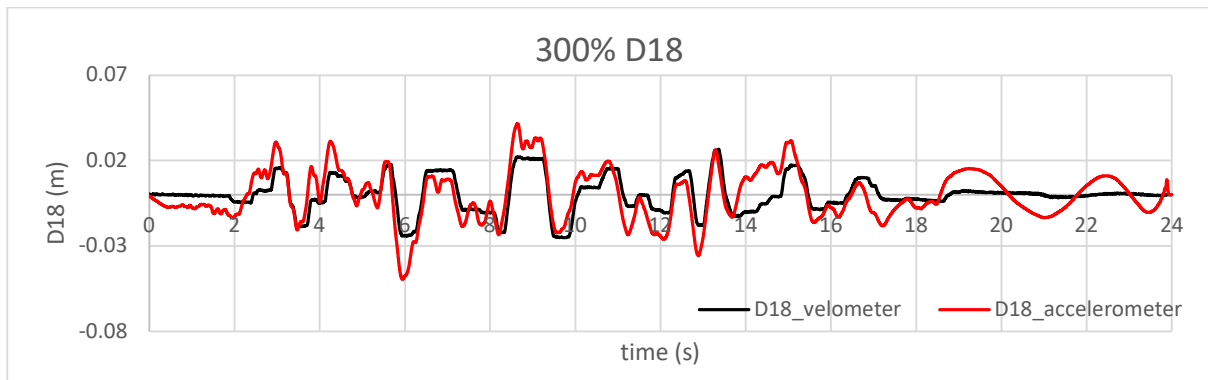


Σχήμα 3.14. Σύγκριση δεδομένων μετατόπισης D17 μεταξύ βελομέτρου και επιταχυνσιομέτρου για το 500% του Iripinia.

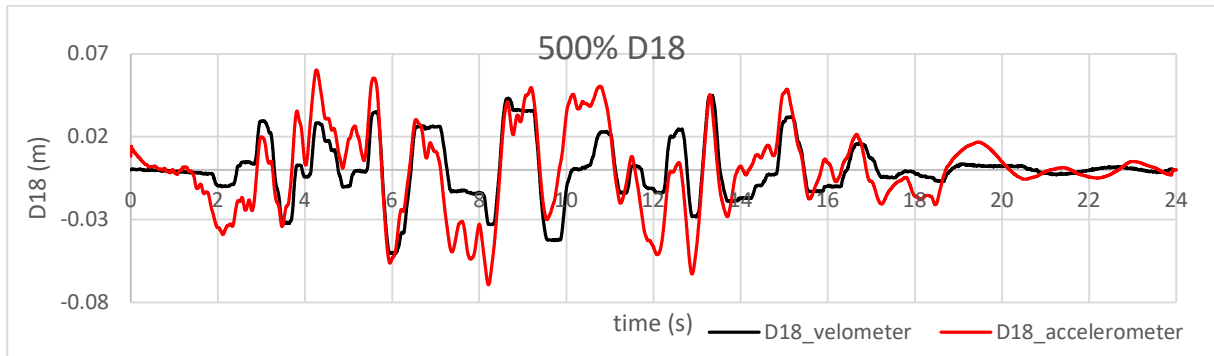
Ακολουθούν και τα αντίστοιχα διαγράμματα, σχήματα 3.15, 3.16, 3.17, (175%, 300% και 500%) για τη θέση μέτρησης D18.



Σχήμα 3.15. Σύγκριση δεδομένων μετατόπισης D18 μεταξύ βελομέτρου και επιταχυνσιομέτρου για το 175% του Iripinia



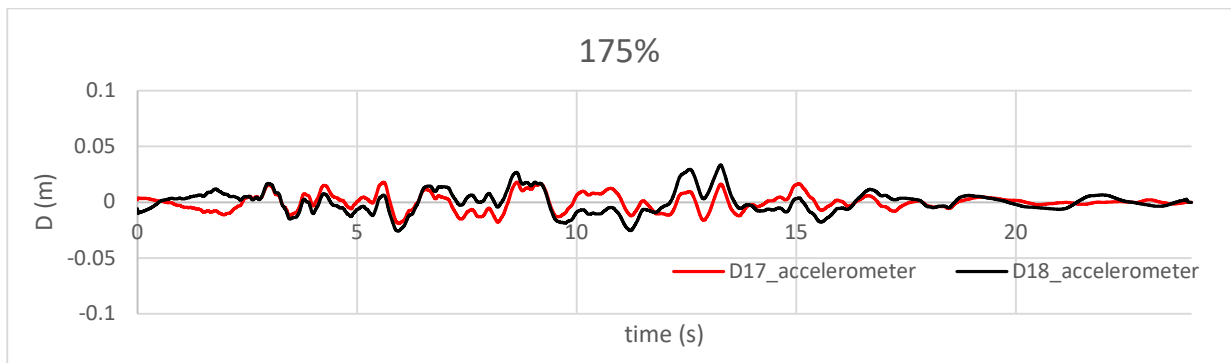
Σχήμα 3.16. Σύγκριση δεδομένων μετατόπισης D18 μεταξύ βελομέτρου και επιταχυνσιομέτρου για το 300% του Iripinia



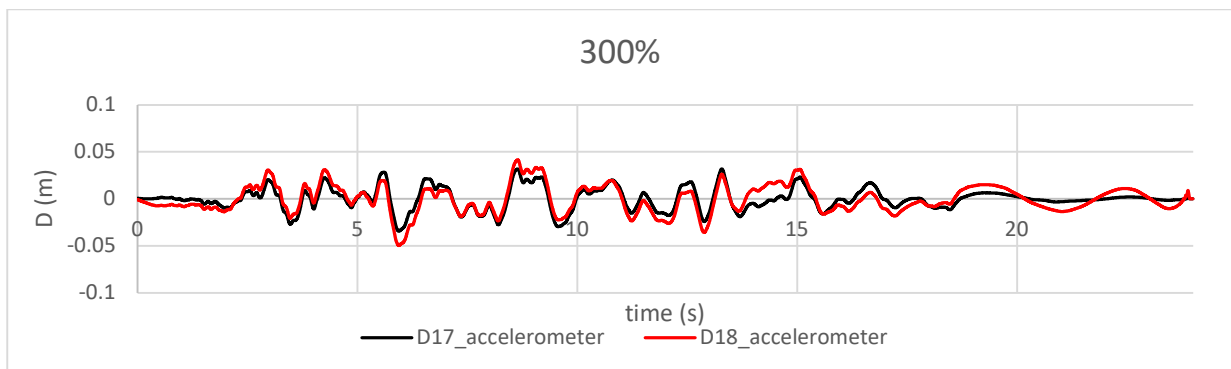
Σχήμα 3.17. Σύγκριση δεδομένων μετατόπισης D18 μεταξύ βελομέτρου και επιταχυνσιομέτρου για το 500% του Irpinia

3.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ D17/D18

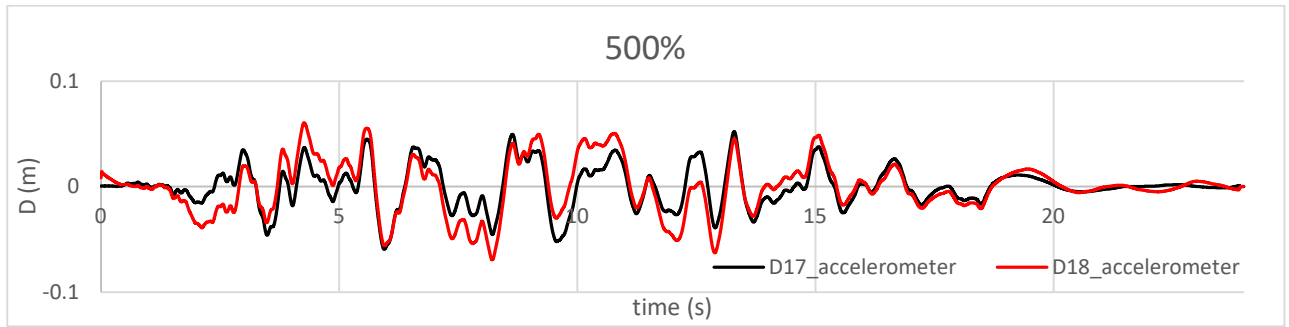
Αρχικά γίνεται σύγκριση (σχήματα 3.18, 3.19, 3.20) των μετατοπίσεων D17, D18 που έχουν εξήχθησαν μέσω διπλής ολοκλήρωσης από τις χρονο-ιστορίες των επιταχυνσιομέτρων.



Σχήμα 3.18. Σύγκριση δεδομένων μετατοπίσεων D17, D18 από τα επιταχυνσιόμετρα για το 175% του Irpinia

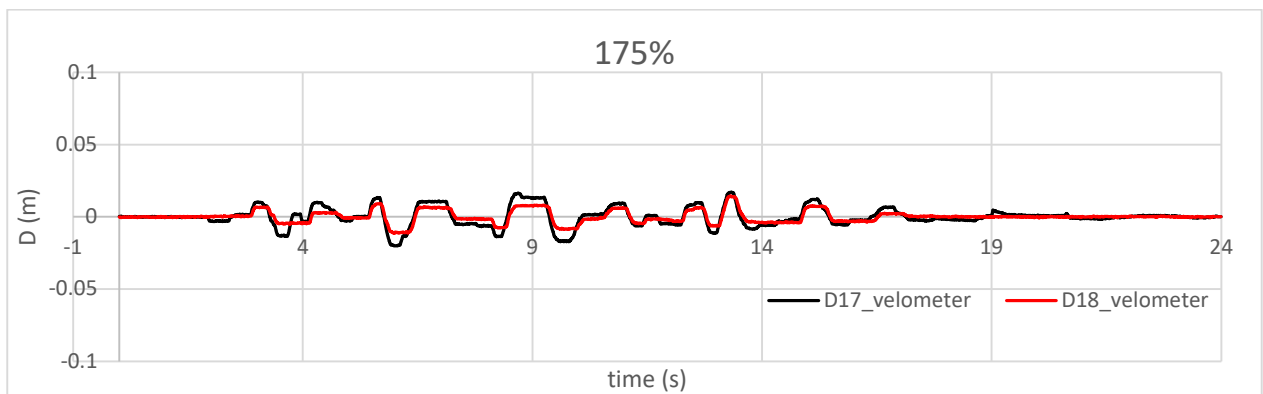


Σχήμα 3.19. Σύγκριση δεδομένων μετατοπίσεων D17, D18 από τα επιταχυνσιόμετρα για το 300% του Irpinia

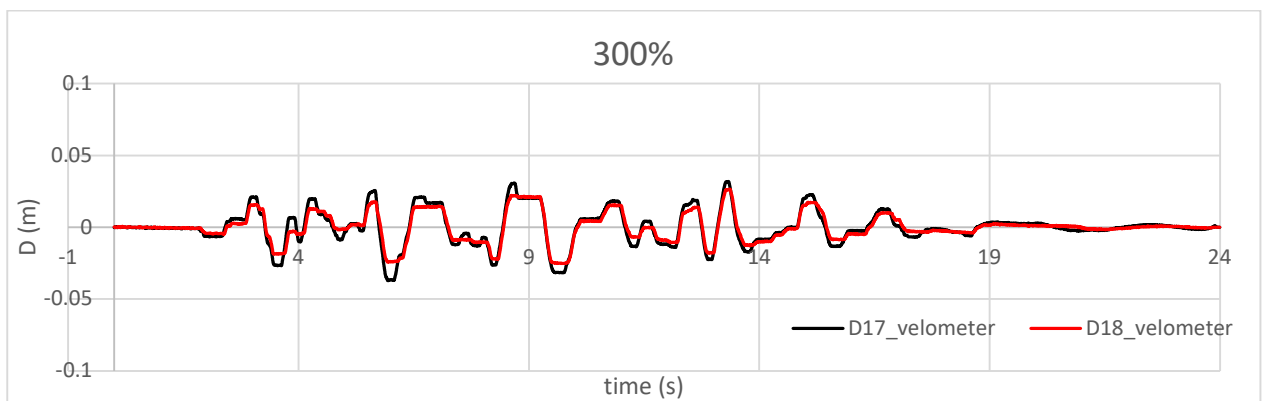


Σχήμα 3.20. Σύγκριση δεδομένων μετατοπίσεων D17, D18 από τα επιταχυνσιόμετρα για το 500% του Iripinia

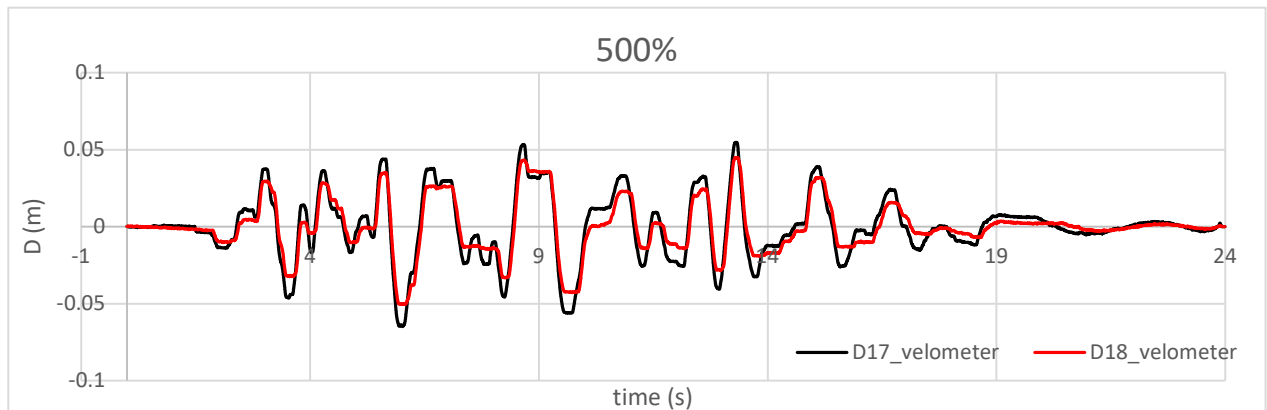
Σύγκριση μετατοπίσεων D17, D18 από τα δεδομένα των βελόμετρων (σχήματα 3.21, 3.22, 3.23).



Σχήμα 3.21. Σύγκριση δεδομένων μετατοπίσεων D17, D18 από τα βελόμετρα για το 175% του Iripinia



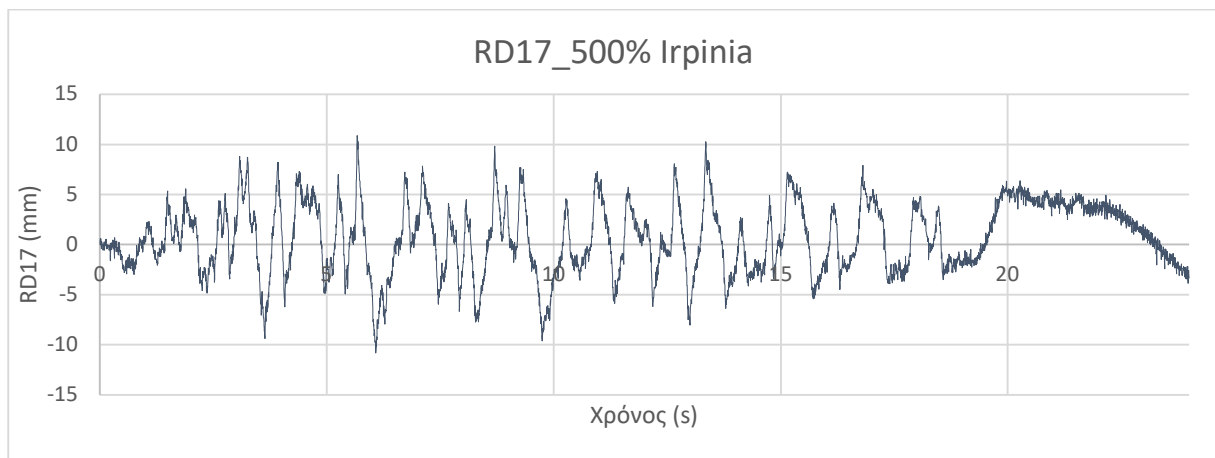
Σχήμα 3.22. Σύγκριση δεδομένων μετατοπίσεων D17, D18 από τα βελόμετρα για το 300% του Iripinia



Σχήμα 3.23. Σύγκριση δεδομένων μετατοπίσεων D17, D18 από τα βελόμετρα για το 500% του Iripinia

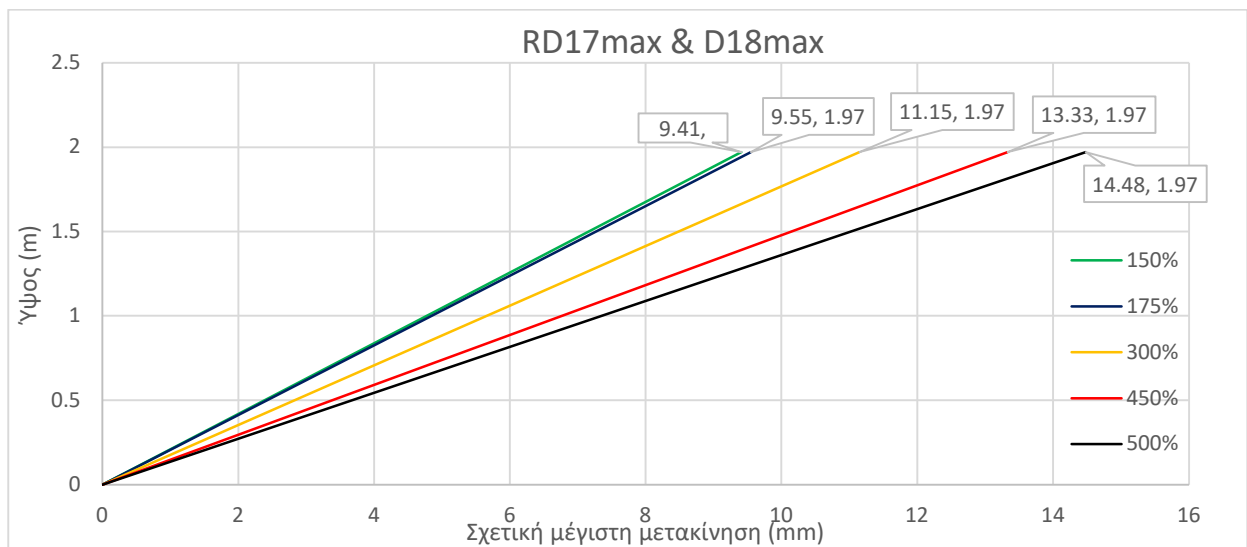
3.7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ RD17 & RD18.

Στις σεισμικές δοκιμές ήταν καταγεγραμμένες οι απόλυτες μετακινήσεις D17 (θέση πεσσού ανατολικής όψης). Για να επιτευχθεί ο έλεγχος της σχετικής μετακίνησης RD17, εφαρμόστηκε διανυσματική αφαίρεση της μετακίνησης της βάσης από την απόλυτη μετακίνηση στη θέση αυτή. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το διαγράμμα της ιστορίας της σχετικής μετακίνησης RD17 για τη δοκιμή 500% της σεισμικής διέγερσης Iripinia κατά x (σχήμα 3.24).



Σχήμα 3.24. Σχετική μετακίνηση RD17 για 500% Iripinia

Στο επόμενο διάγραμμα, σχήμα 3.25, αναπαρίστανται οι μέσοι όροι των σχετικών μετακινήσεων στους πεσσούς της ανατολικής και δυτικής όψης (RD17 & RD18) συναρτήσει του ύψους της κατασκευής στις θέσεις αυτές (1.97 m). Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι δοκιμές για 150%, 175%, 250%, 450% και 500% του σεισμικού φορτίου Iripinia.



Σχήμα 3.25. Σχετικές μέγιστες μετακινήσεις σημείων D17, D18

3.8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ RD17/H & RD18/H.

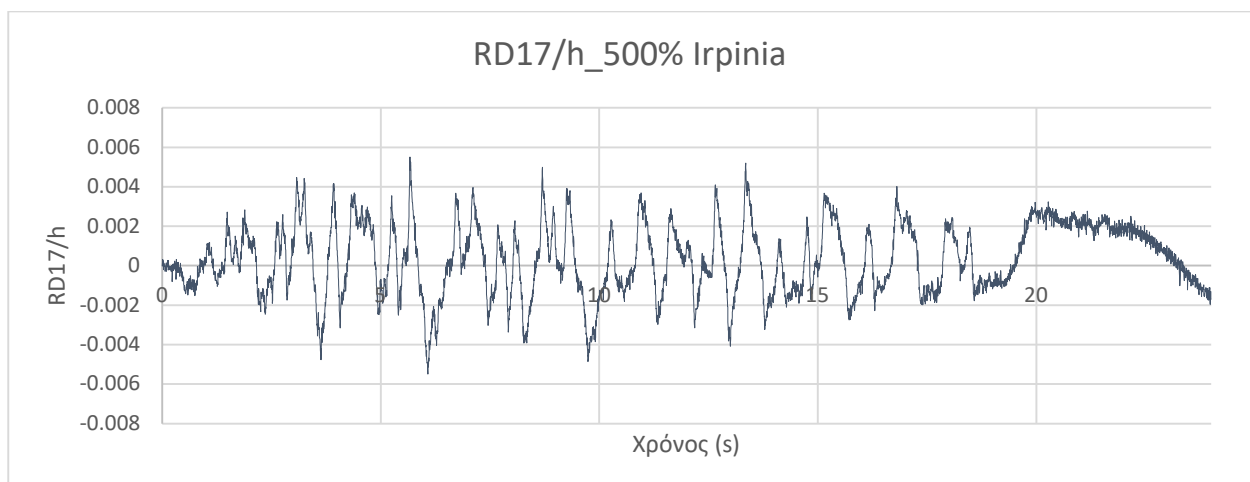
Δεδομένου των τιμών των σχετικών μετακινήσεων έγινε και εκτίμηση των γωνιακών παραμορφώσεων «γ» (interstory drift) στις θέσεις των D17 και D18.

Όπου:

$$\gamma = \frac{RD}{h}$$

Ακόμη, ο όρος RD είναι η σχετική μετακίνηση και h το ύψος. Για την περίπτωση των RD17 και RD18, το ύψος h ισούται με 1.94 m.

Το παρακάτω διάγραμμα, σχήμα 3.2, αντιστοιχεί στην γωνιακή παραμόρφωση στον πεσσο της ανατολικής όψης (RD17/h) που προκύπτει για το 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia.



Σχήμα 3.26. Γωνιακή παραμόρφωση, 500% Irpinia

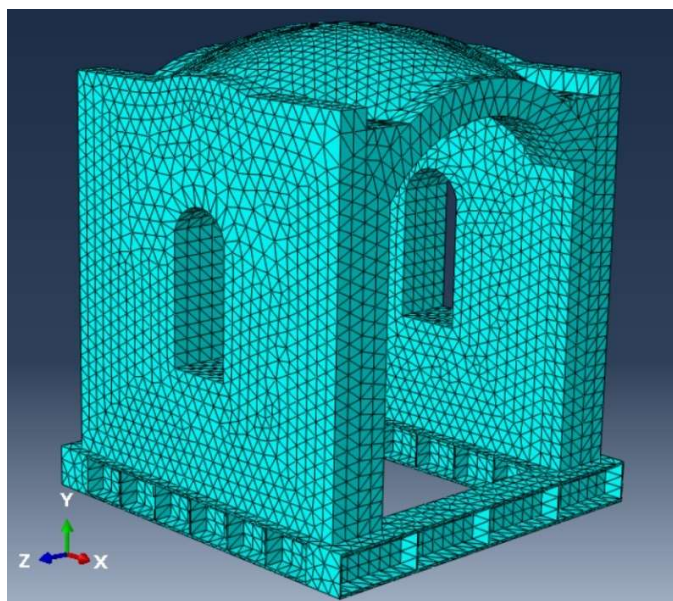
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ I.

Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε σύμφωνα με το τρίτο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας της Κοντοπούλου Ειρήνης «Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς προσομοιώματος κατασκευής από περικλειστη τοιχοποιία και σταυροθόλιο από οπτοπλινθοδομή».

Ειδικότερα, για τη μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Ο έλεγχος της ορθότητας του μοντέλου, έγινε προσεγγίζοντας τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων κατά τις διευθύνσεις X και Y ούτως ώστε να βρίσκονται κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν πειραματικά.

Η γεωμετρία του φορέα προσομοιώθηκε μέσω τρισδιάστατων στοιχείων. Αναλυτικότερα, η κατασκευή αποτελείται από τρία μέλη: τη μεταλλική βάση, μία στρώση κονιάματος που συνδέει τη μεταλλική βάση με τον υπόλοιπο φορέα, δύο παράλληλους τοίχους και το σταυροθόλιο. Η διακριτοποίηση του φορέα έγινε μέσω τρισδιάστατων γραμμικών τετράεδρων στοιχείων, καθένα από τα οποία αποτελείται από τέσσερις κόμβους. Για να είναι ο φορέας ρεαλιστικός, έπρεπε να υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικά υλικά της κατασκευής κατά το πάχος του κάθε στοιχείου, οπότε η μέση διάσταση που επιλέχθηκε για τη διακριτοποίηση του μοντέλου ήταν 0,10m. Η τρισδιάστατη απεικόνιση του υπολογιστικού μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Διακριτοποίηση μοντέλου δοκιμίου I στο Abaqus.

Σημειώνεται, επίσης, ότι ο κατακόρυφος άξονας στο λογισμικό προσομοίωσης αντιστοιχεί στον άξονα των Y. Για να υπάρχει συμφωνία με την ονομασία των αξόνων της σεισμικής τράπεζας, στο κείμενο που ακολουθεί, κατακόρυφος άξονας θα ονομάζεται άξονας Z και ο άξονας Y θα αντιστοιχεί στον άξονα Z του μοντέλου.

4.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Κατά την προσομοίωση της μεταλλικής βάσης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, θεωρήθηκε ότι συνδέεται με το μοντέλο του σταυροθολίου σε σημεία κόμβων απόστασης 30cm περίπου. Ακόμη, θεωρήθηκε πως αυτή είναι πλήρως πακτωμένη στο έδαφος. Οι ιδιότητες του χάλυβα της μεταλλικής βάσης και του κονιάματος, που τη συνδέει με τον υπόλοιπο φορέα, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 4.1: Τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών χάλυβα

Υλικό	E (GPa)	ν	ρ (Mg/m ³)
Χάλυβας	210	0.25	7.8
Κονίαμα σύνδεσης	0.2	0.2	1.8

Οι τιμές των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών των κατακόρυφων τοίχων τρίστρωτης τοιχοποιίας από τραβερτίνη, όπως επίσης, του σταυροθολίου και των τόξων του φορέα από οπτοπλινθοδομή παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες υλικών δοκιμίου I

Υλικό	E (GPa)	ν	ρ (Mg/m ³)
Τρίστρωτη τοιχοποιία	1.0	0.2	2.1
Οπτοπλινθοδομή	0.8	0.2	1.8

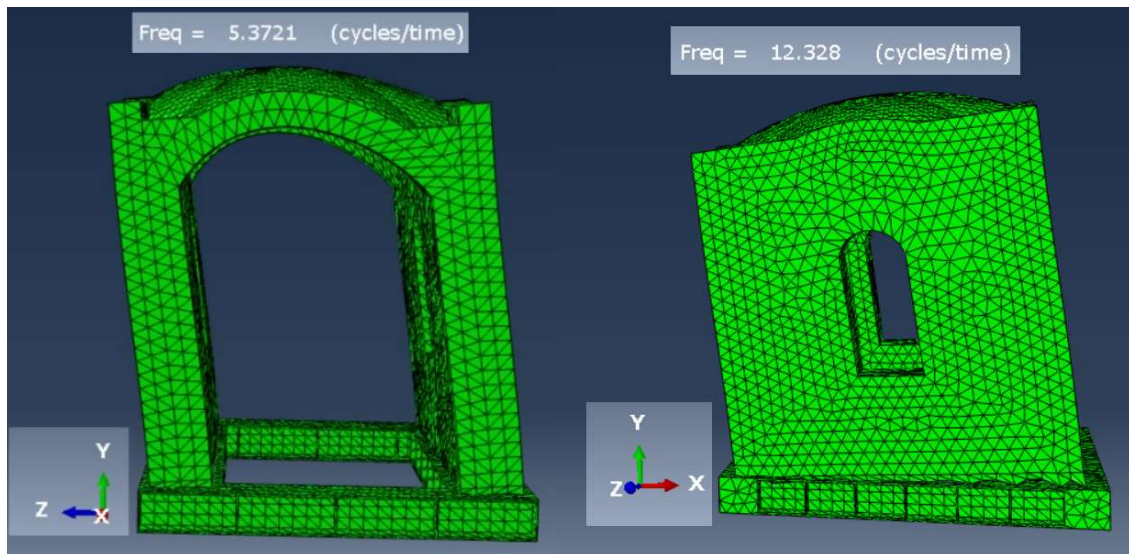
4.3. ΈΛΕΓΧΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ f_x , f_y

Για να θεωρηθεί αξιόπιστη η προσομοίωση της κατασκευής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ελέγχθηκαν οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων στις διευθύνσεις X και Y. Έγινε, επομένως, προσπάθεια να προσεγγιστούν οι τιμές ιδιοσυχνοτήτων του δοκιμίου I που είχαν προκύψει πειραματικά. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων πειραματικού και αριθμητικού μοντέλου.

Πίνακας 4.3: Σύγκριση ιδιοσυχνοτήτων πειραματικού μοντέλου-προσομοιώματος.

	f_x (Hz)	f_y (Hz)
Πειραματικό δοκίμιο	12.30	5.96
Αριθμητικό προσομοίωμα	12.32	5.37

Τα παρακάτω σχήματα αντιστοιχούν στην πρώτη και την δεύτερη ιδιομορφή του αριθμητικού μοντέλου.



Σχήμα 4. 2. Πρώτη & δεύτερη ιδιομορφή αριθμητικού προσομοιώματος

4.4. ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ABAQUS STANDARD

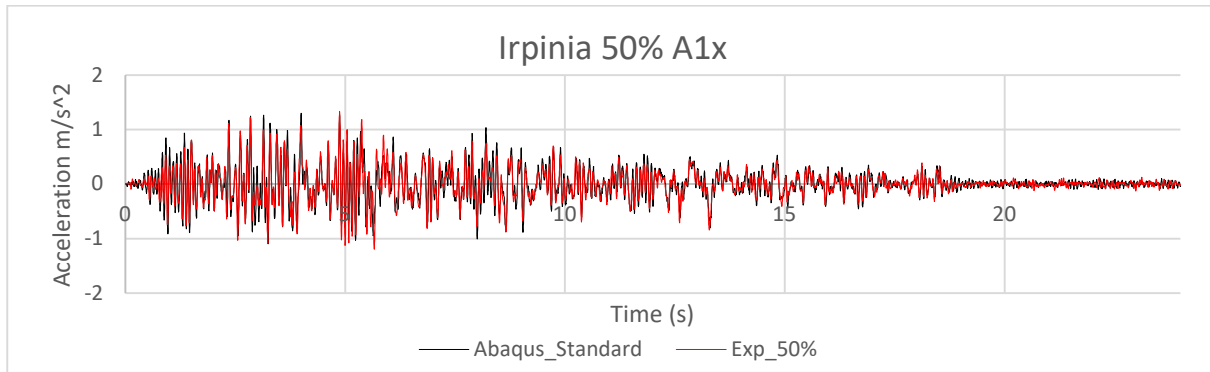
Αρχικά, στο αριθμητικό μοντέλο, εφαρμόστηκαν γραμμικές αναλύσεις. Η εκτέλεση τους υλοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Abaqus Standard και η ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος έγινε με χρήση της λειτουργίας Modal Dynamics. Ειδικότερα, η χρονική περίοδος ορίζεται στα 24 δευτερόλεπτα και το χρονικό βήμα στα 0.005. Η κρίσιμη απόσβεση εκλέχθηκε ως $\zeta_{cr} = 3\%$. Τα επιβαλλόμενα φορτία του συστήματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα φορτία ίδιου βάρους και στις σεισμικές διεγέρσεις. Οι σεισμικές διεγέρσεις αποτελούνται από τα ποσοστά 50% έως 500% του σεισμού Irpinia (δοκιμές 5 έως 17).

4.4.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ A1X ΚΑΙ A2X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

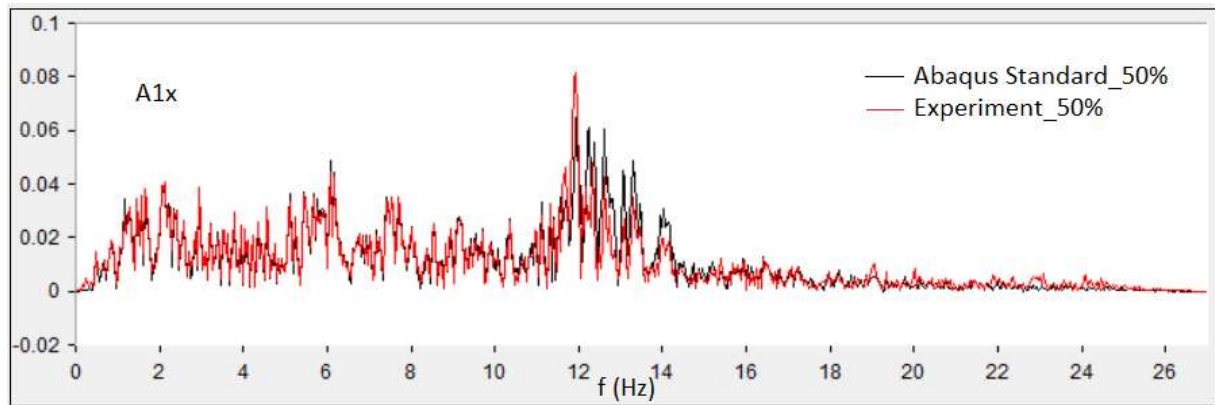
Η σύγκριση των σημάτων θεωρείται απαραίτητο να μελετηθεί τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων. Ειδικότερα, στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι επιταχύνσεις της κορυφής του σταυροθολίου για τις περιπτώσεις 50%, 175% και 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia που εφαρμόστηκε μονοαξονικά ως προς τη διαμήκη διεύθυνση των τοίχων (άξονας X). Επιπλέον, για κάθε ιστορία, έχει υπολογισθεί και το αντίστοιχο φάσμα ούτως ώστε να γίνει σύγκριση και των συχνοτήτων μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων.

Σημειώνεται, επίσης, πως σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές, το 50% του Irpinia αποτελεί ένα σχετικά μικρό σεισμικό φορτίο, το οποίο δεν καταπονεί ιδιαίτερα την κατασκευή. Στο 175% παρατηρούνται οι πρώτες ρωγμές, άρα το σύστημα δεν βρίσκεται πλέον στην ελαστική περιοχή. Στο 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia, παρατηρούνται έντονες και εκτεταμένες ρηγματώσεις.

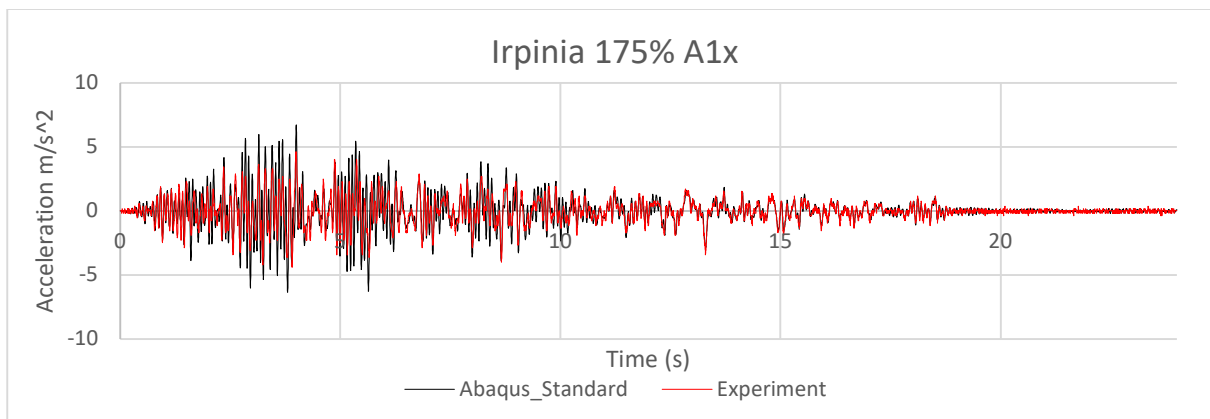
Ακολουθούν οι παραπάνω αποκρίσεις, τα διαγράμματα κόκκινου χρώματος αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα και του μαύρου χρώματος στα αριθμητικά. (Σχήματα 4.3 έως 4.8).



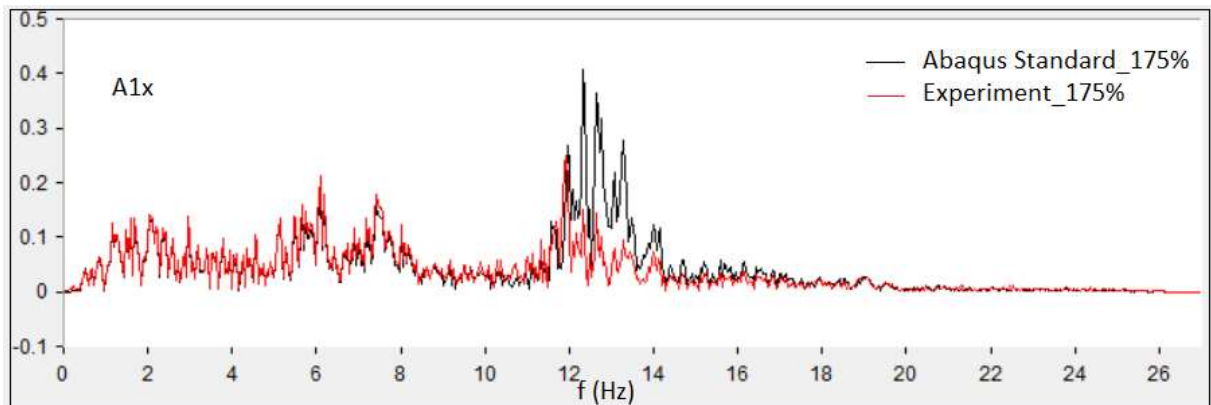
Σχήμα 4.3. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_50%_Irpinia



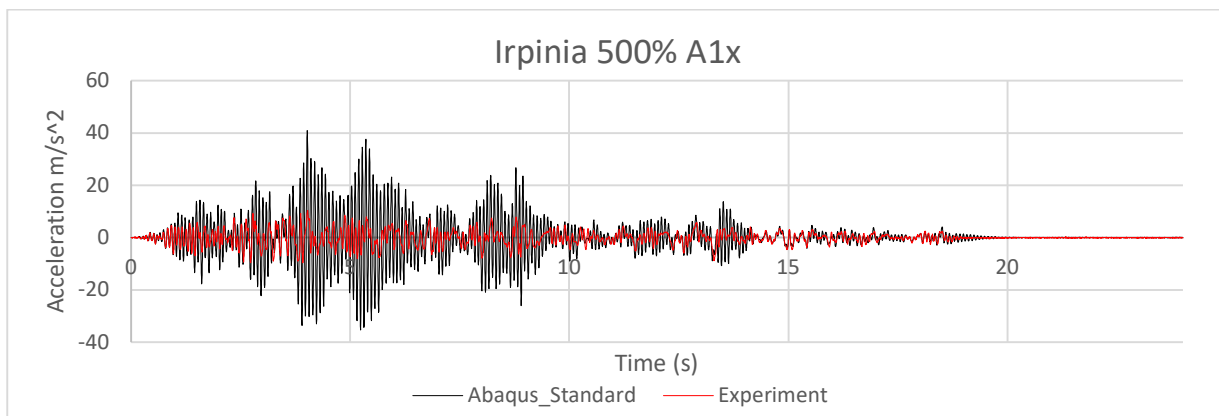
Σχήμα 4.4. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_50%_Irpinia.



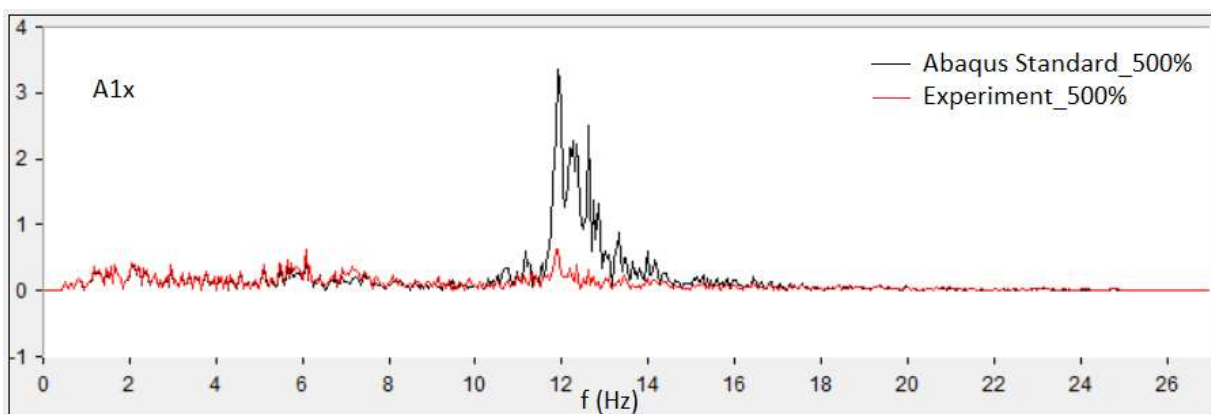
Σχήμα 4.5. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_175%_Irpinia



Σχήμα 4.6. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_175%_Irpinia

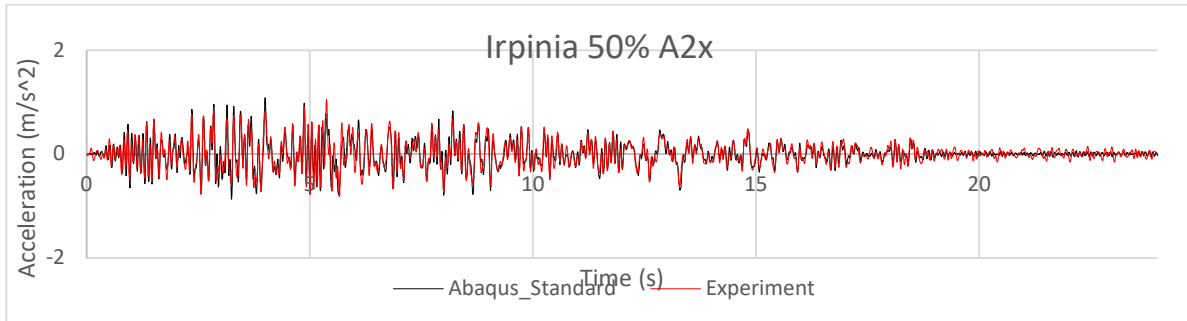


Σχήμα 4.7. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_500%_Irpinia

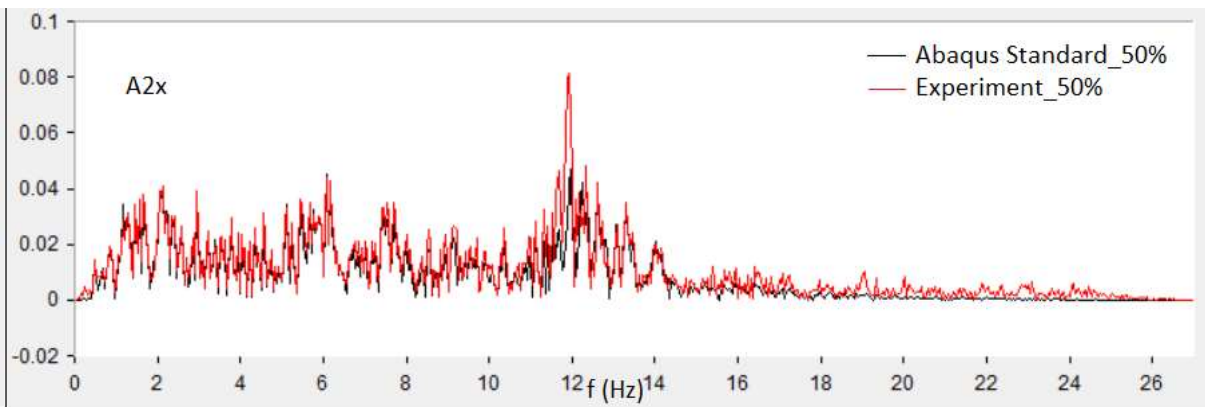


Σχήμα 4.8. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_500%_Irpinia

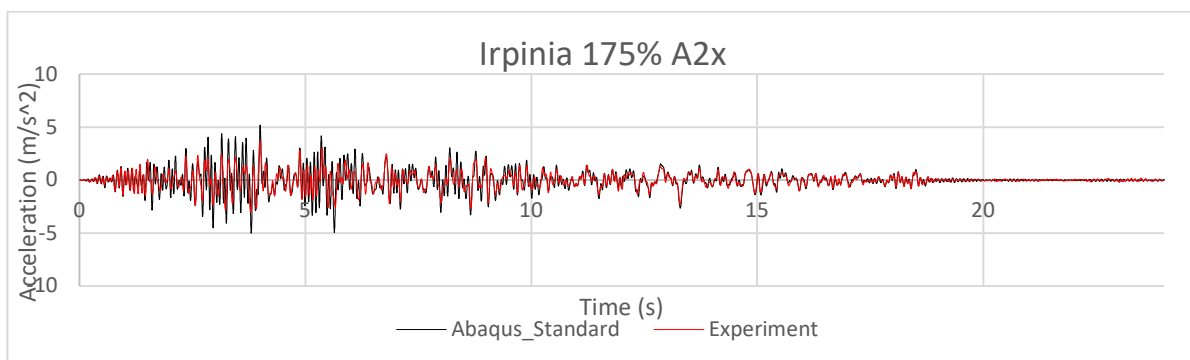
Ομοίως, για τις ίδιες δοκιμές παρουσιάζονται και τα διαγράμματα των επιταχύνσεων A2x. (Σχήματα 4.9 έως 4.14).



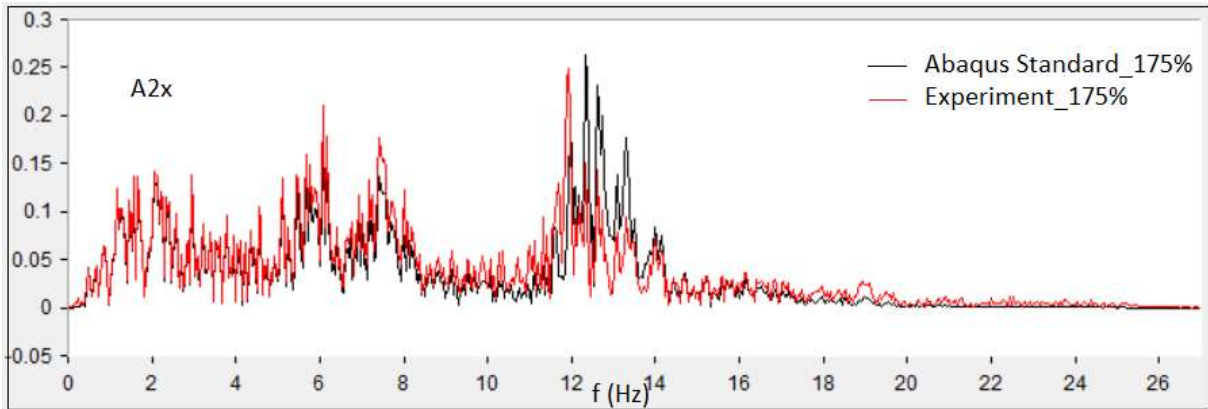
Σχήμα 4.9. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A2x_50%_Irpinia



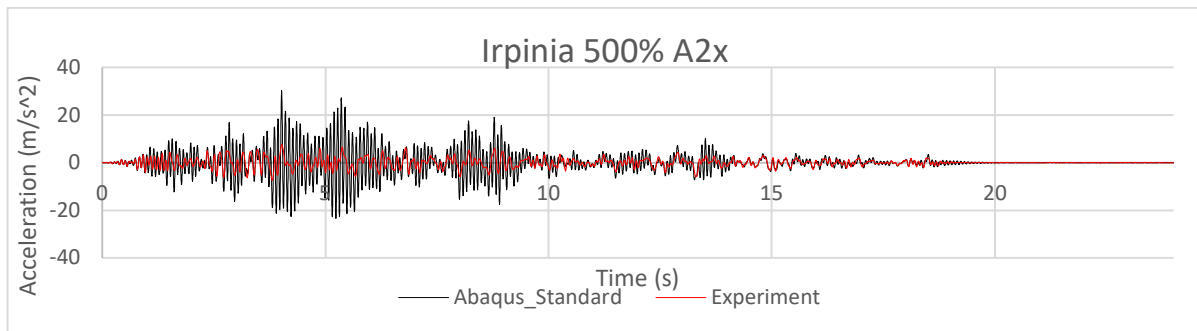
Σχήμα 4.10. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A2x_50%_Irpinia



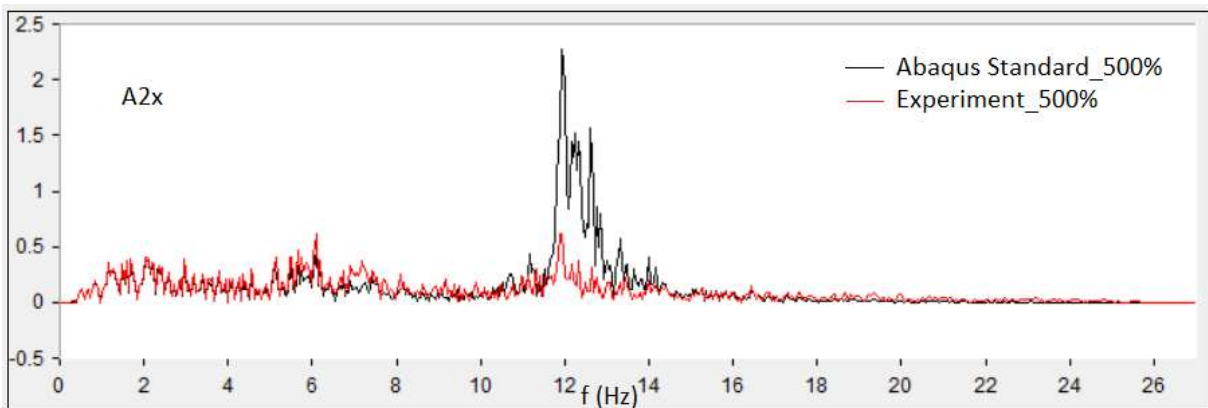
Σχήμα 4.11. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A2x_175%_Irpinia



Σχήμα 4.12. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A2x_175%_Irpinia



Σχήμα 4.13. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A2x_500%_Irpinia



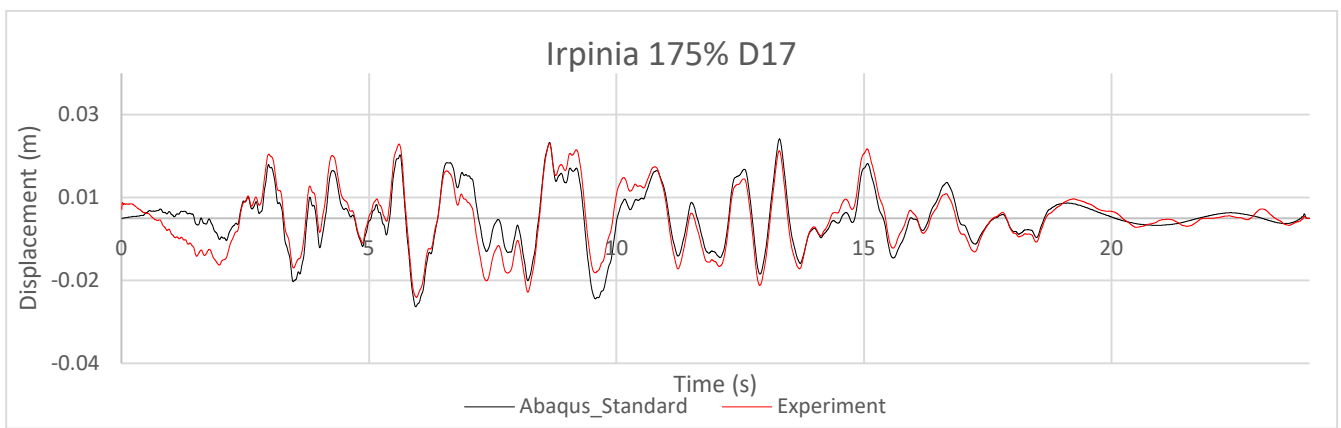
Σχήμα 4.14. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A2x_500%_Irpinia

Παρατηρείται ότι για την περίπτωση του Irpinia 50% οι χονιοιστορίες είναι ουσιαστικά ίδιες μεταξύ τους. Στο Irpinia 175%, μεταξύ των 3s και 8s, τα μέγιστα των αριθμητικών επιταχύνσεων υπερβαίνουν αυτά των πειραματικών. Άρα, επιβεβαιώνονται οι καταγραφές του πειράματος, δηλαδή η εμφάνιση των πρώτων ρωγμών και ότι το μοντέλο αρχίζει να χάνει την ελαστική του συμπεριφορά. Προφανώς, στο

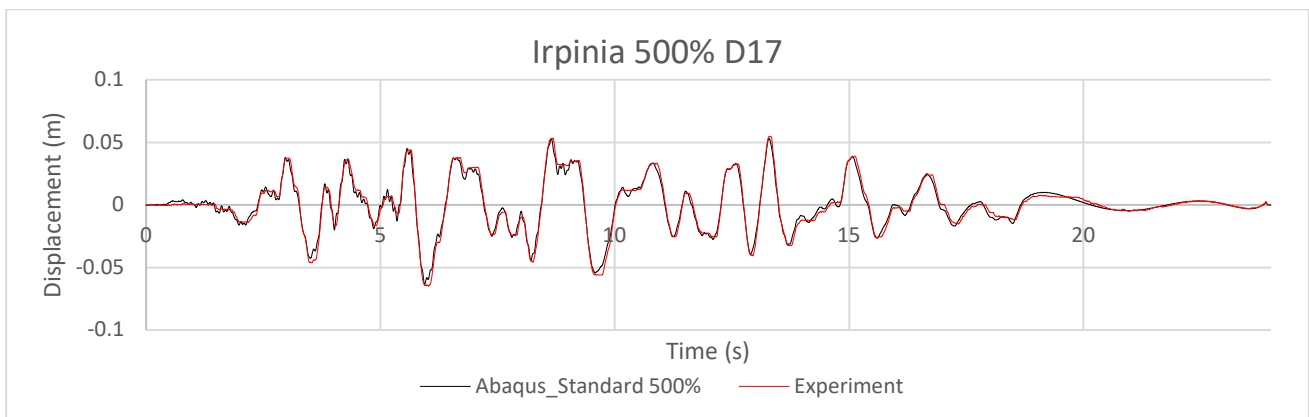
500% του Irpinia η ελαστική ανάλυση δεν προσφέρει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Συμπερασματικά, η συμπεριφορά του υπολογιστικού μοντέλου, δύναται να μελετηθεί μέσω γραμμικής ανάλυσης έως και την δοκιμή 9 (175% Irpinia).

4.4.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ D17X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

Εν συνεχεία, γίνεται σύγκριση των πειραματικών και αριθμητικών μετατοπίσεων στη θέση D17, για τις περιπτώσεις 175% και 500% της σεισμικής διέγερσης. Οι μετατοπίσεις των πειραματικών δεδομένων είναι αυτές που προέκυψαν μέσω της διπλής ολοκλήρωσης των επιταχύνσεων και παρουσιάζονται στα σχήματα 4.15 και 4.16.



Σχήμα 4.15. Σεισμική απόκριση D17_175%_Irpinia



Σχήμα 4.16. Σεισμική απόκριση D17_500%_Irpinia

4.4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ A1X, A2X, A3X.

Προσδιορίζεται το σφάλμα μέχρι την 1η δοκιμή που η ελαστική ανάλυση δεν οδηγεί σε αποδεκτά αποτελέσματα (δοκιμή 10, 175% του Igrinia). Ειδικότερα, για μια παράμετρο X, εκτιμάται η μέση ρίζα τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error, RMSE). Ακολουθεί η σχέση υπολογισμού του RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i_exp} - x_{i_anal})^2}$$

Όπου: n = 4800 το πλήθος των δεδομένων, x_{exp} και x_{anal} είναι η πειραματική και αναλυτική τιμή της παραμέτρου X. Στον παρακάτω πίνακα 4.4. παρουσιάζονται τα σφάλματα των υπό μελέτη χρονοϊστοριών.

Πίνακας 4.4: Σφάλματα αριθμητικών A1X, A2X, A3X.

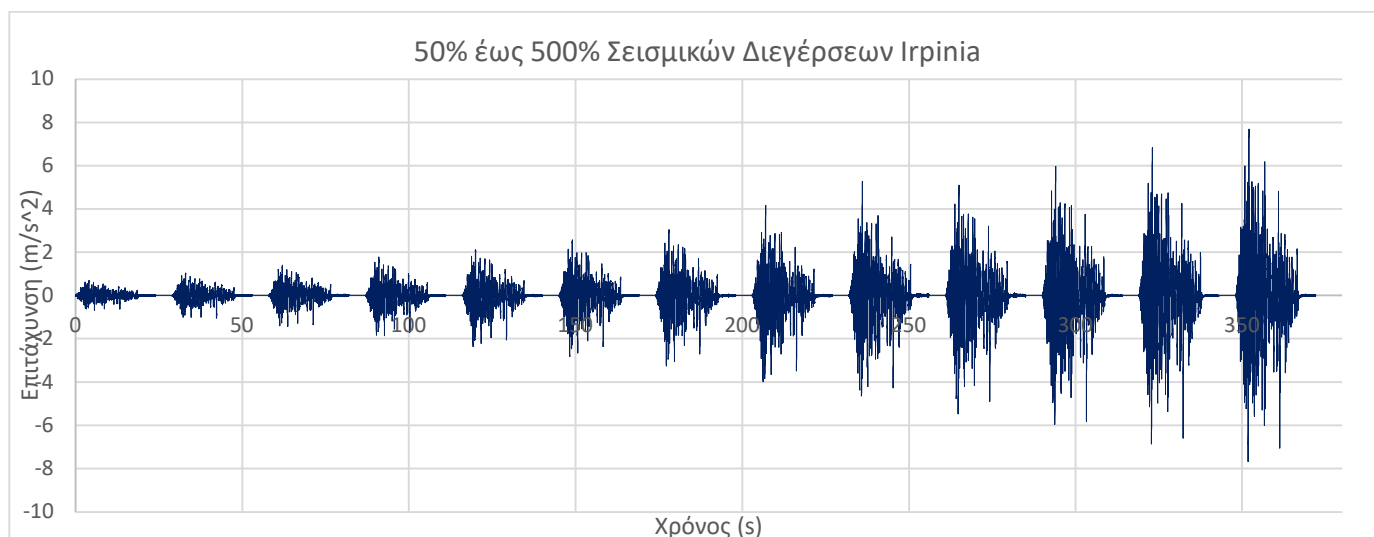
	50%	75%	100%	125%	150%	175%
A1x (m/s ²)	0.15	0.28	0.41	0.56	0.70	0.87
A2x (m/s ²)	0.11	0.20	0.30	0.41	0.52	0.63
A3x (m/s ²)	0.15	0.20	0.28	0.39	0.49	0.62

4.5. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ABAQUS EXPLICIT

Μέθοδος κεντρικών διαφορών (δυναμική μέθοδος)

Η μη γραμμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας λήφθηκε υπόψη χρησιμοποιώντας καταστατικό που αναπτύχθηκε, στο λογισμικό μέσω μιας υπορουτίνας, από το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και λαμβάνει υπόψη όλους του τρόπους αστοχίας της τοιχοποιίας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση: τοιχοποιία σε θλίψη, εφελκυσμό, διάτμηση.

Για να είναι το αριθμητικό μοντέλο αντιπροσωπευτικό του πειραματικού, τα σεισμικά φορτία εφαρμόστηκαν σε σειρά με χρονική διαφορά κατά 5 δευτερολέπτων μεταξύ τους. Υπάρχει, δηλαδή, ο απαραίτητος χρόνος ώστε να επέρχεται ισορροπία στο σύστημα και να μην αλληλεπικαλύπτονται οι αποκρίσεις των σεισμικών διεγέρσεων. Στο σχήμα 4.17 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι σεισμικές διεγέρσεις Irpinia από τη δοκιμή του 50% έως 500% του φορτίου.



Σχήμα 4.17. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης στη βάση.

Κατά τις ανελαστικές αναλύσεις εκτελέστηκαν δύο δοκιμές όπου στη δεύτερη έγινε αύξηση των αντοχών του σταυροθολίου, αναλυτικότερη περιγραφή αυτών των αλλαγών παρουσιάζεται στον πίνακα 4.5. της επόμενης σελίδας.

Πίνακας 4.5: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Δοκιμών I& II

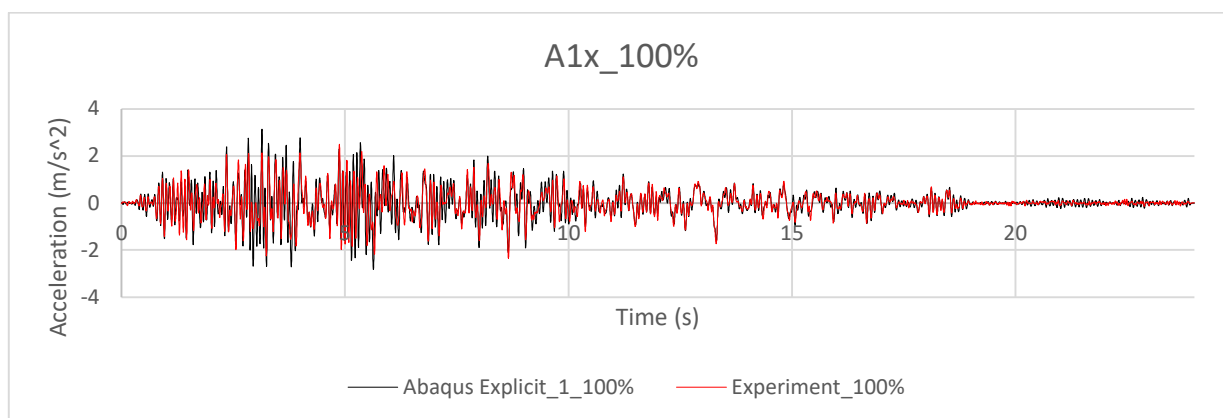
Παράμετροι Υλικού	Πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία	Σταυροθόλιο	
		Δοκιμή I	Δοκιμή II
Πυκνότητα ρ (Mgr/m ³)	2.1	1.8	1.8
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	1	0.8	0.8
Λόγος Poisson	0.25	0.25	0.25
Εφελκυστική Αντοχή f_t (MPa)	0.15	0.07	0.1
Ενέργεια Θραύσης G_I (kN/m)	0.02	0.007	0.01
Μέγιστη θλιπτική αντοχή f_c (MPa)	-1.74	-0.8	-1
Μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_c	-0.0016	-0.0015	-0.0015
Παράμετρος αποφόρτισης από εφελκυσμό α_t	0.85	0.85	0.85
Τάση αποκατάστασης ρωγμής f_t (MPa)	-0.15	-0.07	-0.10
Παράμετρος αποφόρτισης από θλίψη α_c	0.85	0.85	0.85
Διατμητική αντοχή f_s (MPa)	0.3	0.15	0.25
Ενέργεια Θραύσης G_{II} (kN/m)	0.3	0.25	0.25
Παραμένουσα διατμητική αντοχή	0.1	0.05	0.075
Παράμετρος αποφόρτισης σε διάτμηση α_s	0.9	0.9	0.9

Η συγκρίσεις των δεδομένων που ακολουθούν, έγιναν κατόπιν εφαρμογής ψηφιακών φίλτρων άπειρης κρουστικής απόκρισης (IIR), όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.1.1.

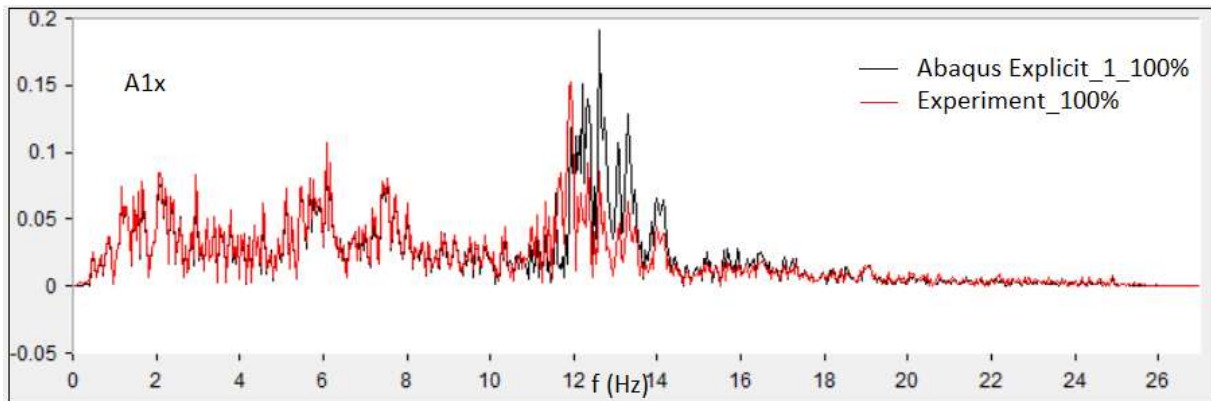
4.5.1. ΔΟΚΙΜΗ I

4.5.1.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ A1X ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ D17X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

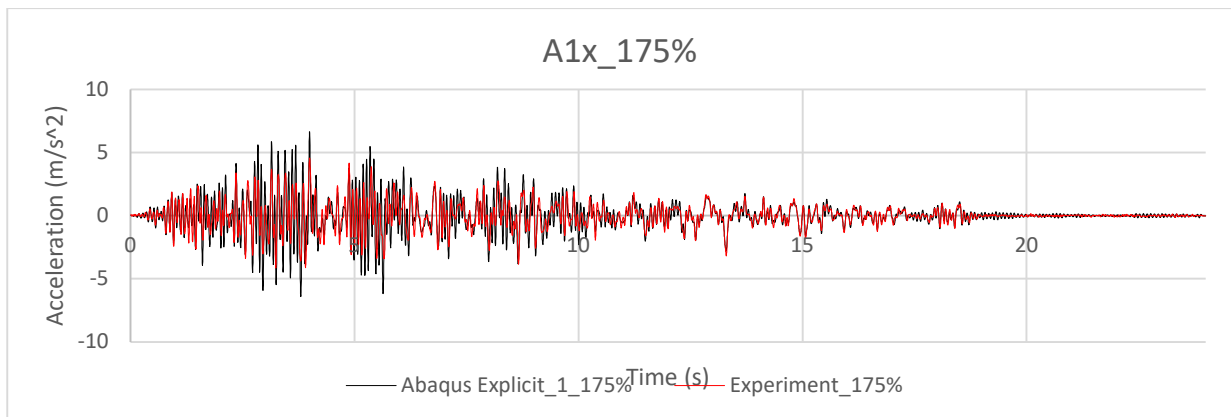
Στα παρακάτω σχήματα (4.18 έως 4.26) παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των A1x και D17 για τις δοκιμές 100%, 175% και 500%.



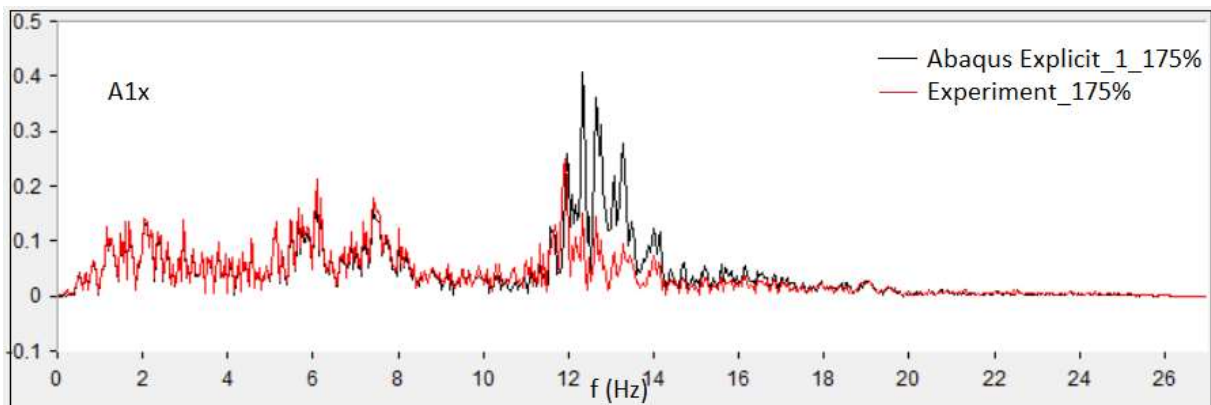
Σχήμα 4.18. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_100%_Igrinia



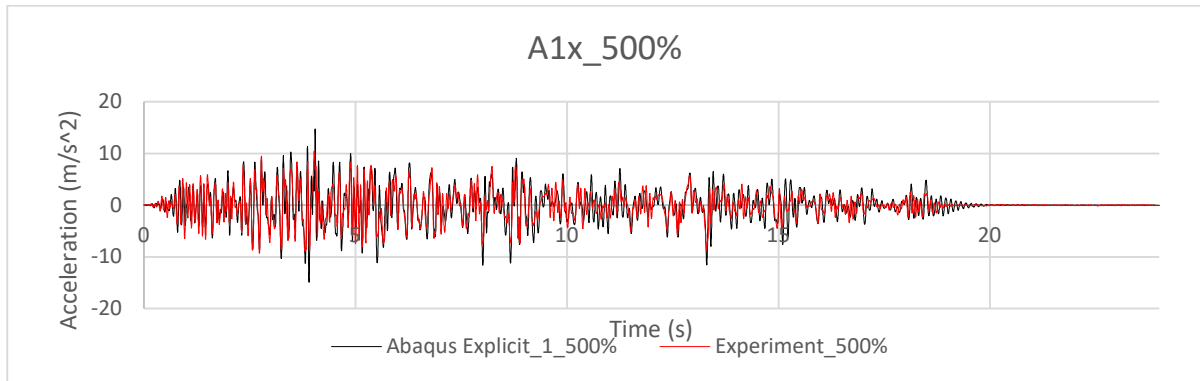
Σχήμα 4.19. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_100%_Irpinia



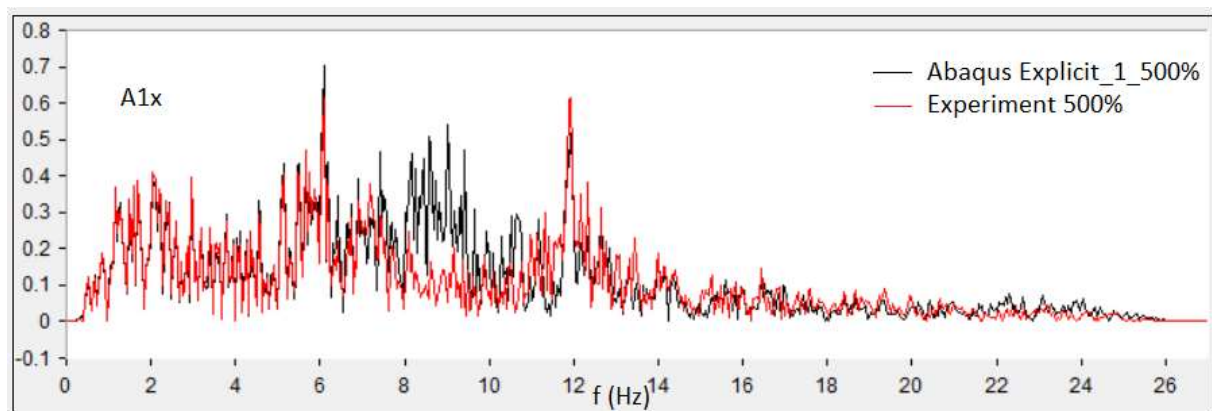
Σχήμα 4.20. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_175%_Irpinia



Σχήμα 4.21. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_175%_Irpinia

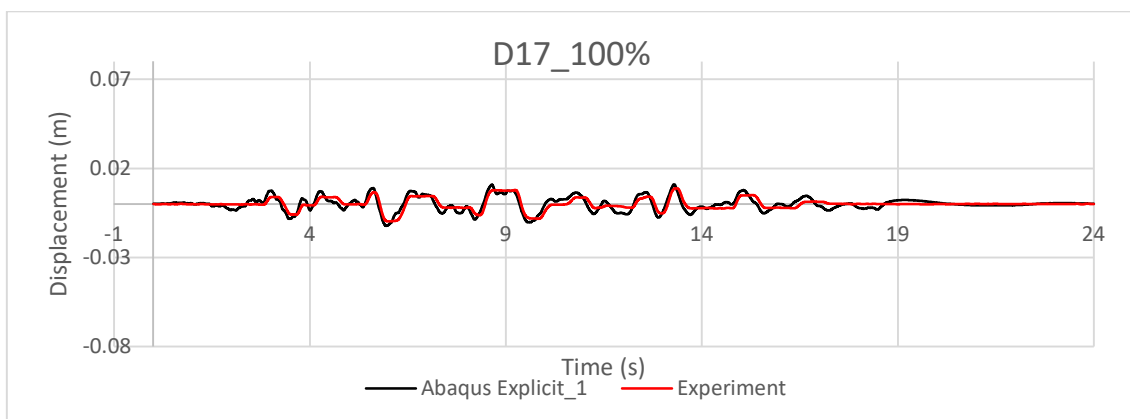


Σχήμα 4.22. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_500%_Irpinia.

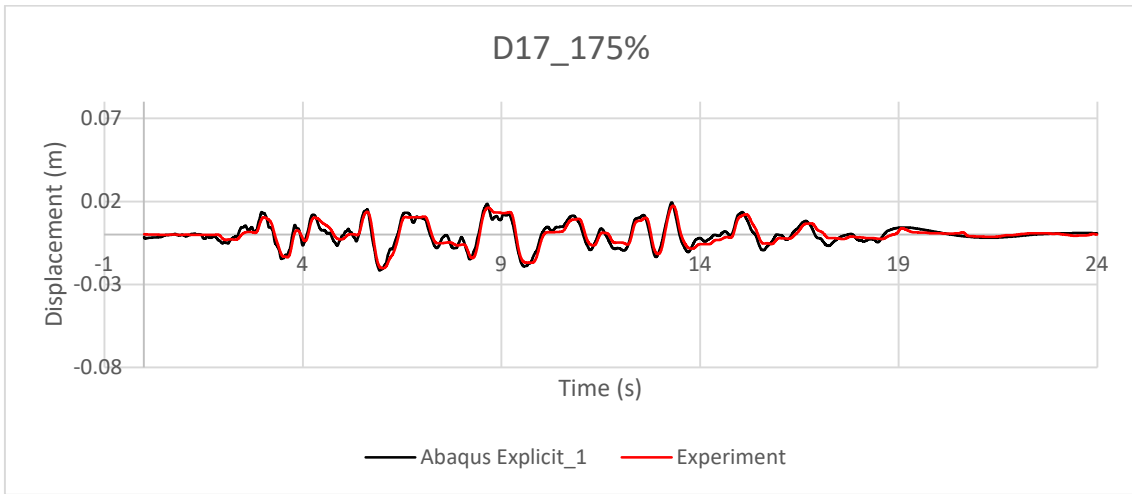


Σχήμα 4.23 Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_500%_Irpinia

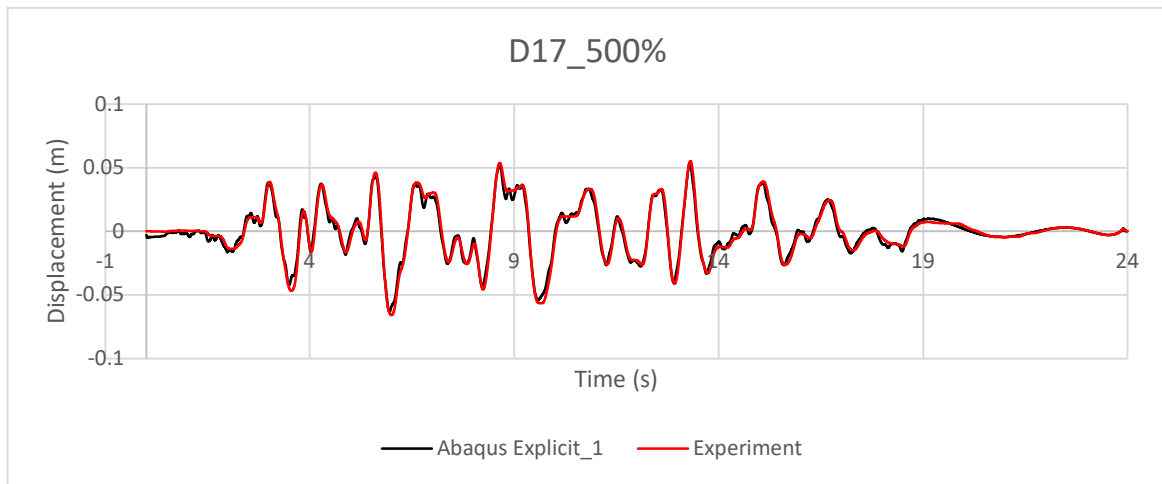
Σημειώνεται ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης οι διαφορές που παρατηρούνται στο πεδίο των συχνοτήτων.



Σχήμα 4.24. Σεισμική απόκριση D17_100%_Irpinia



Σχήμα 4.25. Σεισμική απόκριση D17_175%_Irpinia

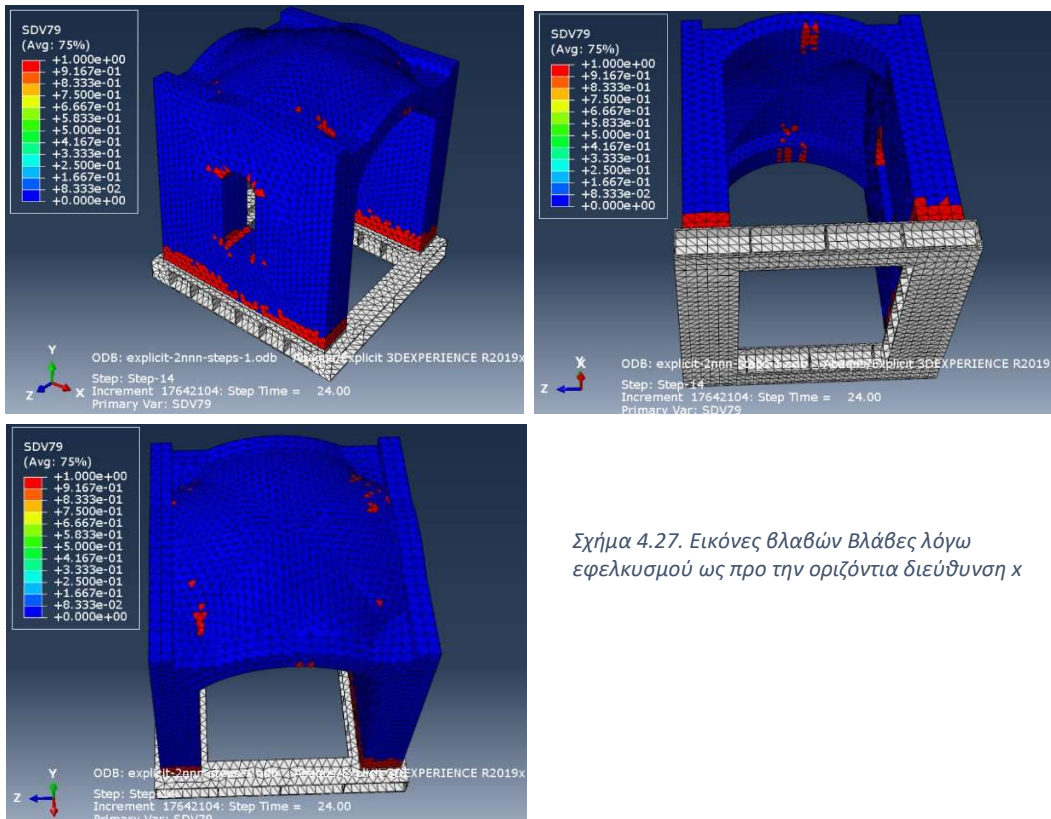


Σχήμα 4.26. Σεισμική απόκριση D17_500%_Irpinia

4.5.1.2. ΘΕΣΕΙΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ.

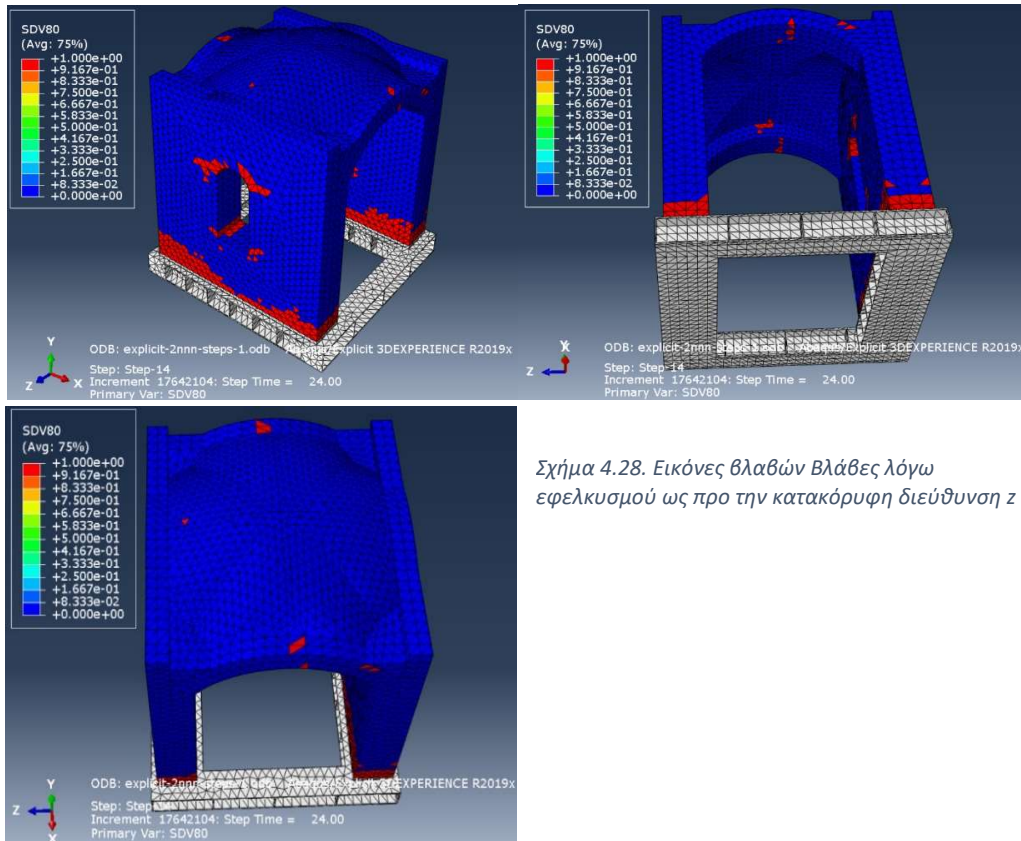
➤ Βλάβες λόγω εφελκυσμού

Ως προς την οριζόντια διεύθυνση x, οι περιοχές αστοχίας εντοπίζονται στις βάσεις των τοίχων, στη μέση των τόξων του σταυροθολίου από την κάτω πλευρά, στην πάνω επιφάνεια των γωνιών του σταυροθολίου, στα άκρα των τόξων των παραθύρων καθώς και στις γωνίες των βάσεων αυτών (σχήμα 4.27)



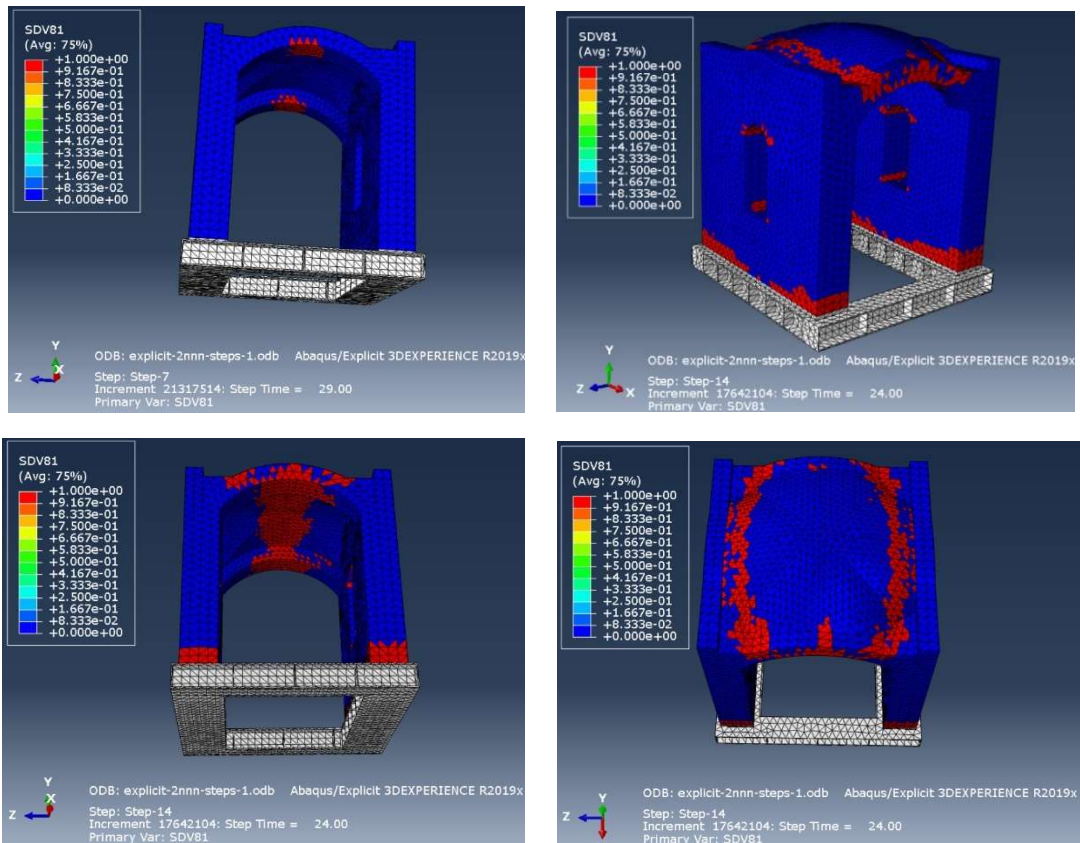
Σχήμα 4.27. Εικόνες θλαβών Βλάβες λόγω εφελκυσμού ως προ την οριζόντια διεύθυνση x

Ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση z, οι περιοχές αστοχίας εντοπίζονται στις βάσεις των τοίχων και κυρίως στα άκρα αυτών, στις γωνίες των βάσεων των παραθύρων και στα άκρα των τόξων αυτών (με μια επέκταση προς την τοιχοποιία), στη μέση των τόξων του σταυροθολίου (σχήμα 4.28)



Σχήμα 4.28. Εικόνες βλαβών βλάβες λόγω εφελκυσμού ως προ την κατακόρυφη διεύθυνση z

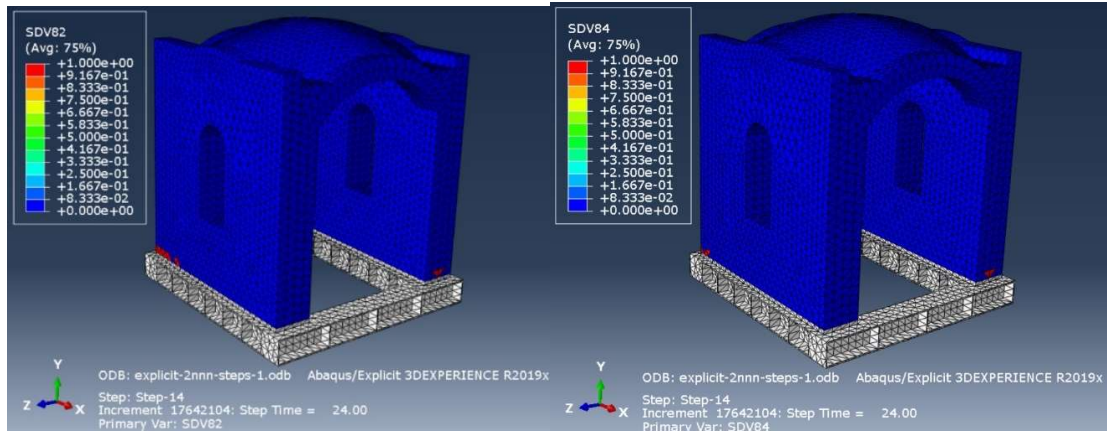
Ως προς την οριζόντια διεύθυνση γ , οι περιοχές αστοχίας εντοπίζονται κατά το 175% του σεισμικού φορτίου στα κέντρα των τόξων του σταυροθολίου. Και κατά το 500% του σεισμικού φορτίου στις βάσεις των τοίχων, στις γωνίες και στις γενέσεις των τόξων των παραθύρων, στο κέντρο και στα άκρα των τόξων του σταυροθολίου, επί του σταυροθολίου κοντά στις συνδέσεις με τους τοίχους, κεντρικά στην κάτω επιφάνεια του σταυροθολίου κατά μήκος των τοίχων (σχήμα 4.29.)



Σχήμα 4.29. Εικόνες βλαβών Βλάβες λόγω εφελκυσμού ως προ την οριζόντια διεύθυνση γ

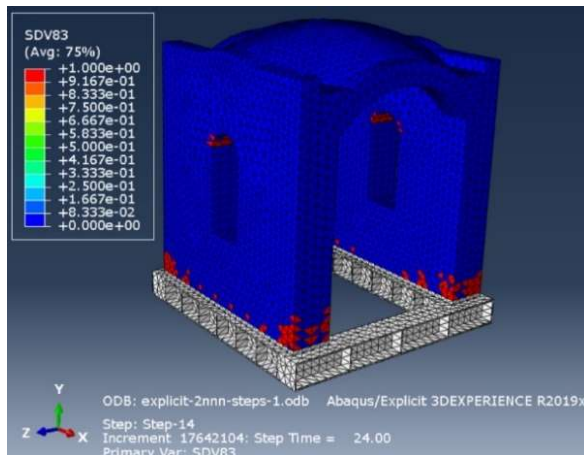
➤ Βλάβες λόγω θλίψης

Ως προς τις οριζόντιες διευθύνσεις x και y , παρατηρούνται πολύ μικρής έκτασης βλάβες στη βάση του τοίχου (σχήμα 4.30)



Σχήμα 4.30. Εικόνες βλαβών λόγω θλίψης ως προς τις οριζόντιες διευθύνσεις x & y .

Ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση z , παρατηρούνται βλάβες στις βάσεις των τοίχων και στις γενέσεις των τόξων των παραθύρων (σχήμα 4.31)

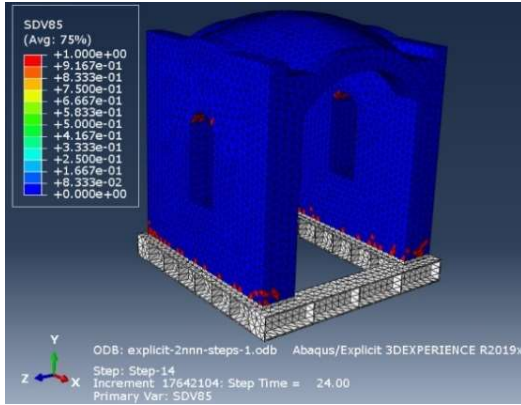


Σχήμα 4.31. Εικόνες βλαβών λόγω θλίψης ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση

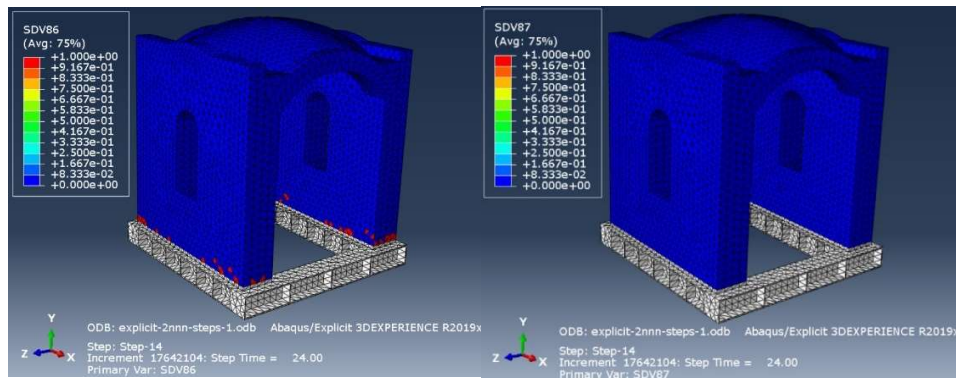
➤ Βλάβες λόγω διάτμησης

Κατά xz παρατηρούνται βλάβες στις βάσεις των τοίχων και στα τόξα των παραθύρων (σχήμα 2.32.)

Κατά yz , παρατηρούνται βλάβες στις βάσεις των τοίχων, κατά yx , δεν εμφανίζονται βλάβες (σχήμα 2.33)



Σχήμα 4.32. Εικόνες βλαβών λόγω διάτμησης xz

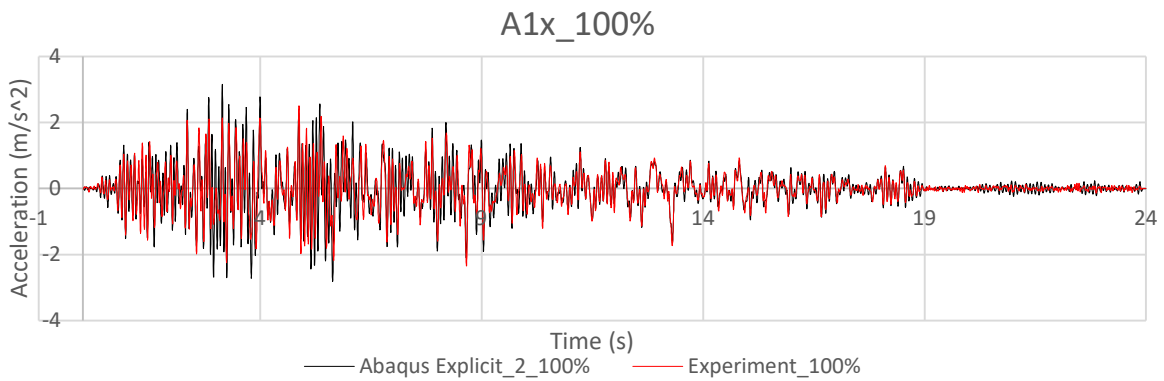


Σχήμα 4.32. Εικόνες βλαβών λόγω διάτμησης zy & yx

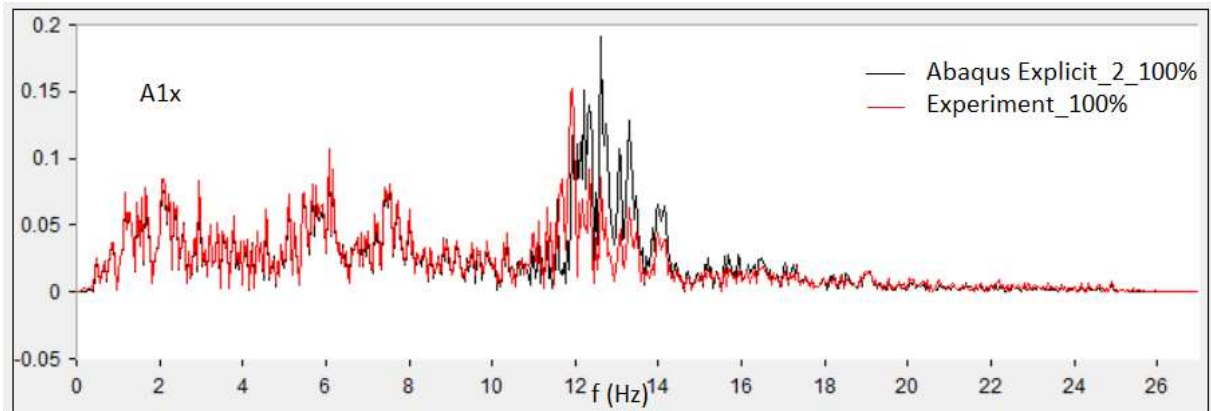
4.5.2. ΔΟΚΙΜΗ II

4.5.2.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ A1X ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ D17X ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

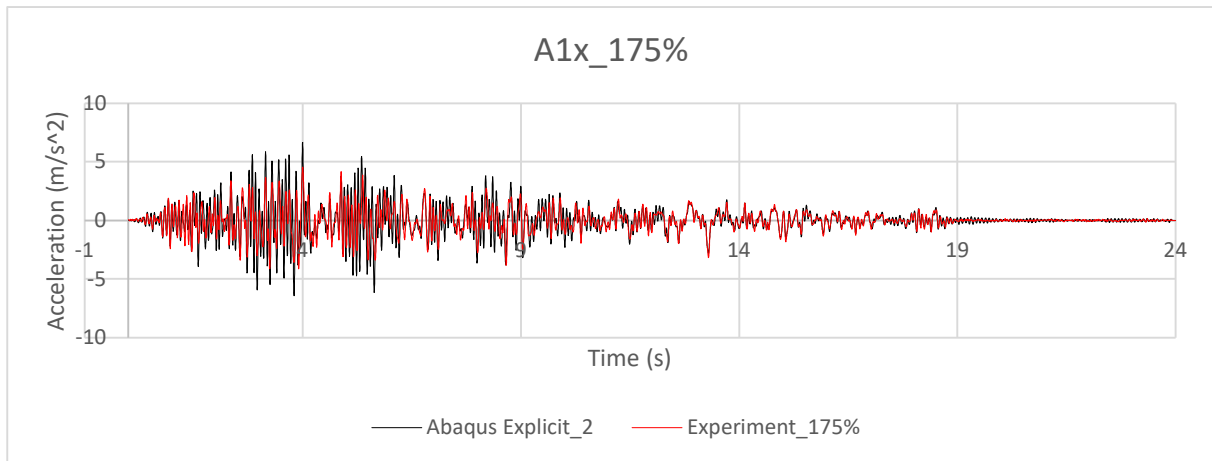
Στα παρακάτω σχήματα (4.33 έως 4.41) παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των A1x και D17 για τις δοκιμές 100%, 175% και 500%.



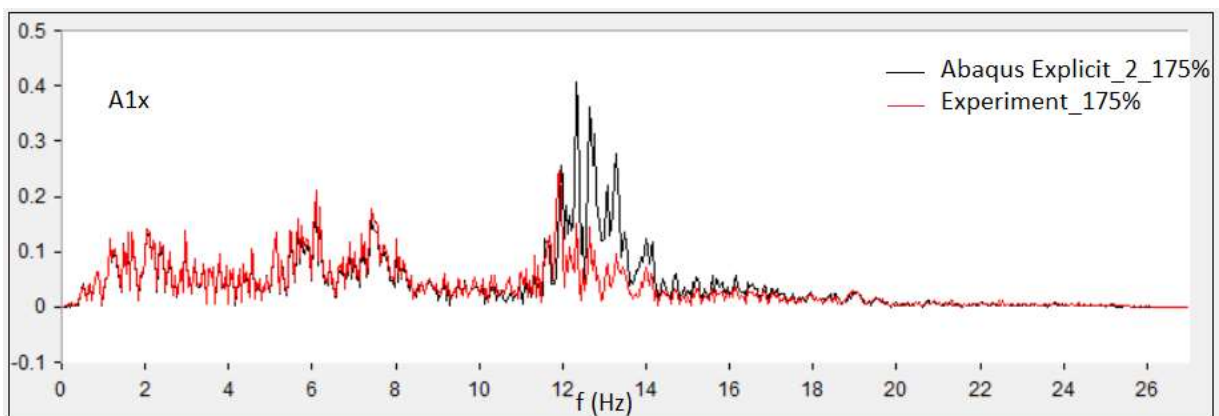
Σχήμα 4.33. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_100%_Irpinia



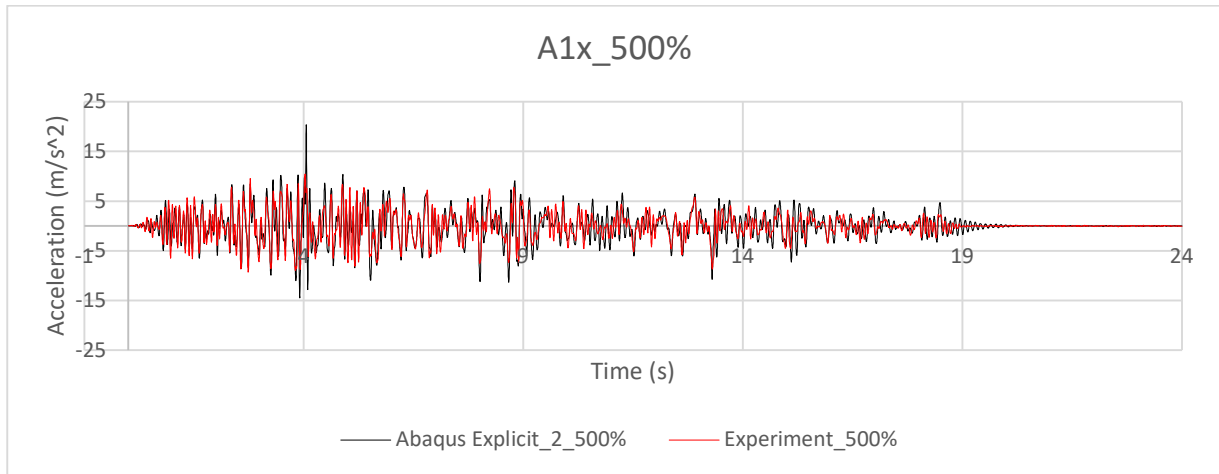
Σχήμα 4.34. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_100%_Irinia



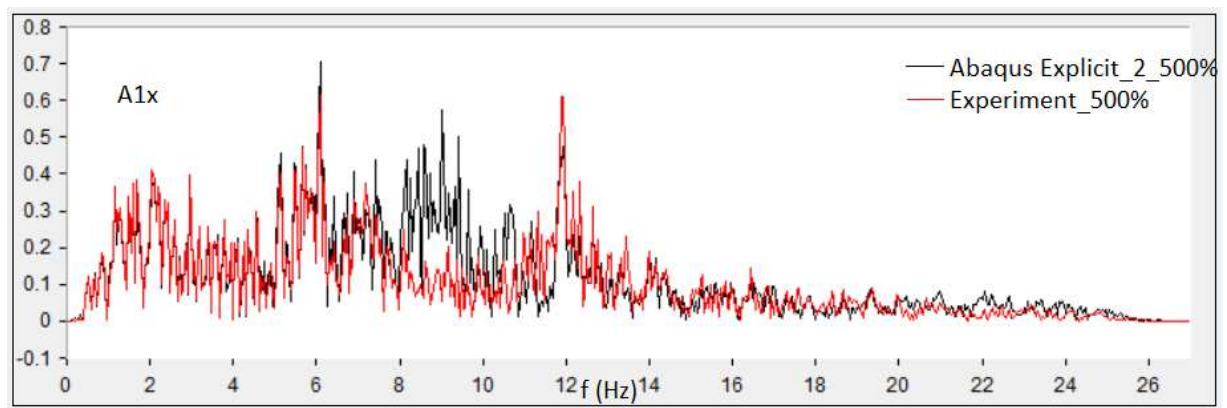
Σχήμα 4.35. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_175%_Irinia.



Σχήμα 4.36. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_175%_Irinia.

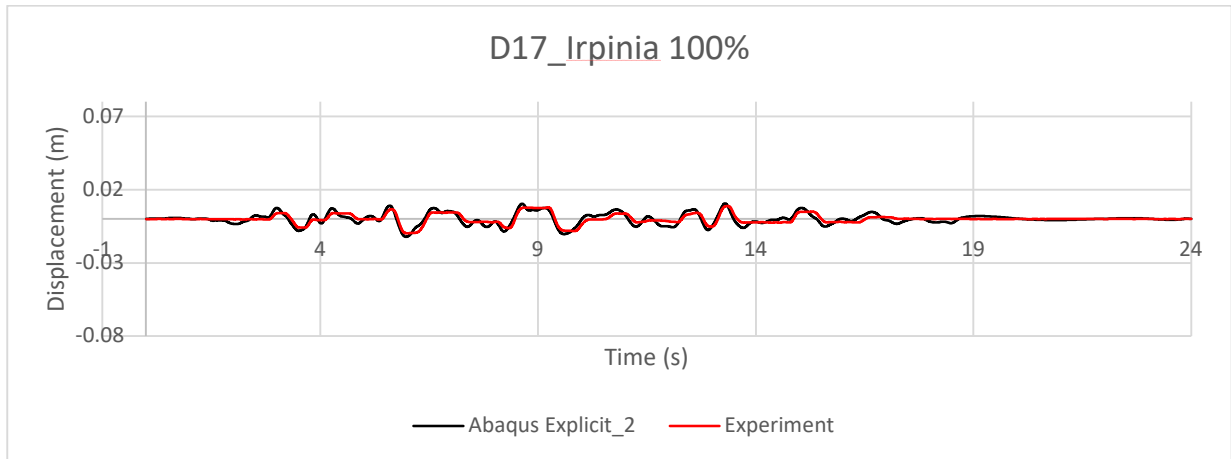


Σχήμα 4.37. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_500%_Irpinia

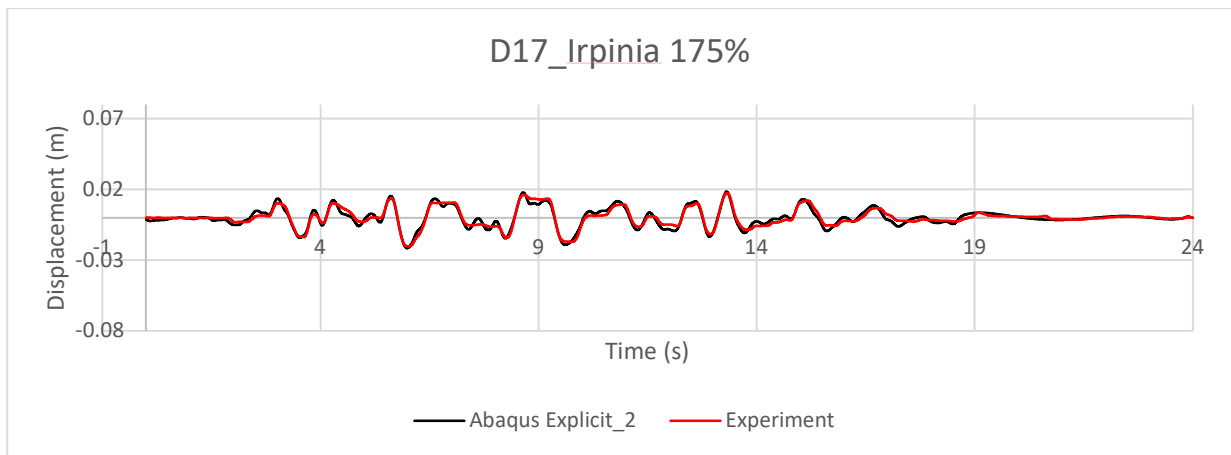


Σχήμα 4.38. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_500%_Irpinia.

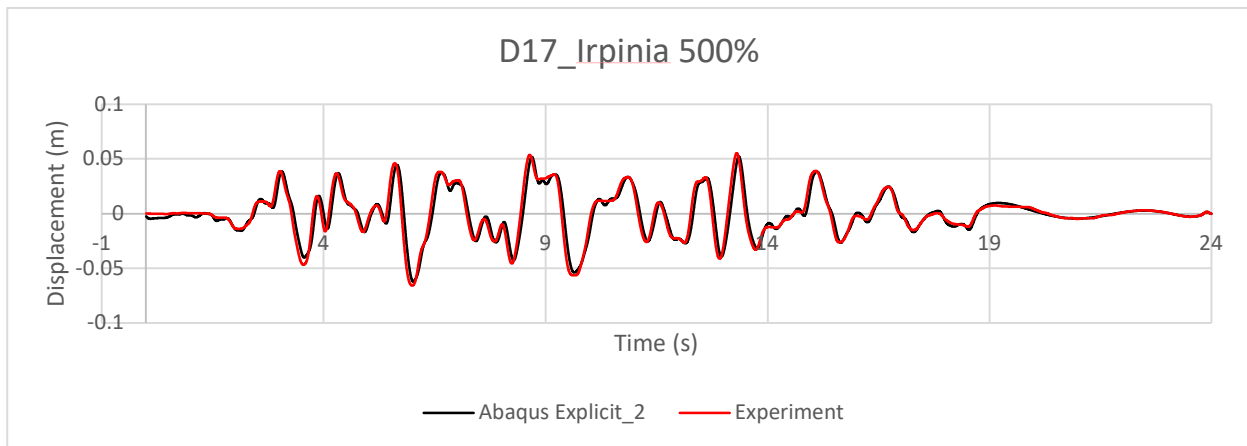
Σημειώνεται ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης οι διαφορές που παρατηρούνται στο πεδίο των συχνοτήτων.



Σχήμα 4.39. Σεισμική απόκριση D17_100%_Irpinia.



Σχήμα 4.40. Σεισμική απόκριση D17_175%_Irpinia.



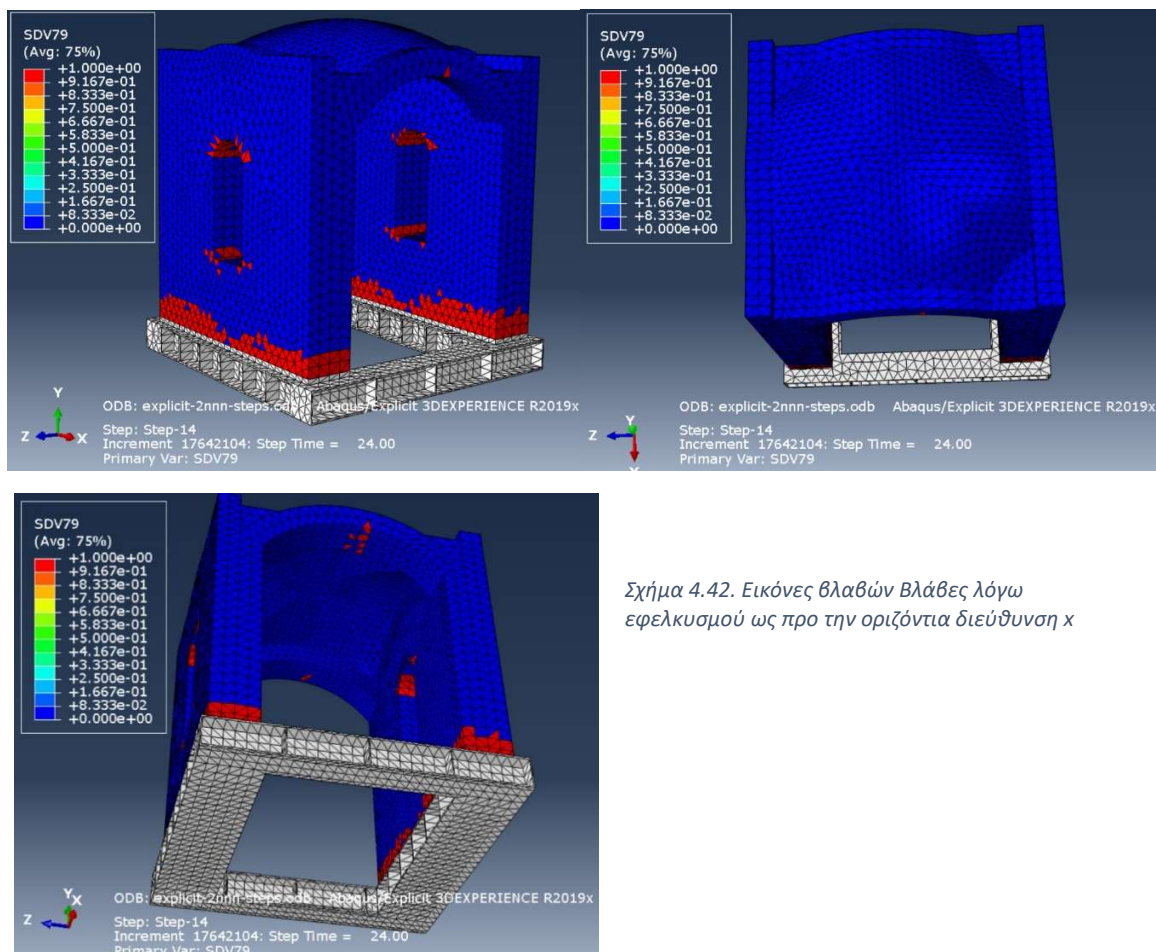
Σχήμα 4.41. Σεισμική απόκριση D17_500%_Irpinia

4.5.2.2. ΘΕΣΕΙΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ.

Στις εικόνες που ακολουθούν, διαφαίνονται οι περιοχές όπου, σύμφωνα με την μη γραμμικά ελαστική ανάλυση, παρουσιάζονται βλάβες λόγω εφελκυσμού, θλίψης ή διάτμησης. Είναι, δηλαδή, οι θέσεις επί του τρισδιάστατου φορέα, στις οποίες οι ασκούμενες τάσεις υπερβαίνουν τις αντοχές των υλικών. Γενικά, γίνεται εστίαση στις βλάβες που έχουν δημιουργηθεί μετά το πέρας της τελευταίας δοκιμής, το 500% του I_{pr} . Για την περίπτωση, όμως, του ασθενούς οριζώντιου άξονα, θα εξεταστούν και οι βλάβες για το 175% του σεισμικού φορτίου, που σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα είναι καταγεγραμμένες οι πρώτες ρωγμές. Υπενθυμίζεται ότι έχει υιοθετηθεί ο συμβολισμός των αξόνων της σεισμικής τράπεζας, οπότε ο κατακόρυφος άξονας είναι ο z (y στις εικόνες του Abaqus) και ο οριζώντιος, ασθενής, άξονας είναι ο γ (z στις εικόνες του Abaqus).

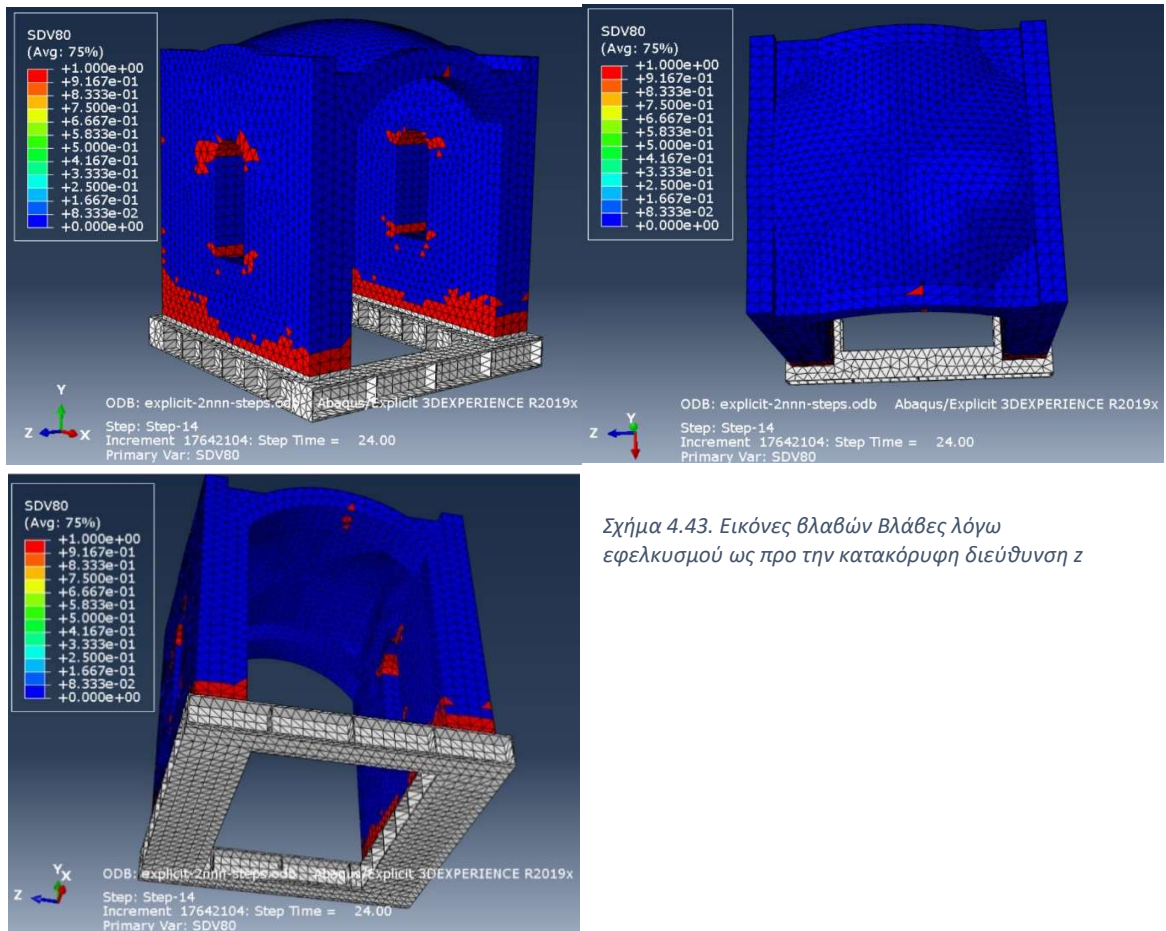
➤ Βλάβες λόγω εφελκυσμού:

Ως προς την οριζόντια διεύθυνση x, οι περιοχές αστοχίας εντοπίζονται στις βάσεις των τοίχων, στη μέση των τόξων του σταυροθολίου από την κάτω πλευρά, στα άκρα των τόξων των παραθύρων καθώς και στις γωνίες των βάσεων αυτών (σχήμα 4.42).



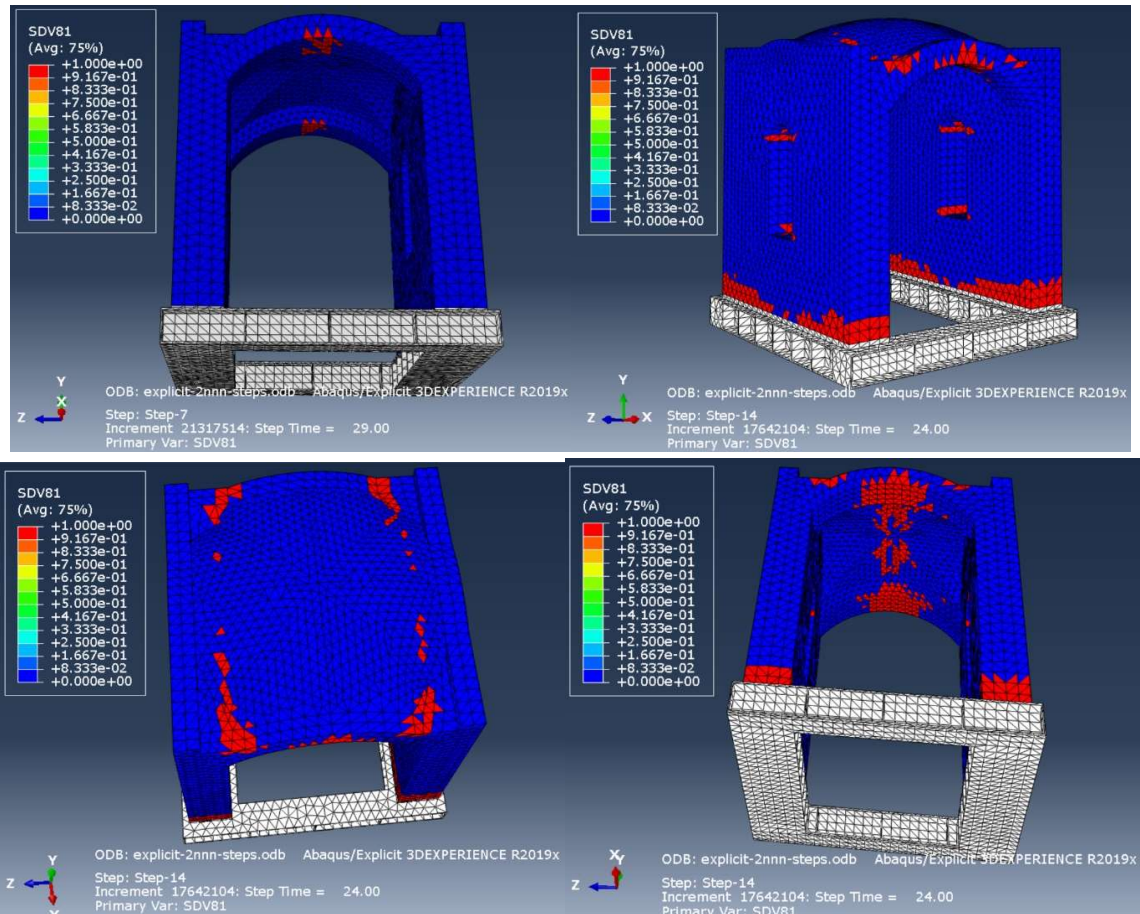
Σχήμα 4.42. Εικόνες βλαβών Βλάβες λόγω εφελκυσμού ως προ την οριζόντια διεύθυνση x

Ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση z, οι περιοχές αστοχίας εντοπίζονται στις βάσεις των τοίχων και κυρίως στα άκρα αυτών, στις γωνίες των βάσεων των παραθύρων και στα άκρα των τόξων αυτών (με μια επέκταση προς την τοιχοποιία), στη μέση των τόξων του σταυροθολίου (σχήμα 4.43.).



Σχήμα 4.43. Εικόνες βλαβών βλάβες λόγω εφελκυσμού ως προ την κατακόρυφη διεύθυνση z

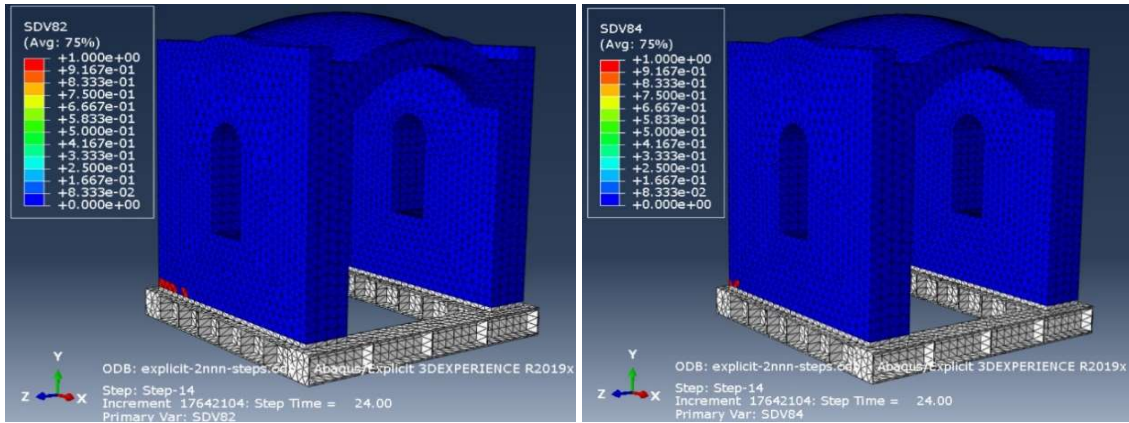
Ως προς την οριζόντια διεύθυνση γ , οι περιοχές αστοχίας εντοπίζονται κατά το 175% του σεισμικού φορτίου στα κέντρα των τόξων του σταυροθολίου. Και κατά το 500% του σεισμικού φορτίου στις βάσεις των τοίχων, στις γωνίες και στις γενέσεις των τόξων των παραθύρων, στο κέντρο και στα άκρα των τόξων του σταυροθολίου, επί του σταυροθολίου κοντά στις συνδέσεις με τους τοίχους, κεντρικά στην κάτω επιφάνεια του σταυροθολίου κατά μήκος των τοίχων (σχήμα 4.44.).



Σχήμα 4.44. Εικόνες βλαβών Βλάβες λόγω εφελκυσμού ως προ την οριζόντια διεύθυνση γ

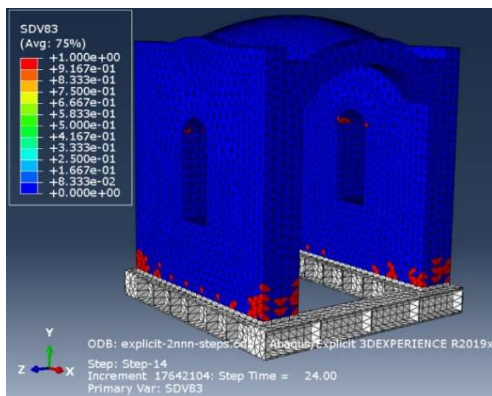
➤ Βλάβες λόγω θλίψης

Ως προς τις οριζόντιες διευθύνσεις x και y , παρατηρούνται πολύ μικρής έκτασης βλάβες στη βάση του τοίχου (σχήμα 4.45).



Σχήμα 4.45. Εικόνες βλαβών λόγω θλίψης ως προς τις οριζόντιες διευθύνσεις x & y .

Ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση z , παρατηρούνται βλάβες στις βάσεις των τοίχων, στις γενέσεις των τόξων των παραθύρων (σχήμα 4.46)

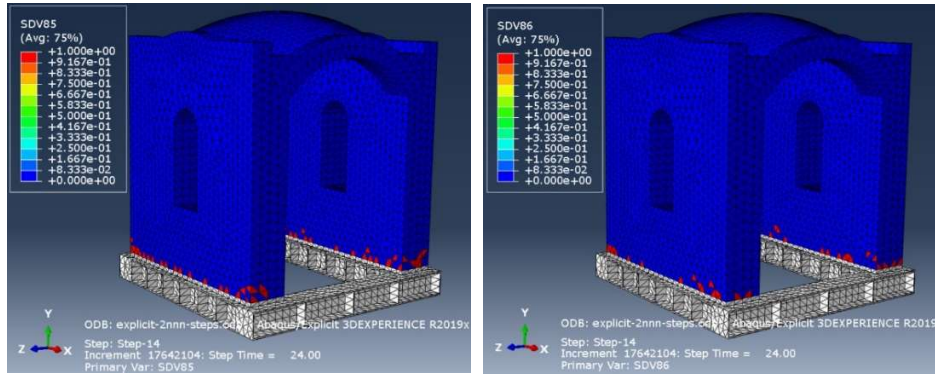


Σχήμα 4.46. Εικόνες βλαβών λόγω θλίψης ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση

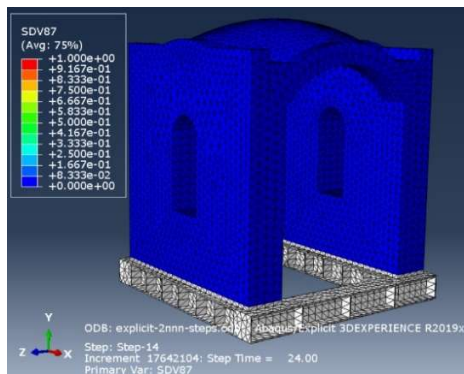
➤ Βλάβες λόγω διάτμησης

Κατά xz και zy, παρατηρούνται βλάβες στις βάσεις των τοίχων (σχήμα 4.47)

Κατά yx, δεν εμφανίζονται βλάβες (σχήμα 4.48)



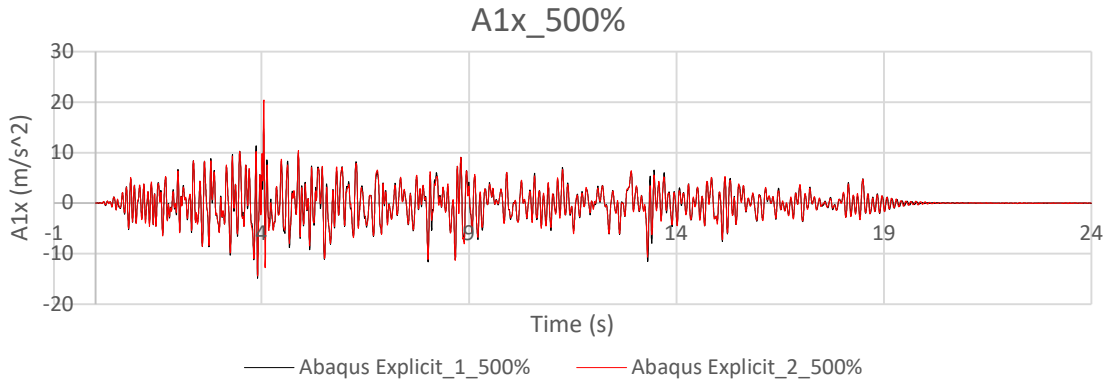
Σχήμα 4.47. Εικόνες βλαβών λόγω διάτμησης xz & zy



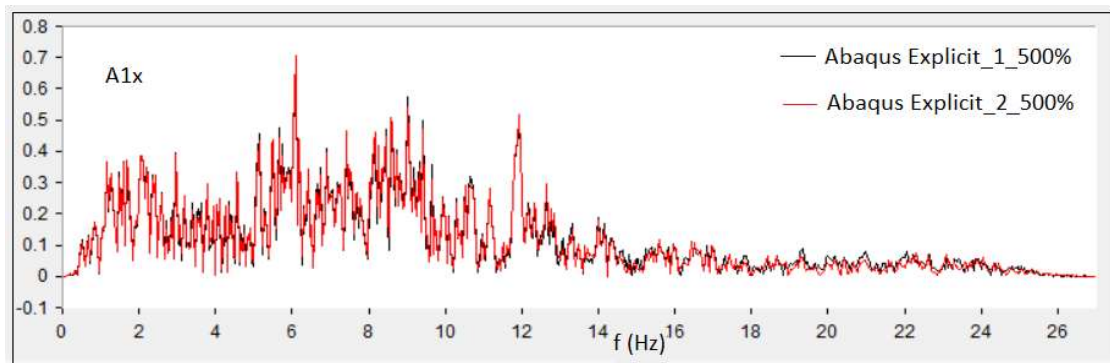
Σχήμα 4.48. Εικόνες βλαβών λόγω διάτμησης yx

4.5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ I & II

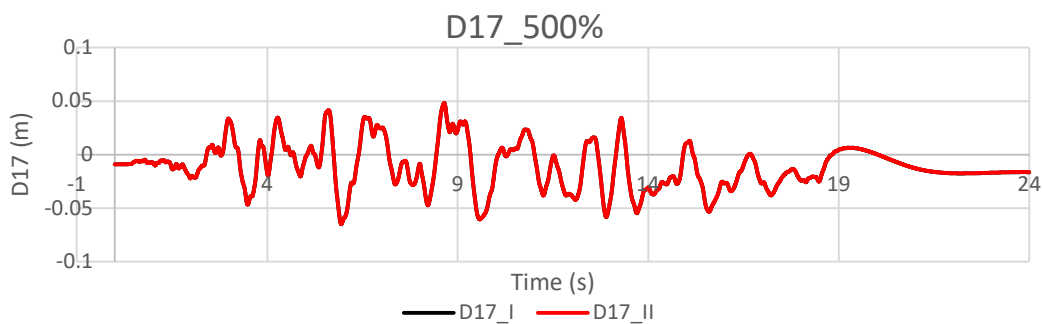
Στα παρακάτω σχήματα (4.49, 4.50, 4.51) παρουσιάζονται η απόκριση επιτάχυνσης κορυφής A1x του 500% στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων και η μετατόπιση D17 για τις δοκιμές I και II.



Σχήμα 4.49. Σεισμική απόκριση στο πεδίο του χρόνου A1x_500%_Irpinia



Σχήμα 4.50. Σεισμική απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων A1x_500%_Irpinia.



Σχήμα 4.51. Σεισμική απόκριση D17_500%_Irpinia

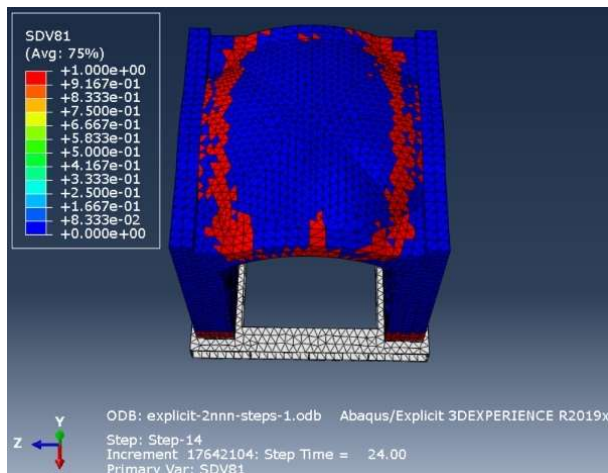
Δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο δοκιμών ως προς τα διαγράμματα των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων.

4.5.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ-ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ I & II.

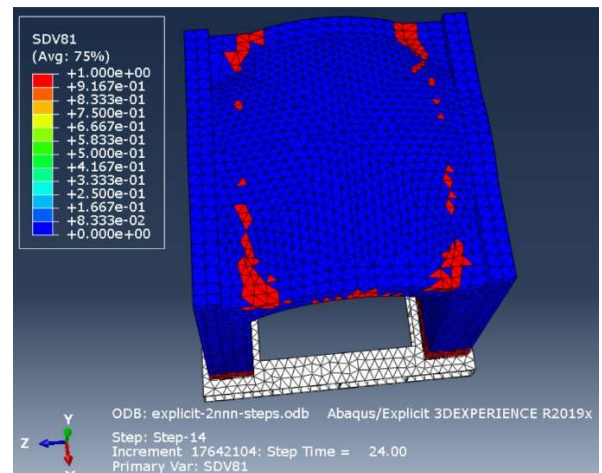
Στις παρακάτω εικόνες (σχήματα 4. 52 έως 4. 4.68) παρουσιάζονται οι περιοχές των βλαβών μετά το 500% του σεισμικού φορτίου Irpinia ως προς x (δοκιμή 17).



Σχήμα 4.52. Εικόνα πειράματος. Ρωγμές στο σταυροτόλιο



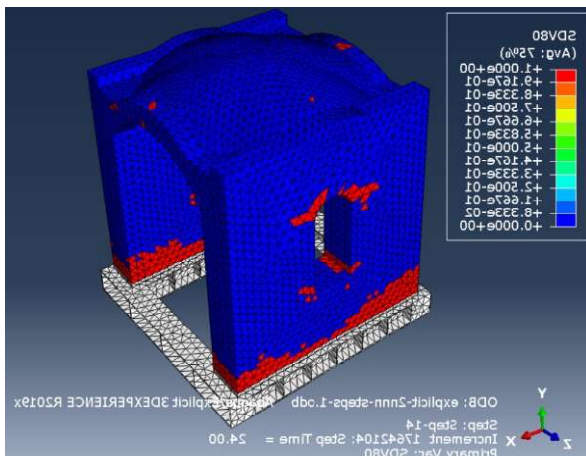
Σχήμα 4.53. Δοκίμο I. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, ασθενής οριζόντιος άξονας



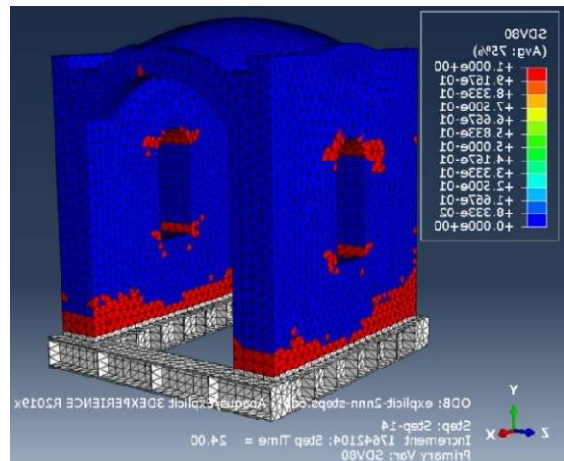
Σχήμα 4.54. Δοκίμο II. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, ασθενής οριζόντιος άξονας



Σχήμα 4.55. Εικόνα πειράματος. Ρωγμές στο τόξο του παραθύρου & στην τοιχοποιία.



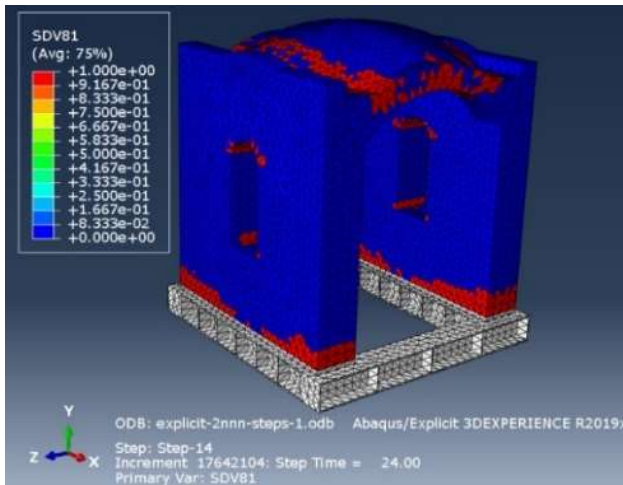
Σχήμα 4.56. Δοκίμιο I. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, κατακόρυφη διεύθυνση



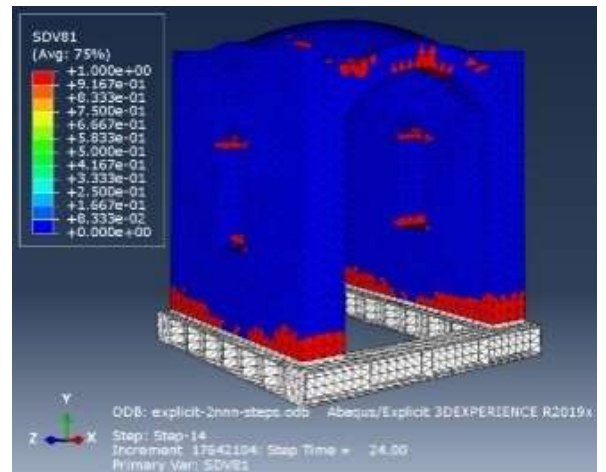
Σχήμα 4.57. Δοκίμιο II. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, κατακόρυφη διεύθυνση



Σχήμα 4.58. Εικόνα από πείραμα. Ρωγμές στο τόξο του σταυροθολίου, στη σύνδεση με την τοιχοποιία



Σχήμα 4.59. Δοκίμιο I. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, ασθενής οριζόντιος άξονας

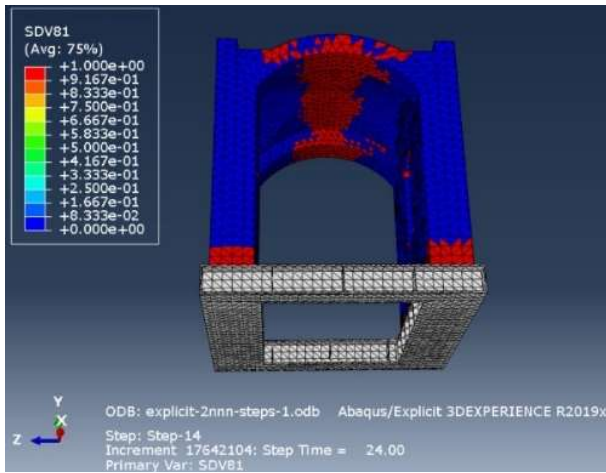


Σχήμα 4.60. Δοκίμιο II. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, ασθενής οριζόντιος άξονας

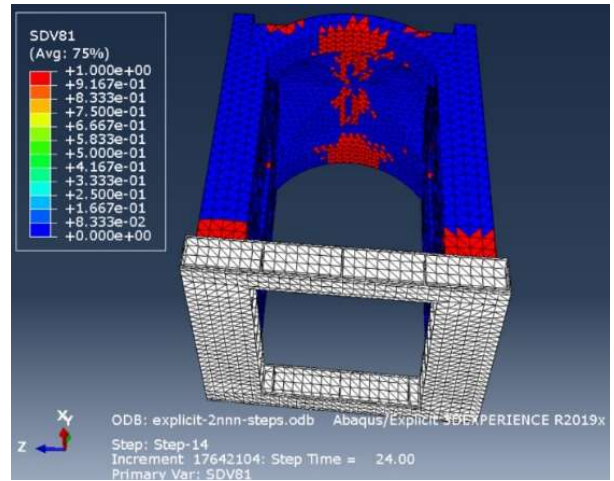


Σχήμα 4.61. Εικόνα πειράματος. Ρωγμές στο κέντρο του τόξου.

Κατά τις πειραματικές δοκιμές δεν υπήρξαν ρωγμές στην κάτω επιφάνεια, στο κέντρο του σταυροθολίου, χαρακτηριστικό που εμφανίζεται στις ανελαστικές αναλύσεις και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



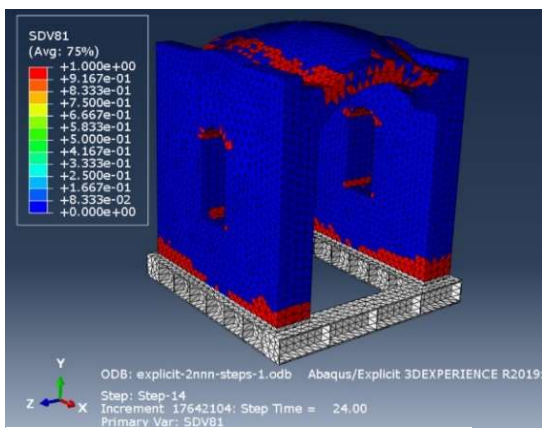
Σχήμα 4.62. Δοκίμιο I. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, ασθενής οριζόντιος άξονας



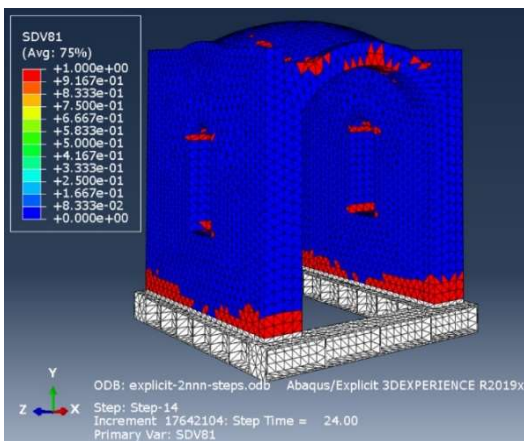
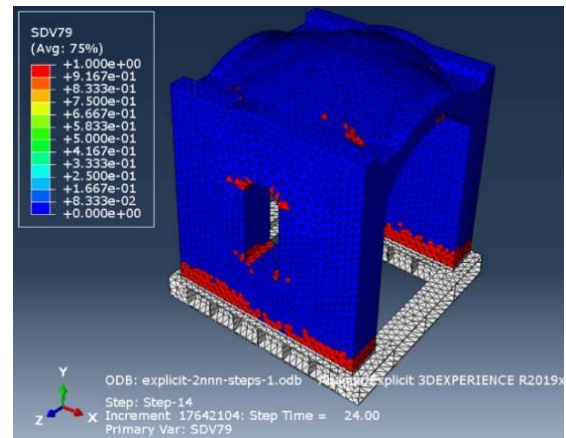
Σχήμα 4.63. Δοκίμιο II. Βλάβες λόγω εφελκυσμού, ασθενής οριζόντιος άξονας



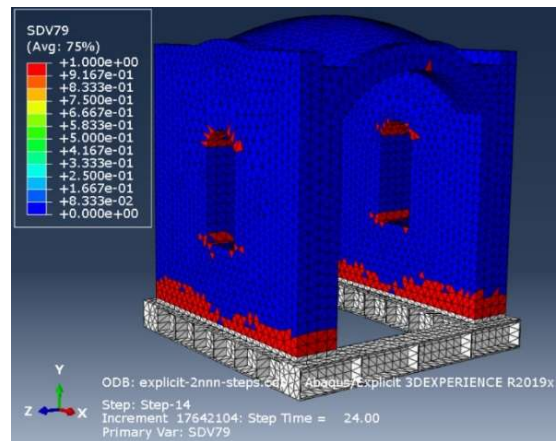
Σχήμα 4.64. Εικόνα πειράματος. Ρωγμές στη βάση της τοιχοποιίας



Σχήμα 4.65. Δοκίμο I. σγ & σχ



Σχήμα 4.66. Δοκίμο II. σγ & σχ



5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι γραμμικά ελαστικές αναλύσεις προσφέρουν αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τις αποκρίσεις των επιταχύνσεων μόνο όσο ο φορέας βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Ακόμη, μέσω της ελαστικής ανάλυσης δεν προσφέρεται η δυνατότητα εκτίμησης της θέσης πιθανών βλαβών όταν η φόρτιση είναι ανακυκλιζόμενη.

Οι ανελαστικές αναλύσεις προσεγγίζουν ικανοποιητικά το πείραμα τόσο ως προς τις αποκρίσεις σε όρους επιτάχυνσης, μετατόπισης όσο και ως προς την περιοχή των βλαβών. Οι Δοκιμές I & II δεν παρουσίασαν διαφορές στα διαγράμματα των μετατοπίσεων και των επιταχύνσεων. Παρουσιάζουν, όμως, διαφορές στις περιοχές των βλαβών. Στη Δοκιμή I, με τις μειωμένες αντοχές, οι βλάβες είναι πιο εκτεταμένες. Επίσης, στις αριθμητικές δοκιμές παρουσιάστηκαν βλάβες κεντρικά επί της κάτω επιφάνειας του σταυροθόλιου, θέση που κατά τις πειραματικές δοκιμές δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές.

Παρουσιάζει ενδιαφέρων η περεταίρω διερεύνηση του συστήματος. Να γίνουν, δηλαδή, επιπλέον παραμετρικές αναλύσεις των αντοχών του σταυροθόλιου (με αύξηση των αντοχών ως προς το Δοκίμιο I). Να ορισθεί τοπικό σύστημα στο σταυροθόλιο και ορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών του στο τοπικό σύστημα. Ακόμη, έχει ενδιαφέρων και η επέκταση των αναλύσεων στις διαξονικές δοκιμές του πειράματος καθώς επίσης και η προσομοίωση των επισκευών που εφαρμόστηκαν στο αρχικό δοκίμιο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βοηθητικές Σημειώσεις μαθήματος «ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ», Χ.Π. ΜΟΥΖΑΚΗΣ, Β.Κ. ΝΤΕΡΤΙΜΑΝΗΣ
2. Σημειώσεις μαθήματος «Προχωρημένη Μηχανική της Τοιχοποιίας», Ελισάβετ Βιντζηλαίου
3. Τεχνική έκθεση δυναμικών δοκιμών δοκιμίου Ι
4. Θολωτές κατασκευές
http://morfologia.arch.duth.gr/1o_etos/pdf/tholotes.pdf
5. Βυζαντινά σταυροθόλια με νευρώσεις, Χ. Μπούρα.
<https://docplayer.gr/9602440-Vyzantina-stayrotholia-me-neyroseis.html>
6. Introduction to Vaulted Structures (AVD)
https://www.earth-auroville.com/vaulted_structures_introduction_en.php#:~:text=Arches%20always%20generate%20the%20section%20of%20vaulted%20structures.&text=Vaults%20are%20generated%20by%20the,most%20of%20the%20time%20horizontal.&text=Domes%20are%20basically%20shaped%20by,on%20circular%20or%20quadrangular%20plans
7. Shake-Table Testing of a Cross Vault, Elizabeth Vintzileou, Charalambos Mouzakis, Lucia Karapitta and Androniki Miltiadou-Fezans
https://www.researchgate.net/figure/The-south-wall-of-the-Katholikon-of-Daphni-Monastery-The-border-between-the-original_fig2_365439595
8. Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts, Elizabeth Vintzileou, Androniki Miltiadou-Fezans
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029607004051>
9. Gothic architecture
<http://an-arthistory.blogspot.com/2015/06/chapter-3-gothic-architecture.html>
10. Cross vault technology
http://www.lanera.com/casteldelmonte/cvtech_172/page-172-03.html
11. Seismic behaviour of cross vaults with different brick pattern, M. Alforno, F. Venuti, A. Monaco & C. Calderini
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-022-01347-6>

