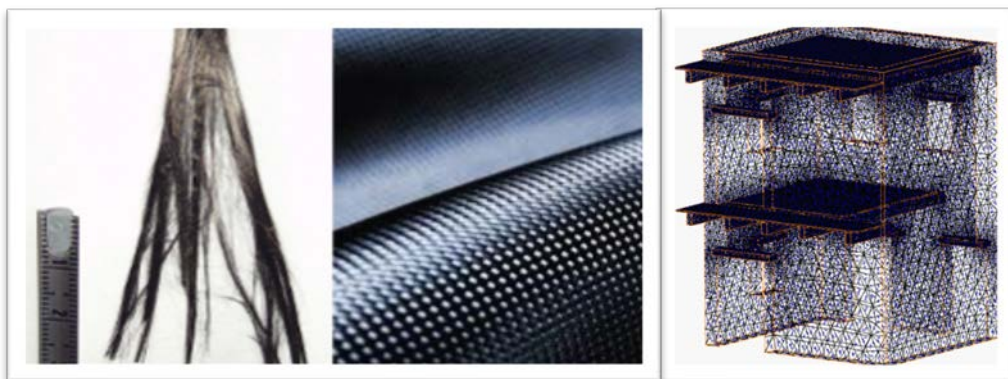




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΧΩΡΟΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕ
ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΥΛΙΚΑ**

**ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΛΙΘΟΔΟΜΗΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ
ΠΟΛΥΜΕΡΗ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΣΑΜΙΟΣ



Επιβλέπουσα : Επίκουρη Καθηγήτρια, Σταυρουλάκη Μαρία

ΧΑΝΙΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη σημαντική καθοδήγηση και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Χώρος Σχεδιασμός και Δομημένο Περιβάλλον- Ολοκληρωμένη προστασία Ιστορικού Δομημένου Περιβάλλοντος με σύγχρονες τεχνολογίες και προηγμένα υλικά» του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου, κ. Σταυρουλάκη Μαρία, Επίκουρη Καθηγήτρια του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Προβιδάκη Κωσταντίνο, Καθηγητή, και τον κ. Τσομπανάκη Ιωάννη, Αναπληρωτή καθηγητή για το χρόνο τους.

Τέλος, για τη συνεχή υποστήριξη και ώθηση που μου προσέφεραν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, που ήταν αρωγοί σε κάθε βήμα της ζωής μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εφαρμογές των ινοπλισμένων πολυμερών χαίρουν τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλης προτίμησης στον κατασκευαστικό τομέα. Η μεγάλη τους αντοχή και οι πολλαπλές μορφές που μπορούν να λάβουν, μπορούν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα και το αισθητικό αποτέλεσμα που επιδιώκεται στη σχεδίαση, ειδικότερα στις περιπτώσεις που αφορούν σε αποκαταστάσεις ιστορικών κτιρίων, στα οποία πρέπει πάση θυσία να διατηρηθεί ο χαρακτήρας της εκάστοτε εποχής στην οποία ανήκουν.

Για τη διερεύνηση, την κατανόηση και τη βελτίωση των χρήσεων των ινοπλισμένων πολυμερών – εν συντομία F.R.P. – στον τομέα της κατασκευής δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προσομοιώματα κτιρίων λιθοδομής, τα οποία ελέγχθηκαν υπό καταπόνηση του σεισμού Colfiorito. Πραγματοποιήθηκε στατική, ιδιομορφική αλλά και ανάλυση με χρονοϊστορία βάσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Πιο συγκεκριμένα, η μορφή, οι διαστάσεις, οι συνθήκες φόρτισης και οι ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν στην παρούσα μελέτη, αντλήθηκαν από δεδομένα προηγούμενης ερευνητικής εργασίας της Ιταλικής ομάδας των Michele Betti, Luciano Galano και Andrea Vignoli. Προσομοιώθηκε ένα κτίριο τοιχοποιίας από λιθοδομή με ξύλινα πατώματα και δοκούς, στο οποίο επιβλήθηκε σεισμική δόνηση σε αρχικές συνθήκες και συνθήκες ενίσχυσης με λωρίδες F.R.P. Έπειτα επιβλήθηκε στις δυο καταστάσεις αυτές η δεκαπλάσια της εν λόγω σεισμικής έντασης, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συνεισφορά των ινοπλισμένων πολυμερών στην αντοχή της τοιχοποιίας, το μέγεθος της συμπεριφοράς αυτής καθώς και τυχόν αρνητικών επιδράσεων που μπορεί να εμφανίζει η εφαρμογή τους, ως ανεπιθύμητη παρενέργεια.

Εξήχθησαν στιγμιότυπα από το πρόγραμμα MSC Marc Mentat, στα οποία οπτικοποιήθηκαν σε χρωματική κλίμακα οι τάσεις και οι μετακινήσεις στις περιοχές των μοντέλων για τις στιγμές εμφάνισης των μεγίστων. Επιπλέον, με αξιοποίηση των μετακινήσεων κατά τις διευθύνσεις x και y , κατασκευάστηκαν διαγράμματα της συνισταμένης της μετατόπισης του κόμβου βάσης και του κόμβου στηθαίου σε συνάρτηση με το χρόνο, ώστε να συγκριθεί το κατά πόσο περιορίζουν τα F.R.P. τη μετακίνηση και κατ' επέκταση κατά πόσο συνεισφέρουν στη

στατικότητα, τη θωράκιση και την αντοχή των κατασκευών ενάντια στους εξωτερικούς παράγοντες. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις στα προσομοιώματα κατέδειξαν τις περιοχές που εμφανίζεται εφελκυσμός και τις περιοχές που εμφανίζεται θλίψη. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ανταποκρίνονται στα αποτελέσματα που αναμένονταν, βάσει προηγούμενων πειραμάτων και βιβλιογραφίας. Μάλιστα, η εφαρμογή της κανονικής έντασης του σεισμού και της δεκαπλάσιας έντασης σεισμού στα ίδια προσομοιώματα εμφάνισαν σχέση δεκαπλάσιας μετακίνησης και ανάπτυξης τάσης στην τοιχοποιία, οι οποίες όμως μορφολογικά ταυτίζονταν και για τις δυο περιπτώσεις.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προέκυψε πως τα F.R.P. όντως επιδρούν θετικά στις κατασκευές. Από τις τιμές που εξήχθησαν, ωστόσο, διαφαίνεται ότι το ζήτημα χρήζει περεταίρω διερεύνησης, πιθανώς αναφορικά με το πλάτος ή το πάχος των λωρίδων, καθώς τα μεγέθη αυτά μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση των κατασκευών. Υπάρχει όμως μια λεπτή γραμμή ανάμεσα στη θετική τους επίδραση στις επιθυμητές περιοχές και την ενδεχόμενη αρνητική επίδραση που μπορεί να έχουν σε περιοχές που δεν ήταν επιθυμητό.

Συνοψίζοντας, με την παρούσα έγινε ένα ακόμα βήμα προς την κατανόηση και την εξέλιξη των ινοπλισμένων πολυμερών. Το πολυπαραγοντικό του θέματος, σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος εφαρμογών του και την πληθώρα κατασκευών και μνημείων που χρήζουν αποκατάστασης, παρέχουν πρόσφορο έδαφος για τη μελέτη και τη διαφοροποίηση των εφαρμογών. Τα δεδομένα της εργασίας αυτής, όπως και δεδομένα προηγούμενων ερευνών, μπορούν ν' αξιοποιηθούν μελλοντικά από φοιτητές ή εταιρείες παραγωγής ινοπλισμένων πολυμερών ώστε να εξειδικευθούν όσο το δυνατόν περισσότερο και ν' ανταπεξέρχονται στις ιδιαιτερότητες της κάθε περίπτωσης.

ABSTRACT

Applications of fiber reinforced polymers have enjoyed great favor over the last decades in the field of manufacturing. Their high durability and the multiple shapes they can take can also serve the aesthetic effect of the design, especially in the case of restorations of historic buildings, at which time the character of the era they belong to must be preserved at all times.

In order to explore, understand and improve the uses of fiber reinforced polymers - in short F.R.P. - in the field of construction, simulations of masonry buildings have been created in the context of this present report, which were tested according to the Colfiorito earthquake.

Static, modular and transient dynamic analysis were performed using the finite element method.

More specific, the form, dimensions, loading conditions and the properties of the materials involved in this experiment were derived from previous research by the Italian team of Michele Betti, Luciano Galano and Andrea Vignoli.

A masonry building with wooden floors and beams was simulated, on which seismic vibration was imposed for the initial and the reinforced conditions with F.R.P. Ten times the seismic intensity was then imposed in these two situations to draw conclusions about the contribution of fiber reinforced polymers to the strength of the masonry, the magnitude of their impact, as well as any undesirable side effects that their application may impose.

From the analysis results, the distribution of stress and strain which were developed to the initial structure and the structure after the application of F.R.P. were compared. From this comparison was extracted the F.R.P. contribution to the minimalization of the displacement and their contribution to the static shielding and strengthening of structures against external factors.

The color gradations of the developed stresses in the models indicate the tensile and compressive regions, which correspond to the results expected, based on previous experiments and literature.

The study of the results showed that the F.R.P. actually have a positive impact on construction. From the values exported, however, it appears that the issue needs further investigation, possibly regarding the width or thickness of the lanes, as these sizes can greatly influence the response of the structures. Although, there is a fine line between their positive impact on the desired areas and the potential negative impact they may have on non desirable areas.

In summary, the present report has been another step towards the understanding and evolution of fiber-reinforced polymers. Due to their multifactorial behaviour, however, as well as its wide range of applications and the abundance of constructions and monuments in need of restoration, there's ample ground for the study and diversification of applications. The data of this work, as well as data from previous research, can be utilized in the future by students or companies producing fiber-reinforced polymers to specialize as much as possible and to meet the particularities of each case.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ε.1. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
Ε.2. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ</u>	21
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	24
1.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	26
1.3. ΥΛΙΚΑ ΙΝΩΝ.....	27
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ FRP(FIBER REINFORCED POLYMERS)</u>	33
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ F.R.P.	33
2.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ F.R.P.....	35
2.3. ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	39
2.4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ FRP ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΝΤΕΣ	41
2.4.1. ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	41
2.4.2. ΥΓΡΑΣΙΑ	41
2.4.3. ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	41
2.5 . ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ FRP	42
2.6. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ FRP	45
2.7. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ FRP	46
2.7.1. ΣΥΜΦΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	49
2.7.2. NEAR SURFACE MOUNTED (NSM)	50
2.7.3. OVERLAY REINFORCEMENT - ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	51
2.7.4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ CFRP LAMINATES.....	51
2.8. ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ	53

2.8.1. ΜΗΤΡΑ	56
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ FRP ΚΑΙ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ</u> ..	59
VILLA BRUNI -PADOVA	70
PALAZZO DELLA RAGIONE	70
ST. FERMO CHURCH, BERONA	73
SAN FRANCESCO CHURCH ASSISI, ITALIA	74
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΣΙΑ.....	76
THE PREMONSTRATE MONASTERY AT TEPLA, WESTERN BOHEMIA, ΤΣΕΧΙΑ.....	77
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</u>	89
4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	102
4.2 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC MARC MENTAT.....	103
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ T.R.E.M.A. (Michele Betti, 2013)	103
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΜΑΤΟΣ</u>	97
5.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	97
5.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	99
5.3. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ	100
5.4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	102
5.5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	105
5.6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	108
5.7. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	111
5.8. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΒΑΣΗΣ	114
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</u>	125
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	165
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	169

Ε.1. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ. 1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΗΤΡΑΣ	34
ΠΙΝΑΚΑΣ. 2 ΤΥΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ	34
ΠΙΝΑΚΑΣ. 3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	54
ΠΙΝΑΚΑΣ. 4 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ GFRP.	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 .ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ T.R.E.M.A.	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ COLFIORITO.	107
ΠΙΝΑΚΑΣ. 9 ΊΔΙΑ ΒΑΡΗ ΥΛΙΚΩΝ	108
ΠΙΝΑΚΑΣ. 10 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ FRP.	122
ΠΙΝΑΚΑΣ. 11 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.	148

Ε.2. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΥΛΙΚΩΝ	21
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ.....	23
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ & ΜΟΥΖΑΚΗΣ, 2007) ..	25
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΙΝΩΝ	26
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΟΛΥΕΔΡΩΝ.....	28
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΩΝ ΥΑΛΟΥ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΠΑΧΟΣ	28
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΟΛΥΕΔΡΩΝ.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΧΡΟΝΙΚΗ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	29
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΊΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ.	31
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ (Α) ΕΚΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ, (Β) ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΑ ΠΕΛΜΑΤΑ, (Γ) ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΣΤΙΣ ΠΛΕΥΡΕΣ (ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ, 2013)	36
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	36
ΕΙΚΟΝΑ 13. Η ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ FRP.....	37

ΕΙΚΟΝΑ 14. ΤΥΠΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ FRP (HEIZA, NABIL, & MELEKA, 2014).....	38
ΕΙΚΟΝΑ 15. ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΙΚΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ FRP	38
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ.	39
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΔΙΧΤΥΩΝ ΣΕ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΑ	39
ΕΙΚΟΝΑ 18. ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.	40
ΕΙΚΟΝΑ 19. ΚΥΡΙΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΝΩΣΤΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ.	44
ΕΙΚΟΝΑ 20. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ (ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ, 2009).....	44
ΕΙΚΟΝΑ 21. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΕΞΟΛΚΕΑ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 23. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ NSM.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 24. ΕΦΑΡΜΟΓΗ CFRP.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 25. ΕΙΚΟΝΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΚΛΩΝΟΥΣ ΙΝΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΚΑΘΕΤΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ: (Α) ΠΛΕΓΜΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ, (Β) ΠΛΕΓΜΑ ΙΝΩΝ ΥΑΛΟΥ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ, (Γ) ΠΛΕΓΜΑ ΙΝΩΝ ΒΑΣΑΛΤΗ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ, (Δ) ΕΠΙΚΑΛΥΜΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ, (Ε) ΕΠΙΚΑΛΥΜΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ ΙΝΩΝ ΥΑΛΟΥ ΚΑΙ (Ζ) ΕΠΙΚΑΛΥΜΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ ΙΝΩΝ ΒΑΣΑΛΤΗ	58
ΕΙΚΟΝΑ 26. 58(Α) ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ. (Β) ΕΠΙΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ (Γ) ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ.....	58
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΣΕ ΘΟΛΟΥΣ ΚΑΙ ΚΑΜΑΡΕΣ.	59
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΚΚΛΗΣΙΑ SAN GETANO, BIT ONTO (BA).	59
ΕΙΚΟΝΑ 29. GENERALI PALACE.....	60
ΕΙΚΟΝΑ 30. ΑΝΑΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΖΕΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΨΗ ΤΗΣ ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ ΤΗΣ ΣΑΝΤΑ ΧΙΑΡΑ.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 31. ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΣΤΗ ΜΟΝΗ ΣΑΝΤΑ.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 32. ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΑΓΑΛΜΑΤΑ.	63
ΕΙΚΟΝΑ 33. ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΑΓΑΛΜΑΤΑ.	64
ΕΙΚΟΝΑ 34. ΧΡΗΣΗ AFRP REAL ALBERGO DI NAPOLI.....	76
ΕΙΚΟΝΑ 35. CHIESA DI SANTA CATERINA, CAPRIOLI.	65
ΕΙΚΟΝΑ 36. VIA ROMA S. PIO L' AQUILA.	65
ΕΙΚΟΝΑ 37. SANTA CORONO VICENZA.	66
ΕΙΚΟΝΑ 38. CHIARA L' AQUILA.	67
ΕΙΚΟΝΑ 39. PALAZZO LELY L' AQUILA.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 40. PALAZZO LELY L' AQUILA.....	69

<i>ΕΙΚΟΝΑ 41. VILLA BRUNO - PADOVA.</i>	70
<i>ΕΙΚΟΝΑ 43. SANTA CORONA.</i>	71
<i>ΕΙΚΟΝΑ 44. ΤΑΦΟΣ ΤΟΥ CASIGNORIO</i>	72
<i>ΕΙΚΟΝΑ 45 . FERMO CHURCH, VERONA.</i>	73
<i>ΕΙΚΟΝΑ 46 SAN GIORGIO, LECCE.</i>	74
<i>ΕΙΚΟΝΑ 47 . PALAZZO DEI CELESTINI, LECCE.</i>	75
<i>ΕΙΚΟΝΑ 48 . SAN FRANCESCO ASSISI, ΙΤΑΛΙΑ.</i>	75
<i>ΕΙΚΟΝΑ 49 . ΝΑΟΣ FOGUANG ΣΤΟ WUTAISHAN.</i>	76
<i>ΕΙΚΟΝΑ 50. PREMONSTRATE MONASTERY AT TEPLA</i>	77
<i>ΕΙΚΟΝΑ 51. THE PREMONSTRATE MONASTERY AT TEPLA, WESTERN BOHEMIA, ΤΣΕΧΙΑ</i>	78
<i>ΕΙΚΟΝΑ 52 . ΛΥΚΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ.</i>	80
<i>ΕΙΚΟΝΑ 53 . 1ο Δ.Σ. ΑΧΑΡΝΩΝ.</i>	82
<i>ΕΙΚΟΝΑ 54. ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ SANTA-MARIA, ALCAINO.</i>	83
<i>ΕΙΚΟΝΑ 55. ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ.</i>	84
<i>ΕΙΚΟΝΑ 56. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.</i>	85
<i>ΕΙΚΟΝΑ 57. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ FRP, ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ (MOJCA JARC SIMONIC, 2014).</i>	86
<i>ΕΙΚΟΝΑ 58. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΤΙΔΩΝ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΑΠΟ ΛΙΘΟΥΣ.</i>	87
<i>ΕΙΚΟΝΑ 59. ΤΟΜΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</i>	92
<i>ΕΙΚΟΝΑ 60. ΜΟΡΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.</i>	93
<i>ΕΙΚΟΝΑ 61 .ΚΑΤΟΨΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ (MICHELE BETTI, 2013)</i>	93
<i>ΕΙΚΟΝΑ 62. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ AUTOCAD</i>	99
<i>ΕΙΚΟΝΑ 63. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MARC.</i>	101
<i>ΕΙΚΟΝΑ 64. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MARC</i>	101
<i>ΕΙΚΟΝΑ 65. ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΑΦΗΣ (ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MARC)</i>	102
<i>ΕΙΚΟΝΑ 66. ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ COLFIORITO, Η ΟΠΟΙΑ ΕΠΛΗΓΗ.</i>	105
<i>ΕΙΚΟΝΑ 67. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΥΡΙΑΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΟΝΗΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ 5,7 ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΡΙΧΤΕΡ.</i>	106
<i>ΕΙΚΟΝΑ 68. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΥΡΙΑΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΟΝΗΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ 6,0 ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΡΙΧΤΕΡ.</i>	106
<i>ΕΙΚΟΝΑ 69. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΙΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΟΦΩΝ (FACE LOAD)</i>	109
<i>ΕΙΚΟΝΑ 70. ΠΑΚΤΩΣΗ (FIXED DISPLACEMENT)</i>	110
<i>ΕΙΚΟΝΑ 71. ΦΟΡΤΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (GRAVITY LOAD)</i>	110
<i>ΕΙΚΟΝΑ 72. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (LOADCASE PROPERTIES)</i>	113

ΕΙΚΟΝΑ 73. ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ Χ-Υ-Z (MICHELE BETTI, 2013)	113
ΕΙΚΟΝΑ 74. ΟΛΙΚΗ (TOTAL) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΣΗ	114
ΕΙΚΟΝΑ 75. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΑΤΑ ΑΞΟΝΑ Χ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ COLFIORITO. .	115
ΕΙΚΟΝΑ 76. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΑΤΑ ΑΞΟΝΑ Υ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ COLFIORITO. .	115
ΕΙΚΟΝΑ 77. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ	116
ΕΙΚΟΝΑ 78 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ MSC MARC.....	130
ΕΙΚΟΝΑ 79. ΣΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ.....	117
ΕΙΚΟΝΑ 80. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΖΗΜΙΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ.	119
ΕΙΚΟΝΑ 81. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΖΗΜΙΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ.....	119
ΕΙΚΟΝΑ 82. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΤΑ FRP ΣΤΟ AUTOCAD	120
ΕΙΚΟΝΑ 83. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MSC MARC	121
ΕΙΚΟΝΑ 84. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ FRP ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	123
ΕΙΚΟΝΑ 85. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΞΟΝΑ Χ.	126
ΕΙΚΟΝΑ 86. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΞΥΛΙΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	127
ΕΙΚΟΝΑ 87. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΑΞΟΝΑ Υ.	127
ΕΙΚΟΝΑ 88. ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	128
ΕΙΚΟΝΑ 89. ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.	128
ΕΙΚΟΝΑ 90. ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	129
ΕΙΚΟΝΑ 91. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΚΥΡΙΟ ΛΟΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ. FREQ:8,507 Hz	130
ΕΙΚΟΝΑ 92. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΚΥΡΙΟ ΛΟΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ. FREQ: 9,055 Hz	131
ΕΙΚΟΝΑ 93. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ. FREQ: 14,82 Hz	132
ΕΙΚΟΝΑ 94. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Χ-Υ-Z ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΚΑΙ ΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΜΗΣ Γ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	133
ΕΙΚΟΝΑ 95. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Χ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	135
ΕΙΚΟΝΑ 96. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Υ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	136
ΕΙΚΟΝΑ 97. ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	137
ΕΙΚΟΝΑ 98. ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΥΡΙΑ ΤΑΣΗ.....	137
ΕΙΚΟΝΑ 99. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ. FREQ:8,923Hz	138
ΕΙΚΟΝΑ 100. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ. FREQ:9,999 Hz.....	139
ΕΙΚΟΝΑ 101. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ. FREQ:15,24 Hz.....	140
ΕΙΚΟΝΑ 102. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Χ-Υ-Z ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΚΑΙ ΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΜΗΣ Γ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	141

ΕΙΚΟΝΑ 103. ΤΟΜΕΣ Α,Β,Γ,Δ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.	142
ΕΙΚΟΝΑ 104. ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΜΕ FRP ΜΟΝΤΕΛΟ (ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Γ)	144
ΕΙΚΟΝΑ 105. ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΜΕ FRP ΜΟΝΤΕΛΟ (ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Α).	144
ΕΙΚΟΝΑ 106. ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΜΕ FRP ΜΟΝΤΕΛΟ (ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Β)......	145
ΕΙΚΟΝΑ 107. ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΜΕ FRP ΜΟΝΤΕΛΟ (ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Δ).	145
ΕΙΚΟΝΑ 108. ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΑΡΧΙΚΟΥ ΚΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ(ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Α) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ (Χ10) ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ.	146
ΕΙΚΟΝΑ 109. ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΑΡΧΙΚΟΥ ΚΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ(ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Γ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ (Χ10) ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ.	146
ΕΙΚΟΝΑ 110. ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΚΟΜΒΟΣ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Α) 2 - 3,5 SEC	147
ΕΙΚΟΝΑ 111. ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΗΣ Α) 2 - 3,5 SEC ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ (Χ10) ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ.	147
ΕΙΚΟΝΑ 112. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 0,02 SEC.	150
ΕΙΚΟΝΑ 113. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 1,76 SEC.	151
ΕΙΚΟΝΑ 114. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 2,53 SEC.	151
ΕΙΚΟΝΑ 115. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 0,02 SEC.	152
ΕΙΚΟΝΑ 116. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 1,76 SEC.	153
ΕΙΚΟΝΑ 117. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 2,52 SEC.	153
ΕΙΚΟΝΑ 118. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 4,01 SEC.	154
ΕΙΚΟΝΑ 119. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 0,02 SEC.	155
ΕΙΚΟΝΑ 120. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 1,76 SEC.	155
ΕΙΚΟΝΑ 121. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 2,53 SEC.	156
ΕΙΚΟΝΑ 122. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 0,02 SEC.	157
ΕΙΚΟΝΑ 123. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 1,76 SEC.	157
ΕΙΚΟΝΑ 124. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 2,52 SEC.	158
ΕΙΚΟΝΑ 125. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ 4,01 SEC.	158
ΕΙΚΟΝΑ 126. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 200 (2SEC)	160

<i>ΕΙΚΟΝΑ 127. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 300 (3SEC).</i>	160
<i>ΕΙΚΟΝΑ 128. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 400 (4SEC).</i>	161
<i>ΕΙΚΟΝΑ 129. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 500 (5SEC).</i>	161
<i>ΕΙΚΟΝΑ 130. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 200 (2SEC).</i>	162
<i>ΕΙΚΟΝΑ 131. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 300 (3SEC).</i>	162
<i>ΕΙΚΟΝΑ 132. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 400 (4SEC).</i>	163
<i>ΕΙΚΟΝΑ 133. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 500 (5SEC).</i>	163

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία αποτελούσαν, μέχρι τις προηγούμενες δεκαετίες, τον κατεξοχήν τρόπο κατασκευής ολόκληρων οικισμών αλλά και σπουδαίων μνημείων, τα οποία σώζονται μέχρι σήμερα. Η επίδραση, ωστόσο, του χρόνου, των περιβαλλοντικών συνθηκών και του ανθρώπινου παράγοντα έχουν επέμβει σημαντικά στη δομή τους, προκαλώντας άλλοτε περιορισμένες κι άλλοτε εκτεταμένες φθορές οι οποίες χρήζουν αποκατάστασης.

Η μελέτη των μεθόδων αποκατάστασης είναι κάτι που απασχολεί πληθώρα επιστημόνων, μηχανικών, αρχιτεκτόνων και άλλων ερευνητών, οι οποίοι αφοσιώνουν την καριέρα τους στην διερεύνηση των μεθόδων ενίσχυσης και αποκατάστασης κατασκευών, με σεβασμό στο χαρακτήρα και στα υλικά της κατασκευής αλλά και στο ευρύτερο δομημένο περιβάλλον.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται οι μέθοδοι αποκατάστασης κατασκευών με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών και πραγματοποιούνται πειράματα για την εμπειριστατωμένη ανάλυση και τεχνική υποστήριξη του θέματος.

Αρχικά πραγματοποιείται ανάλυση στα σύνθετα υλικά, τα επιμέρους υλικά από τα οποία αποτελούνται και τη διαφοροποίηση στις ιδιότητές τους, που επέρχεται με το συνδυασμό των δύο διακριτών μερών. Επεξηγείται η λειτουργία τους στην κατασκευή και κατ' επέκταση τα πλεονεκτήματα που μπορούν να επιφέρουν σ' αυτή, καθώς και τυχόν μειονεκτήματα που μπορεί να εμφανίζουν σε σχέση με άλλα υλικά, ενώ αναφέρεται και η χρήση τους ιστορικά, από την πρώτη στιγμή εμφάνισής τους έως σήμερα, μέσα από παραδείγματα που βρέθηκαν σε ξένη και ελληνική βιβλιογραφία.

Η εργασία προχωράει με την παρουσίαση των ινοπλισμένων πολυμερών ως προηγμένη μέθοδο αποκατάστασης κι ενίσχυσης των κατασκευών, όντας απόγονοι των σύνθετων υλικών. Παρουσιάζονται επίσης οι ιδιότητές τους ανά υλικό και προτείνονται ενδεικτικά τομείς στους οποίους συμπεριφέρεται βέλτιστα η κάθε διαφορετική κατηγορία. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα παραδείγματα και τους τρόπους εφαρμογής που ακολουθούνται, καθώς μέσα από τα παραδείγματα γίνεται αντιληπτή στον αναγνώστη η πολυμορφία στη χρήση τους, στις μεθόδους και τις εξειδικευμένες ανάγκες κάθε επέμβασης (αποκατάσταση, ενίσχυση κλπ.).

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, επίσης, πραγματοποιείται προσομοίωση μιας κατασκευής από φέρουσα τοιχοποιία, η οποία χρήζει αποκατάστασης, με χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Στο μοντέλο αυτό θα εισαχθούν επίσης και στοιχεία ινοπλισμένων πολυμερών. Με αυτό τον τρόπο θα μελετηθεί η συμπεριφορά τους υπό καταπόνηση και η καταλληλότητά τους να αντιμετωπίσουν προβλήματα στατικότητας που μέχρι τώρα θεραπεύονταν με συμβατικές μεθόδους. Εξετάζεται ιδιαιτέρως η περίπτωση χρήσης τους σε διαγώνιες ρωγμές πλησίον σε ανοίγματα.

Τελικός σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τις ιδιότητες των ινοπλισμένων και τη συμπεριφορά τους στον τομέα της αποκατάστασης. Οι προσομοιώσεις αποσκοπούν στην καλύτερη κατανόηση της δομής και της προσφοράς των FRP στον κατασκευαστικό τομέα και κατ' επέκταση στην βελτίωση των επιδόσεών τους. Η εξέλιξη της μεθόδου θα συμβάλλει στον εκσυγχρονισμό των επεμβάσεων, διατηρώντας στο ακέραιο την αρχική μορφή των κατασκευών, προσδοκώντας ένα αρχιτεκτονικά άρτιο αποτέλεσμα.

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Κεφάλαιο 1.

- Εισαγωγή στην έννοια των σύνθετων υλικών και αναδρομή στη χρήση τους έως σήμερα.
- Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών – εμβάθυνση στη συμπεριφορά τους ανάλογα με το υλικό των ινών, ως ενισχυτικό στο σύνθετο υλικό.

Κεφάλαιο 2.

- Ανάλυση της έννοιας των FRP, των ιδιοτήτων τους, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους.
- Ιστορική αναδρομή στη συμβολή τους στον κατασκευαστικό και βιομηχανικό τομέα.
- Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των FRP σε έκθεση σε εξωτερικούς παράγοντες.
- Σταδιακή ανάλυση της διαδικασίας εφαρμογής τους.
- Ανάλυση καινοτόμων μεθόδων εφαρμογών.
- Παρουσίαση ειδών ρητίνης και της μεθόδου Ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα .
- Σύγκριση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών σε πλέγμα βροχίδων αντί με εφαρμογή σε μορφή ινών.

Κεφάλαιο 3.

- Ιδιαίτερη μνεία σε παραδείγματα εφαρμογών FRP σε αποκαταστάσεις στην Ελλάδα και το εξωτερικό.
- Αναφορά σε παρόμοια πειράματα με το παρόν .

Κεφάλαιο 4.

- Περιγραφή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.
- Παρουσίαση του προγράμματος MSC MARC MENTAT της εταιρίας Marc Analysis Corporation, το οποίο αξιοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να επιλυθούν προβλήματα μηχανικής.
- Εισαγωγή στο επιστημονικό πρόγραμμα T.R.E.M.A. ((Technologies for the Reduction of seismic Effects on Architectural Manufactured Structures), το οποίο στοχεύει στη αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, των οποίων η σεισμική συμπεριφορά ενισχύεται με τεχνικές αποκατάστασης.

Κεφάλαιο 5.

- Μεθοδολογία – Μοντελοποίηση – Διακριτοποίηση – Επίλυση προσομοιώματος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 6.

- Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 7.

- Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.

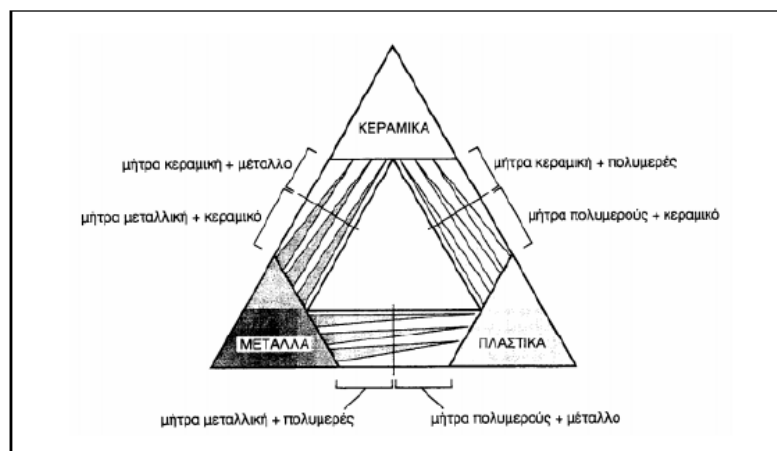
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων διακριτών μερών αποτελεί ένα σύστημα, το οποίο χαρακτηρίζεται ως «σύνθετο». Εξ' ορισμού, το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα και είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (Agarwal, 1990).

Στη μηχανική ένα σύνθετο υλικό συγκεντρώνει στη δομή του χαρακτηριστικά από τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία και αποτελείται, ούτως ώστε αυτό ν' αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες, συνδυαστικά για να καλύπτει τις εκάστοτε ανάγκες για τις οποίες αυτό προορίζεται. Στον κλάδο αυτό, το δεύτερο υλικό το οποίο εισέρχεται στη μήτρα ως βελτιωτικό, πολύ συχνά, συνίσταται από ίνες διαφόρων υλικών όπως πλαστικό, μέταλλο, γυαλί, πολυμερή κ.ά. . Συνοπτικά, ο ρόλος της μήτρας είναι η μεταφορά των τάσεων στα πρόσθετα βελτιωτικά και η προστασία αυτών από το περιβάλλον. Διακρίνονται σε (Εικόνα 1):

- MMC (Metal Matrix Composites)
- CMC (Ceramic Matrix Composites)
- PMC (Polymer Matrix Composites)

Ο ρόλος των βελτιωτικών, τα οποία διασκορπίζονται μέσα στη μήτρα στο σύνθετο, είναι η ενίσχυση της μήτρας.



Εικόνα 1. Συνδυασμοί υλικών

Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς το βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Ένα σημαντικό και επιθυμητό χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης-παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω και διαρροή.

Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

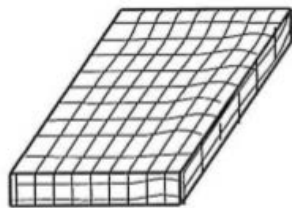
1. Σύνθετα υλικά ινών αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
2. Σύνθετα υλικά στρωμάτων αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
3. Σύνθετα υλικά σωματιδίων αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα. (Τριανταφύλλου, 2013)

Σύμφωνα με τον προσανατολισμό των ινών υπάρχουν δύο κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών.

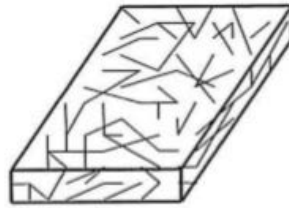
1. Προσανατολισμένα, των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
2. Μη προσανατολισμένα, των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό.

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Σύμφωνα με τον τρόπο τοποθέτησης και το συνδυασμό των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες (Εικόνα 2):

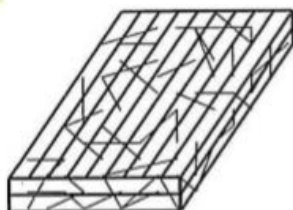
1. Πλεκτών ινών, τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης. Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
2. Ασυνεχών ινών, τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό τους υλικό. Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
3. Υβριδικά, τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών. Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
4. Συνεχών ινών, όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



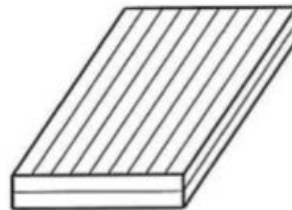
1. Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών



2. Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών



3. Υβριδικό σύνθετο υλικό



4. Σύνθετο υλικό συνεχών ινών

Εικόνα 2. Προσανατολισμός Ινών στη μήτρα

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από το 5.000 π.Χ. (Εικόνα 3), όπου οι Αιγύπτιοι ενίσχυαν ωμόπλινθους με πλέγμα από άχυρα, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Από τα τέλη του 19ου αιώνα που άρχισε ν' αυξάνεται η χρήση των συνθετικών υλικών, αυτά είχαν ως συστατικά στοιχεία φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική παραγωγή υαλονημάτων ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1930 και ουσιαστικά σηματοδοτεί τη γέννηση των σύνθετων υλικών προηγμένης τεχνολογίας (Σταθόπουλος, 2009). Τα σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών από υπόγειες δεξαμενές καυσίμων έως ύφαλα πλοίων και πολεμικά αεροσκάφη. Αρχικά, λόγω του υπερβολικού κόστους και των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών περιορίστηκαν στην αεροναυπηγική, τη χημική βιομηχανία και τη ναυπηγική. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυσή τους πρωτοεμφανίστηκε στην Ελβετία το 1984. . Η συμπεριφορά των συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών κατά την τελευταία εικοσαετία έχει δοκιμαστεί με εξαιρετική επιτυχία και ιδιαίτερα σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία. Τα μόνα στοιχεία που διαθέτουμε για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν εγκατασταθεί σήμερα σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού προέρχονται από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και από την προβολή στο χρόνο συμπερασμάτων που αφορούν στην τρέχουσα κατάσταση των υλικών αυτών

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΥΛΙΚΟ
5000 π.Χ.	Μίγμα παπύρου-πίσσας
1500 π.Χ.	Επίστρωση ξύλου (καπλαμάς)
1909 μ.Χ.	Φαινολικά σύνθετα
1928 μ.Χ.	Σύνθετα ουρίας-φορμαλδεΐδης
1938 μ.Χ.	Σύνθετα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης
1942 μ.Χ.	Πολυεστέρας- ίνες υάλου
1946 μ.Χ.	Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης
1946 μ.Χ.	Σύνθετα Nylon - ίνες υάλου
1951 μ.Χ.	Σύνθετα πολυστυρενίου-υάλου
1956 μ.Χ.	Σύνθετα φαινόλης-αμιάντου
1964 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα άνθρακα-υάλου
1972 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες Aramid
1975 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα aramid/γραφίτη

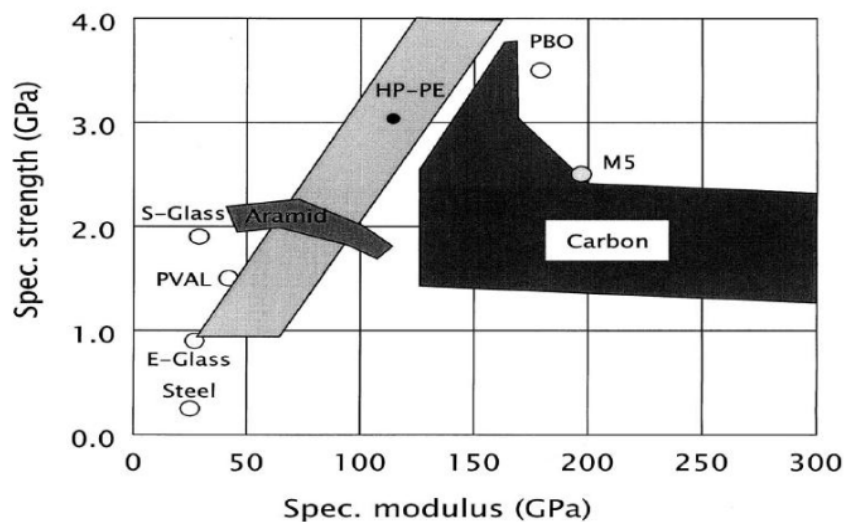
Εικόνα 3. Ιστορική εξέλιξη των πολυμερικών σύνθετων υλικών (Παπανικολάου & Μουζάκης, 2007)

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία πρόοδος που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών, όσον αφορά τόσο στις ιδιότητες όσο και στη διαδικασία παραγωγής τους, έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής των ινοπλισμένων πολυμερών και δραματική αύξηση εφαρμογής τους σε τεχνικά έργα. Σήμερα το ¼ της παραγωγής σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται σε εφαρμογές. Στη χώρα μας οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώθηκαν ιδιαίτερα μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999 (Σταθόπουλος, 2009).

1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα στη χρήση των σύνθετων υλικών είναι τα εξής:

- Μείωση βάρους (υψηλές ειδικές ιδιότητες -πυκνότητα)
- Χαμηλό κόστος συντήρησης (αντίσταση στην διάβρωση)
- Ευελιξία κατά τον σχεδιασμό, δυνατότητα κατασκευής περίεργων σχημάτων για ειδικές εφαρμογές, και ενσωμάτωσης μεγάλων τμημάτων
- Περιβαλλοντικά φιλικά υλικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή
- Ασφάλεια δομές με ικανότητα απορρόφησης κρούσεων



Εικόνα 4. Γραφική απεικόνιση μηχανικών ιδιοτήτων ινών

Ενώ τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι:

- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Ελλιπής τεχνολογία μαζικής παραγωγής για σύνθετα υψηλής απόδοσης
- Δυσκολία στην ανακύκλωση σύνθετων θερμοσκληρυνόμενης μήτρας και σύνθετων θερμοπλαστικής μήτρας με ίνες γυαλιού
- Ελλιπής γνώση στο σχεδιασμό με ανισότροπα υλικά
- Αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς και των μηχανισμών αστοχίας
- Περιορισμένη βιομηχανική δυναμικότητα (παγκόσμια παραγωγή άνθρακα μόνο 30000 tons)

1.3. ΥΛΙΚΑ ΙΝΩΝ

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τελευταίες διαπιστώσεις καθώς και η χρήση των σύνθετων υλικών στις εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού έως ενός σημαντικού βαθμού, προέκυψαν μέσω ειδικών μελετών αρκετών ερευνητών, στηριζόμενες κυρίως στις θεωρίες της μηχανικής της θραύσης και της αντοχής των υλικών (Luh & Evans, 1978), (Marshall, Cox, & Evans, 1985), (Charalambides & Evans, 1989), (Daniel, Anastassopoulos, & Lee, 1992), (Zacharopoulos Z. , 1998), (Gdoutos, Giannakopoulou, & Zacharopoulos, 1999) και (Zacharopoulos D. , 2004), αποτέλεσμα των οποίων ήταν η καταρχήν εις βάθος κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και κατ' επέκταση των πιθανών μορφών αστοχίας μεταξύ του μητρικού και ενισχυτικού υλικού (υπό μορφή ινών), και κατά δεύτερον η σημαντική βελτίωση της σύνθεσής τους ώστε το παραγόμενο σύνθετο προϊόν να παρουσιάζει υψηλές αντοχές.

Οι ίνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Συνθετικές ίνες όπως το νάιλον, το πλαστικό
- Φυσικές ίνες προέρχονται από ζώα και φυτά.(ίνες καρύδας και ίνες μπαμπού). Ορυκτές ίνες από μέταλλο ή βράχο είναι ίνες άνθρακα, ίνες γυαλιού, ίνες Kevlar και ίνες αμιάντου.

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες πολυαραμίδης, προϊόντα υψηλής αντοχής που παρουσιάζουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία (θραύση) γεγονός που τα χαρακτηρίζει ως εγγενώς ψαθυρά δομικά υλικά (Νοβίδης, 2008).

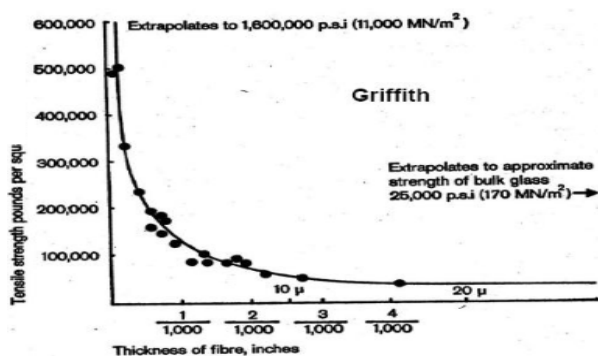
1.3.1. ΙΝΕΣ ΥΑΛΟΥ

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων.

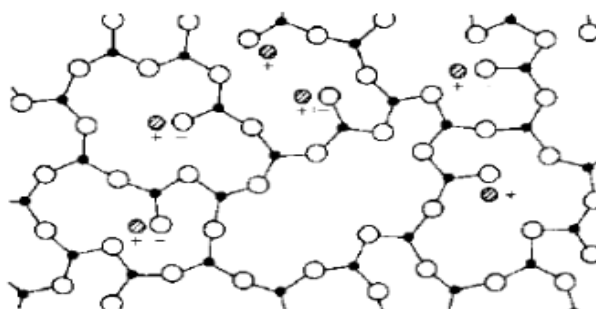
Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμίδη, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα.

Η αντοχή και η δυσκαμψία των ινών υάλου προέρχεται από το τρισδιάστατο δίκτυο πολυέδρων από το οποίο και αποτελούνται (Εικόνα 5). Κάθε πολύεδρο είναι συνδυασμός ατόμων οξυγόνου γύρω από ένα άτομο πυριτίου, τα οποία ενώνονται με ομοιοπολικούς δεσμούς. Η δομή και η αντοχή του δικτύου μπορεί να τροποποιείται με την προσθήκη μεταλλικών οξειδίων.

Τα ψαθυρά υλικά, όπως το γυαλί είναι άμορφα και δεν έχουν την ικανότητα να προσανατολίζουν την δομή τους. Τυπικές ίνες γυαλιού έχουν μέτρο ελαστικότητας παρόμοιο με αυτό του αλουμινίου αλλά ειδική αντοχή η οποία φτάνει 3-6 φορές αυτή του ατσάλιου. Οι ίνες υάλου υπερτερούν των υπολοίπων υλικών ινών κυρίως λόγω της υψηλής αντοχής τους και του αρκετά μειωμένου κόστους τους, το οποίο ανέρχεται σε υποπενταπλάσιο σε σχέση με το κόστος των ανθρακονημάτων. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλων κατασκευών –ενισχύσεων ο παράγοντας κόστος είναι από τους σημαντικότερους για την καλύτερη επίτευξη του στόχου.



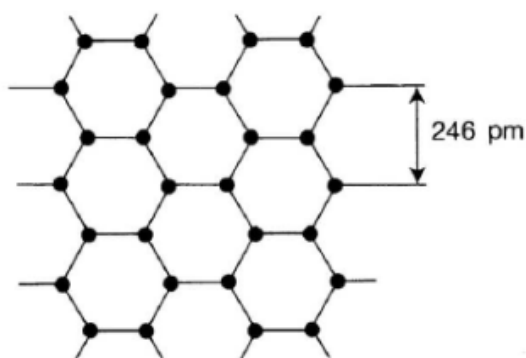
Εικόνα 5. Τρισδιάστατο δίκτυο πολυέδρων



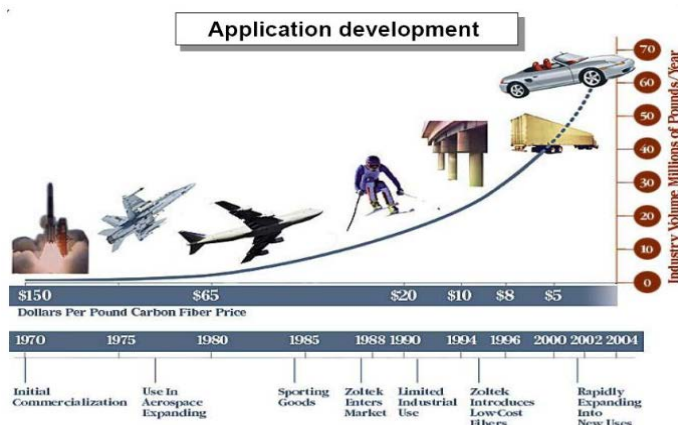
Εικόνα 6. Γραφική απεικόνιση εφελκυστικής αντοχής ινών υάλου σχετικά με το πάχος

1.3.2. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα ή ρεγιόν με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000 βαθμούς Κελσίου). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου.



Εικόνα 7. Τρισδιάστατο δίκτυο πολυέδρων



Εικόνα 8. Χρονική-οικονομική εξέλιξη της χρήσης ινών άνθρακα

Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εκτείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 21 GPa έως 700 GPa.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ινών άνθρακα είναι η υψηλή ανθεκτικότητα έναντι όξινων, οργανικών και αλκαλικών διαλυμάτων, όπως και καλή συμπεριφορά σε περιπτώσεις μόνιμων φορτίων και υψηλών θερμοκρασιών. Άρα όταν απαιτείται βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και μείωσης βάρους, οι ίνες άνθρακα είναι η πρώτη επιλογή. Στα μειονεκτήματα των ινών αυτών συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος το οποίο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και η ευαισθησία τους σε πλευρικά φορτία. Όμως, το γεγονός ότι ο άνθρακας είναι ευγενές μέταλλο το κατατάσσει στα υλικά με υψηλή αγωγιμότητα και έτσι είναι ικανό να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων αν έρθει σε επαφή με αυτά. Ως εκ τούτου οι ίνες άνθρακα είναι σημαντικό να μην έρχονται σε επαφή με επιφάνειες χάλυβα ή αλουμινίου.

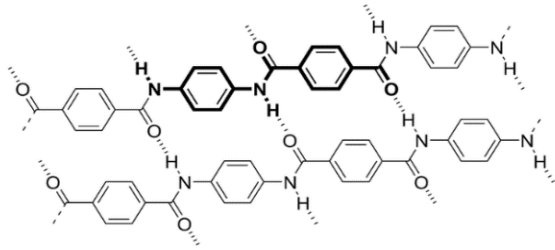
1.3.3. ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΑΡΑΜΙΔΗ

Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμίδη που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι KEVLAR. Είναι η πιο επιτυχείς οργανικές ίνες που παρασκευάσθηκαν βιομηχανικά και αναπτύχθηκαν από την εταιρεία DuPont. Δεν υπάρχουν λεπτομέρειες για τον τρόπο παρασκευής της αλλά σύμφωνα με την αρχική πατέντα του 1968 οι ίνες Kevlar βασίζονται στο πολυπαραβενζαμίδιο και έχουν μέτρο ελαστικότητας 130 GPa. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμίδη σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

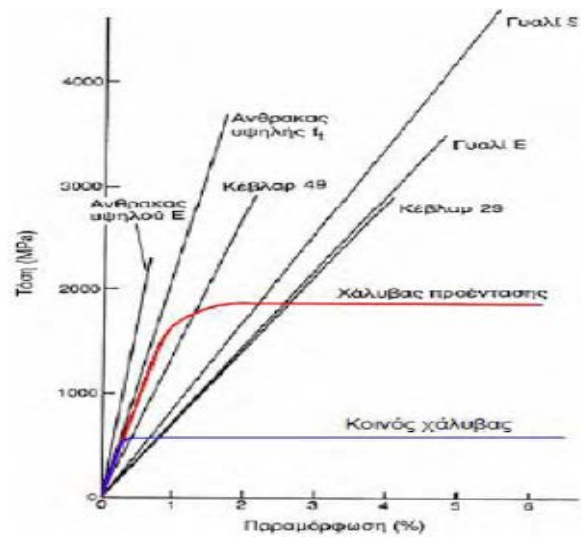
Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμίδη έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 MPa έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή, ενώ δεν έχουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη. Είναι ανθεκτικές στους διαλυτές, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Υπάρχουν δύο τύποι ινών Kevlar, το Kevlar 29 και το Kevlar 49. Το μεν πρώτο έχει υψηλή αντοχή και μέτριο μέτρο ελαστικότητας. Το δεύτερο έχει υψηλότερο μέτρο αλλά την ίδια αντοχή και είναι το πλέον κατάλληλο για ενίσχυση συνθέτων υλικών. Χρησιμοποιείται συνήθως σε βαλλιστικές εφαρμογές (Παπανικολάου & Μουζάκης, 2007).

Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ υπό δεδομένη τάση παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις. Οι ίνες αραμιδίου είναι ισχυρά ανισότροπες με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς στην διεύθυνση των ινών και ασθενείς δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των αλυσίδων. Ο ισχυρά ανισότροπος χαρακτήρας οδηγεί σε χαμηλό μέτρο διάτμησης, και χαμηλές εγκάρσιες και θλιπτικές ιδιότητες. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, χαρακτηριστικό το οποίο οφείλεται στη χημική δομή του πολυμερούς από το οποίο παράγονται. Ένα μειονέκτημα του υλικού αυτού είναι το γεγονός ότι σε αλκαλικό περιβάλλον

δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική η συμπεριφορά του. Για αυτόν τον λόγο το υλικό αυτό έχει περιορισμένη χρήση στο πεδίο των ενισχύσεων σε σχέση με τα προαναφερθέντα υλικά ινών.



Εικόνα 9. Ίνες αραμιδίου



Εικόνα 10. Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα.

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών και κυρίως η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, είναι αυτές που προσδίδουν τη μεγάλη σημασία τους στο πεδίο των εφαρμογών ενισχύσεων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε σχέση με τον κοινό χάλυβα, που χρησιμοποιείται στις κατασκευές, καθώς και με τον προεντεταμένο χάλυβα, η εφελκυστική αντοχή των ινών είναι πολύ μεγαλύτερη. Επίσης, σε αντίθεση με αυτά τα δύο είδη χαλύβων έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες έχουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι το σημείο της θραύσης τους, ενώ οι συνήθεις χρησιμοποιούμενοι χάλυβες παρουσιάζουν διγραμμική συμπεριφορά και μεγάλη πλαστιμότητα. Συγκεκριμένα για κάθε υλικό ινών η σχέση τάσης – παραμόρφωσης απεικονίζεται στο επόμενο συγκριτικό διάγραμμα, καθώς και οι σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στον κοινό και στον προεντεταμένο χάλυβα.

1.3.4. ΙΝΕΣ ΒΑΣΑΛΤΗ

Οι ίνες βασάλτη προέρχονται από ηφαιστειακό πέτρωμα βασάλτη το οποίο μετά την έκρηξη στερεοποιείται ερχόμενο σε επαφή με τον αέρα ή το νερό. Ο βασάλτης τήκεται σε θερμοκρασία περίπου 1450 ° C και έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, κατά μέσο όρο ίση με 0,035 W / mK. Λόγω της διαφορετικής σύνθεσης χημικής σύνθεσης των πετρωμάτων είναι κατάλληλος για την εξώθηση συνεχών νηματίων διαφόρων διαμέτρων (9-24 μm). Πρωτοπόρος στην παραγωγή ινών βασάλτου ο Paul Dhein 1923. Την δεκαετία του '60 στη Μόσχα και την Πράγα ήταν οι πρώτες προσπάθειες να χρήσης του για στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές. Στη δεκαετία του '90 αυτή η τεχνολογία άρχισε να χρησιμοποιείται για πολιτικές χρήσεις. Προς το παρόν, οι ίνες βασάλτη παράγονται βιομηχανικά στη Ρωσία, την Ουκρανία και την Κίνα. Η τεχνολογική διαδικασία για την παραγωγή ινών βασάλτη βασίζεται σε τέσσερα βασικά βήματα:

1. Προ επεξεργασία του βασαλτικού πετρώματος.
2. Τήξη στον κλίβανο για να ληφθούν συνεχείς ίνες.
3. Συνεχής περιστρεφόμενη επεξεργασία.
4. Υφαντική ή άλλες πιο συγκεκριμένες εργασίες, για να αποκτήσετε και άλλα σχήματα για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Οι βασικές ίνες κατασκευάζονται και πωλούνται σε πολλαπλές μορφές.

- Μαλλί: Θερμική και ακουστική μόνωση και ως ένα ιδιαίτερο σύστημα φιλτραρίσματος.

- Υφάσματα.

Υπάρχουν και άλλες μορφές που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή. Μερικά παραδείγματα είναι:

- την κατασκευή ράβδων οπλισμού σκυροδέματος αντί του χάλυβα
- δίχτυα για την ενίσχυση του οδοστρώματος
- ελαφρά μονωτικά πάνελ με κηρήθρα σε ίνες βασάλτη καλυμμένες με υαλοβάμβακα
- υλοποίηση πάνελ σάντουιτς με ίνες άνθρακα-βασάλτη
- ακουστικά και θερμομονωτικά υλικά για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους
- μαλακή στέγη (πλάκες και κεραμίδια)
- επαναχρησιμοποιήσιμοι ξυλότυποι
- εσωτερικοί σωλήνες αποστράγγισης, , συστήματα μεταφοράς θερμότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FIBER REINFORCED POLYMERS)

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ F.R.P.

Πέραν από τις συμβατικές τεχνικές ενίσχυσης τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για ποιοτική και οικονομική βελτιστοποίηση στις ενισχύσεις των μνημείων οδήγησε τη διεθνή επιστημονική κοινότητα στη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής νέων τεχνικών βασισμένων στη χρήση σύνθετων υλικών. Τα νέα αυτά σύνθετα υλικά έχουν ως φορέα ανάληψης των εφελκυστικών δυνάμεων ένα συνεχές ύφασμα ινών, το οποίο εμποτίζεται με εποξειδική ρητίνη και επικολλάται στο μέλος (Γεωργίου, 2007).

Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως ινοπλισμένα πολυμερή (FRP - Fiber Reinforced Polymer) ενώ εναλλακτική πρόταση αποτελεί μια νέα γενιά σύνθετων υλικών: τα ινοπλισμένα κονιάματα ή αλλιώς τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (TRM – Textile Reinforced Mortar) ή (TRC- Textile Reinforced Concrete).

Τα FRP ή Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) είναι μία από τις νεότερες προσθήκες στη διάθεση του μηχανικού. Τα υλικά εξελίσσονται εδώ και δεκαετίες, ενώ η μείωση του κόστους που συνδυάζεται με τη νεότερη κατανόηση της μεταβλητότητας και των οφελών των ιδιοτήτων των υλικών, έχει επιτρέψει μία αυξανόμενη χρήση τους στις κατασκευές.

Ως σύνθετο υλικό θεωρείται το ινοπλέγμα που συνδυάζεται με τη μήτρα ανόργανης σύστασης και δημιουργείται ένα νέο συνεκτικό υλικό, οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου προκύπτουν είτε από πειραματικές μετρήσεις είτε με εκτίμηση βάσει των ιδιοτήτων του κάθε επιμέρους υλικού. Η σχέση που συνδέει τις ιδιότητες είναι γνωστή ως «κανόνας ανάμειξης» και δίνεται από τις δυο ακόλουθες σχέσεις:

$$Et \approx E_{fib}V_{fib} + E_mV_m \quad (2.1.1)$$

$$ft \approx f_{fib}V_{fib} + f_mV_m \quad (2.1.2)$$

όπου:

- E_t : το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών παράλληλα στις ίνες E_{fib} : το μέτρο ελαστικότητας των ινών
- E_m : το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας
- V_{fib} : το ογκομετρικό ποσοστό ινών
- V_m : το ογκομετρικό ποσοστό της μήτρας ($=1-V_{fib}$)
- f_t : η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών παράλληλα στις ίνες f_{fib} : η εφελκυστική αντοχή των ινών
- f_m : η εφελκυστική αντοχή της μήτρας

Ως σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες υψηλής αντοχής (άνθρακα, υάλου, αραμιδίου και βασάλτη) σε συνδυασμό με πολυμερή υλικά (συνήθως εποξειδικές ρητίνες). Επειδή, όμως, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της εφελκυστικής αντοχής των ινών είναι τάξης μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της μήτρας, δηλαδή $E_{fib}/E_m \gg 1$ και $f_{fib}/f_m \gg 1$, ο κανόνας ανάμειξης ισχύει κατά προσέγγιση, ακόμα και αν παραληφθούν οι τελευταίοι όροι. Δηλαδή οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών μπορούν να υπολογιστούν μόνο με τη χρήση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών και του ογκομετρικού ποσοστού αυτών.

Μητρικό Υλικό	Πυκνότητα d (kg/m ³)	Εφελκυστική Αντοχή f_t (MPa)	Μέτρο E (GPa)	Παραμόρφωση Θραύσης ϵ_t (%)
Εποξειδική ρητίνη	1200 – 1400	55 – 130	2.8 – 4.1	3.0 – 7.0
Πολυεστέρας	1200 – 1400	35 – 104	2.1 – 3.5	< 5.0
Βινυλεστέρας	1150 – 1350	73 – 81	3.0 – 3.5	3.5 – 5.5

Πίνακας. 1 Τυπικές ιδιότητες μήτρας (Τριανταφύλλου, 2013)

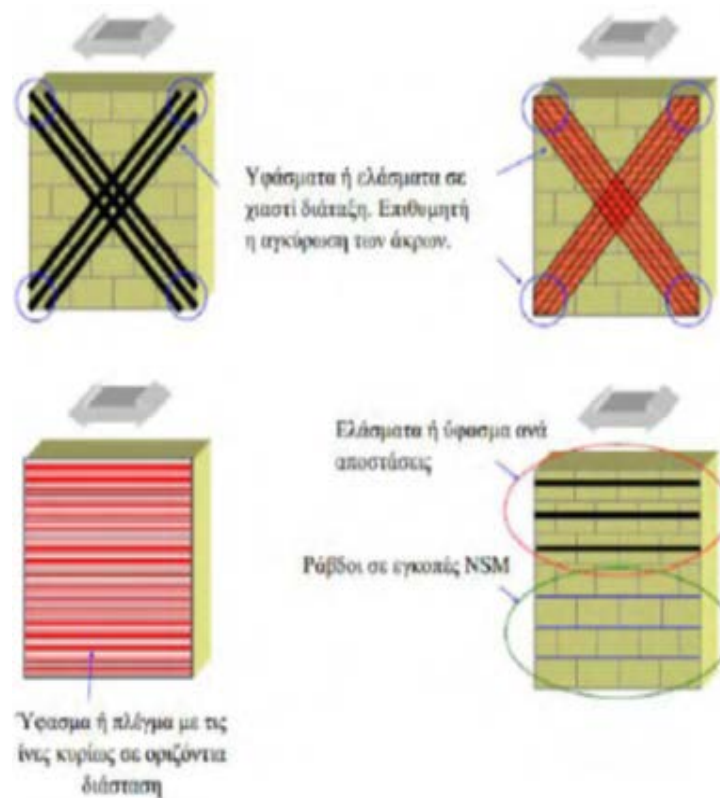
Υλικό Ινών	Μέτρο E (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή f_t (MPa)	Μin Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_t (%)
Άνθρακας			
Γενικής χρήσης	220 – 240	2050 – 3790	1.2
Υψηλής αντοχής	220 – 240	3790 – 4820	1.4
Πολύ υψηλής αντοχής	220 – 240	4820 – 6200	1.5
Υψηλού μέτρου E	340 – 520	1720 – 3100	0.5
Πολύ υψηλού μέτρου E	520 – 690	1380 – 2400	0.2
Γυαλί			
E	69 – 72	1860 – 2860	4.5
S	86 – 90	3440 – 4140	5.4
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου E	69 – 83	3440 – 4140	2.5
Υψηλού μέτρου E	110 – 124	3440 – 4140	1.6

Πίνακας. 2 Τυπικές ιδιότητες ινών (Τριανταφύλλου, 2013)

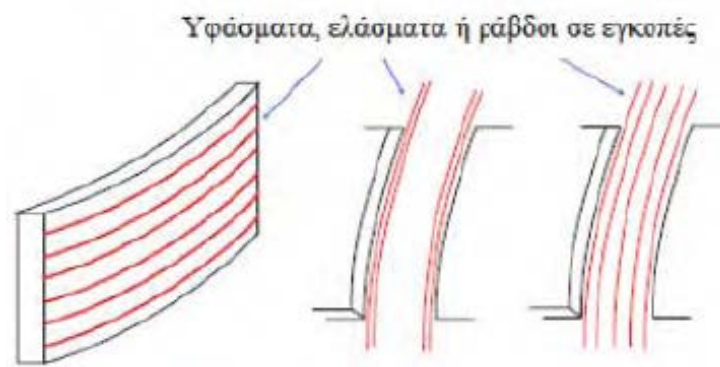
Η χρήση των FRP ως εξωτερικά επικολλώμενου οπλισμού σε στοιχεία τοιχοποιίας έχει συστηματικά διερευνηθεί και έχουν εντοπιστεί τα οφέλη της στην αύξηση της πλευρικής αντοχής όσο και στην αύξηση της αρχικής ελαστικής δυσκαμψίας αλλά και της απορρόφησης ενέργειας της τοιχοποιίας. Ενώ τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνικής ενίσχυσης εντοπίζονται κυρίως στις ψαθυρές μορφές αστοχίας της ενίσχυσης και στην αδυναμία των FRP να ακολουθήσουν τις μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις της τοιχοποιίας μετά το μέγιστο φορτίο. Το τελευταίο μπορεί να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα όταν η ικανότητα παραμόρφωσης με παράλληλη διατήρηση μέρους της πλευρικής αντοχής είναι απαιτούμενη, ενώ εγείρει και ζητήματα συγκράτησης της τοιχοποιίας σε ταυτόχρονη εκτός επιπέδου δράση (Γεωργίου, 2007) πράγμα που είναι κρίσιμο, καθώς τα ενισχυτικά υλικά θα μπορούσαν διαφορετικά να γλιστρήσουν εύκολα ή να καταστραφούν λόγω φθοράς.

2.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ F.R.P.

Η πρώτη ευρείας κλίμακας εφαρμογή τους αφορά στην ενίσχυση δύο χιλιάδων βάρων γεφυρών στην περιοχή Yolo δυτικά του Sacramento στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας και έπειτα η χρήση τους επεκτάθηκε στην ενίσχυση πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε πολλά άλλα κράτη της Αμερικής και της Ασίας. Στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, η χρήση τους αυξήθηκε την περίοδο 1992-1995 και κυρίως μετά το σεισμό του Hyogoken-Nangu το 1995 κατά 500%. Στην Ελλάδα εφαρμογές αναφέρονται στις αρχές της δεκαετίας του 1990 στην Χαλκίδα. Είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα νέα υλικά τα οποία λόγω της ευελιξίας τους έχουν ποικίλες εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια η χρήση των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, καθώς ανακαλύπτονται περισσότερες περιπτώσεις στις οποίες είναι εφικτό να εφαρμοστούν αυτά τα στοιχεία. Το γεγονός ότι είναι δυνατό να κατασκευαστούν στοιχεία με πάχος από 10 έως 30 χιλιοστά με μεγάλη ικανότητα παραλαβής φορτίων και υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση προσφέρει στα στοιχεία IAM μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με το οπλισμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ευρέως έως σήμερα στις περισσότερες περιπτώσεις νέων κατασκευών και ενισχύσεων υπαρχόντων (Αντωνιάς, 2016).



Εικόνα 11. Ενδεικτική διάταξη συνθέτων υλικών για ενίσχυση σε κάμψη (α) εκτός επιπέδου, (β) εντός επιπέδου με οπλισμούς κοντά στα πέλματα, (γ) εντός επιπέδου με ομοιόμορφα κατανεμημένους οπλισμούς στις πλευρές (Τριανταφύλλου, 2013)



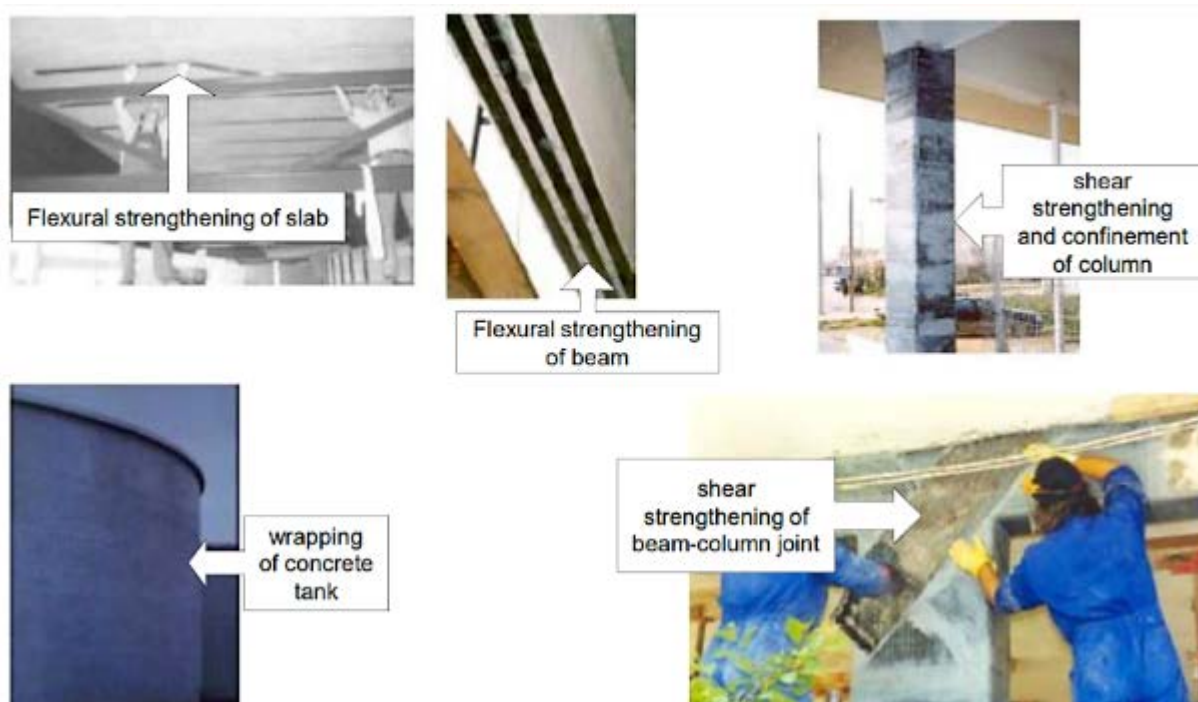
Εικόνα 12. Διατάξεις συνθέτων υλικών για ενίσχυση σε διάτμηση εντός επιπέδου



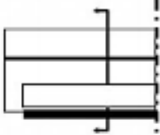

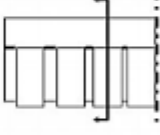
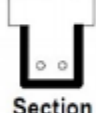
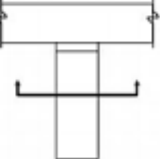

Εικόνα 13. Η τοποθέτηση της ενίσχυσης με FRP

Σήμερα, τα F.R.P. προσφέρουν τεκμηριωμένα αποδεκτές λύσεις και αποτελούν υλικό επιλογής ως μέσο επισκευής ή ενίσχυσης για τα παρακάτω συνήθη προβλήματα σε κτιριακά έργα:

- αντισεισμικές ενισχύσεις υφιστάμενων δομικών στοιχείων με ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης ως μέσο αποκατάστασης (1^{ov}) ανεπαρκών ματίσεων, (2^{ov}) ανεπαρκούς περίσφιγξης, (3^{ov}) για την αύξηση της διατμητικής αντοχής και την ικανοποίηση των επιδιώξεων του ικανοτικού ελέγχου και (4^{ov}) για να προσδώσουν πλαστιμότητα και ικανότητα παραμόρφωσης στα επιμέρους στοιχεία και στο σύνολο της κατασκευής.
- αύξηση της φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τις απαιτήσεις που προδιαγράφονται από αλλαγή χρήσης κτιρίων (αύξηση φορτίων λειτουργικότητας και αστοχίας)
- αποκατάσταση φέρουσας ικανότητας και αύξηση πλαστιμότητας σε στοιχεία και κατασκευές που έχουν υποστεί απώλεια οπλισμού και σκυροδέματος λόγω διάβρωσης των χαλύβδινων οπλισμών κατόπιν έκθεσης σε χημικώς επιθετικό περιβάλλον.
- αποκατάσταση ελλιπούς αρχικού σχεδιασμού και αναίρεση πιθανών κακοτεχνιών κατά την κατασκευή του έργου
- διόρθωση συσσωρευμένων βλαβών από έλλειψη ή και δαπανηρή διαδικασία συντήρησης υφιστάμενων κατασκευών και
- προστασία δομικών στοιχείων και κτιρίων από τυχωματικές δράσεις που οφείλονται σε κρουστικά φαινόμενα, όπως εκρήξεις, πρόσκρουση με κινούμενα οχήματα κλπ. (Νοβίδης, 2008)



Εικόνα 14. Τυπικές περιπτώσεις εφαρμογών FRP (Heiza, Nabil, & Meleka, 2014)

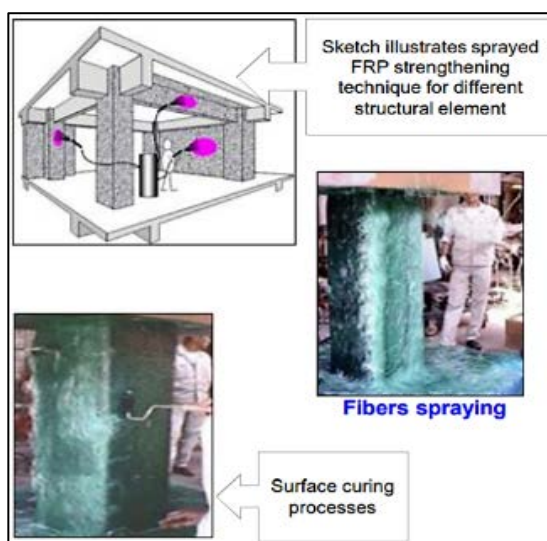
Type	Application	Fibre Dir.	Schematic
Flexural	Tension and/or side face of beam	Along long. axis of beam	  Section
Shear	Side face of beam (u-wrap)	Perpendicular to long. axis of beam	  Section
Confinement	Around column	Circumferential	  Section

Εικόνα 15. Πίνακας τυπικών περιπτώσεων εφαρμογών FRP http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Review

2.3 ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΝΟΠΛΗΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΔΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

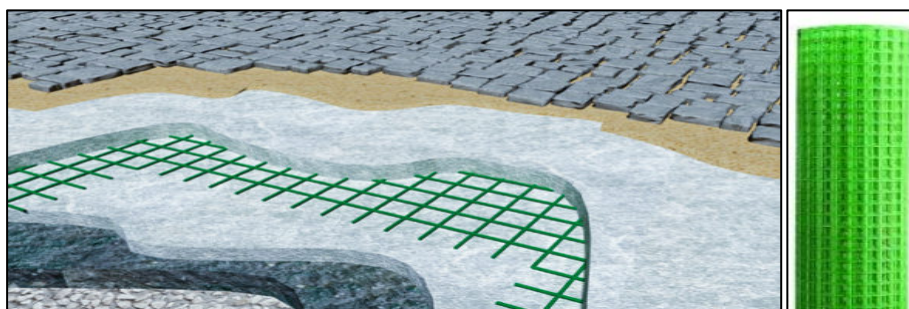
Μια πολλά υποσχόμενη καινοτόμα μέθοδος ενίσχυσης κατασκευών, είναι η εφαρμογή Ινοπλισμένων Πολυμερών δια ψεκασμού. Ίνες άνθρακα ή υάλου κατάλληλα σχηματισμένες ψεκάζονται σε επιφάνειες σκυροδέματος με βινυλεστερική ρητίνη. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ανερχόμενη, διότι σε σχέση με τις μέχρι τώρα γνωστές μεθόδους, η βινυλεστερική ρητίνη χρειάζεται λιγότερο χρόνο σκλήρυνσης από την επωξική ρητίνη, παρέχοντας τις ίδιες ευεργετικές ιδιότητες.



Εικόνα 16. Εφαρμογή ινοπλισμένων δια ψεκασμού.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΝΟΠΛΗΣΜΕΝΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΑ

Το σύστημα RI-STRUTTURA βασίζεται στην κατασκευή ασβεστοκονιάματος ή τσιμεντοκονίας ενισχυμένης με θερμοσκληρυνόμενα ρητινώδη δίκτυα ινών γυαλιού, επιτρέπει τη δημιουργία μιας σταθερής βάσης με καλές μηχανικές επιδόσεις για την επακόλουθη τοποθέτηση του δαπέδου. Η χρήση του RI-STRUTTURA εγγυάται καλύτερη κατανομή φορτίων, αποφυγή δημιουργίας κενών και τοπικής καθίζησης.



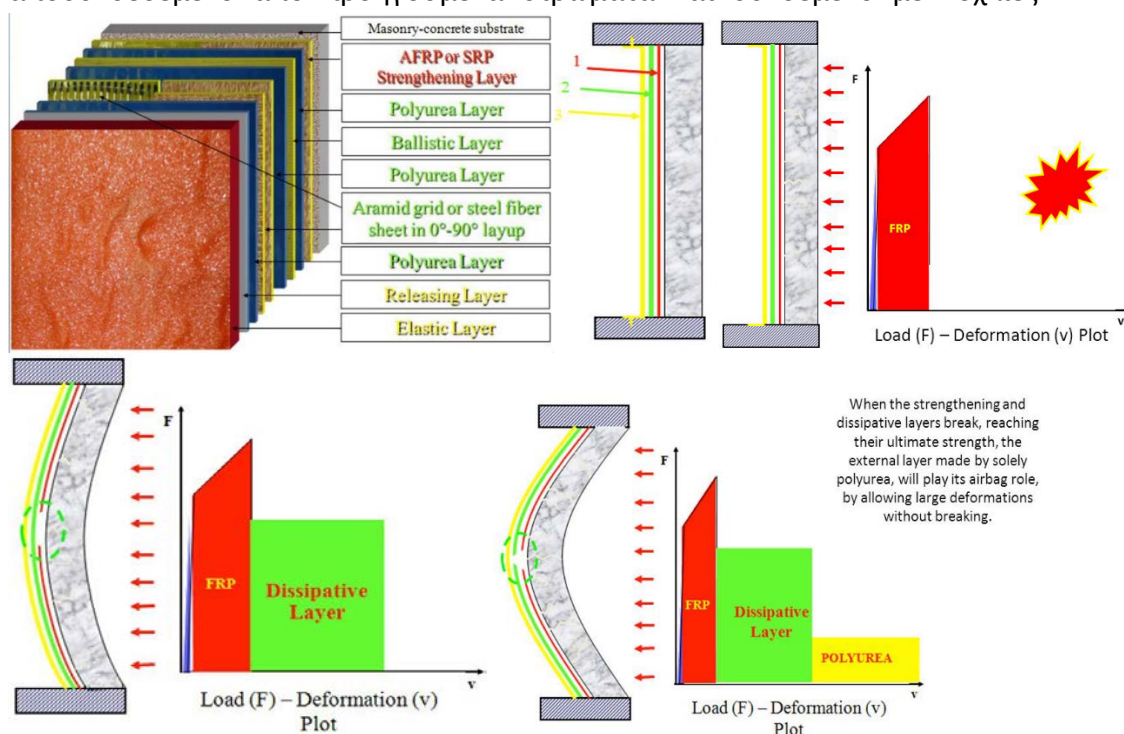
Εικόνα 17. Εφαρμογή ινοπλισμένων δικτύων σε ιστορικά πεζοδρόμια

ELASTIC SYSTEM for DYNAMIC RETROFITTING

ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΣΚΕΥΗ

Το σύστημα ενίσχυσης E.S.D.R. γεννήθηκε από τη σύζευξη προηγμένων υλικών όπως το FRP με νέο υλικό POLYUREA (πολυανθρακική ρητίνη με υψηλή ανθεκτικότητα και παραμορφωσιμότητα) με τον διπλό ρόλο τόσο της μήτρας για πλέγματα από αραμίδια ή χάλυβα αλλά και της βελτίωσης της ελαστικότητας του συστήματος.

1. Ενισχυτικό στρώμα που κατασκευάζεται από AFRP-SRP εμποτισμένο επί τόπου χρησιμοποιώντας εποξειδικές ρητίνες με χειροκίνητη προετοιμασία.
2. Διαστρεβλωτική/βαλλιστική στρώση που πραγματοποιείται από επικαλυπτόμενα στρώματα που κατασκευάζονται από ανορθωτικά πλέγματα αραμιδίου/χάλυβα με πολυουρεθάνη και βαλλιστικά πάνελ.
3. Ελαστικό στρώμα κατασκευάζεται από ένα παχύ στρώμα πολυουρεθάνης μερικώς αποσυνδεδεμένο από προηγούμενα στρώματα και συνδεδεμένο με κοχλίες AFRP-SRP.



Εικόνα 18. Ελαστικά συστήματα αποκατάστασης.

2.4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ FRP ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΝΤΕΣ

2.4.1. ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Σε φυσιολογικές θερμοκρασίες το υλικό συμπεριφέρεται ομαλά. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) είναι το σημείο που εξασθενούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Οι χημικές αλυσίδες της ρητίνης γίνονται πιο εύκαμπτες και τα φορτία μοιράζονται ανισομερώς προκαλώντας περαιτέρω φόρτιση των κοντύτερων ινών. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 80 βαθμών μπορούν να φανούν επιβλαβής και αντίστοιχα θερμοκρασίες μεταξύ -10 και -30 παρουσιάζουν ψαθυρή μορφή αστοχίας λόγω της δυσκαμψίας που παρουσιάζεται στο υλικό. Όσον αφορά στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε περίπτωση πυρκαγιάς, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, τα υλικά που έρχονται σε άμεση επαφή με τη φωτιά αναφλέγονται, εκτός εάν επιχριστούν ή επαλειφθούν με ειδική ρητίνη. Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικά επιχρίσματα ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους (40-50 mm) (Σταθόπουλος, 2009).

2.4.2. ΥΓΡΑΣΙΑ

Το νερό αποτελεί εν γένει εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον για όλα τα δομικά υλικά. Η μήτρα από ρητίνη απορροφά το νερό. Η ποσότητα του νερού που απορροφάτε εξαρτάται από το είδος της ρητίνης και τη θερμοκρασία του νερού. Οι άμεσες συνέπειες της απορρόφησης νερού από τη μήτρα είναι συνήθως οι ακόλουθες:

1) Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g μειώνεται και

2) Η ρητίνη χάνει τη δυσκαμψία της (Σταθόπουλος, 2009).

2.4.3. ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου (UV) προκαλεί μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών (γήρανση). Ένδειξη αποτελεί σε εκτεθειμένες επιφάνειες η μικρορηγμάτωση και η χρωματική αλλοίωση. Για την προστασία προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών βαφών (Σταθόπουλος, 2009).

2.5. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ FRP

Τα κύρια πλεονεκτήματα που προσέφεραν τα υλικά οπλισμού από ΙΟΠ έναντι των συμβατικών (χάλυβας) και τα έχουν καταστήσει υλικά επιλογής στις εφαρμογές ενίσχυσης είναι:

- i. η υψηλή εφελκυστική αντοχή και παραμορφωσιμότητα που αναπτύσσουν, σε συνδυασμό με την παραγωγή τους σε εύκαμπτα ινοπλισμένα υφάσματα, τα καθιστά κατάλληλα ως μέσο παθητικής περίσφιγξης του σκυροδέματος, σε αντικατάσταση / συμπλήρωση ελλιπών ή φθαρμένων συνδετήρων (Arduini & Nanni, 1997)
- ii. στο μικρό τους βάρος,
- iii. ευκολία εφαρμογής
- iv. διατήρηση γεωμετρίας.

Οι θετικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι οι εξής:

- Χαμηλό βάρος ενίσχυσης, το οποίο βοηθά στην τοποθέτησή τους αφού δεν απαιτείται βαρύς ή ειδικός εξοπλισμός.
- Ικανοποιητική πλαστιμότητα έως ότου επέλθει θραύση.
- Υψηλή αντίσταση στη διάβρωση και ανθεκτικότητα στον χρόνο.
- Εύκολη εφαρμογή αφού απαιτείται μικρή προετοιμασία στο εργοτάξιο. Η εκκένωση του χώρου δεν είναι αναγκαία και η όχληση στους χρήστες είναι ελάχιστη. Η προετοιμασία των προς ενίσχυση στοιχείων είναι μικρή και σύντομη
- Υψηλή παραγωγικότητα σε άμεσο χρονικό διάστημα αφού η τοποθέτηση τους είναι πολύ σύντομη χρονικά σε σχέση με συμβατικές μεθόδους.
- Εύκολη προσαρμογή στη στάθμη ενίσχυσης που απαιτείται και μεγάλη ποικιλία στις διαστάσεις τους.
- Μη παρεμβατική μέθοδος, παρουσιάζοντας ελάχιστες αλλαγές στη γεωμετρία της κατασκευής. Τα υλικά μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του έργου.
- Τέλος, παρουσιάζουν υψηλό λόγο αντοχής προς μάζα και δυσκαμψίας προς μάζα, χαρακτηριστικό ιδιαιτέρως σημαντικό όσον αφορά τις αντισεισμικές ενισχύσεις, καθώς αύξηση της μάζας συνεπάγεται αύξηση των σεισμικών φορτίων (Γεωργίου, 2007) (Σταθόπουλος, 2009).

Γενικότερα, για την κατάταξη των μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τυποποιημένες και μη τυποποιημένες μέθοδοι, οι οποίες προσδιορίζουν τις ιδιότητες και τις δομές ενισχυμένων και μη ενισχυμένων πολυμερών καθώς και των σύνθετων πολυμερών:

- Πλαστικά. Μη κυψελοειδή πλαστικά. Μέρος 1: Μέθοδος βύθισης, υγρού πυκνόμετρου και τιτλοδότησης (ISO 1183-1:2004).
- Πλαστικά. Προσδιορισμός εφελκυστικών ιδιοτήτων. Μέρος 1: Γενικές ιδιότητες (ISO 527-1:1993)
- Πλαστικά. Προσδιορισμός θλιπτικών ιδιοτήτων (ISO 604:2002)
- Πλαστικά. Προσδιορισμός καμπτικών ιδιοτήτων (ISO 178:2001)
- Ινοπλισμένα πλαστικά σύνθετα. Προσδιορισμός καμπτικών ιδιοτήτων (ISO 14125:1998)
- Ινοπλισμένα πλαστικά σύνθετα. Προσδιορισμός της φαινομενικής ενδοελασματικής διατμητικής αντοχής με τη μέθοδο κοντής δοκού (ISO 14130:1997)
- Πλαστικά. Προσδιορισμός παιπάλης. Μέρος 1: Γενικές μέθοδοι (ISO 3451-1:1997)
- Πλαστικά και εβονίτης. Προσδιορισμός σκληρότητας εσοχής με τη βοήθεια σκληρόμετρου (Shore hardness) (ISO 868:2003)
- Πλαστικά. Μέθοδος έκθεσης σε εργαστηριακές πηγές φωτός. Μέρος 1 Γενική οδηγία (ISO 4892-1:1999)
- Πλαστικά. Μέθοδος έκθεσης σε εργαστηριακές πηγές φωτός. Μέρος 2: Λαμπ ΡΟΦ Xenon Arc (ISO 4892-2:2006)
- Πλαστικά. Μέθοδος έκθεσης σε εργαστηριακές πηγές φωτός. Μέρος 3: Λαμπτήρες φθορίου UV (ISO 4892-3:2006)
- Η μέθοδος Scanning Electron Microscopy (SEM) χρησιμοποιείται για τη μελέτη της δομής των θραυσμένων επιφανειών των δειγμάτων και την παρακολούθηση της πιθανής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πολυμερών και των ενισχύσεων.
- Για την ανάλυση της χημικής σύστασης χρησιμοποιούνται υπέρυθροι μετασχηματισμοί Fourier (FTIR) ή ακόμη και η φασματομετρία Raman .

Properties	Reinforcement				
	Cellulose	Basalt fibre	Glass fibre	Carbon fibre	Aramid
Tensile strength	+++	++++	++++	++++	++++
Flexural strength	+++	+++	++++	++++	++++
Electrical properties	+++	+++	++++	+	+++
Heat resistance	+++	++++	++++	++++	++++
Water resistance	++	++++	+++	+++	+++
Painting	+++	+	++	+	++

Key: +: weak, ++: medium, +++: good, ++++: excellent.

Εικόνα 19. Κύριες ιδιότητες γνωστό ενισχυτικών σε πολυεστερικά σύνθετα.

Ιδιότητα (σε 20 °C) Πυκνότητα (kg/m ³)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	1100-1700	2350	7800
Μέτρο διάτμησης (GPa)	0,5-20	20-50	205
Λόγος Poisson	0,2-8	8-21	80
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	0,3-0,4	0,2	0,3
Διατμητική αντοχή (MPa)	9-30	1-4	200-600
Θλιπτική αντοχή (MPa)	10-30	2-5	150-400
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0,5-5	0,015	20-50
Ενέργεια θραύσης (Jm ⁻²) – κατά προσέγγιση	200-1000	100	10 ⁵ -10 ⁶
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 ⁻⁶ /°C)	25-100	11-13	10-15
Υδαταπορροφητικότητα: 7 ημ. – 25 °C (% κ.β.)	0,1-3	5	0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	—	—

Εικόνα 20. Ενδεικτικές ιδιότητες των ρητινών και σχετικές συγκρίσεις (Σταθόπουλος, 2009)

2.6. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ FRP

Τα ινοπλισμένα πολυμερή με μήτρα εποξειδικής ρητίνης (FRP) παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία οφείλονται κατά κύριο λόγο στην χρήση εποξειδικών ρητινών:

- Απώλεια αντοχής του υλικού λόγω της πτωχής συμπεριφοράς των εποξειδικών ρητινών σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (50-80 °C).
- Υψηλό κόστος εποξειδικών ρητινών.
- Η επαφή με τις ρητίνες εγκυμονεί κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία.
- Οι ρητίνες είναι ιδιαιτέρως εύφλεκτες και κατά την καύση τους απελευθερώνουν τοξικά αέρια.
- Δυσκολία στην εφαρμογή των FRP σε χαμηλές θερμοκρασίες ή σε υγρές επιφάνειες.
- Οι μανδύες FRP δεν επιτρέπουν στα δομικά στοιχεία να «αναπνεύσουν» με αποτέλεσμα τη συσσώρευση υγρασίας.
- Ασυμβατότητα μεταξύ ρητινών και κάποιων υλικών του υποστρώματος (π.χ. άργιλος). Επίσης, ορισμένες ιδιότητες της τοιχοποιίας, όπως το πορώδες, οι ανώμαλες επιφάνειες και η μεγάλη τραχύτητα επηρεάζουν αρνητικά την πρόσφυση μεταξύ των τούβλων και της εποξειδικής ρητίνης.
- Μετά από σεισμό η αποτίμηση πιθανών βλαβών πίσω από μανδύες FRP είναι αδύνατη μόνο με οπτική παρατήρηση.
- Αποτελούν μη ανακυκλώσιμο υλικό
- Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και εξοπλισμός καθώς οι ρητίνες είναι ένα ιδιαιτέρως «ευαίσθητο» υλικό κατά την εφαρμογή τους (Σταθόπουλος, 2009).

2.7. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ FRP

Τα ινοπλισμένα πολυμερή εφαρμόζονται σε ένα ευρύ και συνεχώς επεκτεινόμενο φάσμα ενισχύσεων και αποκαταστάσεων, σε πληθώρα διαφορετικών κατασκευών, καλύπτοντας από τις ανάγκες αναστήλωσης ιστορικών κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, έως τις πιο σύγχρονες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, ακόμα και στην αεροναυπηγική.

Η επιλογή του τύπου και της μορφής των ινοπλισμένων πολυμερών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τις βελτιωτικές εργασίες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τη γεωμετρία και τις διαστάσεις των προβληματικών κατασκευών, το είδος της καταπόνησης που υφίστανται, το βαθμό της περιβαλλοντικής τους έκθεσης και το είδος της έκθεσης αυτή, καθώς και από

Ως επί το πλείστον στη χώρα μας χρησιμοποιείται η βασική τεχνική κατά την οποία επικολλώνται χειρωνακτικά υφάσματα εμποτισμένα ή μη με ρητίνη είτε προκατασκευασμένα στοιχεία όπως ελάσματα, σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, μέσω εποξειδικών ρητινών .

Σε εφαρμογές στο εξωτερικό ακολουθούνται και πιο προηγμένες μέθοδοι, οι οποίες ακόμα δεν είναι διαδεδομένες στον Ελλαδικό χώρο. Αυτές είναι:

- Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη
- Εφαρμογή με προένταση
- Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση
- Προκατασκευασμένα στοιχεία
- Εφαρμογή ράβδων εγκοπής
- Μηχανική στερέωση ελασμάτων με αγκύρια
- Πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα

Η επικρατούσα, βασική τεχνική εφαρμογής για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια:

1. **Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου** που αποτελεί και καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη της επιδιωκόμενης συμπεριφοράς του ενισχυμένου στοιχείου, καθώς από αυτήν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συνεργασία παλαιού και νέου υλικού.
2. **Σύμφυση και Επαφή Διεπιφανειών** (Επικόλληση των στρώσεων του FRP σε αυτή την επιφάνεια) (Σταθόπουλος, 2009).



*Εικόνα 21. Προετοιμασία επιφάνειας του σκυροδέματος για την εφαρμογή ανθρακονημάτων.
(πηγή: SIKΑ HELLAS, 2004)*

Σκοπός της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι η απομάκρυνση τυχόν αδύναμων ή ενανθρακωμένων στρώσεων, καθώς και η εξομάλυνσή της, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συγκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού σε αυτή. Η προετοιμασία της επιφάνειας έχει γενικά πολύ μεγάλη επίδραση στη μακρόχρονη αντοχή της σύνδεσης και την συμπεριφορά του υλικού. Η διαδικασία προετοιμασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Όταν πρόκειται για σκυρόδεμα, η επιφάνεια καθαρίζεται καλά, διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται. Η υγρασία της τελικής επιφάνειας του σκυροδέματος δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 4% (Οικονομάκη, 2016).
- Απομακρύνονται τα σαθρά και χαλαρά τμήματα του βλαφθέντος τμήματος της επιφάνειας του σκυροδέματος ή σκυρόδεμα που δεν πληροί τις προδιαγραφές και αντικαθίσταται με υλικό καλής ποιότητας.

- Ακολουθεί απομάκρυνση σκυροδέματος υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο κατά προτίμηση με αμμοβολή.
- Τέλος, απομάκρυνση σκόνης και θραυσμάτων με χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Μετά την προεργασία συνίσταται να ελέγχεται η καταλληλότητα της επιφάνειας με τη μέθοδο του εξολκέα και η επικόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού για να γίνεται το συντομότερο δυνατό ώστε να προλαμβάνεται περαιτέρω ενανθράκωση του σκυροδέματος (Σταθόπουλος, 2009). Εφόσον το σύνθετο υλικό καλύπτει και γωνίες του στοιχείου, αυτές εξομαλύνονται και λειαίνονται για ν' αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30mm.



Εικόνα 22. Έλεγχος της επιφάνειας του σκυροδέματος με τη μέθοδο του εξολκέα όπως φαίνεται στη φωτογραφία

Για την περίπτωση αποκατάστασης τοιχοποιίας ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια:

1. Επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας που θα γίνει η επικόλληση, με αφαίρεση όλων των χαλαρών, σαθρών τμημάτων, πλήρωση των ρωγμών, εξασφαλίζοντας έτσι ένα υγιές υπόστρωμα και μια λεία επιφάνεια. Στόχος είναι η μεταφορά δυνάμεων στα σύνθετα υλικά με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ασφάλεια. Στην περίπτωση που το συνθετικό υλικό καλύπτει γωνίες, αυτές εξομαλύνονται και λειαίνονται για να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30 mm
2. Επαλείφουμε την επιφάνεια αναμονής με εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του φύλλου.

3. Εφαρμόζεται ομοιόμορφη πίεση καθώς τοποθετείται το φύλλο του σύνθετου υλικού στην επιφάνεια αναμονής, με τρόπο που αποφεύγεται ο εγκλωβισμός του αέρα σε αυτό.
4. Αν προβλέπεται η τοποθέτηση παραπάνω του ενός φύλλου, η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

2.7.1. ΣΥΜΦΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Τα σύνθετα υλικά επικολλώνται στα δομικά στοιχεία με χρήση διαφόρων κολλών (εποξικές, πολυεστερικές) που εξασφαλίζουν τη διαρκή σύνδεση και από κοινού λειτουργία του FRP με το στοιχείο μέσω της διατμητικής τάσης που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια επαφής τους. Η διαδικασία προετοιμασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική ρητίνη ή άλλη κατάλληλη συγκολλητική ουσία.
- Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση χρήσης υλικών τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται μόνο μία στρώση
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων αν απαιτείται.
- Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού σύμφωνα με τη μελέτη επισκευής-ενίσχυσης.

Οι κυριότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί η συγκολλητική ουσία είναι οι ακόλουθες:

- Επαρκής αντοχή σε υγρασία και ερπυσμό
- Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου (T_g) τουλάχιστον ίση με 45°C.
- Ελάχιστη διατμητική αντοχή στους 20°C ίση με 18MPa.
- Ικανότητα πλήρωσης κενών και εφαρμογής σε κατακόρυφες και ανεστραμμένες επιφάνειες
- Ανθεκτικότητα στην αλκαλική φύση του σκυροδέματος

Η επιφάνειες της στρώσης της κόλλας είναι της τάξης των 0,1-0,5 mm. Λόγω της υγρής τους φύσης, οι συγκολλητικές ουσίες ρέουν πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες της στερεάς

επιφάνειας και καθώς έρχονται σε επαφή με αυτή, αλληλοεπιδρούν μέσω των μοριακών τους δυνάμεων. Στη συνέχεια, η ουσία στερεοποιείται και επιτυγχάνεται η σύνδεση των δύο υλικών. Η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από την άμεση σύμφυση των επιφανειών και την ομοιόμορφη διάστρωση της κολλάς (Σταθόπουλος, 2009).

2.7.2. NEAR SURFACE MOUNTED (NSM)

Μια κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των FRP στην Ιταλία, η οποία αποδεικνύεται πρωτεργάτης στις αποκαταστάσεις ιστορικών κατασκευών, είναι η μέθοδος Near Surface Mounted (NSM). Η ράβδος ή η ταινία FRP είναι τοποθετείτε σε αυλάκι (τρύπα) που δημιουργείτε στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Αυτές οι αυλακώσεις καθαρίζονται χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο αέρα για την απομάκρυνση τυχόν λεπτών υλικών που υπάρχουν μετά την διάνοιξη. Στη συνέχεια εφαρμόζεται εποξική ρητίνη για να επιτευχθεί η ενσωμάτωση μέχρι να το καλύψει.

Αυτό γίνεται για να βοηθήσει στην ανάπτυξη της σύνθετης δράσης μεταξύ της τοιχοποιίας και του FRP.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτεί την ελάχιστη προετοιμασία επιφάνειας. Επιπλέον, είναι οικονομικά αποδοτικό.

Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που ο τοίχος υπόκειται σε υψηλό φορτίο βαρύτητας ή όταν ο τοίχος υποβαθμίζεται σοβαρά. Επίσης, δεν είναι τόσο αποτελεσματική.



Εικόνα 23. Εφαρμογή μεθόδου NSM.

2.7.3. OVERLAY REINFORCEMENT - ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ

Σε αυτή την τεχνική ένα στρώμα εποξειδικού στεγανωτικού εφαρμόζεται στην επιφάνεια του τοίχου, και στη συνέχεια επικαλύπτεται το FRP στην επιφάνεια του τοίχου και τέλος τελειώνει με ένα στρώμα εποξειδικού κορεστικού).

Επιφανειακή συναρμολόγηση και φύλλα

Στην τεχνική αυτή, οι ταινίες FRP στερεώνονται απ' ευθείας στην επιφάνεια του τοίχου. Η επιφάνεια του τοίχου πρέπει να είναι απαλλαγμένη από χαλαρά υλικά. Η επιφάνεια πρέπει να εξομαλυνθεί χρησιμοποιώντας εποξειδικό κονίαμα. Χρησιμοποιείται μια ανεστραμμένη σπάτουλα με αυλάκωση V για την εφαρμογή λεπτού στρώματος 2-3 χιλ. εποξειδικής κόλλας. Οι ταινίες FRP τοποθετούνται στον τοίχο και πιέζονται προς τα μέσα με τη χρήση ελαστικού κυλίνδρου μέχρι η κόλλα και το υλικό να συμπιέζεται και από τις δύο κατευθύνσεις (Hatzinikolas & Korany, 2005)

2.7.4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ CFRP LAMINATES

Η ιταλική εταιρεία ASLAN προτείνει μια καινοτόμα μέθοδο ενίσχυσης με τη χρήση ινοπλισμένων τύπου 4000 CFRP Laminates. Μετά από αξιολόγηση της υπάρχουσας κατασκευής από εξειδικευμένο προσωπικό, ακολουθείται συνήθης μέθοδος σε σκυρόδεμα, τοιχοποιία ή ακόμα και ξύλινη κατασκευή, η οποία έχει πρώτα απαλλαγεί από επιφανειακά σαθρά τμήματα. Συγκεκριμένα:

1. Προετοιμάζεται η εξωτερική επιφάνεια με αμμοβολή ή υδροβολή, σε βάθος όπου σε κατασκευές από σκυρόδεμα αποκαλύπτονται τα αδρανή, σύμφωνα με τα πρότυπα ACI 546R και ICRI 0370.
2. Σε περίπτωση σκυροδέματος εφαρμόζονται δοκιμές από έμπειρο μηχανικό, για να εξασφαλιστεί η αρτιότητα του υποστρώματος του σκυροδέματος.
3. Μετρίεται η επιπεδότητα και η ομοιομορφία της προετοιμασμένης επιφάνειας. Μία ανισόπεδη επιφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε πρόωγη αποσύνδεση του υλικού υπό καταπόνηση. Τέτοιες επιφάνειες μπορούν να επιτεδωθούν με τη χρήση κατάλληλου κονιάματος.

4. Πριν την εφαρμογή της κατασκευαστικής κόλλας, η επιφάνεια του CFRP Laminate που έχει εκτραχυνθεί καθαρίζεται με ακετόνη ή κάποιο άλλο διάλυμα, μέχρι να απομακρυνθεί κάθε κατάλοιπο που βρίσκεται πάνω στο υλικό.
5. Επίσης, πριν την εφαρμογή της κόλλας ελέγχονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν, ούτως ώστε να διασφαλισθεί ότι είναι στα ανεκτά όρια για την καλή λειτουργία των υλικών.
6. Η ειδική κόλλα κατασκευών εφαρμόζεται και στην προς αποκατάσταση επιφάνεια, και στο υλικό αποκατάστασης.
7. Το έλασμα τοποθετείται προσεκτικά και πιέζεται στη θέση της με τη χρήση ενός πλαστικού ρολού, ώστε να επιτευχθεί συγκόλληση άνευ κενών σε γραμμή πάχους 2-3mm. Περιττό συγκολλητικό αφαιρείται πριν να στερεοποιηθεί.



Εικόνα 24. Εφαρμογή CFRP

2.8 ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ

Μία ενδιαφέρουσα καινοτομία, η οποία μελετάται την τελευταία δεκαετία στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, είναι η αντικατάσταση της μήτρας, δηλαδή της ρητίνης (οργανικό υλικό) η οποία συγκολλά τις ίνες, με ένα πολύ λεπτόκοκκο ανόργανο υλικό, τύπου κονιάματος που έχει ως βάση του το τσιμέντο και αντί για ίνες θα χρησιμοποιηθούν πλέγματα με βροχίδες (textiles) . Τα πλέγματα αυτά κατασκευάζονται ανά αποστάσεις σε 2 τουλάχιστον (τυπικά ορθογώνιες) διευθύνσεις. Η πυκνότητα, εξαρτάται από την ποσότητα και την απόσταση των βροχίδων σε κάθε διεύθυνση, αντίστοιχα, επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πλέγματος και το βαθμό συνεργασίας ινών και του μητρικού υλικού κυρίως μέσω μηχανικής εμπλοκής του κονιάματος στα κενά μεταξύ των δεσμών. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα πλέγματα ινών είναι από άνθρακα, γυαλί, αραμίδιο και βασάλτη ενώ κυκλοφορούν κονιάματα διαφορετικής σύστασης/ιδιοτήτων τα οποία πρέπει να διαθέτουν ένα συγκεκριμένο όριο ρευστότητας/εργασιμότητας. Το κονίαμα ενδέχεται να έχει πρόσθετα πολυμερή σε ποσοστό περίπου 20% κατά βάρος των λεπτόκοκκων ενώ συχνά ως μήτρα χρησιμοποιείται κονίαμα υδραυλικής ασβεστού, το οποίο δεν περιέχει τσιμέντο ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή του σε αρχαιολογικές κατασκευές. Ο όρος που χρησιμοποιείται για τα εξελιγμένα αυτά σύνθετα υλικά μανδυνών ενίσχυσης είναι Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) ή Textile Reinforced Mortar (TRM) ή Textile Reinforced Concrete (TRC).

Κατά την τελευταία αυτή δεκαετία και σε άλλα πολλά πανεπιστήμια ανά τον κόσμο έχει συγκριθεί άμεσα η αποδοτικότητα μεταξύ των TRC και των FRP, και έχει διαπιστωθεί ότι η χρήση TRC είναι πολλά υποσχόμενη μιας και δεν υστερεί πολύ έναντι της χρήσης FRP, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τα δύο υλικά έχουν την ίδια αποδοτικότητα.

Τα παραπάνω αποτελούν απόδειξη ότι τα TRC αποτελούν ένα ανταγωνιστικό σύστημα ενίσχυσης και όχι μόνο που ελκύει συνεχώς το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, ενώ πλέον και ο κλάδος της βιομηχανίας και του εμπορίου εμπλέκονται ολοένα και πιο ενεργά στην παραγωγή και την προώθηση αυτού του συστήματος (Γεωργίου, 2007).

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστική αστοχίας (%)
Άνθρακας			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικ.	500-700	2100-2400	0,2-0,4
Γυαλί			
E	70-75	1900-3000	3,0-4,5
Z	70-75	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότη. (Κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)	115-130	3500-4100	2,5-3,5

Πίνακας. 3 Ιδιότητες υλικών ινών(Τριανταφύλλου, 2013)

Στον παραπάνω πίνακα δίδονται ενδεικτικές ιδιότητες ινών ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών με ίνες σε μία κυρίως διεύθυνση μπορούν είτε να μετρηθούν πειραματικά (αυτός είναι ο ορθότερος τρόπος εύρεσης των ιδιοτήτων αυτών), είτε να εκτιμηθούν βάση των αντιστοιχιών για τις ίνες και τη μήτρα, μέσω της σχέσης που είναι γνωστή ως «κανόνας ανάμιξης»:

$$E = E_{ib}V_{ib} + E_mV_m \quad \{1\}$$

$$F = f_{ib}V_{ib} + f_mV_m \quad \{2\}$$

E_f : μέτρο ελαστικότητας σύνθετων υλικών παράλληλα στις ίνες	V_m : ογκομετρικό ποσοστό μήτρας = $1 - V_{fib}$
E_{fib} : μέτρο ελαστικότητας ινών	f_f : εφελκυστική αντοχή σύνθετων υλικών παράλληλα στις ίνες
E_m : μέτρο ελαστικότητας μήτρας	f_{fib} : εφελκυστική αντοχή ινών
V_{fib} : ογκομετρικό ποσοστό ινών	f_m : εφελκυστική αντοχή μήτρας

Πίνακας. 4 Ονοματολογία συμβολισμών (Τριανταφύλλου ,2013)

2.8.1. ΜΗΤΡΑ

ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και, ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό. Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες.

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών είναι:

- Εποξικές ρητίνες. Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν.
- Πολυεστερικές ρητίνες. Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες και λόγω της χημικής τους σύστασης παρουσιάζουν μια δυσάρεστη οσμή και αποφεύγονται για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται.
- Βινυλεστερικές ρητίνες. Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο

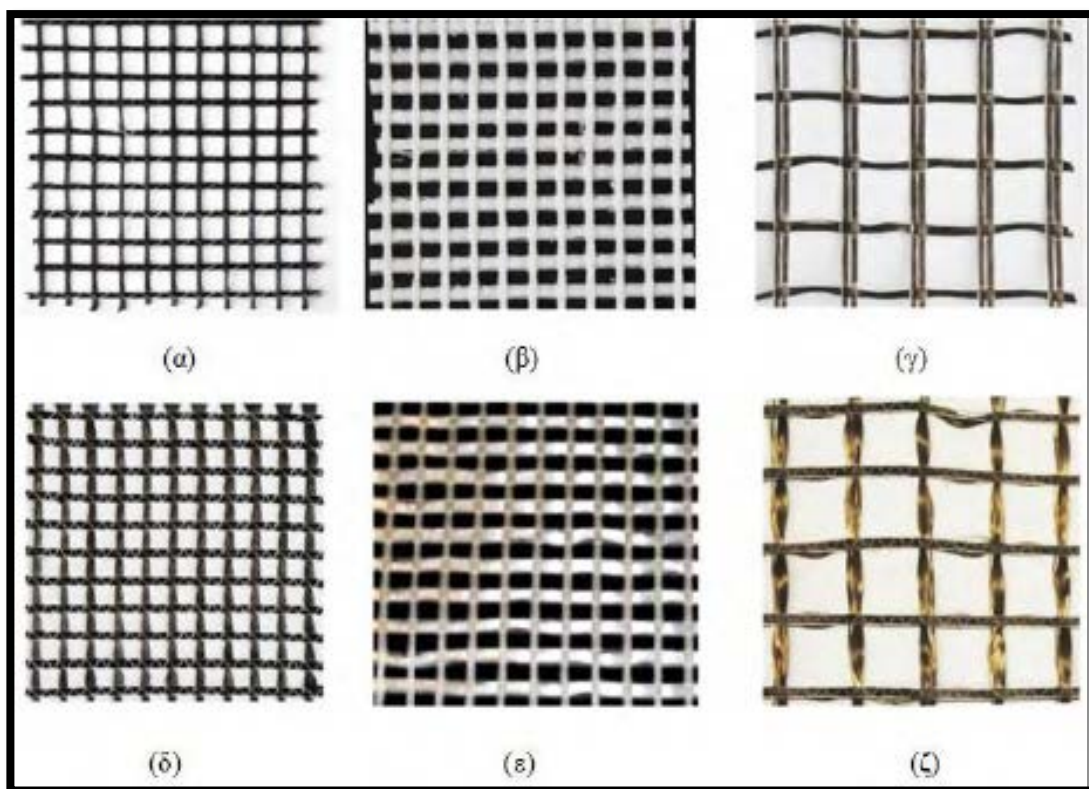
εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές.

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Οι δύο συνηθέστεροι τύποι ινοπλισμένων πολυμερών υγρής μορφής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης, είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης (Σταθόπουλος, 2009).

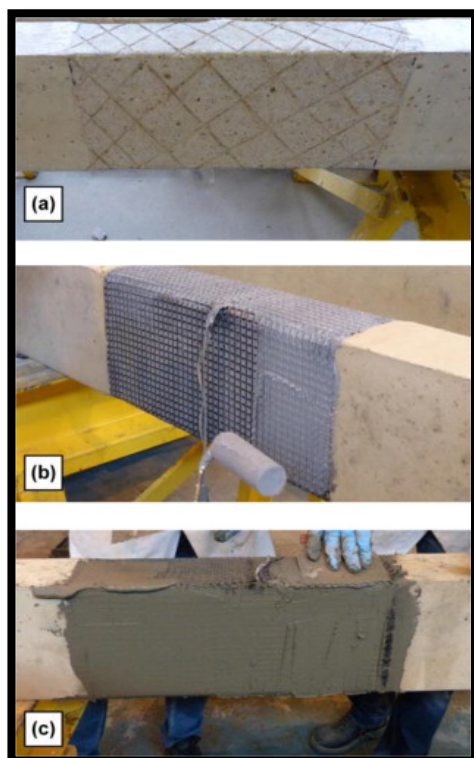
ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ

Οι μηχανικές, χημικές και ρεολογικές ιδιότητες του υλικού μήτρας που περιβάλλει τα πλέγματα ινών καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την συμπεριφορά του σύνθετου υλικού από TRM, όσο αφορά την δυνατότητα ανάληψης φορτίων και την ανθεκτικότητά του σε διάρκεια. Οι προϋποθέσεις που θα πρέπει να πληροί το ανόργανο μητρικό υλικό είναι οι εξής :

- Η ικανότητα διείσδυσης της μήτρας στο πλέγμα ινών, αποτελεί τη βασικότερη προϋπόθεση για την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών συνάφειας μεταξύ των ινών και της μήτρας.
- Η υψηλή εργασιμότητα του κονιάματος.
- Ο χαμηλός ρυθμός απώλειας της εργασιμότητας.
- Το υψηλό ιξώδες.
- Η επαρκής διατμητική αντοχή.
- Η ανθεκτικότητά της έναντι επιθετικών περιβαλλοντικών συνθηκών.
- Η χημική του δομή πρέπει να είναι συμβατή με τη χημική δομή του πλέγματος ινών (Γεωργίου, 2007).



Εικόνα 25. Εικόνα Διάφορα ινοπλέγματα δύο διαστάσεων με κλώνους ινών σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις: (α) πλέγμα ινών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, (β) πλέγμα ινών υάλου χωρίς επικάλυψη, (γ) πλέγμα ινών βασάλτη χωρίς επικάλυψη, (δ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών άνθρακα, (ε) επικαλυμμένο πλέγμα ινών υάλου και (ζ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών βασάλτη



Εικόνα 26.

(α) Προετοιμασμένη επιφάνεια σκυροδέματος πριν την ενίσχυση.

(β) Επικόλληση του πλέγματος με εποξειδική ρητίνη

(γ) Εφαρμογή ενός επιπλέον στρώματος κονιάματος πάνω από το πλέγμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ FRP ΚΑΙ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

3.1. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενισχυτική επέμβαση στις καμάρες και στους θόλους σε τοιχοποιία με μονής κατεύθυνσης ύφασμα από ανθρακονήματα.



Εικόνα 27. Επέμβαση σε θόλους και καμάρες.

Εκκλησία του San Gaetano, Bitonto (BA) - Παρέμβαση για την αντικατάσταση ξύλινων κεφαλών ακτίνας της στέγης με ξύλινες προθέσεις και σύνδεση του με ράβδους από γυάλινες ίνες και εποξειδικά ενέματα.



Εικόνα 28. Παρέμβαση στην εκκλησία San Getano, Bit onto (BA).

Generali Palace-Φλωρεντία

- Δομική και σεισμική αναβάθμιση με διάρκεια εργασιών 211 μέρες.
- Ενίσχυση πατωμάτων από σοβά με ίνες γυαλιού και ενίσχυση των ξύλινων δοκών ορόφου με εξολκημένα προφίλ γυαλιού.
- Διασύνδεση δαπέδου και η πρόληψη της ανατροπής της πρόσοψης(1450 carbon nad UHTSS fiber sheets).



Εικόνα 29. Generali Palace

Δομική ενίσχυση της εκκλησίας (The church of Santa Maria of Thanks) με την χρήση του συστήματος "Reticolatus"

Σύστημα ενίσχυσης: Reticolatus - Prof. Antonio Borri - Faculty of Engineering of Perugia

Project και διαχείριση εργασιών: Arch. Fabio Andreassi - Eng. Massimiliano Andreassi

Εκτελεστική εταιρεία: Ianni Costruzioni

Τόπος και έτος εκτέλεσης: L'Aquila, 2009-2010

Προμηθευτής υλικών: FIDIA S.r.l. - Technical Global Services.

Είδος χρησιμοποιούμενων υλικών: Fabrics: FIDSTEEL 3X2-G Hardwire (from which the strand was obtained).

		
Άποψη της εκκλησίας Santa Maria delle Grazie στην Villa Sant'Angelo (AQ).	Πολύ κατεστραμμένη περιοχή με επακόλουθη κατάρρευση μέρους της τοιχοποιίας.	Υλικό ανάκτησης μετά την κατάρρευση.
		
Καθαρισμός και αφαίρεση της κόλλας κονιάματος ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση της ενίσχυσης και η επακόλουθη ανασύνταξη.	Άποψη της περιοχής προετοιμασμένη και έτοιμη να ενισχυθεί.	Σχέδιο ενίσχυσης του συστήματος "RETICOLATUS".
		
Εισαγωγή της έλικας χαλύβδινων ινών FIDSTEEL 3X2-G στην κόλλα.	Προβολή του κατάλληλου συστήματος στερέωσης των επικαλυπτόμενων κλώνων.	Προβολή του τύπου κλώνου που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση με το σύστημα "RETICOLATUS".

Ενισχυτική επέμβαση θολωτών τοιχοποιιών. Εξωτερική ενίσχυση θόλων με GFRP πλέγμα ενσωματωμένο σε υδραυλικό ασβέστη.



Εικόνα 30. Ενισχυτική επέμβαση σε θόλους.

Ανασυγκρότηση της ροζέτας στην πρόσοψη της βασιλικής της Σάντα Χιάρα (Μονή της Σάντα Χιάρα) με τη χρήση ράβδων ινών από γυαλί.



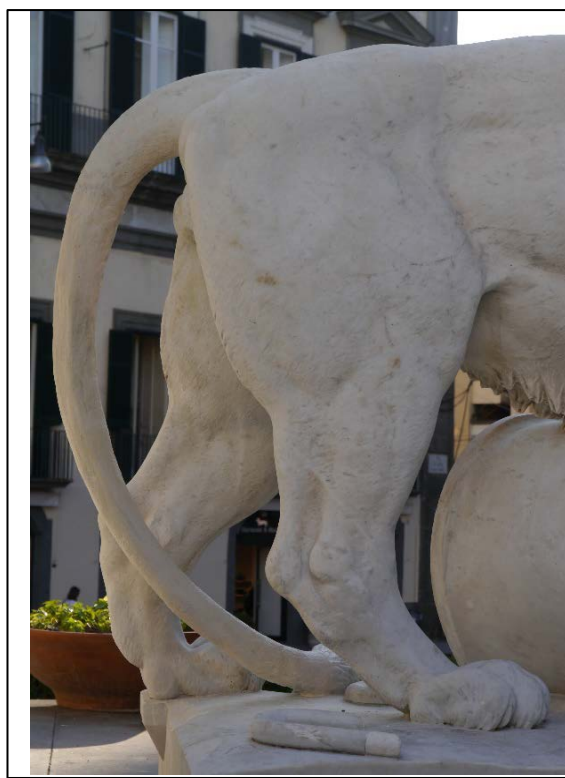
Εικόνα 31. Επέμβαση στη Μονή Σάντα Χιάρα.

**Επέμβαση επιδιόρθωσης στα αγάλματα των λιονταριών στην Piazza dei Martiri
(Νάπολη) με τη χρήση ινών άνθρακα.**



Εικόνα 32. Επέμβαση αποκατάστασης σε αγάλματα.

Η διαρθρωτική αποκατάσταση των αγαλμάτων των λιονταριών προσφέρθηκε από το τμήμα υλικών και εφαρμοσμένης μηχανικής παραγωγής του Πανεπιστημίου της Νάπολης (Φεντερίκο Τσε), υπό την καθοδήγηση του καθηγητή. Ing. Ignazio Crivelli Visconti και σε συμφωνία με την ειδική εποπτεία για την ιστορική, καλλιτεχνική κληρονομιά. Ο σύνδεσμος μουσείων της πόλης της Νάπολης, παρενέβη μέσα προσωπική φροντίδα και δαπάνη στο σχεδιασμό και την υλοποίηση. Η αποκατάσταση και ενοποίηση των βανδαλισμού ουρών. Το πρόγραμμα αναστήλωσης του καθηγητή Crivelli Visconti, ο οποίος με τη συμμετοχή της ING. Κλαούντιο Cigliano, της ING. Domenico Μπριγκάντε και του τεχνικού Αντρέα Baron, πραγματοποιήθηκε μέσω της καινοτόμου χρήσης σύνθετων υλικών και τις δικές τους ειδικές τεχνικές.



Εικόνα 33. Τελική μορφή αγάλματος λιονταριού.

Παρεμβάσεις ενοποίησης στην Real Albergo dei Poveri di Napoli. Ενοποίηση και ενίσχυση τοίχων με χρήση ινών Aramid AFRP.



Εικόνα 34. Χρήση AFRP Real Albergo di Napoli.

**Δομική παγίωση της τοιχοποιίας με ενίσχυση ινών CFRP Chiesa di Santa Caterina
στο Caprioli.**



Εικόνα 35. Chiesa di Santa Caterina, Caprioli.

Via Roma S. Pio L'Aquila (2013)

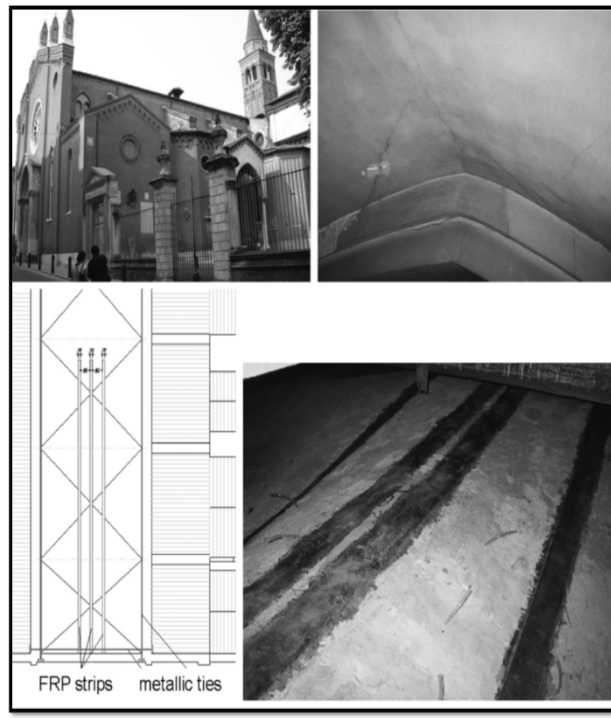


Εικόνα 36. Via Roma S. Pio L'Aquila.

Εκκλησία της Santa Corona, Vicenza

Το κτίσμα αποτελεί κλασικό παράδειγμα εκκλησίας Γοτθικού ρυθμού του 13ου αιώνα.

Και σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα της κατασκευής επικεντρωνόταν στο θόλο, ο οποίος εμφάνιζε τις ρωγμές της φωτογραφίας. Συνδυασμός μεθόδων FRP, ενεμάτων και περισφίξεων χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της γενικής απόκρισης της κατασκευής. Συγκεκριμένα, ενισχύθηκαν οι σταυροειδείς θόλοι στις εξωτερικές καμπύλες τους με λωρίδες πλάτους 20 cm στη διαμήκη τους κατεύθυνση.



Εικόνα 37. Santa Corono Vicenza.

Chiara L'Aquila (2014)

- Εφαρμογή Frp σε μορφή υφασμάτων από ανθρακονήματα.
- Εφαρμογή Frp υφάσματος από ίνες βασάλτου.
- Εφαρμογή συνδετήρων από ίνες άνθρακα και βασάλτη.



Εικόνα 38. Chiara L'Aquila.

Palazzo Lely L'Aquila (2012-2013)

Δομική ενίσχυση με ίνες άνθρακα. Χρόνοι ενοποίησης και διαμερίσματα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση έχει πραγματοποιηθεί σε διάφορες φάσεις:

1. Προετοιμασία των ταινιών στις οποίες θα εφαρμοστεί η ενίσχυση σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου.
2. Καθαρισμός δομικού στοιχείου με αναρρόφηση και εμφύσηση πεπιεσμένου αέρα.
3. Τοποθέτηση ενισχυμένου κονιάματος με ίνες για την ομαλοποίηση της επιφάνειας όπου θα εφαρμοστεί η ταινία CFRP.

Αυτά τα βήματα ολοκληρώνουν την προετοιμασία της εφαρμογής. Στη συνέχεια ξεκινάμε με τα στάδια εφαρμογής άνθρακα:

1. Εφαρμογή εποξειδικού ασταριού.
2. Εφαρμογή εποξειδικού ενέματος για την εξισορρόπηση οποιωνδήποτε απορροών.
3. Εφαρμογή FRP ταινίας με ειδικές σπάτουλες
4. Εφαρμογή της άμμου χαλαζία για να δώσει τη σωστή πρόσφυση για την επακόλουθη επεξεργασία.

Αυτές οι φάσεις ολοκληρώνουν τη δομική ενίσχυση, η οποία, εάν διεξαχθεί σε τέλεια κατασκευή, θα δώσει στο σύνθετο υλικό τα συνθετικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 39. Palazzo Lely L'Aquila.



Εικόνα 40. Palazzo Lely L' Aquila.

Villa Bruni -Padova

Αριστοκρατική Ιταλική έπαυλη, τοποθετημένη στην καρδιά της “Valle della Cura”, σχεδιασμένη με το πνεύμα του “Art Nouveau”. Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους το κτίριο έχριζε αποκατάστασης ήταν ο θόλος της κατασκευής, ο οποίος είχε εκλεπτυνθεί υπό τη δράση μεγάλων θλιπτικών φορτίων. Η αποκατάσταση περιλαμβάνει την επισκευή με **ταινίες FRP των κύριων ρωγμών στις εσωτερικές κι εξωτερικές καμπύλες του τοξωτού θόλου**, συνδυαστικά με άλλα μέτρα περίσφιξης μέσω των ξύλινων δοκών του δαπέδου. Οι λωρίδες FRP σχεδιάστηκαν και υπολογίστηκαν με τη χρήση μιας συγκεκριμένης μεθόδου που εφαρμόζεται σε θόλους, λαμβάνοντας υπόψη τους τροποποιημένους μηχανισμούς αστοχίας της κατασκευής.



Εικόνα 41. Villa Bruno - Padova.

Palazzo della Ragione

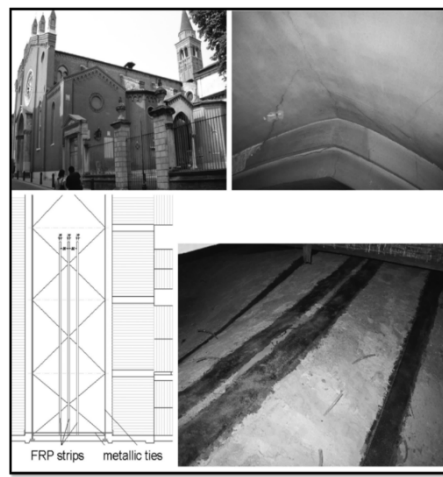
Το Palazzo della Regione ήταν η αρχαία έδρα των δικαστηρίων της πόλης της Πάντοβα. Κατασκευάστηκε το 1218 και ανακατασκευάστηκε το 1306 από τον Giovanni degli Eremitani, που του έδωσε τη χαρακτηριστική θολωτή οροφή σχήματος ενός αναποδογυρισμένου πλοίου. Ο επάνω όροφος καταλαμβάνεται από το μεγαλύτερο κρεμαστό δωμάτιο στον κόσμο με διαστάσεις 81Χ27 μέτρα και 27 μέτρα ύψος με ξύλινη οροφή. Φημολογείται ότι έχει τη μεγαλύτερη οροφή στην Ευρώπη που δεν στηρίζεται σε υποστυλώματα. Για την ενίσχυση και την αποκατάστασή του χρησιμοποιήθηκαν λωρίδες άνθρακα με ινοπλισμένα πολυμερή, τα οποία εντέχνως κρύφτηκαν πίσω από τα αυθεντικά ιστορικά μεταλλικά στηρίγματα.



Εικόνα 42. Palazzo della Ragione

Santa Corona, Vicenza

Το κτίσμα αποτελεί κλασικό παράδειγμα εκκλησίας Γοτθικού ρυθμού του 13ου αιώνα. Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα της κατασκευής επικεντρωνόταν στο θόλο, ο οποίος εμφάνιζε τις ρωγμές της φωτογραφίας. Συνδυασμός μεθόδων FRP, ενεμάτων και περισφίξεων χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της γενικής απόκρισης της κατασκευής. Συγκεκριμένα, ενισχύθηκαν οι σταυροειδείς θόλοι στις εξωτερικές καμπύλες τους με λωρίδες πλάτους 20 cm στη διαμήκη τους κατεύθυνση.



Εικόνα 43. Santa Corona

Τάφος του Casignorio, Βερόνα

Ένα περίεργο παράδειγμα εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών είναι το μαρμάρινο άγαλμα στον τάφο του Casignorio στη Βερόνα της Ιταλίας. Το άγαλμα παρουσίαζε στη βάση του ζημιές που προκλήθηκαν από την οξείδωση των μετάλλων και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ένα σύστημα αλληπάλληλων επιπέδων ινοπλισμένων πολυμερών από άνθρακα κατέστησε δυνατή την ανακατασκευή των στοιχείων του αγάλματος που έφεραν φορτία, αποκαθιστώντας και την αισθητική του αγάλματος.

Αυτό είναι ένα τρανό παράδειγμα του ότι, σε περιπτώσεις μνημείων που η αισθητική είναι μεγάλης σημασίας, η χρήση των FRP κρίνεται η πλέον καταλληλότερη. Ωστόσο, το γεγονός ότι η χρήση τους αποτελεί ακόμα καινοτόμο μέθοδο αποκατάστασης, η πειραματική διερεύνηση πρέπει να συνεχιστεί, με σεβασμό στην πολιτισμική κληρονομιά, ξεκαθαρίζοντας τις θετικές και τις αρνητικές επιδράσεις σε μια κατασκευή.



Εικόνα 44. Τάφος του Casignorio

St. Fermo Church, Βερόνα

Η εκκλησία χρονολογείται τον 8^ο αιώνα, μεταγενέστερα τον 13^ο αιώνα χτίστηκε το καμπαναριό. Η χρήση των λωρίδων FRP περιορίστηκε την εξωτερική πλευρά του θόλου σε σταυρωτή διάταξη. Η διαδικασία περιλαμβάνει:

1. Προετοιμασία της επιφάνειας όπου θα εφαρμοστεί FRP (συμπλήρωση κενών).
2. Εξομάλυνση και καθαρισμός των επιφανειών.
3. Εφαρμογή των λωρίδων FRP.
4. Εφαρμογή προστασία UV.



Εικόνα 45 . Fermo church, Verona.

San Gorgio Church Lecce, Ιταλία

Η εκκλησία του San Gorgio στο ήταν ένα αρχαίο ρωμαϊκό παρεκκλήσι, χτισμένο το 1302 και έλαβε την τελική μορφή του το 1800. Το καμπαναριό έχει ύψος 18,5m και πλάτος 3m αποτελείται από τέσσερις κολώνες. Υπέστη σοβαρές ζημιές από το σεισμό της 15ης Οκτωβρίου 1996. Στην εκκλησία του San Gorgio, οι αψίδες και οι θόλοι παρουσίασαν ένα αξιοσημείωτο επίπεδο ζημιών λόγω της καθίζησης των στύλων. Αυτό το φαινόμενο προκάλεσε υψηλές πιέσεις στην τοιχοποιία δημιουργώντας πιθανότητα επικείμενης τοπικής κατάρρευσης. Επιλέχθηκαν τένοντες FRP για να παραλάβουν τα φορτία μετατόπισης των τόξων. Ελάσματα χρησιμοποιήθηκαν για την γεφύρωση των ρωγμών στους θόλους εσωτερικά και καλύφθηκαν με επίχρισμα έπειτα.



Εικόνα 46 San Gorgio, Lecce.

San Francesco church Assisi, Ιταλία

Έγινε εφαρμογή ελασμάτων FRP στην εξωτερική πλευρά των θόλων του καθεδρικού ναού του San Francesco (Assisi, Ιταλία) μετά την σεισμό το 1997. Αυτό ήταν απαραίτητο επειδή στην εσωτερική επιφάνεια υπήρχαν αρχαίες τοιχογραφίες που εκτελέστηκαν από τον Giotto που δεν έπρεπε να αλλοιωθούν.

Ο σύντομος χρόνος για την επισκευή και την διατήρηση της αισθητικής στις προαναφερθείσες περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί ως ένα παράδειγμα στο οποίο η μετασκευή με υλικά FRP ήταν η μόνη λύση που θα μπορούσε να εγγυηθεί τα επιθυμητά αποτελέσματα.



Εικόνα 47 . San Francesco Assisi, Ιταλία.

Palazzo dei Celestini Lecce, Ιταλία

Είναι ένα κτίριο του 16^{ου} αιώνα με λιθοδομή μια κολώνα κινδύνευε με κατάρρευση κατακόρυφες ρωγμές που έδειξαν επικείμενη αποτυχία σύνθλιψης. Η στρατηγική αποκατάστασης περιλάμβανε την χρήση ελασμάτων FRP και την τοποθέτηση ράβδων FRP ως πείρων για την αποτροπή της αποσύνθεσης της τοιχοποιίας υπό υψηλά αξονικά φορτία. Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν αύξηση πάνω από 200% σε αντοχή σε θλίψη για τις στήλες που ενισχύθηκαν με ελάσματα και ράβδους σε σύγκριση με τα αρχικά δείγματα ελέγχου. Μία αύξηση περίπου 50% στις τυλιγμένες με ελάσματα FRP στήλες.



Εικόνα 48 . Palazzo dei Celestini, Lecce.

Εφαρμογές στην Ασία

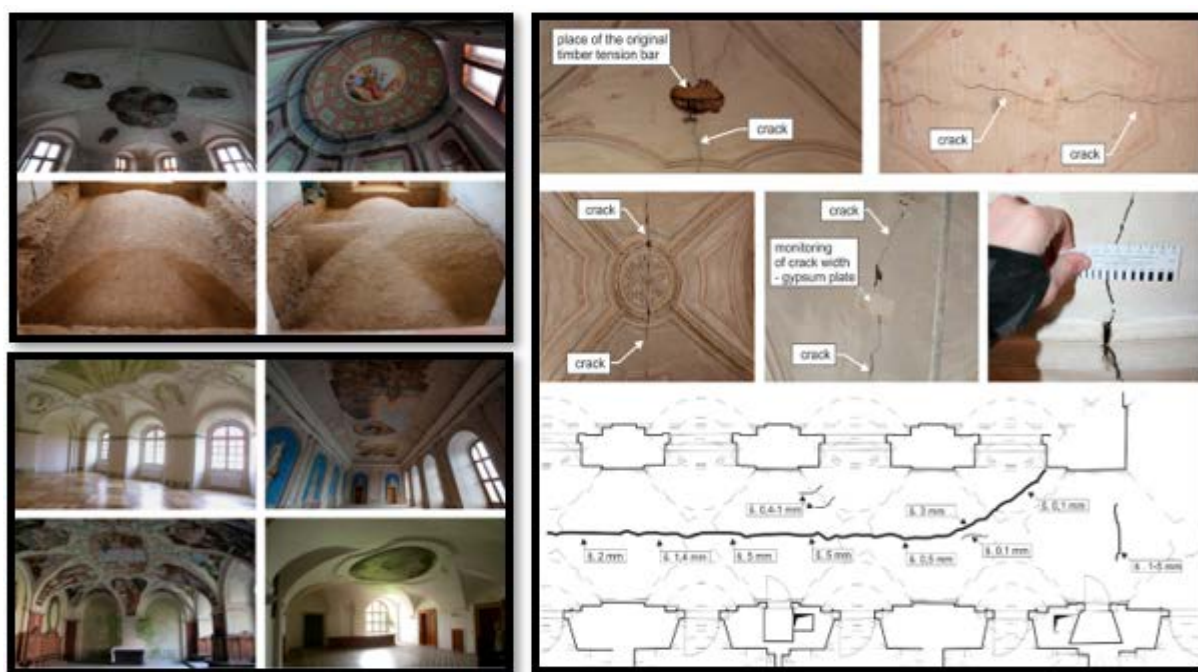
_Σε ορισμένες ασιατικές χώρες, όπως στην Κίνα, την Ιαπωνία και την Κορέα, τα περισσότερα από τα ιστορικά τους κτίρια είναι κατασκευασμένα από ξύλο (Απαγορευμένο Παλάτι στο Πεκίνο, ο ναός Foguang στο Wutaishan). Η ενίσχυση με FRP είναι πολύ αποτελεσματική για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του ξύλινου στοιχείου και της αισθητικής του, με ελάχιστο κίνδυνο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αποκατάσταση του River House, ενός παραδοσιακού ξύλινου μνημείου που χτίστηκε στη δεκαετία του 1880 στη Σιγκαπούρη με ταινίες CFRP (με εποξειδική ρητίνη) ξύλινων δοκών και περιτύλιξη ξύλινων στηλών με φύλλα GFRP αλλά και την τοποθέτηση τους ταινιών σταυρωτά για την σταθεροποίηση του δαπέδου.



Εικόνα 49 . Ναός Foguang στο Wutaishan.

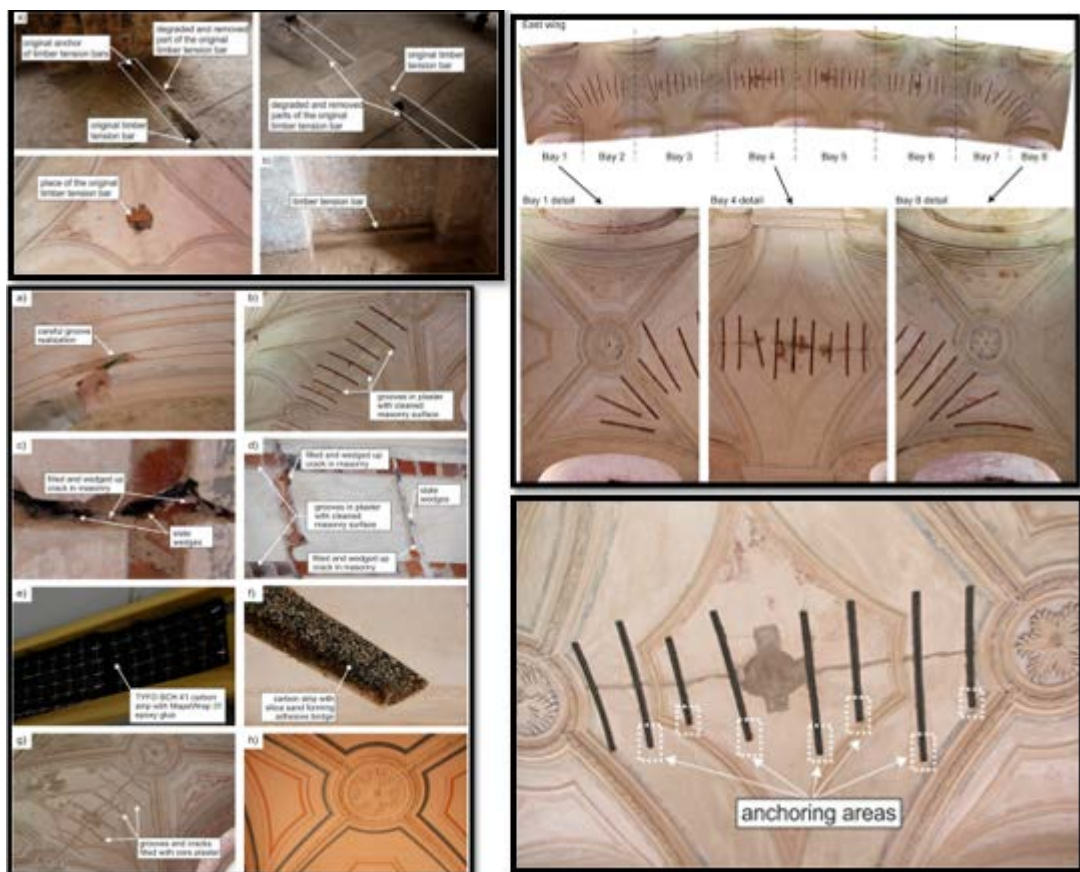
The Premonstrate Monastery at Tepla, Western Bohemia, Τσεχία

Χρονολογείται από το δεύτερο μισό του 12ου αιώνα και κατά την διάρκεια του 17ου αιώνα πήρε την τελική του μορφή. Το μοναστήρι αποτελεί μέρος του μοναστηριακού συγκροτήματος, είναι ένα κτίριο δύο διαδρόμων με ένα υπόγειο, δύο ορόφους και μια ξύλινη στέγη. Οι τοίχοι είναι από πέτρα και έχουν διαταχθεί κατά τη διαμήκη κατεύθυνση του κτιρίου με πάχος 1 έως 1,5 m και οι χώροι καλύπτονται ως επί το πλείστον με θόλους. Η έρευνα δεν αποκάλυψε καμία μηχανική βλάβη της τοιχοποιίας, η οποία θα επέφερε αλλαγές στο σχήμα του πυθμένα. Στους θόλους πάνω από τον τοξωτό περίπατο της νότιας και ανατολικής πτέρυγας του πρώτου ορόφου της μονής εντοπίστηκε μια συνεχή ρωγμή λόγω εφελκυστικών τάσεων η οποία έφθανε σε πλάτος τα 5-40mm. Κατά την τελευταία ανακατασκευή του 2004 που έγινε στον δεύτερο όροφο αντικαταστάθηκαν οι προϋπάρχοντες ξύλινοι δοκοί με μεταλλικούς τένοντες αγκυρωμένους στην τοιχοποιία. Μετά από αριθμητικές αναλύσεις αίτιων βλάβης που έγιναν διαπιστώθηκε ότι η θέση των ρωγμών στην στέψη των θόλων συνάδουν με βλάβη που έχει προκληθεί επιμήκης θόλους υπό την επίδραση κατακόρυφης δύναμης ή οριζόντιας παραμόρφωσης που προκαλείτε από αναποτελεσματική διαδοκίδωση και χρήση τενόντων. Οι τοίχοι ακουμπούν πάνω στους θόλους αλλά δεν επιτυγχάνεται η απαραίτητη σύνδεση για να λειτουργούν αρμονικά.



Εικόνα 50. Premonstrate Monastery at Tepla

Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα αριθμητικών και πειραματικών αναλύσεων, η σταθεροποίηση και η ενίσχυση των κατεστραμμένων κοιλοτήτων των θόλων του τοξωτού διαδρόμου στον 1ο όροφο σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας μη προεντεταμένες λωρίδες από σύνθετα στοιχεία άνθρακα, με πλάτος 45mm και 0,7m (κοντά στη διασταύρωση του θόλου και των τυμπάνων) 1.5m (ανάμεσα στις κολώνες) σε μήκος κάθετα στη συνεχή εφελκυστική ρωγμή. Η απόσταση των λωρίδων σχεδιάστηκε περίπου στα 0,45 με 0,55 μ. Ανάλογα με το μέγεθος και το πλάτος των ρωγμών, 3-9 λωρίδες εφαρμόστηκαν σε κάθε μία κοιλότητα. Πρέπει να σημειωθεί, ότι για την καλύτερη λειτουργία οι λωρίδες ακυρώθηκαν τα τμήματα του θόλου που δεν είχαν εκτεταμένη ζημιά. Οι σύνθετες ταινίες άνθρακα κατασκευάστηκαν από το ανθρακικό υλικό TYFO SCH41 (ένα στρώμα) και το αυτοκόλλητο MapeWrap 31 τοποθετημένο σε εποξειδική ρητίνη δημιουργώντας πιο κατάλληλα χαρακτηριστικά.



Εικόνα 51. The Premonstratense Monastery at Tepla, Western Bohemia, Τσεχία

Επισκευή – Ενίσχυση Διατηρητέου Κτιρίου 46ου Λυκείου Αθηνών

Τριόροφο κτίριο αστική κατοικία 1914. Αργολιθοδομή 50-60 cm (ασβεστολιθικής προέλευσης) Μπατικοί διαχωριστικοί τοίχοι με συμπαγή τούβλα. Μεταγενέστερες επεμβάσεις κλείσιμο/διάνοιξη ανοιγμάτων με οπτόπλινθους στους εσωτερικούς τοίχους.



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΟ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ

- Λοξές ρηγματώσεις σε τοίχους με μεγάλο ελεύθερο ύψος του Α ορόφου, πάνω από τα πρέκια, αποδιοργάνωση γωνιών κυρίως εσωτερικά
- Κατακόρυφες ρηγματώσεις αποκόλλησης εγκαρσίων τοίχων
- Αποκόλληση περιμετρικά των ανοιγμάτων από τη φέρουσα λιθοδομή, τα οποία είχαν κτιστεί μεταγενέστερα με τούβλα
- Αποδιοργάνωση των υπερθύρων από συμπαγή τούβλα
- Συστηματικές κατακόρυφες ρωγμές στη στέψη των διαχωριστικών τοίχων από οπτοπλινθοδομή, στο χώρο υποδοχής του Α ορόφου
- Οξείδωση των μεταλλικών δοκών ΙΡΕ 140 που υποστηρίζουν τα δάπεδα

Οι ενέργειες που εκτελέστηκαν για την αποκατάσταση του εν λόγω κτηρίου περιλάμβαναν:

- Αποκατάσταση συνοχής και αύξηση της αντοχής της φέρουσας τοιχοποιίας με συστηματικές τσιμεντενέσεις
- Ενίσχυση διαφραγμάτων με επικόλληση χιαστί λαμών

- Αύξηση της δυσκαμψίας του διαφράγματος
- της στέγης, κατασκευή οριζοντίου διαζώματος Ω.Σ.
- Στην εσωτερική πλευρά των αετωμάτων εφαρμόζεται μανδύας από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C20/25
- Ανακατασκευή της πλάκας από ωπλισμένο σκυρόδεμα C16/20 στην αίθουσα σχήματος οβάλ και στο πρόσκτισμα
- Ενίσχυση πεσσών σε όλο το ύψος των ανοιγμάτων ισογείου και Α' ορόφου με πλέγμα και οπλισμένο επίχρυσμα
- Αντικατάσταση των φθαρμένων ξύλινων δοκών της κεραμοσκεπής, χωρίς αποξήλωση των βασικών ξύλινων δοκών
- Ανακατασκευή οπτοπλινθοδομών, τοπική αποκατάσταση και συμπλήρωση τμημάτων της τοιχοποιίας
- Ενίσχυση της διατμητικής αντοχής των υπερθύρων ισογείου και Α' ορόφου, μέσα-έξω, με επικόλληση συνθετικών ελασμάτων (λάμες FRP)
-



Εικόνα 52 . Λύκειο Αθηνών.

Επισκευή – Ενίσχυση Διατηρητέου Κτιρίου 1ου Δ.Σ. ΑΧΑΡΝΩΝ



Παθολογία:

- Πλαγιοκατακόρυφες ρηγματώσεις και ρωγμές αποκόλλησης εγκαρσίων τοίχων
- Χιαστί ρηγματώσεις στο διαχωριστικό τοίχο της στοάς, γραφείου.
- Οριζόντιες ρηγματώσεις στη βάση των υποστυλωμάτων
- Λοξές ρηγματώσεις πάνω από τα μεταλλικά πρέκια
- Αποκόλληση της ψευδοροφής κατά μήκος των περιμετρικών τοίχων
- Αύξηση της δυσκαμψίας του διαφράγματος της στέγης με την κατασκευή οριζοντίου διαζώματος Ω.Σ. στη στέψη όλων των τοίχων

Μεθοδολογία:

- Ενίσχυση της αντοχής των πεσσών με αμφίπλευρους μανδύες GUNITE C20/25 για τους εσωτερικούς τοίχους και μονόπλευρους για τους εξωτερικούς
- Αποκατάσταση συνοχής (ομογενοποίηση) και αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας με συστηματικές τσιμεντενέσεις
- Επισκευή-αποκατάσταση των μεταλλικών πρεκιών των ανοιγμάτων και της μετωπικής δοκού του επιστυλίου
- Βαθύ αρμολόγημα με τσιμεντοκονίαμα τύπου M5
- Εφαρμογή ωπλισμένου επιχρίσματος στην εξωτερική επιφάνεια των τοίχων με ίνες πολυπροπυλενίου
- Περίσφιγξη των χτιστών υποστυλωμάτων της πρόσοψης με τοποθέτηση εταλλικών γωνιών 60X6 στις ακμές και επικόλληση υαλουφασμάτων FRP σε όλο το ύψος



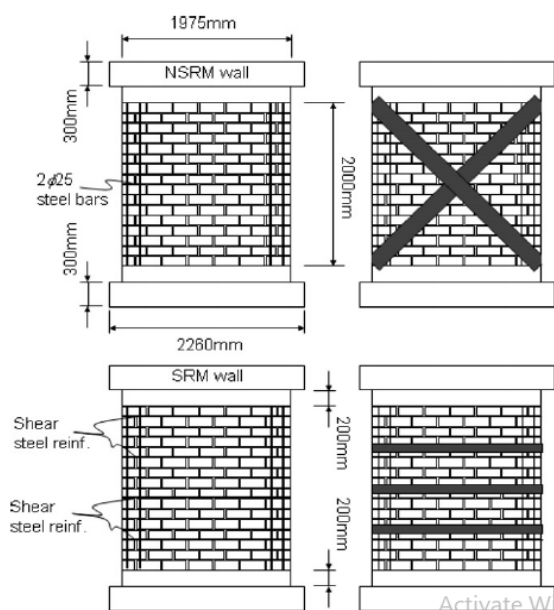
Εικόνα 53 . 1ο Δ.Σ. Αχαρνών.

3.2. ΠΑΡΟΜΟΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Οι εξωτερικά επικολλώμενες ίνες πολυμερών (FRP) είναι μια τεχνική αποκατάστασης που έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επισκευή ή την ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος και κατασκευών τοιχοποιίας. Ενώ τοιχώματα τοιχοποιίας που ενισχύονται με FRP μπορούν να έχουν μεγάλη αύξηση της αντοχής, η ενδεχόμενη αρνητική επίδρασή τους της παρουσίας βλάβης στα τοιχώματα κατά το χρόνο της επισκευής δεν έχει μελετηθεί.

Hernan Santa-Maria, Pablo Alcaino

Οι (Hernan Santa-Maria, 2011) ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό, εξετάζοντας τέσσερις δομές από τοιχοποιία, πλήρους κλίμακας οι οποίες, αρχικά καταπονήθηκαν σε διάτμηση με φορτίο ίσο με τη μέγιστη αντοχή τους και κατόπιν επισκευάστηκαν με τη χρήση δύο εξωτερικά διαμορφωμένων λωρίδων από ίνες άνθρακα. Δύο διαφορετικές διαμορφώσεις επικαλύψεων CFRP χρησιμοποιήθηκαν για την επισκευή των τοιχοποιιών με διαγώνιες διατμητικές ρωγμές. Οι τοίχοι καταπονήθηκαν υπό κυκλική φόρτιση και τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκρίθηκαν με τις αποκρίσεις από τοίχους χωρίς αρχική βλάβη και ενισχυμένους με CFRP. Παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη δύναμη και η ικανότητα παραμόρφωσης, καθώς και ο τρόπος αστοχίας και βλάβης, των επισκευασμένων τοιχωμάτων ήταν παρόμοια σε εκείνη των ανέπαφων τοίχων που ενισχύθηκαν με τα ίδια ενισχυτικά σχήματα. Η γεωμετρία των προσομοιωμάτων εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα:

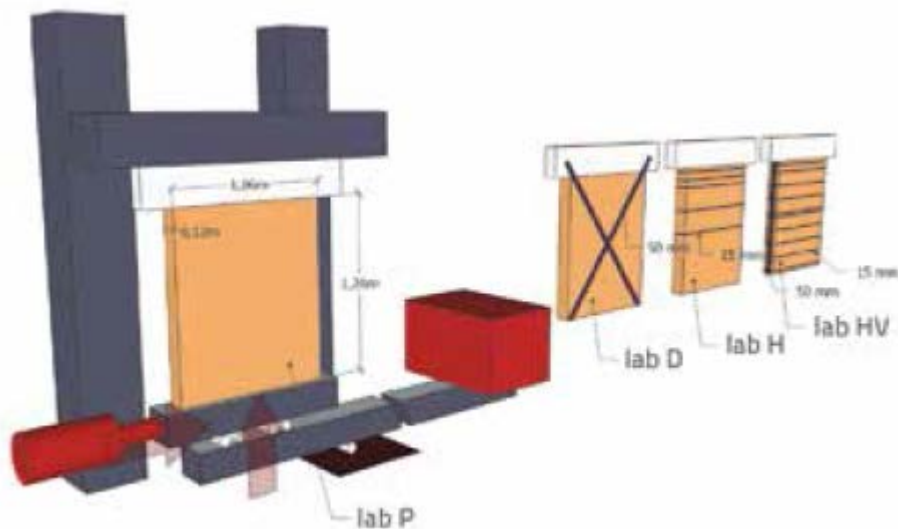


Εικόνα 54. Διάταξη προσομοιώματος Santa-Maria, Alcaino.

Simoncic – Gostic – Bosiljickov – Zarnic

Εργαστηριακές και επί τόπου στο πεδίο δοκιμές διάτμησης τοιχωμάτων ενισχυμένων με λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών από άνθρακα (CFRP) και υαλοπλέγματα FRP συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα διαφορετικών υπολογιστικών μοντέλων που προσομοιώνουν τοιχοποιία με FRP.

Στην πειραματική αναφορά των (Mojca Jarc Simoncic, 2014) διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά των κρίσιμότερων στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας, ανάμεσα στα ανοίγματα αυτής. Εξέτασαν 16 δοκίμια, τα οποία κατασκευάστηκαν γι' αυτό το σκοπό. Από αυτά, τα έξι (6) ενισχύθηκαν με διαγώνιες λωρίδες πλάτους 50mm (D) τρία (3) με οριζόντιες στενές λωρίδες πλάτους 15mm σε πέντε επίπεδα (H), τρία (3) με οριζόντιες στενές λωρίδες, πλάτους 15mm σε εννέα επίπεδα και λωρίδες πλάτους 50mm στα πλάγια (HV). Τέσσερα (4) δοκίμια παρέμειναν ως είχαν, χωρίς ενίσχυση (P). Στα παραπάνω εφαρμόστηκε κάθετη θλιπτική δύναμη 400 kN, η οποία ποσοτικοποιήθηκε περίπου στο 25% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας.



Εικόνα 55. Διάταξη δοκιμών και ενισχύσεων.

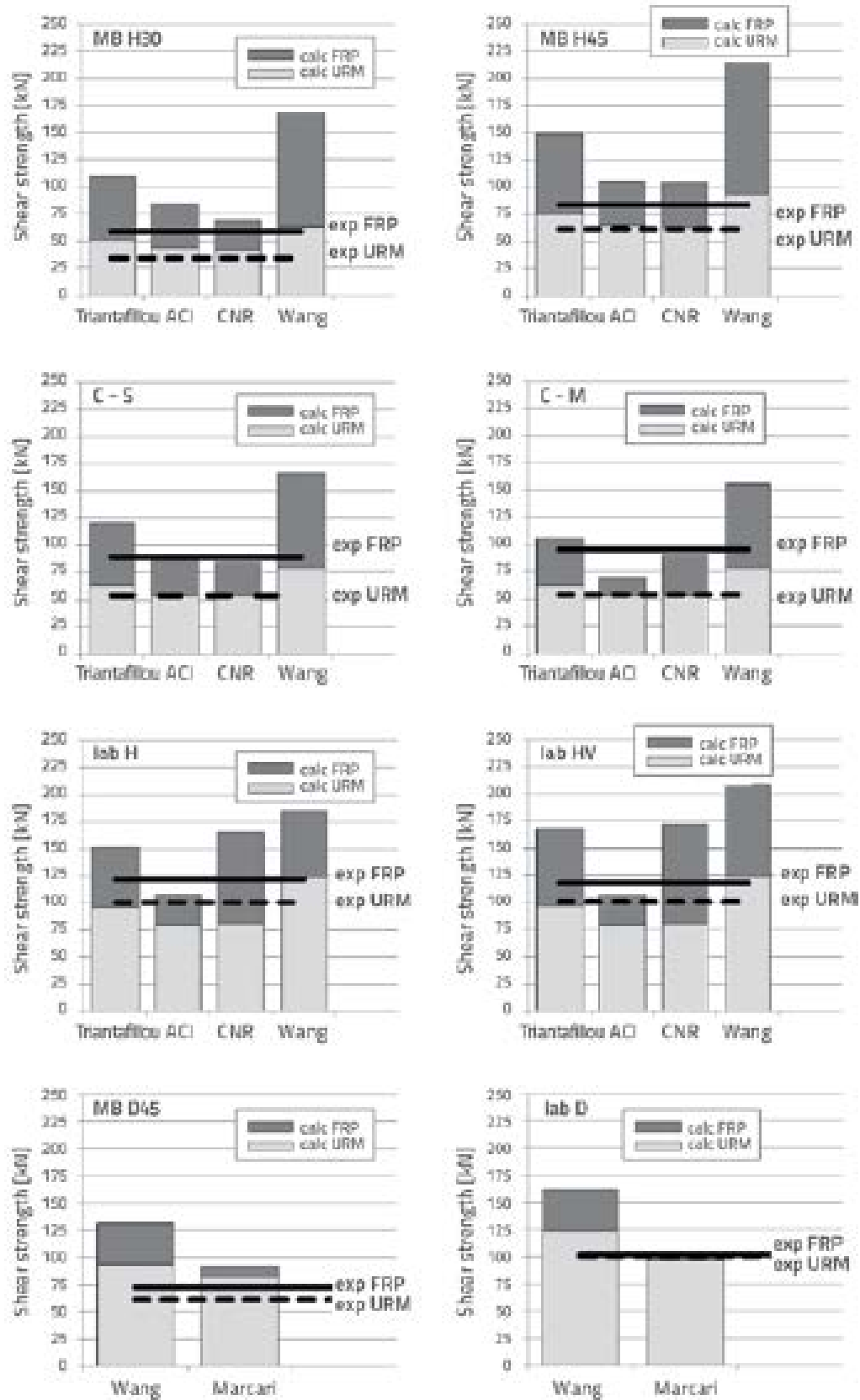
Όπως και στην περίπτωση των Santa-Maria, Alcaino, οι δοκιμές νέων και παλαιών δειγμάτων από συμπαγή τοιχοποιία ενισχυμένη με FRP έδειξε αύξηση της δύναμης διατμήσεως και της τελικής μετατόπισης. Οι (Mojca Jarc Simonič, 2014) κατέληξαν πως τα βέλτιστα αποτελέσματα ελήφθησαν όταν εφαρμόστηκαν λωρίδες σε οριζόντια και κάθετη διάταξη εποξειδικά δεσμευμένες λωρίδες και τροποποιήθηκαν, ενώ χειρότερα αποτελέσματα εξήχθησαν με διαγώνιες λωρίδες λόγω αποτυχίας αποκολλήσεως. Περαιτέρω επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων δόθηκε από τις υπολογιστικές προσεγγίσεις ACI και CNR. Οι προσεγγίσεις υπολογισμού CNR έδειξαν την καλύτερη συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα.

Οι μορφές αστοχίας των ενισχυμένων και μη δοκιμών εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 56. Μηχανισμοί αστοχίας ενισχυμένων και μη δοκιμών.

Το ζήτημα της ενίσχυσης των υφιστάμενων κτιρίων είναι κάτι που τις τελευταίες δεκαετίες ερευνάται συστηματικά, καθώς πληθώρα κατασκευών, ιστορικών και μη, εμφανίζουν τώρα προβλήματα φθοράς από το χρόνο, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τους ανθρωπογενείς παράγοντες αλλά και απρόβλεπτα φαινόμενα, όπως οι σεισμοί. Στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, οι (Mojca Jarc Simonič, 2014) συνέκριναν τα πειραματικά τους αποτελέσματα με υπολογιστικά μοντέλα που προτάθηκαν από τους (Triantafillou, 1998), (Wang, 2006) και το μοντέλο CNR-DT 200/2004.

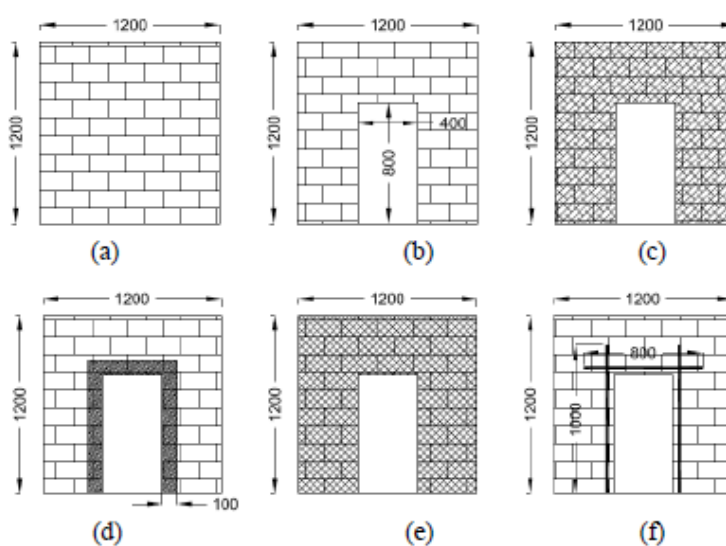


Εικόνα 57. Σύγκριση της διατμητικής αντοχής τοιχοποιίας και της συνεισφοράς της ενίσχυσης FRP, από διαφορετικούς ερευνητές για τα δεδομένα δοκίμια (Mojca Jarc Simonič, 2014).

Ένα πολύ ενδιαφέρον πείραμα διεξήχθη από τους (Ahmed El-Gendy, 2018). Κατασκεύασαν 16 τοίχους από πλίνθους, διαστάσεων 1,20 x 1,20 x 1,10 μ, τα οποία χωρίστηκαν σε 6 παρτίδες των τριών. Πιο συγκεκριμένα:

- Τρεις τοίχοι αξιοποιήθηκαν ως κτίρια αναφοράς, χωρίς κανένα άνοιγμα και χωρίς ενίσχυση (WCC1,WCC2,WCC3)
- Τρεις τοίχοι κατασκευάστηκαν με άνοιγμα διαστάσεων 800 x 400 x 60 μμ, χωρίς καθόλου ενίσχυση (WOC1,WOC2,WOC3)
- Τρεις τοίχοι ενισχύθηκαν με υφάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή υάλου (WLF1,WLF2,WLF3)
- Τρεις τοίχοι ενισχύθηκαν με υφάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή υάλου τα οποία επικολλήθηκαν περιμετρικά των ανοιγμάτων (WSF1,WSF2,WSF3)
- Τρεις τοίχοι ενισχύθηκαν με ένα παχύ στρώμα 15 μμ σιδηροπυριτίου (WFC1,WFC2,WFC3) και τέλος,
- Τρεις τοίχοι ενισχύθηκαν με ράβδους σπλισμού στις ακμές των ανοιγμάτων (WSB1,WSB2,WSB3) .

Επιπλέον, πειραματικά δείγματα φέρουσας τοιχοποιίας από λίθους, υφασμάτων και λωρίδων από FRP δοκιμάστηκαν ώστε να προσδιοριστούν οι μηχανικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 58. Απεικόνιση πειραματικών παρτίδων φέρουσας τοιχοποιίας από λίθους.

Οι μηχανικές ιδιότητες των υφασμάτων FRP από ίνες υάλου περιγράφονται στον Πίνακα 5

Specific gravity	2.56
Effective strip thickness	0.43 mm
Young's modulus of elasticity	75.9 GPa
Tensile modulus	60 GPa
Tensile Strength	875 MPa
Ultimate strain	0.0146

Πίνακας 5. Ιδιότητες υφασμάτων GFRP.

Εν τέλει, τα εξαχθέντα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τεχνικές ενίσχυσης που εξετάστηκαν αύξησαν την ικανότητα των τοίχων με ανοίγματα κατά μια μέση αύξηση της τάξεως του 5% για τους τοίχους με ενίσχυση από υφάσματα GFRP και 8% γι' αυτούς που ενισχύθηκαν με τις λωρίδες GFRP αντίστοιχα. Οι τοίχοι με ανοίγματα που ενισχύθηκαν με χαλύβδινες ράβδους εμφάνισαν αύξηση 22% και η αντοχή τους έφτασε το 78% της ικανότητας του τοίχου αναφοράς..

Ανάλογα αριθμητικά μοντέλα έχουν προταθεί τις τελευταίες δεκαετίες, με κοινό γνώμονα τη διερεύνηση της επίδρασης των σύγχρονων και των μη επεμβατικών – καταστρεπτικών μεθόδων στις κατασκευές. Με αυτά ασχολήθηκαν και οι (Garbin, E., Galati, N., Nanni, A., Modena, C., Valluzzi, M.R, 2007), (Prota, 2008), (Zhuge, 2010), (Myers, 2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

4.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την επίλυση προβλημάτων τάσεων-παραμορφώσεων σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις, η εύρεση αναλυτικών λύσεων της μερικής διαφορικής εξίσωσης μετατοπίσεων καθίσταται πολύ δύσκολη και περιορίζεται σε απλές γεωμετρίες. Σε πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως αυτές που περιγράφουν κτηριακές εγκαταστάσεις, η εύρεση του πεδίου τάσεων-παραμορφώσεων υλοποιείται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων (Υπολογιστική μηχανική). Συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων.

Κατά τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, η διαφορική εξίσωση μετατρέπεται σε ένα σύνολο αριθμητικών εξισώσεων. Η λύση του συστήματος των αριθμητικών εξισώσεων δίνει την τιμή του αγνώστου (μετατοπίσεις) σε συγκεκριμένα σημεία και όχι σε όλα τα σημεία του χώρου. Τα σημεία αυτά είναι τα διακριτά σημεία και η μετατροπή της διαφορικής εξίσωσης σε ένα σύνολο αριθμητικών εξισώσεων καλείται διακριτοποίηση. Η διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης πραγματοποιείται με τη χρήση ενός πλέγματος (mesh), οι κόμβοι του οποίου είναι τα διακριτά σημεία.

Καθώς η διαφορική εξίσωση δεν περιγράφεται πλέον αναλυτικά αλλά, με ένα σύνολο αριθμητικών εξισώσεων, αναμένεται το αποτέλεσμα της λύσης να διαφέρει από το αποτέλεσμα της αναλυτικής επίλυσης. Συνεπώς, η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα των κόμβων του πλέγματος. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της λύσης. Απαιτείται λοιπόν, κάθε φορά να αυξάνουμε (π.χ. διπλασιάζουμε) σταδιακά το πλήθος των κόμβων του πλέγματος. Αν σε δυο διαδοχικές αυξήσεις δεν μεταβληθεί η ακρίβεια της λύσης τότε έχει επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα της αριθμητικής προσέγγισης.

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις με τη χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου είναι αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση υπολογιστή.

Επιπλέον, η εξίσωση της διάχυσης αποτελεί την ιδανική διαφορική εξίσωση για την εισαγωγή στην αριθμητική επίλυση διαφορικών εξισώσεων που συναντώνται σε προβλήματα μετάδοσης της θερμότητας και μηχανικής των ρευστών. Αυτός είναι και ο λόγος που στην αγορά είναι διαθέσιμα ανεπτυγμένα λογισμικά που υλοποιούν της αριθμητική επίλυση αυτής της διαφορικής εξίσωσης. Μάλιστα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η βάση των περισσότερων προγραμμάτων που υπάρχουν για μηχανικούς υπολογισμούς. Ένα από αυτά τα προγράμματα που βασίζονται στην χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι το MSC Marc Mentat το οποίο και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

4.2. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MSC MARC MENTAT

Το Marc ήταν το πρώτο εμπορικό λογισμικό μη γραμμικών πεπερασμένου στοιχείων που αναπτύχθηκε από την Marc Analysis Research Corporation που ιδρύθηκε το 1971 από τον Dr. Pedro Marcal. Το 1999 αποκτήθηκε από την MSC Software Corporation. Το Mentat είναι ο αποκλειστικός (pre- and post-processor , προ- και μετα-επεξεργαστής) που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη του Marc.

Το MSC Marc είναι ένα μη γραμμικό λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση συμπεριφοράς σύνθετων υλικών και αλληλεπίδρασης κάτω από μεγάλες παραμορφώσεις και στελέχη. Μπορεί επίσης να προσομοιώνει σενάρια πολλών φυσικών σε διαρθρωτικές, θερμικές, πιεζοηλεκτρικές, ηλεκτροστατικές, μαγνητοστατικές και ηλεκτρομαγνητικές συμπεριφορές. Χρησιμοποιεί αυτόματη δισδιάστατη και τρισδιάστατη αναπαράσταση για την ανάλυση δομών που υφίστανται μεγάλες στρεβλώσεις και ρηγματώσεις.

4.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ T.R.E.M.A.

(Michele Betti, 2014)

Η έρευνα που διεξήχθη για την παρούσα διπλωματική εργασία στηρίχθηκε στη φιλοσοφία του προγράμματος T.R.E.M.A. (Technologies for the Reduction of seismic Effects on Architectural Manufactured Structures), το οποίο στοχεύει στη αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατων κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, των οποίων η σεισμική συμπεριφορά ενισχύεται με τεχνικές αποκατάστασης. Οι τεχνικές που πραγματεύεται το εκτενές αυτό πειραματικό πρόγραμμα διεξάγονται στο σεισμικό εργαστήριο ENEA στη Ρώμη. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν δύο πανομοιότυπα τρισδιάστατα κτίρια με κλίμακα 1:1,5, σύμφωνα με τις παραδοσιακές τεχνικές και πρακτικές της κεντρικής Ιταλίας. Στο πλαίσιο του έργου αξιολογήθηκε επίσης η αποτελεσματικότητα των καινοτόμων τεχνικών αποκατάστασης με το σύστημα CAM (Active Concrete of Masonry) με σύγκριση των αποτελεσμάτων στα δύο πρωτότυπα. Το πρώτο πρωτότυπο (RM) κατασκευάστηκε και ενισχύθηκε με το σύστημα CAM, στη συνέχεια δοκιμάστηκε για να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης. το δεύτερο (URM) δοκιμάστηκε μέχρι να καταρρεύσει χωρίς ενίσχυση.

Το πρωτότυπο είναι ένα διώροφο κτίριο κλίμακας 1: 1,5 (Εικόνα 60), με τα τοιχώματα να κατασκευάζονται με πεπλεγμένη υφή τοιχοποιίας και χαμηλής ποιότητας κονίαμα, με σκοπό την αναπαραγωγή ορισμένων τυπικών δομών τοιχοποιίας που υπάρχουν στις περιοχές της Κεντρικής Ιταλίας. Η διάταξη του σχεδίου αποτελείται από ένα ενιαίο κέλυφος με εξωτερικές διαστάσεις 3,5 m x 3,0 m (Εικόνα 61) και τα ύψη διασταύρωσης μετρήθηκαν περίπου 2,2 m. Στην κορυφή του κτιρίου υπήρχε ένα στηθαίο από πλινθοδομή ύψους 0,15 μ. πάνω από το επίπεδο του δευτέρου ορόφου, οπότε το συνολικό ύψος του πρωτοτύπου ήταν 4,55 μ. Οι τοίχοι από πλινθοδομή, κατασκευασμένοι με ασβεστολιθικές πέτρες και ασβεστοκονίαμα, είχαν σταθερό πάχος 0,25 μ. και αποτελούνται από δύο κατακόρυφες όψεις χωρίς καμία εγκάρσια σύνδεση. Οι οριζόντιες κατασκευές έγιναν με εύκαμπτες ίνες ξύλου. Κάθε πάτωμα χτίστηκε με 5 ξύλινες δοκούς (διατομής 0.10 m x 0.18 m) και ξύλινες σανίδες με πάχος περίπου 20 mm καρφωμένες στις δοκούς.

Για να αναπαραχθεί η κακή κατασκευαστική τεχνική που είναι χαρακτηριστική για ορισμένα μη ενισχυμένα κτίρια τοιχοποιίας της Κεντρικής Ιταλίας, τόσο οι συνδέσεις τοιχοποιίας-

πατώματος όσο και οι συνδέσεις τοιχοποιίας-τοιχοποιίας υλοποιήθηκαν με μη αποτελεσματικό τρόπο.

Το συνολικό βάρος της τοιχοποιίας ήταν περίπου 169,71 kN. Το πρότυπο κατασκευάστηκε πάνω από μία δοκό οπλισμένου σκυροδέματος που είχε ύψος 0,4 μ. Και βάρος 28,25 kN. Το βάρος των ξύλινων πατωμάτων ήταν περίπου 4,08 kN και, επιπλέον, για να προσομοιωθούν τα χαρακτηριστικά στη μειωμένα κλίμακα μεγέθους, τοποθετήθηκε μία κατανεμημένη μάζα 2,5 t σε κάθε πάτωμα. Ως εκ τούτου, το συνολικό βάρος του πρωτότυπου πάνω στη δονητική τράπεζα, συμπεριλαμβανομένης της δοκού, ήταν περίπου 251,14 kN.

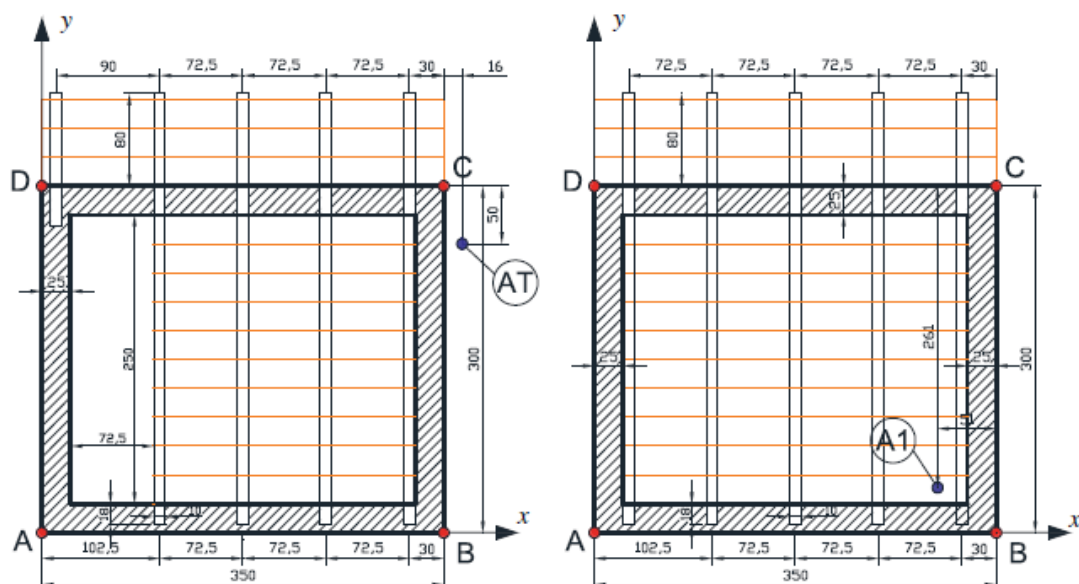
Όπως προαναφέρθηκε, οι τοίχοι από πλινθοδομή του πρωτοτύπου κατασκευάστηκαν με ασβεστολιθικές πέτρες και ασβεστοκονίαμα, με αναλογίες βάρους των συστατικών 10,5 (άμμος), 11 (ασβέστη) προς 1 (τσιμέντο). Οι μονάδες τοιχοποιίας σχεδιάστηκαν κατά προσέγγιση (δηλ. έχουν ακανόνιστο σχήμα) και είχαν μεταβλητές διαστάσεων από μέσο έως μεγάλο μέγεθος. Τα τοιχώματα είχαν μια τομή διπλού κάθετου στρώματος με υφή ακανόνιστη (opus incertum) . Οι μέσες διαστάσεις των αρμών κονιάματος ήταν σκόπιμα πολύ μεγάλες τόσο στην πρόσοψη όσο και στην τομή. Καμία σύνδεση μεταξύ των δύο στρωμάτων δεν υλοποιήθηκε. Επιπλέον, προκειμένου να αναπαραχθεί ένα κακό κατασκευαστικό σύστημα, τα τοιχώματα δεν συνδέονταν μεταξύ τους στις γωνίες και δεν υλοποιήθηκαν δοκοί από σκυρόδεμα για τη σύνδεση των ξύλινων δοκών με τους τοίχους. Ένα δοκάρι ξύλου τοποθετείται σε κάθε άνοιγμα.



Εικόνα 59. Τομή τοιχοποιίας του μοντέλου



Εικόνα 60. Μορφή γεωμετρίας προσομοιώματος.



Εικόνα 61 .Κάτοψη κελύφους προσομοιώματος (Michele Betti, 2013)

Σεισμικές τράπεζες εφαρμόζουν ταλάντωση που προσομοιώνει το σεισμό του Colfiorito (ως εισαγωγή αναφοράς) με την μορφή κανονικοποιημένης φυσικής σεισμικής δραστηριότητας, ο οποίος αναλύθηκε σε επόμενη ενότητα, ενώ τυχαίες δοκιμές εκτελέστηκαν πριν τις δυναμικές δοκιμές, ώστε να επιβεβαιωθούν οι συχνότητες των κτιρίων. Για να αντιστοιχιστεί με την μειωμένη κλίμακα μεγέθους της δομής, η αρχική σεισμική εγγραφή μειώθηκε σε χρόνο (δηλαδή οι εγγραφές κλιμακώθηκαν κατά μήκος του χρονικού άξονα με παράγοντα ίσο με την τετραγωνική ρίζα της γεωμετρικής κλίμακας του μοντέλου: $\sqrt{\frac{3}{2}} = 1,225$ και τόσο οι συνισταμένες Βορρά-Νότου (NS) και Ανατολής-Δύσης (EW) εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Τόσο καταστροφικές όσο και μη καταστροφικές δοκιμές διεξήχθησαν αρχικά στα στοιχεία ώστε να χαρακτηριστεί η τοιχοποιία. Πολλά παραδείγματα ασβεστούχων λίθων ελέγχθηκαν για να αξιολογηθεί η μέση θλιπτική αντοχή (f_{bc}) και η ειδική μάζα (γ_m). Οι τιμές που αποκομίστηκαν ήταν $f_{bc} = 8,5 \text{ N/mm}^2$ και $\gamma_m = 1.700,00 \text{ kg/m}^3$. Εργαστηριακές δοκιμές σε κονιάμα παρείχαν τη μέση θλιπτική αντοχή (f_{mc}) και την εφελκυστική αντοχή (f_{mf}) ίσες με $0,72 \text{ N/mm}^2$ και $0,14 \text{ N/mm}^2$ αντίστοιχα. Επιπλέον δοκιμές στους συνδέσμους του κονιάματος πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο διείσδυσης PNT-G για να εκτιμηθεί η ποιότητα του κονιάματος. Τα αποτελέσματα έδωσαν μια μέση τιμή $f_{mc} = 0,54 \text{ N/mm}^2$. Για να αξιολογηθεί η θλιπτική αντοχή f_{wc} του αρμολογήματος τοιχοποιίας, ξεκινώντας από τις ιδιότητες των μονάδων και του κονιάματος, προτάθηκαν πολλές σχέσεις. Γενικά αυτές οι μέθοδοι είναι αξιόπιστες μόνο για τοιχοποιίες με κανονική υφή, οπότε στην παρούσα περίπτωση είναι μόνο δυνατόν ν' αποκομιστεί ένα εφικτό εύρος της μεταβλητότητας γι' αυτή την παράμετρο. Θεωρώντας $f_{bc} = 8.5 \text{ N/mm}^2$ και $f_{mc} = 0.72 \text{ N/mm}^2$ είναι λογικό να υποθέσουμε ότι το f_{wc} κυμαίνεται από 2 έως $3,5 \text{ N/mm}^2$.

Επιπροσθέτως στις δοκιμές των μονάδων, η τοιχοποιία χαρακτηρίστηκε μέσω τριών διαγώνιων δοκιμών συμπίεσης που πραγματοποιούνται σε δοκίμια τοιχοποιίας. Χτίστηκαν με τις ίδιες τεχνικές, υλικά και κατασκευαστές που απασχολούνταν με την κατασκευή των πρωτότυπων κτιρίων. Πρόκειται για τετράγωνα δοκίμια με πλευρά μήκους ίση με 0,9 m και πάχος 0,25 m. Πρώτον, εφαρμόστηκε ένα κατανεμημένο κάθετο φορτίο q στις δύο αντίθετες πλευρές του πάνελ, κι έπειτα εφαρμόστηκε το διαγώνιο φορτίο P_d , με έλεγχο μετατόπισης έως την κατάρρευση. Τα τρία δοκίμια, που ονομάστηκαν MT_1 , MT_2 και MT_3 , δοκιμάστηκαν

επιβάλλοντας μια διαφορετική κάθετη δύναμη στο επίπεδο προ-φόρτισης, συγκεκριμένα $q_1=0,1$, $q_2=0,15$ και $q_3=0,20$ N/mm², αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα, σε όρους μέγιστου διαγωνίου φορτίου ήταν $P_{d1}=37,1$, $P_{d2}=27,8$ και $P_{d3}=51,5$ kN για τις τρεις δοκιμές.

Για σκοπούς ορθότητας, ελήφθησαν τα αποτελέσματα της δοκιμής MT₁, δεδομένου ότι η δοκιμή MT₂ προκάλεσε μη φυσιολογική λειτουργία αστοχίας, ενώ τα αποτελέσματα της δοκιμής MT₃ ήταν ισοδύναμα με εκείνα της δοκιμασίας MT₁.

Υποθέτοντας την τοιχοποιία ως ένα ομοιογενές γραμμικό ελαστικό μέχρι να αστοχήσει, οι κύριες τάσεις στο κέντρο δίνονται από τις σχέσεις (Galano L, 2001) :

$$\sigma_1 = -0,785\tau_d + \frac{\sigma_v}{2} + \sqrt{(1,469\tau_d)^2 + \frac{\sigma_v^2}{4}} \quad \text{Εξ. 1}$$

$$\sigma_3 = -0,785\tau_d + \frac{\sigma_v}{2} - \sqrt{(1,469\tau_d)^2 + \frac{\sigma_v^2}{4}} \quad \text{Εξ. 2} \quad , \text{ όπου}$$

σ_v : θλιπτική τάση που εφαρμόζεται στην πρώτη φάση της δοκιμής (με αρνητικό πρόσημο)

$$\tau_d = \frac{P_d}{A\sqrt{2}} \quad \text{και}$$

A: η περιοχή της τομής του δοκιμίου.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το φορτίο q εφαρμόστηκε σε μήκος 0,42 μ., για τη δοκιμή MT₁, προκύπτει $\sigma_v = 0,047$ N/mm².

Αντικαθιστώντας το θλιπτικό φορτίο αστοχίας στις εξισώσεις (1) και (2) προέκυψαν η κύρια εφελκυστική τάση $\sigma_1 = 0,058$ N/mm² και η κύρια θλιπτική τάση $\sigma_3 = -0.288$ N/mm². Για την αστοχία με διαγώνια ρωγμή, όπως προκύπτει από τη δοκιμή, η τάση σ_1 δίνει ένα καλό αποτέλεσμα για την αξιολόγηση της αντοχής εφελκυσμού της τοιχοποιίας (f_{wt}). Με τον ίδιο τρόπο, για το δοκίμιο MT₃ προέκυψε $\sigma_1 = 0,069$ N/mm² και $\sigma_3 = -0,417$ N/mm² βρέθηκαν. Με βάση αυτή την ερμηνεία, η αντοχή εφελκυσμού της τοιχοποιίας κυμαίνεται από 0,06 έως 0,07 N/mm².

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στόχος της προσομοίωσης του κτιρίου ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς του σε στατικά φορτία καθώς και η εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς του, με αξιοποίηση των ιδιομορφών του και των ιδιοσυχνοτήτων του.

I. Σχεδίαση αρχικού μοντέλου Πεπερασμένων στοιχείων

Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινάει με την εισαγωγή της γεωμετρίας της κατασκευής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD 2019 και τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου με προδιαγραφές συμβατές με το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων.

II. Προεπεξεργασία

Κατά το στάδιο αυτό γίνεται διακριτοποίηση του μοντέλου και των επιμέρους όγκων του σε στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων (finite elements) τα οποία συνδέονται ανά δύο ή και περισσότερα στους κόμβους (nodes) ή επιφάνειες ή ακμές.

Τα δεδομένα που εισάγονται στη συνέχεια διαφοροποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις της επίλυσης που έχει επιλεχθεί να πραγματοποιηθεί (Στατική ή Δυναμική). Για παράδειγμα, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προ-επεξεργασία και γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται προ-επεξεργαστές (pre processors).

Έπειτα πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται επιλύτες (solvers) και εμπεριέχουν τη μαθηματική διατύπωση της επίλυσης των αριθμητικών εξισώσεων του μοντέλου.

III. Μετεπεξεργασία

Όταν ολοκληρωθεί η επίλυση, αξιοποιούνται προγράμματα που αποκαλούνται μετά-επεξεργαστές (post processors), ώστε να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα και να τα αξιολογήσει.

IV. Σχεδίαση διορθωμένου μοντέλου επίλυση (αν τα αποτελέσματα δεν είναι λογικά)

Περιγραφή του προβλήματος : Στο στάδιο αυτό καλείται ο μελετητής να διατυπώσει πλήρως το φυσικό πρόβλημα. Θα πρέπει να καθοριστούν τα δεδομένα και οι μεταβλητές ως προς τις οποίες επιζητάτε μια λύση.

Εισαγωγή της γεωμετρίας : Η μόρφωση του φέροντος οργανισμού βάσει των αρχιτεκτονικών σχεδίων αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο της μεθόδου για την προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

V. Διακριτοποίηση του φορέα

Στην συνέχεια η κατασκευή διαιρείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό γεωμετρικών στοιχείων . Τα στοιχεία αυτά ενώνονται σε συγκεκριμένα σημεία που ονομάζονται κόμβοι. Για τον κάθε κόμβο υπάρχει ένα καθορισμένο πλήθος βαθμών ελευθερίας. Έτσι κάνοντας την διακριτοποίηση της κατασκευής το συνεχές πρόβλημα με τους άπειρους βαθμούς ελευθερίας ανάγεται σε ένα διακριτό προσομοίωμα με πεπερασμένους βαθμούς ελευθερίας και πλέον γίνεται εφικτή η επίλυση του με την χρήση αλγεβρικών εξισώσεων.

VI. Εισαγωγή Ιδιοτήτων Υλικού και Συνοριακών συνθηκών

Οι ιδιότητες των υλικών αφορούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και προσδιορίζουν την μηχανική συμπεριφορά του φορέα . Οι συνοριακές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τις στηρίξεις και της δυνάμεις που εφαρμόζονται στο σώμα , καθώς και τις αρχικές συνθήκες όταν αυτό είναι απαραίτητο . Θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα στον καθορισμό όλων των δυνάμεων και του τρόπου εφαρμογής τους . Όσον αφορά τα σεισμικά φορτία ο Αντισεισμικός Κανονισμός καθορίζει σαφώς το μέγεθος και την κατανομή τους.

VII. Αριθμητική Επίλυση

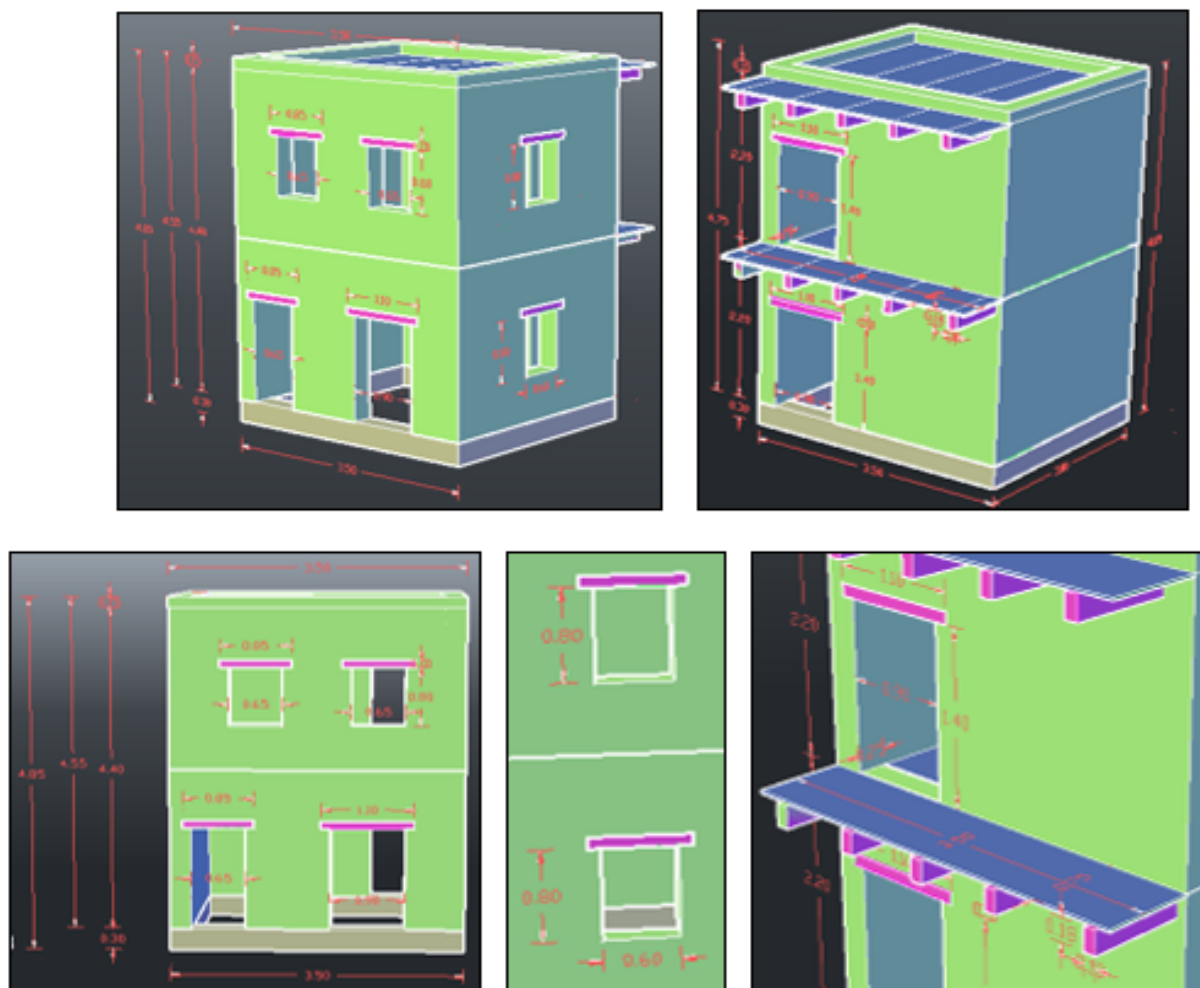
Αφού έχουν καθοριστεί οι ιδιότητες των υλικών και οι συνοριακές συνθήκες προχωράμε στην αριθμητική επίλυση του προβλήματος.

5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η γεωμετρία που δημιουργήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD 2019 εισήχθη σε σχεδιαστικό πρόγραμμα δημιουργίας συμπαγών μοντέλων (solid elements) ώστε να προκύψει το τρισδιάστατο μοντέλο με προδιαγραφές συμβατές με το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων (MSC Marc Mentat).

Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 62.) αρχικά σχεδιάστηκε το τετράεδρο τοίχωμα, στο οποίο δημιουργήθηκαν τα ανοίγματα και οι υποδοχές, για κάθε στοιχείο, στις διαστάσεις και τα σημεία που παρουσίαζαν τα σχέδια του κτιρίου.

Έπειτα, δημιουργήθηκαν οι δοκοί και τα ανώφλια, τα οποία συνδέθηκαν στις κατάλληλες θέσεις και τελικώς τα εσωτερικά και εξωτερικά πετώματα στις στάθμες των δύο ορόφων. Στο πρόγραμμα της προσομοίωσης εισάγουμε τα στοιχεία του φορέα σε μορφή solid και για αυτό το λόγο εξάγουμε το αρχείο τους επιμέρους όγκους σε μορφή ACIS(.sat).



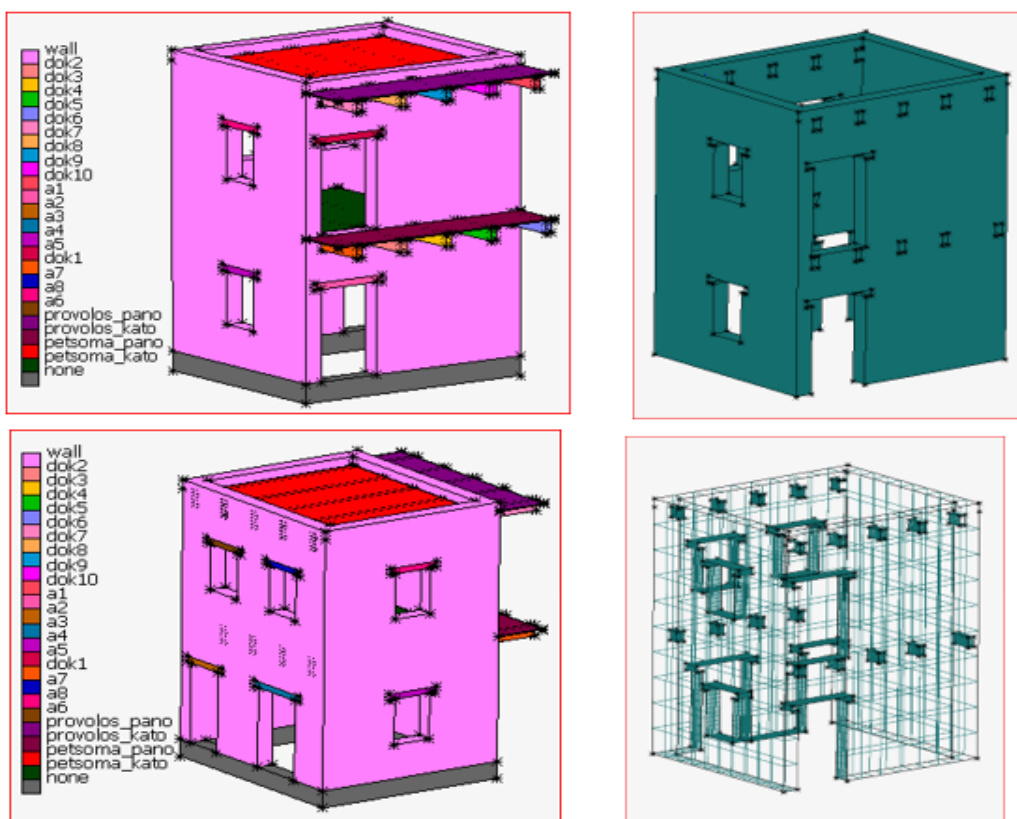
Εικόνα 62. Το μοντέλο στο περιβάλλον του AutoCAD

5.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

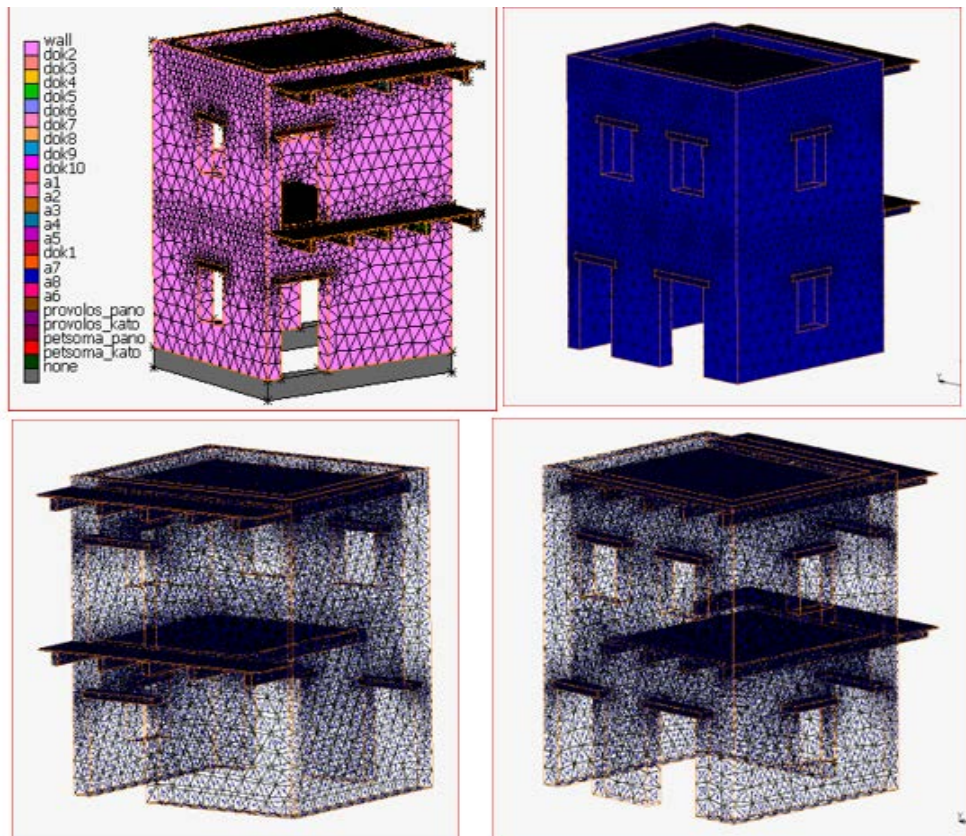
Η διακριτοποίηση των επιμέρους όγκων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων (finite elements) σε μορφή τριγωνικού πλέγματος (triangular mesh) (Εικόνες 63, 64). Στο σημείο αυτό αξίζει ν' αναφερθεί, πως η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα των κόμβων του πλέγματος και αντίστοιχα ένα πιο πυκνό πλέγμα αυξάνει το υπολογιστικό κόστος και την διάρκεια της ανάλυσης (αυξάνεται το σύνολο των αριθμητικών εξισώσεων). Προτείνεται επομένως, να γίνει, σε πρώτη φάση πιο αραιή διακριτοποίηση του φορέα και έπειτα να γίνονται δοκιμές με πιο αραιές διακριτοποιήσεις μέχρι να πετύχουμε να συγκλίνουμε στην λύση του μοντέλου που επιθυμούμε.

Η δημιουργία του πλέγματος διακριτοποίησης του φορέα πραγματοποιείται με την εντολή **Volumes**. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει είτε αυτόματα, είτε χειροκίνητα (κάτι το οποίο απαιτεί από τον χρήστη αρκετά καλή εμπειρία και γνώση σε παρόμοιες εφαρμογές) .

Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε αυτόματα η δημιουργία του πλέγματος και ο συντελεστής της πυκνότητας της διακριτοποίησης διαφέρει στους επιμέρους όγκους καθώς επηρεάζεται από τις διαστάσεις και τις ιδιότητες του κάθε υλικού. Μετά από αρκετές δοκιμές το τελικό διακριτοποιημένο μοντέλο κατέληξε να έχει 117.772 στοιχεία (elements) και 35.418 κόμβους (nodes).



Εικόνα 63. Το μοντέλο στο περιβάλλον του MARC.



Εικόνα 64. Διακριτοποιημένο μοντέλο στο περιβάλλον του Marc

5.4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Μετά την εισαγωγή των γενικών στοιχείων της γεωμετρίας του φορέα και την αναπαράσταση του συνόλου του ως πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, εξειδικεύονται ακόμα περισσότερα τα στοιχεία της κατασκευής, με την κατάταξή τους στην κατάλληλη ομάδα (λιθοδομή, δοκάρια, ανώφλια, πέτωμα). Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τα contact bodies. Κάθε ένα χαρακτηρίζεται από την ταυτότητά του (Body Name), τον τύπο του (Body Type) και τους βαθμούς ελευθερίας του (εν προκειμένω G: Glued, δηλαδή πλήρως συνδεδεμένο). Έτσι δημιουργείται ο πίνακας επαφής στον οποίο συμμετέχουν όλα τα στοιχεία και περιγράφονται οι επιμέρους συνδέσεις τους, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.

First	Body Name	Body Type	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1-15	1 wall	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
16-30	2 dok2	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	3 dok3	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	4 dok4	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	5 dok5	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	6 dok6	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	7 dok7	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	8 dok8	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	9 dok9	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	10 dok10	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	11 a1	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	12 a2	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	13 a3	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	14 a4	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	15 a5	Meshed (Deformable)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G

Εικόνα 65. Πίνακας Επαφής

(πίνακας ανάλυσης του τύπου σύνδεσης των στοιχείων στο περιβάλλον Marc)

Φυσικά, απαραίτητα για την πλήρη περιγραφή και σωστή συμπεριφορά των επιμέρους στοιχείων, είναι οι αντίστοιχες ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται, καθώς αυτές προσδιορίζουν την μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου. Εισήχθησαν για το κάθε στοιχείο, ακολουθώντας το πρότυπο του προγράμματος T.R.E.M.A., το οποίο έχει περιγραφεί προηγουμένως. Όλα τα στοιχεία θεωρούνται ελαστοπλαστικά, ενώ επιπλέον, για να εξαχθούν ακριβέστερα αποτελέσματα εισάγονται για τα όλα τα υλικά τα κριτήρια αστοχίας και διαρροής τους. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα στοιχεία που συνθέτουν το μοντέλο και οι φυσικές τους ιδιότητες.

Κάποια από αυτά τα μεγέθη προέκυψαν από τις παρακάτω εξισώσεις;

$$a = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3 * (3 - \sin \varphi)}} = 0,55$$

$$\beta = \frac{a}{\sqrt{3 * (3 * c^2 - a^2)}} = 0,29$$

$$M = \frac{1 - \alpha * \sqrt{3}}{\alpha * \sqrt{3} - 1}$$

$$y_{str} = \frac{6 * c * \cos \varphi}{\sqrt{3} * (3 - \sin \varphi)} = 787.000 \text{ N/m}^2$$

Υλικό	Λιθοδομή	Ξύλινες Δοκοί	Ξύλινα Ανώφλια	Επένδυση Ξύλου
Μέτρο Ελαστικότητας E (Mpa)	700	10000	10000	10000
Λόγος Poisson ν	0,25	0,2	0,2	0,2
Φαινομενική πυκνότητα ρ (kg/m ³)	1700	700	700	700
Αντοχή σε Εφελκυσμό σ _τ (Mpa)	0,065			
Αντοχή σε Θλίψη σ _σ (Mpa)	2,5			
Συνοχή c (Mpa)	0,7			
Γωνία Εσωτερικής Τριβής φ	40			

Πίνακας 6. Ιδιότητες των στοιχείων του κτηρίου

Αντιστοίχως, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που εισήχθησαν από τους (Michele Betti, 2014) παρουσιάζονται στον Πίνακα. 7.

Ιδιότητα	Ονομασία	M.M.	Ποσότητα
Θλιπτική αντοχή	f_{bc}	N/mm ²	8.5
Ειδική μάζα	γ_m	kg/m ³	1700
Μέση Θλιπτική αντοχή	f_{mc}	N/mm ²	0.72
Μέση Εφελκυστική αντοχή	f_{bc}	N/mm ²	0.14
Για ποιότητα κονιάματος	f_{mc}	N/mm ²	0.54
Θλ. αντοχή αρμολογήματος	f_{wc}	N/mm ²	2-3.5

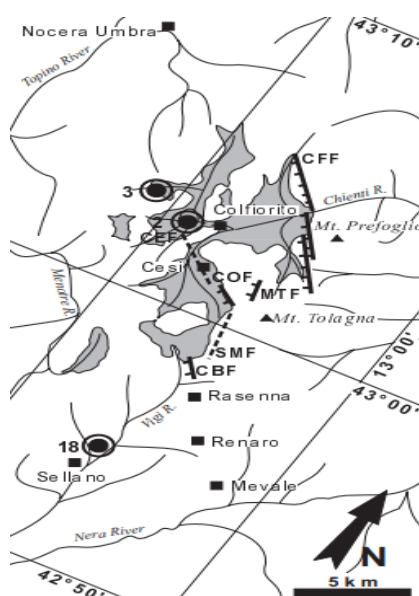
Πίνακας. 7 Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα T.R.E.M.A.

Σημαντική θεωρήθηκε η ταύτιση των δεδομένων εισαγωγής και η πιστότερη προσέγγιση μεθοδολογίας (γεωμετρία-ιδιότητες-συνθήκες φόρτισης και καταπόνησης) με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε από τους (Michele Betti, 2014) στο πλαίσιο της φιλοσοφίας του προγράμματος T.R.E.M.A., καθώς συγκλίνοντα αποτελέσματα θα επιβεβαιώσουν και θα ενισχύσουν την ορθότητα εκτέλεσης και των δυο μερών, ενώ θα αποτελέσουν επιπλέον απόδειξη της ευεργετικής επίδρασης των ινοπλισμένων πολυμερών στις μη οπλισμένες φέρουσες πλινθοδομές. Αντίθετα, αποκλίνοντα αποτελέσματα θα καταδείξουν πιθανά λάθη στην όλη θεώρηση ή ακόμα και την εκτέλεση κι ενδεχομένως θα κατευθύνουν μελλοντικούς ερευνητές σε σωστότερο μονοπάτι για την αποκόμιση αξιοποιήσιμων συμπερασμάτων.

5.5 ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

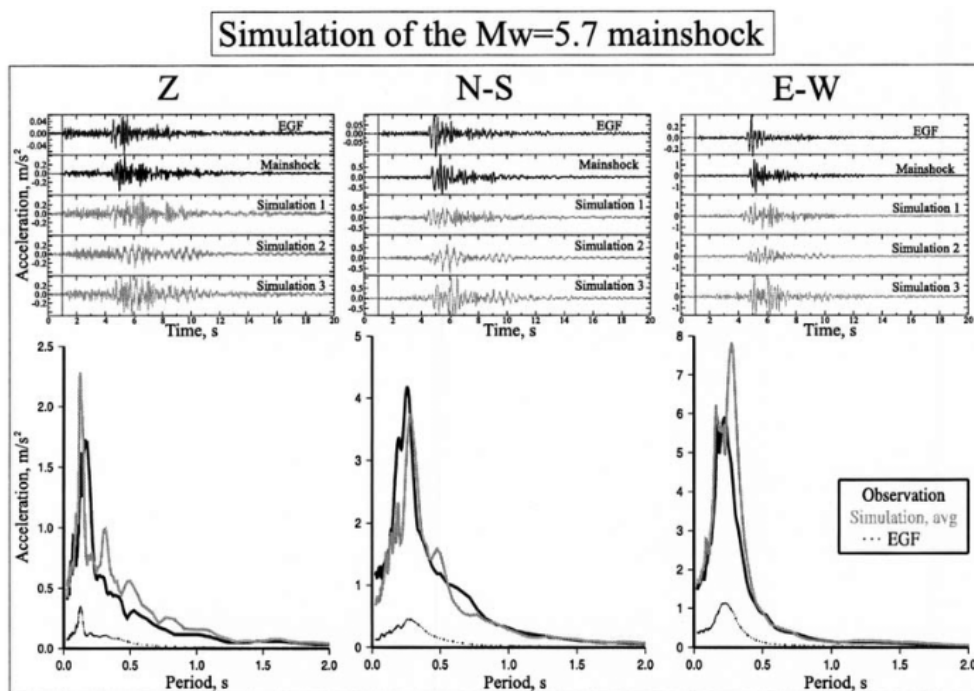
Στο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της συνεισφοράς των ινοπλισμένων πολυμερών στη στατική ενίσχυση των κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία επιβλήθηκαν φορτία σεισμικής δόνησης, αντίστοιχα με αυτά που αναπτύχθηκαν κατά τον σεισμό που έλαβε χώρα στο χωριό Colfiorito της Ιταλίας, την 26η Σεπτεμβρίου 1997.

Ο σεισμός, τάξης μεγέθους 5,9 της κλίμακας Richter, είχε ως επίκεντρο το χωριό Colfiorito στην περιοχή Umbria της κεντρικής Ιταλίας και προκάλεσε αρκετούς θανάτους και εκτεταμένες ζημιές με τις πλέον σημαντικές να αφορούν σε ιστορικά μνημεία ανεκτίμητης πολιτισμικής αξίας, όπως ο ναός του Αγίου Φραγκίσκου της Ασίζης. Ο σεισμός χαρακτηρίστηκε από διαφοροποίηση των εντάσεων σε επίπεδο μακροκλίμακας, ενώ η διαφοροποίηση παρατηρήθηκε και σε επίπεδο μικροκλίμακας μέσα σε οικιστικές μονάδες. Ειδικότερα, μετά από λεπτομερή καταγραφή των ζημιών στα επιμέρους τμήματα των χωριών διαπιστώθηκε ότι οι διαφορές των εντάσεων έφτασαν τους 2-3 βαθμούς της EMS-1992. Είναι χαρακτηριστικό ότι η ανωτέρω παρατήρηση επιβεβαιώθηκε και από τα υφιστάμενα ενόργανα δεδομένα σύμφωνα με τα οποία οι τιμές ενίσχυσης ήταν σημαντικότερες κατά θέσεις μέσα στον οικισμό του Cesi. Στις δύο περιοχές όπου εμφανίστηκαν οι διαφοροποιήσεις εμφανίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί με τελείως διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. (Lekkas, 2000). Γίνεται έτσι κατανοητή η σημασία των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραγόντων στη διαμόρφωση εντάσεων σε επίπεδο μακρο-και-μικροκλίμακας.

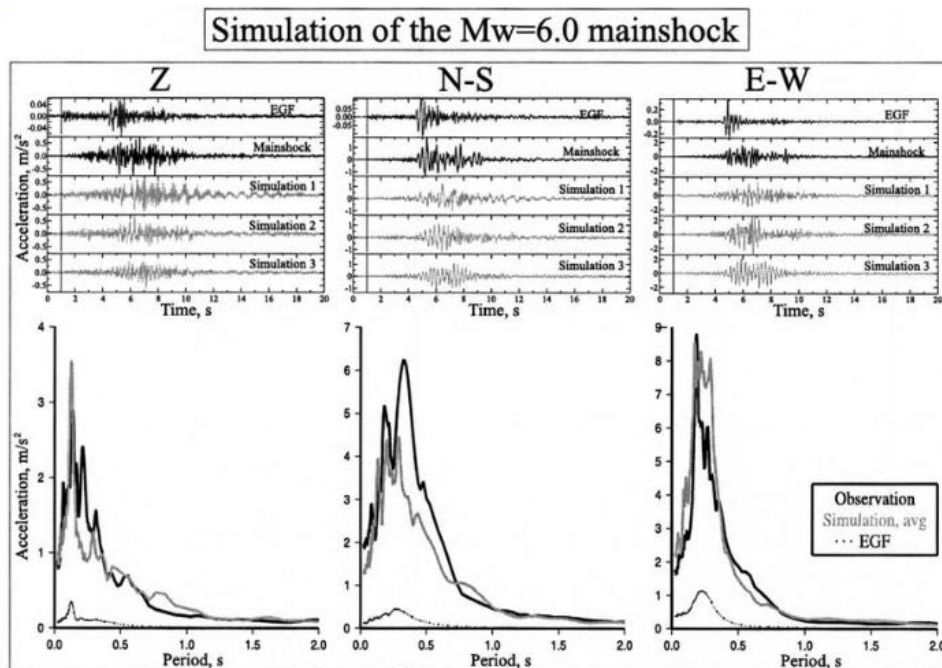


Εικόνα 66. Ευρύτερη περιοχή Colfiorito, η οποία επλήγη.

Γραφικά, η απεικόνιση της σεισμικής επιτάχυνσης των κυρίων δονήσεων σε σχέση με την περίοδο, είχαν την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 67. Επιτάχυνση – περίοδος κύριας σεισμικής δόνησης μεγέθους 5,7 της κλίμακας Ρίχτερ.



Εικόνα 68. Επιτάχυνση – περίοδος κύριας σεισμικής δόνησης μεγέθους 6,0 της κλίμακας Ρίχτερ.

Source Parameters of Colfiorito Mainshocks and the Foreshock Used as Empirical Green's Function

	Seismic Moment	Corner Frequency	Stress Drop
M_w 5.7 mainshock	$M_0 = 0.4 \times 10^{18} \text{ N m}$	$F_c = 0.5 \text{ Hz}$	$\Delta\Sigma \sim 19 \text{ bars}$
M_w 6.0 mainshock	$M_0 = 1.0 \times 10^{18} \text{ N m}$	$F_c = 0.3 \text{ Hz}$	$\Delta\Sigma \sim 15 \text{ bars}$
Foreshock	$m_0 = 5.6 \times 10^{15} \text{ N m}$	$f_c = 1.5 \text{ Hz}$	$\Delta\sigma \sim 8.2 \text{ bars}$

Πίνακας 8. Παράμετροι των κύριων δονήσεων του σεισμού Colfiorito.

Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μορφή καταπόνησης για την πειραματική διερεύνηση των FRP, καθώς επηρέασε σημαντικά ιστορικά μνημεία, κυρίως από πέτρα και φέρουσα τοιχοποιία, τα οποία έχουν άμεση σχέση μορφολογικά και μηχανικά με την παρούσα έκθεση, οπότε εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και θα αποδώσουν μια ρεαλιστική εικόνα. Ως εκ τούτου, αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόληψη με την εκ των προτέρων ενίσχυση μνημείων και αρχιτεκτονικών οροσήμων, αλλά και την εκ των υστέρων αποκατάσταση των ήδη καταπονημένων από το χρόνο, τους φυσικούς αλλά και τους ανθρωπογενείς παράγοντες.

5.6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κατά τη στατική ανάλυση, στόχος είναι να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου, υποβαλλόμενο στα στατικά μόνιμα φορτία του. Αρχικά ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις στηρίξεις και τις δυνάμεις που εφαρμόζονται στο σώμα καθώς και τις αρχικές συνθήκες όταν αυτό είναι απαραίτητο.

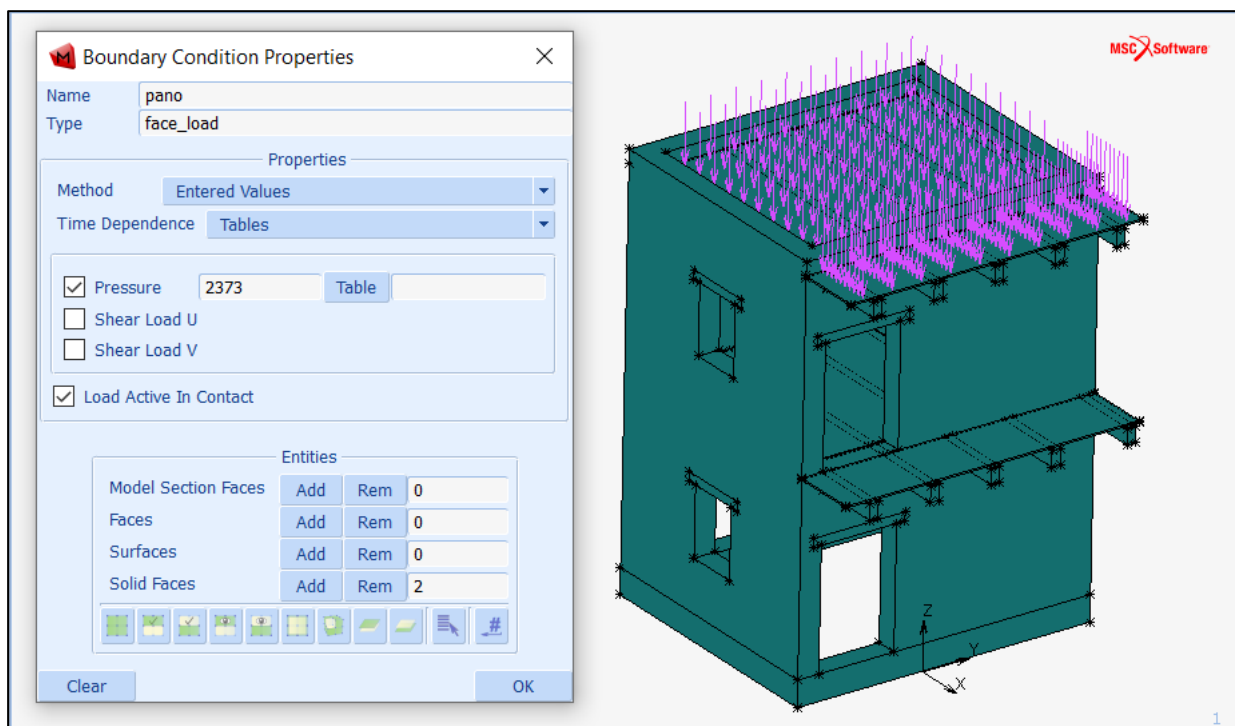
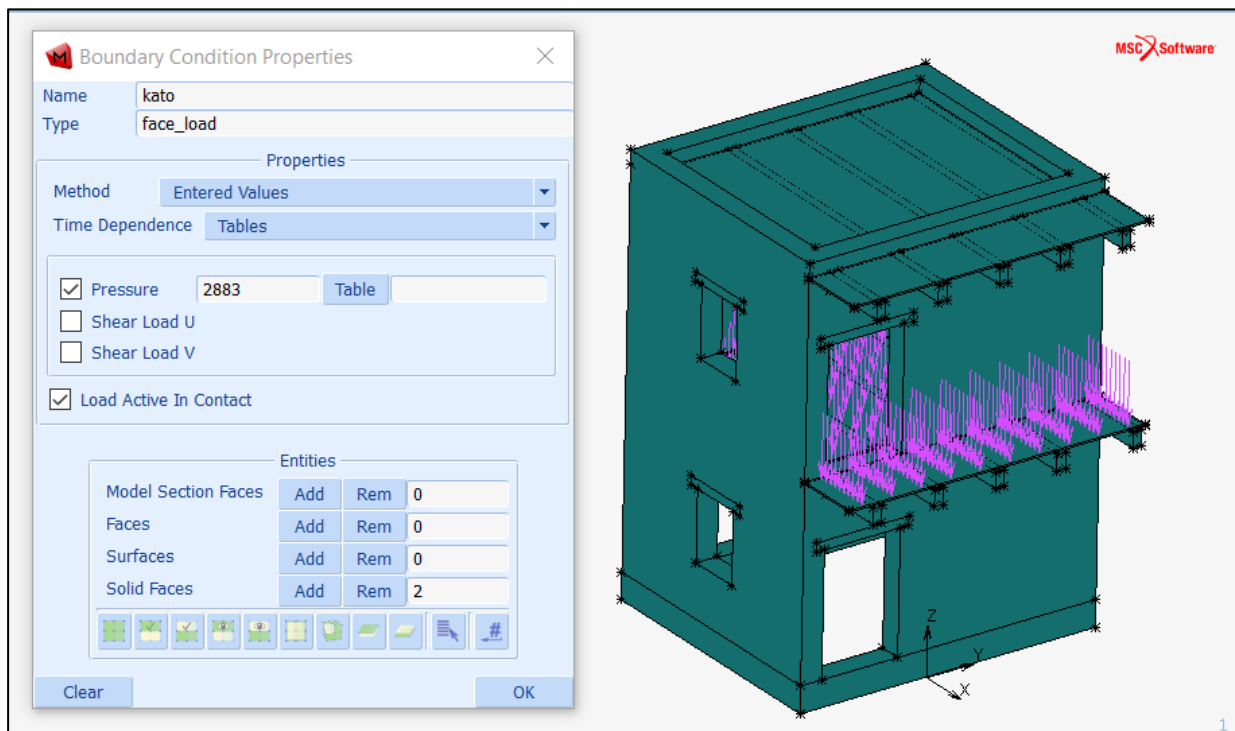
Συνοριακές συνθήκες:

- Η πάκτωση της κατασκευής στη βάση. Ορίζεται ότι το μοντέλο πακτώνεται στους 84 κόμβους της βάσης, με παρόμοιο τρόπο με το μοντέλο σύγκρισης, που πακτώνεται σε δοκάρι από σκυρόδεμα. Η εισαγωγή της πάκτωσης σε ένα κόμβο ισοδυναμεί με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας.
- Το φορτίο της βαρύτητας. Το πρόγραμμα καθορίζει αυτόματα τα ίδια βάρη των στοιχείων προσομοίωσης, μέσω του ειδικού βάρους των υλικών που προκύπτει από τις ιδιότητές τους, πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

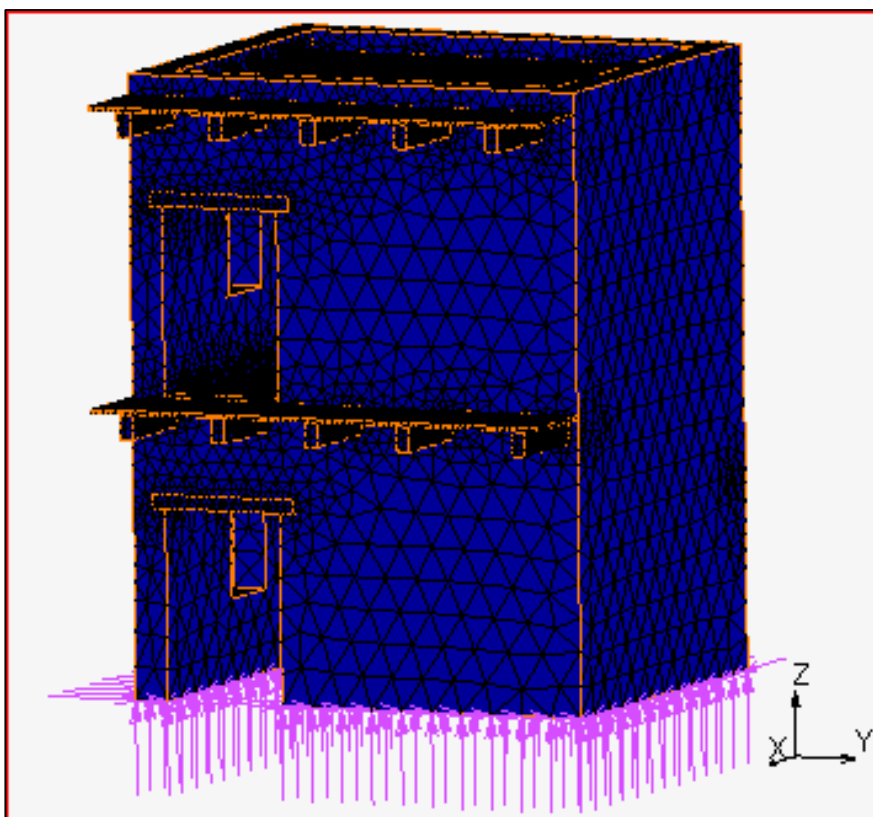
Δεδμένο	Μ.Μ.	Ποσότητα
Συνολικό βάρος τοιχοποιίας	kN	169.71
Βάρος Δοκού Ο.Σ.	kN	28.25
Βάρος ξυλ.πατωμάτων	kN	4.08
Κατ/νη μάζα πατώματος	tn	2.5

Πίνακας. 9 Ίδια βάρη υλικών

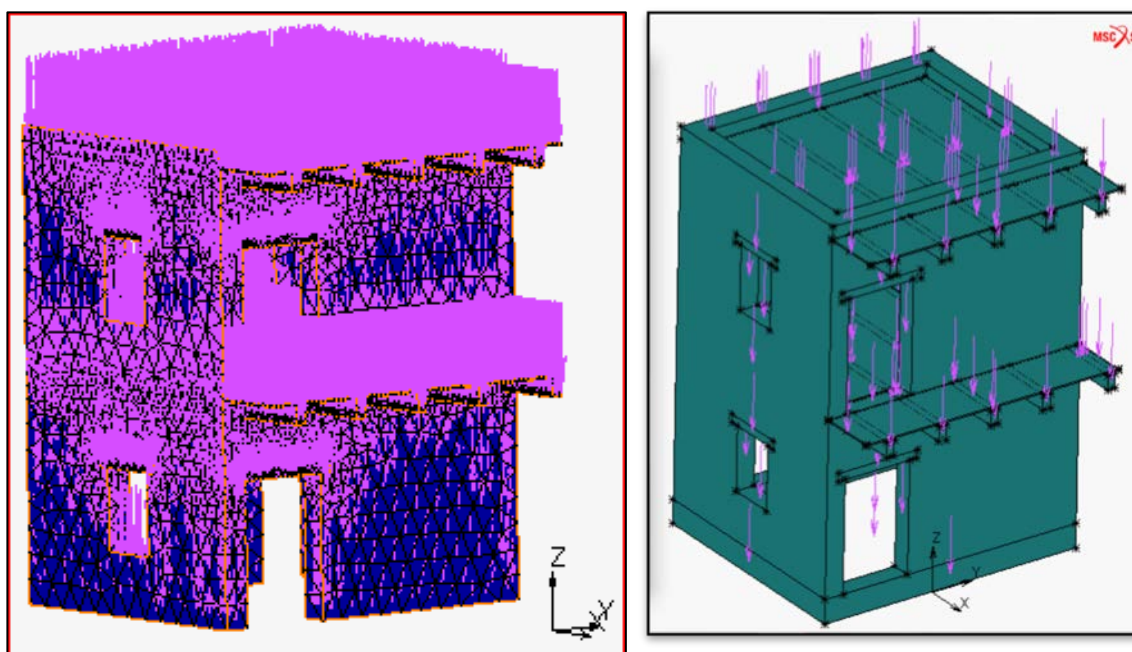
- Για τις ανάγκες της προσομοίωσης και για να ταυτίζεται το μοντέλο μας με το μοντέλο αναφοράς κατανεμήθηκε ομοιόμορφα στους ορόφους μάζας 2,5 tn. Έπειτα μετατρέπουμε την μάζα σε κατακόρυφο φορτίο πίεσης (N/mm^2) σύμφωνα με την επιφάνεια του ξύλινου πατώματος που υφίσταται στον κάθε όροφο.



Εικόνα 69. Επιφανειακή φόρτιση στις στάθμες των ορόφων (Face Load)



Εικόνα 70. Πάκτωση (Fixed Displacement)



Εικόνα 71. Φορτίο Βαρύτητας (Gravity Load)

5.7. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι ιδιομορφές και οι ιδιοτιμές ενός διακριτοποιημένου συστήματος αποτελούν την ταυτότητά του. Μέσω της ιδιομορφικής ανάλυσης επιτυγχάνεται η ανάλυση της κατασκευής για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών της, των κύριων ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών που τη διεγείρουν και τα οποία καθορίζονται από τη δομή του συστήματος, από τη γεωμετρία, τη μάζα και την ακαμψία του συστήματος. Η ιδιομορφική ανάλυση επιτρέπει την απλοποιημένη δυναμική ανάλυση της κατασκευής, ενώ με χρήση αριθμητικής ολοκλήρωσης στον χρόνο μπορεί να γίνει ακριβής ολοκλήρωση των εξισώσεων της κίνησης και επίλυση του δυναμικού μοντέλου για οποιαδήποτε εξωτερική δυναμική φόρτιση. Η μεγάλη πρακτική αξία της ιδιομορφικής ανάλυσης έγκειται στη δυνατότητα έκφρασης της απόκρισης ενός τυχαίου πολυβάθμιου συστήματος ως γραμμική επαλληλία των ιδιομορφών του. Οι ιδιοταλαντώσεις που υπολογίζονται από την ανάλυση ιδιομορφών, χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του κόστους άλλων βασικών αναλύσεων, με κατάλληλο περιορισμό του αριθμού των βαθμών ελευθερίας του συστήματος.

Κατά την προσομοίωση του υπό εξέταση κτιρίου στο πρόγραμμα Marc δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στα δεδομένα εισαγωγής, καθώς ζητούμενο ήταν οι ιδιομορφές του συστήματος να ταυτίζονται με τις ιδιομορφές που παρήχθησαν από τους (Michele Betti, 2014), ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

Ο προσδιορισμός των ιδιομορφών του φορέα μέσω μιας ιδιομορφικής ανάλυσης σχετίζεται αποκλειστικά με τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης ενός κτιρίου, δηλαδή τη μάζα και τη δυσκαμψία του και είναι εντελώς ανεξάρτητος από τις δράσεις και τις μορφές φόρτισης που εφαρμόζονται. Είναι συνεπώς δυνατή η εκτέλεση προκαταρκτικών ιδιομορφικών αναλύσεων, προκειμένου να προσδιοριστούν κάποια χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του φορέα, πριν την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Θα πρέπει βεβαίως να έχει ολοκληρωθεί η γεωμετρία και ο ορισμός και η ανάθεση των διατομών των γραμμικών στοιχείων (δυσκαμψία φορέα), όπως και η κατάλληλη προσθήκη της μάζας του φορέα.

Η δυναμική απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σε εξωτερικές δυνάμεις μπορεί να υπολογιστεί με μια ιδιομορφική ανάλυση, που συνοψίζεται ως μια σειρά των ακόλουθων βημάτων (Chopra, 2010):

1. Καθορισμός των ιδιοτήτων της κατασκευής
 - Προσδιορισμός του μητρώου μάζας και του μητρώου δυσκαμψίας
 - Εκτίμηση του ιδιομορφικού λόγου απόσβεσης
2. Προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών
3. Υπολογισμός της απόκρισης σε κάθε ιδιόμορφη
4. Συνδυασμός της συνεισφοράς όλων των ιδιομορφών και τον προσδιορισμό της ολικής απόκρισης.

Ιδιομορφή είναι ο τρόπος με τον οποίο ταλαντώνεται ο φορέας με μία συγκεκριμένη συχνότητα . Η τελική παραμόρφωση του φορέα είναι ο συνδυασμός των ιδιομορφών που διεγείρονται ανάλογα με τον σεισμό.

Η ανάλυση των μεταβλητών είναι η μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων των συστημάτων στον τομέα συχνοτήτων. Ένα τυπικό παράδειγμα θα ήταν οι δομές δοκιμών υπό δονητική διέγερση. Η ανάλυση των ιδιομορφών είναι το πεδίο μέτρησης ή υπολογισμού και ανάλυσης της δυναμικής απόκρισης δομών και / ή υγρών ή άλλων συστημάτων κατά τη διάρκεια της διέγερσης.

Στο πρόγραμμα αντίστοιχα ορίζεται το εύρος των συχνοτήτων, θεσπίζοντας την ελάχιστη και μέγιστη συχνότητα και τις μέγιστες επαναλήψεις.

Loadcase Properties

Name: lcase2

Type: Structural
dyn_modal

Lanczos
Frequency Method: ☐ Number ☒ Range
Lowest Frequency: 2
Highest Frequency: 20
Modes: 10

Power Sweep
Max # Iterations: 40
Tolerance: 0.0001
Initial Shift: 0
Highest Frequency: 0
☐ Auto Shift
Modes Per Shift: 5
Shift Parameter: 1

Modal Participation Factors
Center Of Rotation
0 0 0

☐ Non-Positive Definite

Recover
☒ Reaction Forces ☒ Stresses

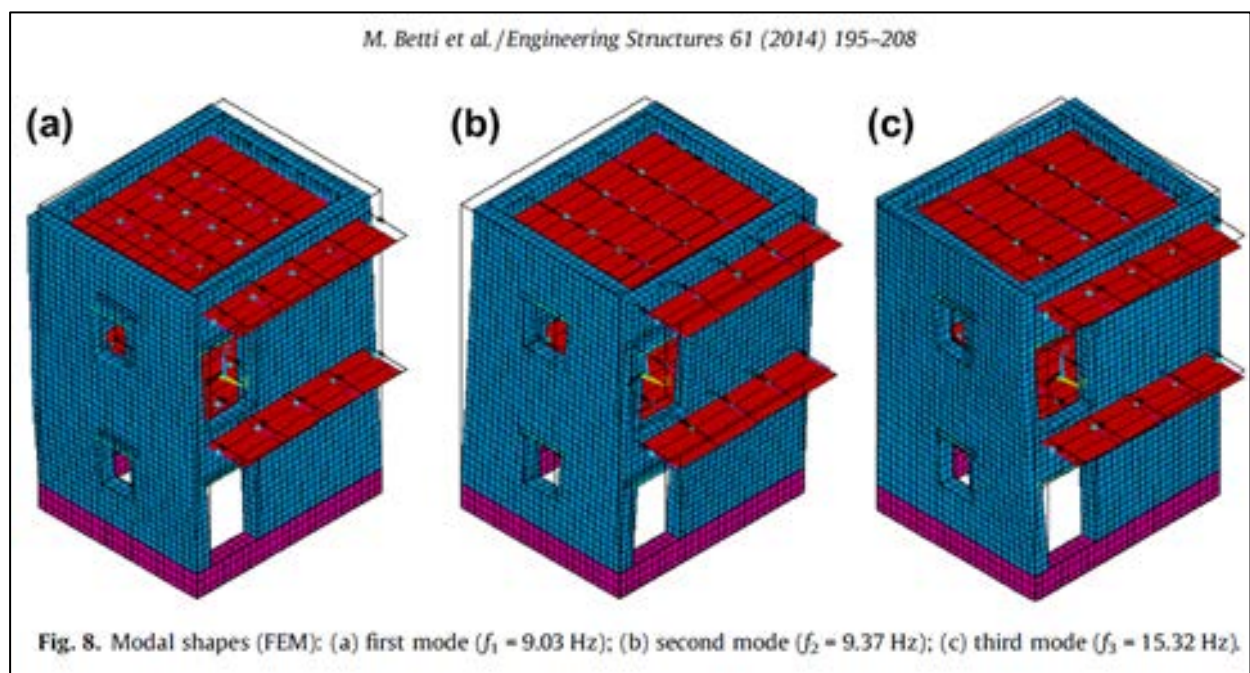
Loadcase Results

☐ Deactivation / NC Machining
☐ Input File Text ☐ Include File

Title

Reset OK

Εικόνα 72. Περιπτώσεις Φόρτισης (Loadcase Properties)



Εικόνα 73. Ιδιομορφές ταλάντωσης στις διευθύνσεις x-y-z (Michele Betti, 2014)

5.8. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΒΑΣΗΣ (TRANSIENT DYNAMIC ANALYSIS)

Η δυναμική ανάλυση με χρονοϊστορία βάσης (μερικές φορές αποκαλείται ανάλυση χρόνου) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δυναμικής απόκρισης μιας δομής κάτω από τη δράση οποιωνδήποτε γενικών χρονοεξαρτώμενων φορτίων. Η χρονική κλίμακα της φόρτισης είναι τέτοια ώστε τα αποτελέσματα αδράνειας ή απόσβεσης να θεωρούνται σημαντικά.

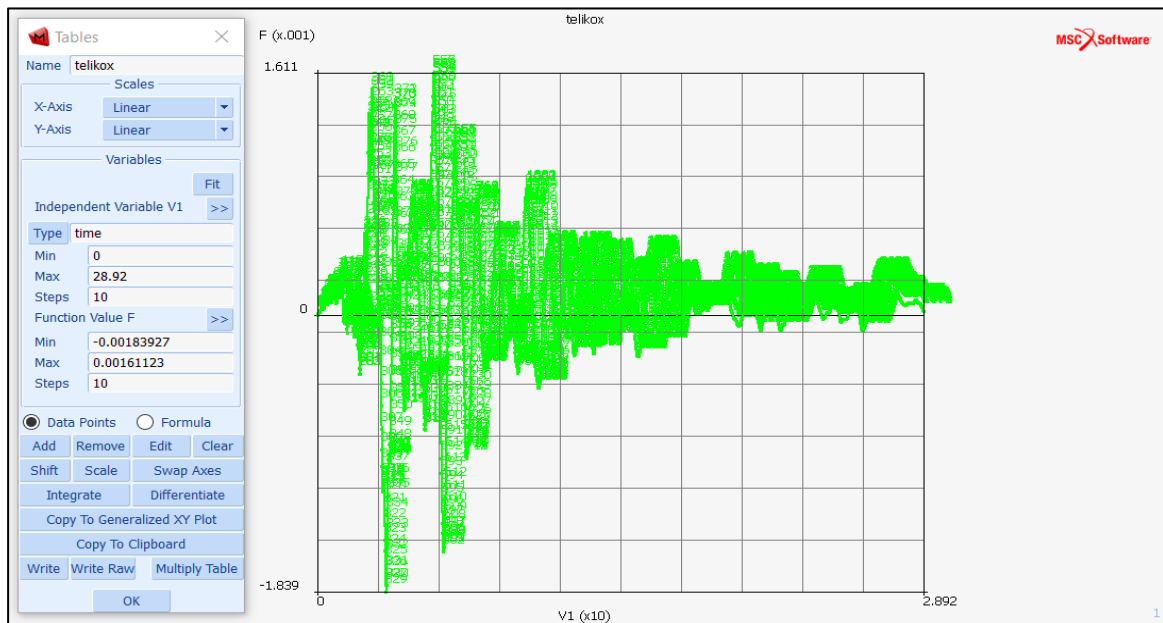
Πρώτο βήμα ήταν η ανεύρεση της χρονοϊστορίας του σεισμού Colfiorito. Μετά από έρευνα που έγινε στο διαδίκτυο, σε πλατφόρμες με δεδομένα σεισμών (PEER BERKLEY,ISESD,IRIS,NGA WEST2 BERKLEY), δεν βρέθηκαν δεδομένα για τη συγκεκριμένη δόνηση . Μετά από επικοινωνία με μέλη της ερευνητικής ομάδας από την Ιταλία αντλήθηκαν οι μετρήσεις των επιταχυνσιογράφων οι οποίες ήταν όπως την εικόνα. Στις στήλες 1 και 2 καταγράφεται ο χρόνος και στις στήλες 3,4,5 οι μετρήσεις του επιταχυνσιογράφου για τους άξονες Χ,Y,Z αντίστοιχα. Οι στήλες ενδιαφέροντος είναι οι στήλες 2 και 7, οι οποίες εξάγονται σε μορφή κειμένου (.txt) για να εισαχθούν στο πρόγραμμα μέσω τις εντολής Read.

COMPONENTI "UNIBAS"				
1	2	3	4	5
SCALA 1:1 SCALA 2:3				
time	time	NS	EW	UP
(sec)	(sec)	(g)	(g)	(g)
0	0	0	0	0
0.01	0.008165	0.001559	-0.00545	0.01148
0.02	0.0163299	0.004493	-0.02298	-0.01367
0.03	0.0244949	0.004315	-0.02572	-0.03552
0.04	0.0326599	0.002344	-0.00885	-0.01141
0.05	0.0408248	0.006229	-0.0042	0.019039
0.06	0.0489898	0.004909	-0.01497	0.013054
0.07	0.0571548	-0.00689	-0.01258	0.003251
0.08	0.0653197	-0.00693	0.004706	0.009171
0.09	0.0734847	0.007901	0.010614	0.001191
0.1	0.0816497	0.010152	-0.0012	-0.00909
0.11	0.0898146	-0.00297	-0.00663	0.010725
0.12	0.0979796	-0.00405	0.004708	0.028193
0.13	0.1061446	0.008288	0.005943	0.011656
0.14	0.1143095	0.011798	-0.01241	-0.00176
0.15	0.1224745	0.006486	-0.01227	0.008124
0.16	0.1306395	0.005877	0.014301	0.005498
0.17	0.1388044	0.007278	0.01976	-0.0196
0.18	0.1469694	0.005249	-0.00053	-0.03514
0.19	0.1551344	0.004979	-0.00199	-0.02128
0.2	0.1632993	0.005428	0.009278	0.013489
0.21	0.1714643	-0.00149	0.000912	0.03355
0.22	0.1796292	-0.01084	-0.00807	0.009201
0.23	0.1877942	-0.00992	-0.00128	-0.02302
0.24	0.1959592	-0.00156	-0.00112	-0.01017
0.25	0.2041241	0.000272	-0.00252	0.019784

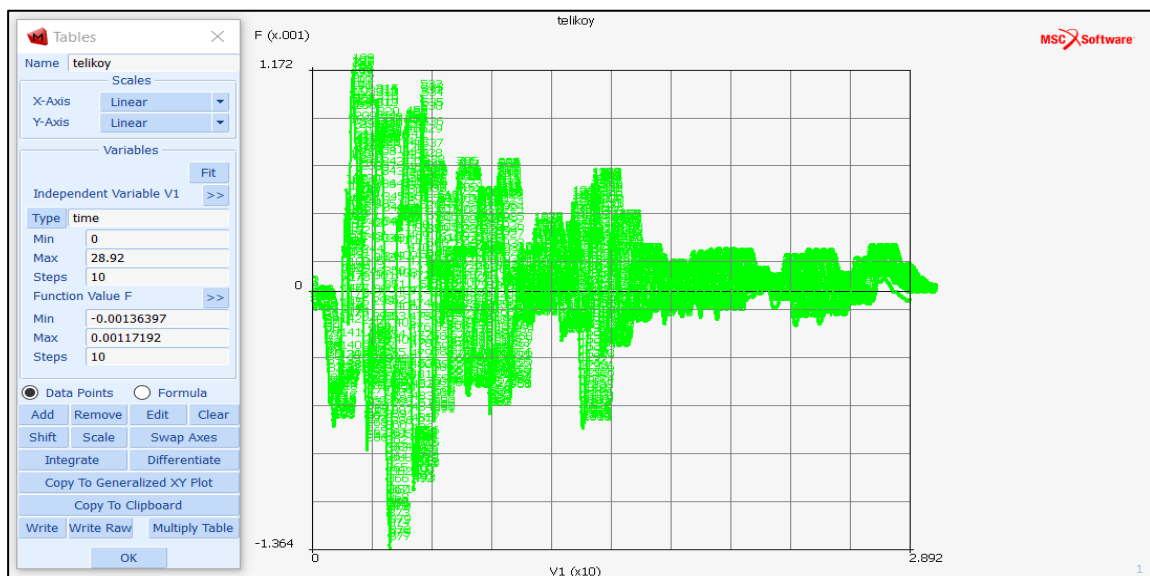
0.00	0.00000	0.00	0.00000000
0.01	0.01529	0.01	-0.05347000
0.02	0.02879	0.02	-0.17194000
0.03	-0.00175	0.03	-0.02694000
0.04	-0.01934	0.04	0.16557000
0.05	0.03812	0.05	0.04560000
0.06	-0.01295	0.06	-0.10567000
0.07	-0.11378	0.07	0.02346000
0.08	-0.00238	0.08	0.16956000
0.09	0.14551	0.09	0.05795000
0.10	0.02208	0.10	-0.11585000
0.11	-0.12868	0.11	-0.05329000
0.12	-0.01061	0.12	0.11121000
0.13	0.12101	0.13	0.01211000
0.14	0.03443	0.14	-0.18007000
0.15	-0.05211	0.15	0.00142000
0.16	-0.00598	0.16	0.26064000
0.17	0.01375	0.17	0.05356000
0.18	-0.01991	0.18	-0.19907000
0.19	-0.00265	0.19	-0.01432000
0.20	0.00441	0.20	0.11056000
0.21	-0.06789	0.21	-0.08207000
0.22	-0.09169	0.22	-0.08809000
0.23	0.00904	0.23	0.06662000
0.24	0.08198	0.24	0.00155000
0.25	0.01798	0.25	-0.01376000
0.26	-0.05502	0.26	0.13258000
0.27	-0.01430	0.27	-0.00284000

Εικόνα 74. Ολική (total) απόκριση της αρμονικής ταλάντωσης με απόσβεση

Με χρήση των μετρήσεων που εισήχθησαν με την προηγούμενη διαδικασία, δημιουργείται ο πίνακας (table) του σεισμού . Έπειτα πραγματοποιείται διπλή ολοκλήρωση για να μετατραπεί η επιτάχυνση κατά x σε μετατόπιση κατά x . Στην τελική μορφή του πίνακα, στον άξονα x , περιγράφεται ο χρόνος σε second και στον άξονα y περιγράφεται η μετατόπιση κατά X σε (m). Αντίστοιχα δημιουργήθηκε και ο αντίστοιχος πίνακας (table) που περιγράφεται η μετατόπιση κατά y .

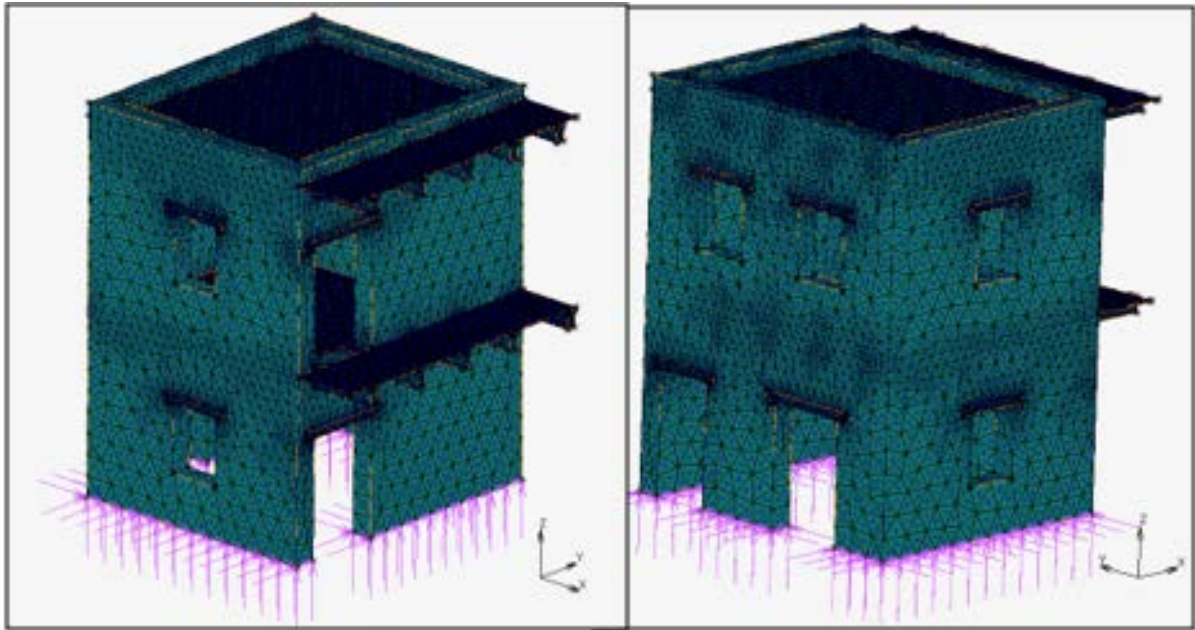


Εικόνα 75. Απεικόνιση μετατόπισης κατά άξονα X συνάρτησε του χρόνου για το σεισμό Colfiorito. . (χρονοϊστορία μετατόπισης κατά x)



Εικόνα 76. Απεικόνιση μετατόπισης κατά άξονα Y συνάρτησε του χρόνου για το σεισμό Colfiorito.(χρονοϊστορία μετατόπισης κατά y)

Έπειτα εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες του σεισμού (Boundary Condition) χρησιμοποιώντας τους πίνακες μετατόπισης που δημιουργήθηκαν προηγουμένως. Σαν συνοριακές συνθήκες περιγράφουν την δράση του σεισμού στους κόμβους της βάσης του φορέα στους αντίστοιχους άξονες σύμφωνα με τον ισχύοντες κανονισμούς σεισμικών φορτίσεων (ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑΣ 6) (κατά x 100% και κατά y 100%).

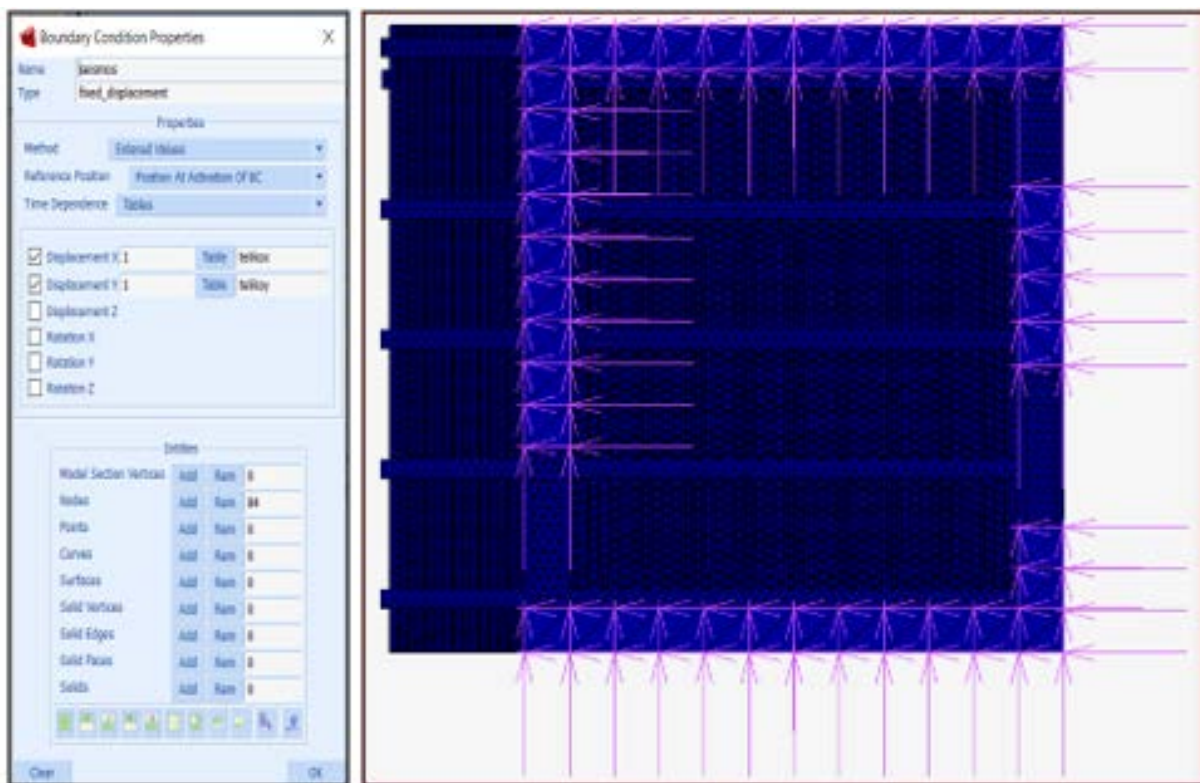


Εικόνα 77. Μοντέλο προσομοίωσης με τις σεισμικές φορτίσεις στους κόμβους της βάσης

Έπειτα δημιουργείται η συνθήκη φόρτισης (Loadcase) που θα χρησιμοποιηθεί στην δυναμική ανάλυση, η οποία περιλαμβάνει τις συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions):

- Την αρχική συνθήκη της πάκτωσης (Fixed Displacement)
- Το φορτίο της βαρύτητας (Gravity Load)
- Επιφανειακή φόρτιση στους ορόφους(Face Load)
- Την επίδραση του σεισμού στους κόμβους της βάσης

Ορίζεται το χρονικό εύρος της ανάλυσης και τα βήματα αυτής. Μετά από αρκετές δοκιμές βρέθηκε το κατάλληλο βήμα με το οποίο μπορούν να επιτευχθούν όλα τα μέγιστα (peaks) του σεισμού χωρίς να δημιουργούνται μεγάλες μεταπτώσεις στο χρονικό βήμα, στα σημεία εκατέρωθεν αυτών .



Εικόνα 78 Στιγμιότυπο MSC Marc Εικόνα 79. Σημεία της βάσης του φορέα που φορτίζονται με τον σεισμό

Στην αρχή της διεγέρσης εντοπίστηκε μια δυσκολία. Θέτοντας μια μεγάλη μετατόπιση στους κόμβους της βάσης στον φορέα που ήταν σε αδράνεια, δημιουργήθηκε μεγάλη φόρτιση στα στοιχεία της βάσης (μεγάλη μετατόπιση). Αυτό οδήγησε στην ουσιαστική ανάγκη πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο βήμα, ώστε η παραμόρφωση να μεταφερθεί από τους κόμβους της βάσης στον υπόλοιπο φορέα ομαλά.

Στα πλαίσια της αναζήτησης του κατάλληλου χρονικού βήματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με δεδομένο εισαγωγής τη χρονοϊστορία ενός άλλου χαρακτηριστικού σεισμού, του Irpinia(1980), του οποίου τα φάσματα επιτάχυνσης και μετατόπισης χαρακτηρίζονται από μικρότερα τοπικά μέγιστα. Η επίλυση ολοκληρώθηκε επιτυχώς χωρίς να χρειαστεί να γίνουν αλλαγές στον αυτοματοποιημένο χρονικό βηματισμό του προγράμματος.

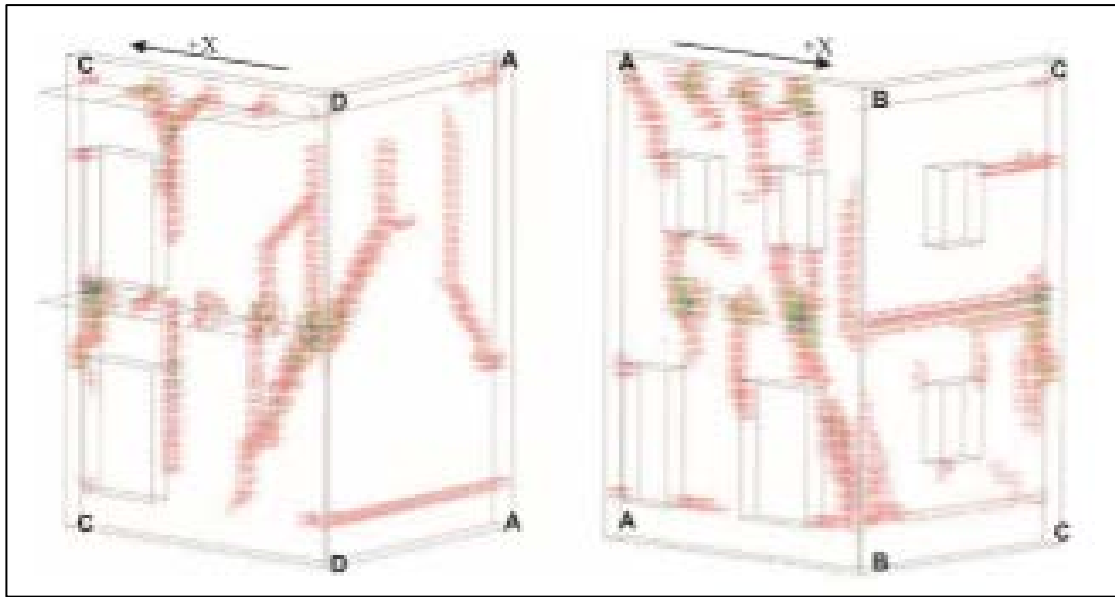
Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι στις δυναμικές φορτίσεις και πιο συγκεκριμένα για τον υπό εξέταση σεισμό (Colfiorito) είναι προτιμότερο να ορίζονται περισσότερα και μικρότερα βήματα υπολογισμού, καθώς και από άποψη χρόνου και από άποψη υπολογιστικής επεξεργασίας είναι πιθανότερη η σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Μεγαλύτερα χρονικά βήματα μπορούν να καταστήσουν αδύνατη την επίλυση ή να αυξήσουν το χρονικό και το υπολογιστικό κόστος,

καθώς η αυτοματοποιημένη διαδικασία αναγκάζεται να πραγματοποιήσει περισσότερους χρονικούς διαχωρισμούς (separations), ώστε να καταλήξει σε συγκλίνοντα αποτελέσματα.

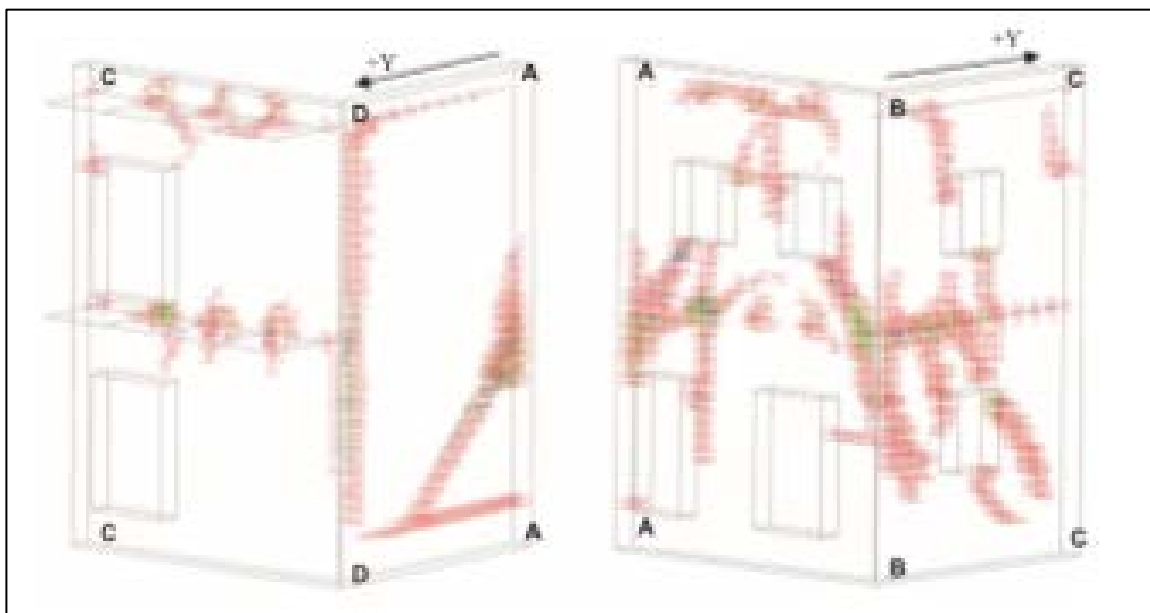
Μετά από τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης με χρονοϊστορία βάσης ενισχύονται οι ευπαθείς περιοχές με την χρήση υφασμάτων FRP. Προτιμήθηκαν ανθρακονήματα (CFRP) καθώς έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών ανά τον κόσμο και ειδικότερα στην Ιταλία όπου η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όλο και συχνότερα, κερδίζοντας έδαφος έναντι των υπόλοιπων μεθόδων ενίσχυσης. Χαρακτηριστική ιδιότητα των ανθρακονημάτων είναι το μικρό τους βάρος, το οποίο τα καθιστά από τα πλέον καταλληλότερα υλικά ενίσχυσης, σε συνδυασμό και με το μειωμένο τους κόστος, σε σχέση με προηγούμενες δεκαετίες, λόγω της αυξημένης ζήτησης για το υλικό.

Επιλέχθηκαν υφάσματα CFRP. Το πάχος τους ήταν μικρότερο του 1mm, ενώ το πάχος της ρητίνης εξαρτάται από την ποσότητα, τον τρόπο εφαρμογής, την πυκνότητα και το ιξώδες της (0,5-2mm). Οι ιδιότητες των FRP που εισήχθησαν στο πρόγραμμα αντλήθηκαν από διεθνή βιβλιογραφία που αφορά σε πειραματικά δεδομένα.

Η τοποθέτηση των CFRP γίνεται σε χιαστί μορφή, εκατέρωθεν των ανοιγμάτων του Ισογείου και του Α' Ορόφου, καθώς και περιμετρικά του κτιρίου, σε μορφή λωρίδας πλάτους 10cm, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τρόπος τοποθέτησης της ενίσχυσης, καθώς σε προγενέστερες αναλύσεις που διεξήχθησαν από τους (Michele Betti, 2014), προέκυψαν ευπαθείς περιοχές, που συγκεντρώνονται περίξ των ανοιγμάτων, πράγμα που φαίνεται στις παρακάτω εικόνες προσομοιώσεων τόσο των προαναφερθέντων ερευνητών, όσο και των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.



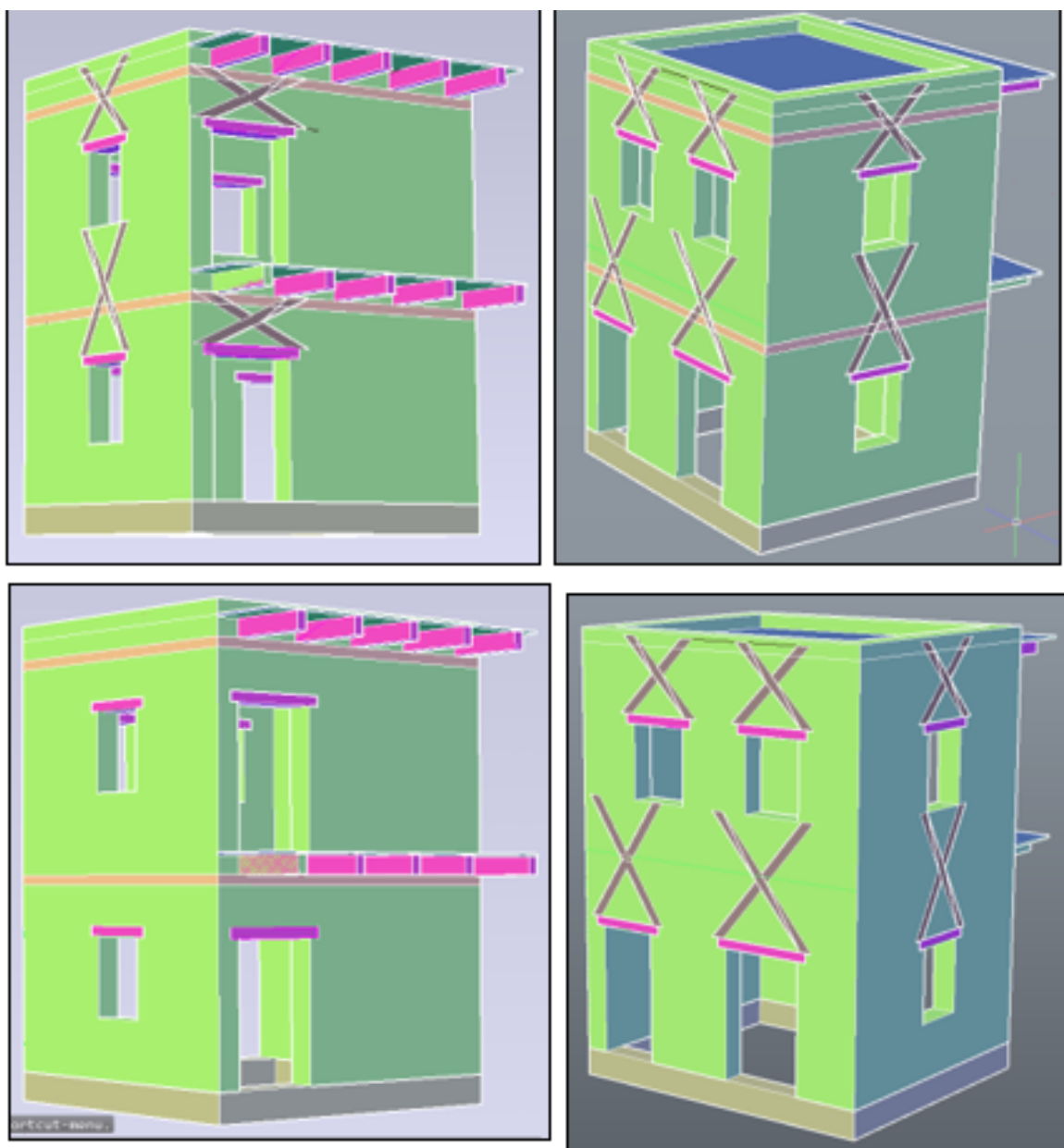
Εικόνα 80. Κατανομή των ζημιών της επίδρασης του σεισμού (ρωγμές και αστοχίες) κατά τον άξονα x .



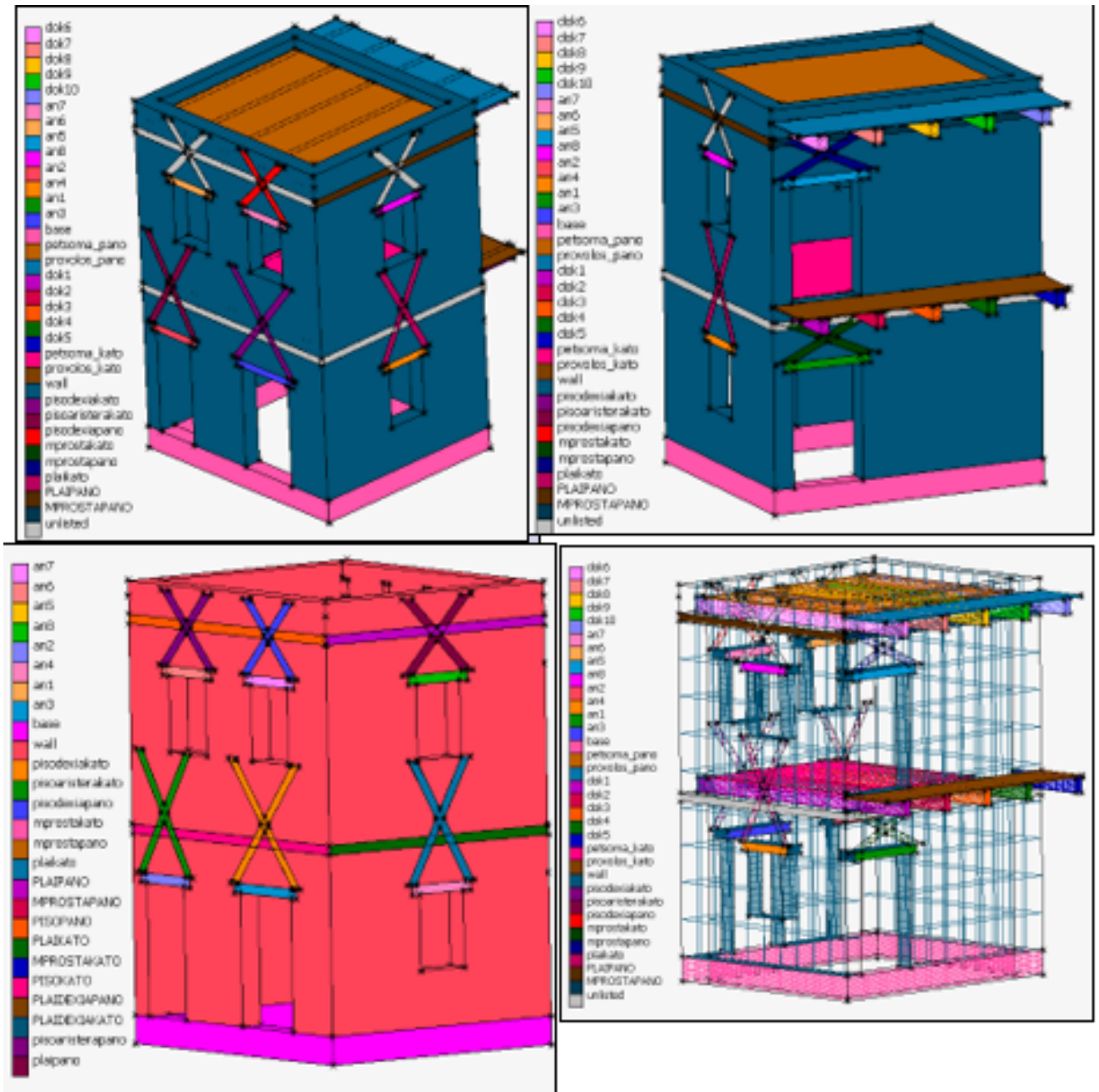
Εικόνα 81. Κατανομή των ζημιών της επίδρασης του σεισμού (ρωγμές και αστοχίες) κατά τον άξονα y .

Μοντελοποίηση

Αρχικά σχεδιάστηκε το αποτύπωμα των χιαστή λωρίδων FRP που εφαρμόστηκαν στις ευπαθείς περιοχές του φορέα. Αυτό μετατράπηκε σε τρισδιάστατο 3D solid στοιχείο, αναθέτοντάς του πάχος 1mm και πλάτος 10 cm, όπως φαίνεται και στις εικόνες. Επιπλέον τοποθετήθηκε λωρίδα υφάσματος FRP στην οριζόντια διεύθυνση πάνω από τα ανώφλια των ανοιγμάτων (παράθυρα και πόρτες) κοντά στα σημεία σύνδεσης των ορόφων και του στηθαίου με τον Α' όροφο. Η λωρίδα είναι πλάτους 10 εκατοστών.



Εικόνα 82. Μοντέλο με τα FRP στο AutoCAD



Εικόνα 83. Μοντέλο προσομοίωσης στο περιβάλλον του MSC Marc .

Διακριτοποίηση

Αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα επιμέρους στοιχεία του φορέα διακριτοποιήθηκαν σύμφωνα με τις διαστάσεις τους. Το μικρό πάχος των υφασμάτων CFRP οδήγησε στη χρήση πυκνότερου πλέγματος στη διάσταση του πάχους. Δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα Contact Bodies, τα οποία εισήχθησαν στο Πίνακα στοιχείων (Contact Table) ως πλήρως συνδεδεμένα (Glued).

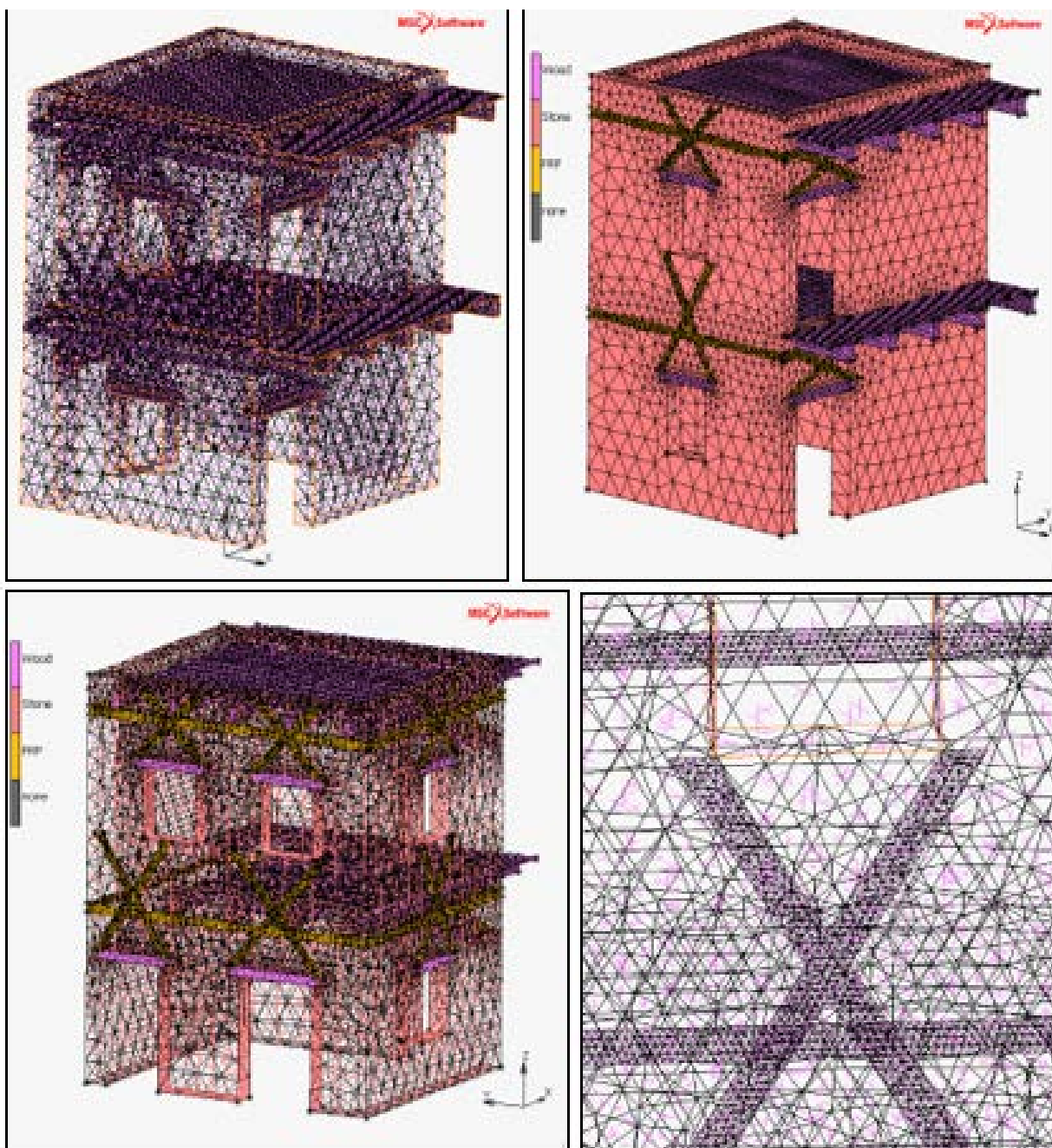
Αντίστοιχα με τον

Πίνακα. 10 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των CFRP παρακάτω:

Υλικό	CFRP
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	140
Λόγος Poisson ν	0,3
Φαινομενική πυκνότητα ρ (kg/m ³)	1580
Yield Stress (MPa)	3.7

Πίνακας. 10 Ιδιότητες FRP.

Έπειτα, τα διακριτοποιημένα τμήματα του κτιρίου που εισήχθησαν ώστε να δημιουργηθεί το μοντέλο, αναγνωρίστηκαν ως σώματα σε επαφή (contact bodies) και η μεταξύ τους σύνδεση ορίστηκε σε «Glue», δηλαδή πλήρης σύνδεση σωμάτων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες επιλύσεις (Στατική-Δυναμική-Ιδιομορφική και Χρονοϊστορία Βάσης) στο ενισχυμένο, πλέον, με τα ινοπλισμένα πολυμερή από άνθρακα, προσομοίωμα.



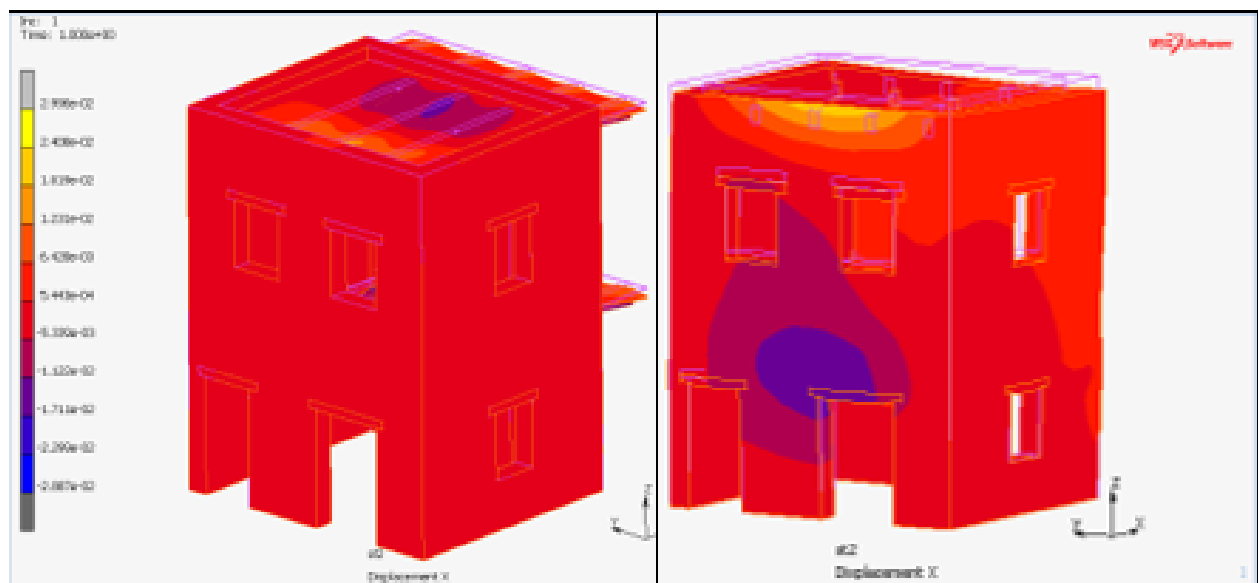
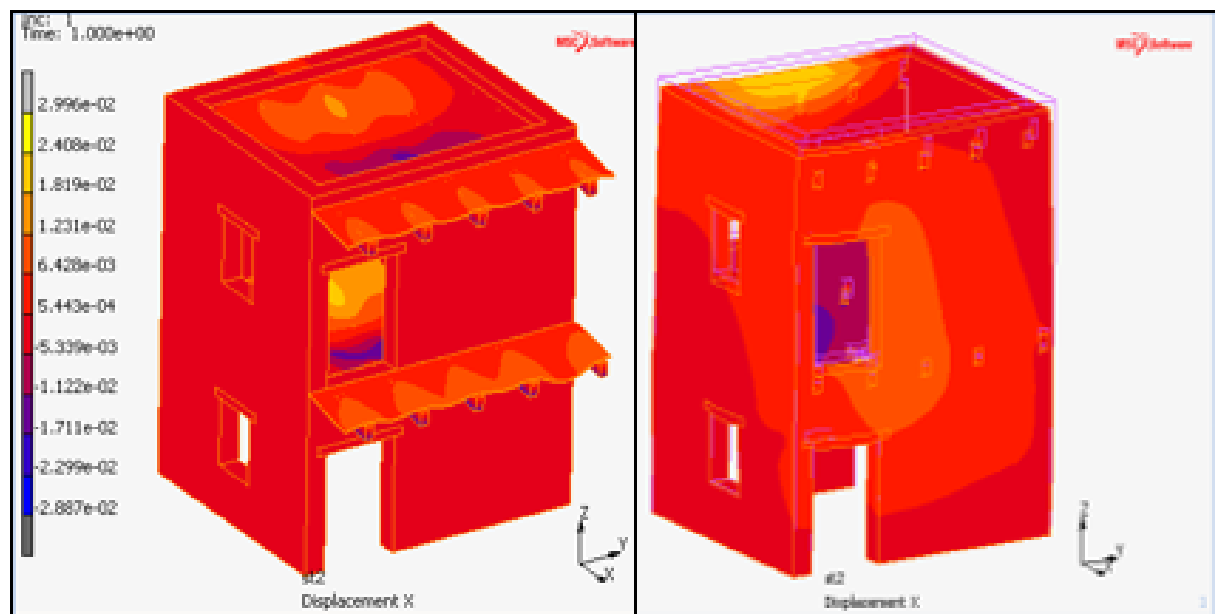
Εικόνα 84. Διακριτοποίηση των FRP στο μοντέλο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

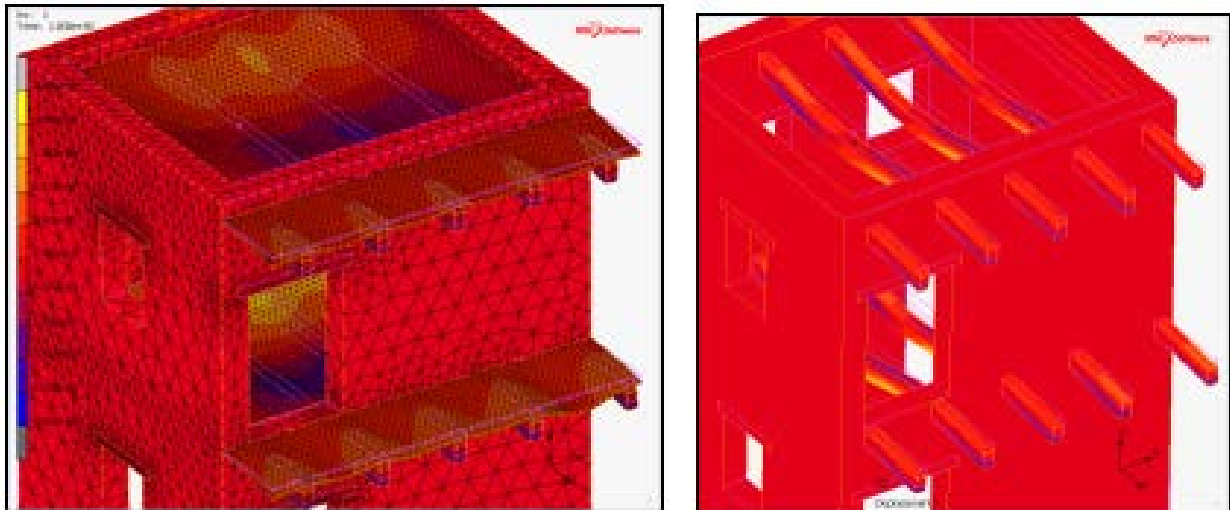
Τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης σχολιάζονται και αξιοποιούνται για την κατανόηση της συμπεριφοράς των χρησιμοποιούμενων υλικών, της γεωμετρίας τους, αλλά και γενικότερα της τεχνικής αποκατάστασης που πραγματοποιείται αυτή η διπλωματική εργασία, ώστε ν' αποκομισθούν συμπεράσματα για την ακαταλληλότητά τους στον τομέα της κατασκευής και της αποκατάστασης, αλλά και να εντοπισθούν χαρακτηριστικά τους τα οποία επιδέχονται βελτίωση.

6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται τ' αποτελέσματα μετατόπισης κατά τον άξονα x . Παρουσιάζεται έντονη παραμόρφωση στα ξύλινα δάπεδα. Πιο συγκεκριμένα, στα εσωτερικά δάπεδα παρουσιάζεται έντονη βύθιση με εμφανές βέλος κάμψης στο κέντρο. Αυτό είναι πιο σαφές, αν παρατηρήσει κανείς την παραμόρφωση που λαμβάνουν τα δοκάρια της Εικόνας 87, καθώς και τα ξύλινα πατώματα εξωτερικά του κτιρίου, όπου το βέλος κάμψης είναι έντονο ανάμεσα στις στηρίξεις, γεγονός που προσδίδει σ' αυτά την όψη κυματοειδούς παραμόρφωσης.

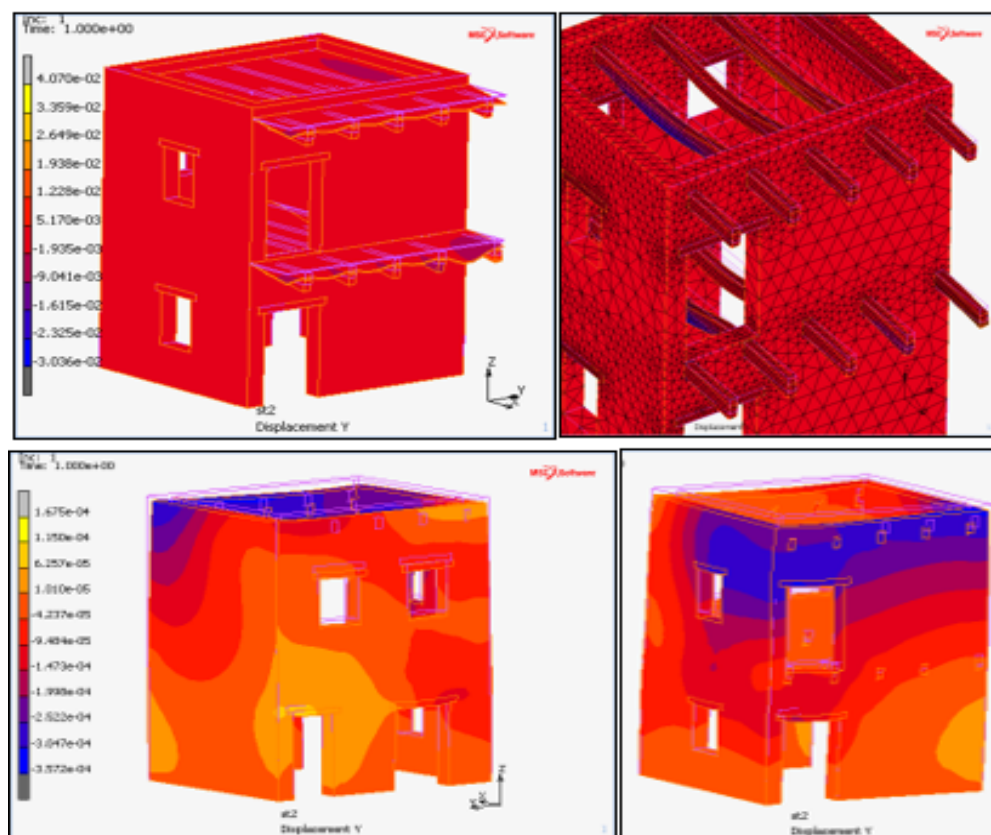


Εικόνα 85. Μετατοπίσεις στον οριζόντιο άξονα x.

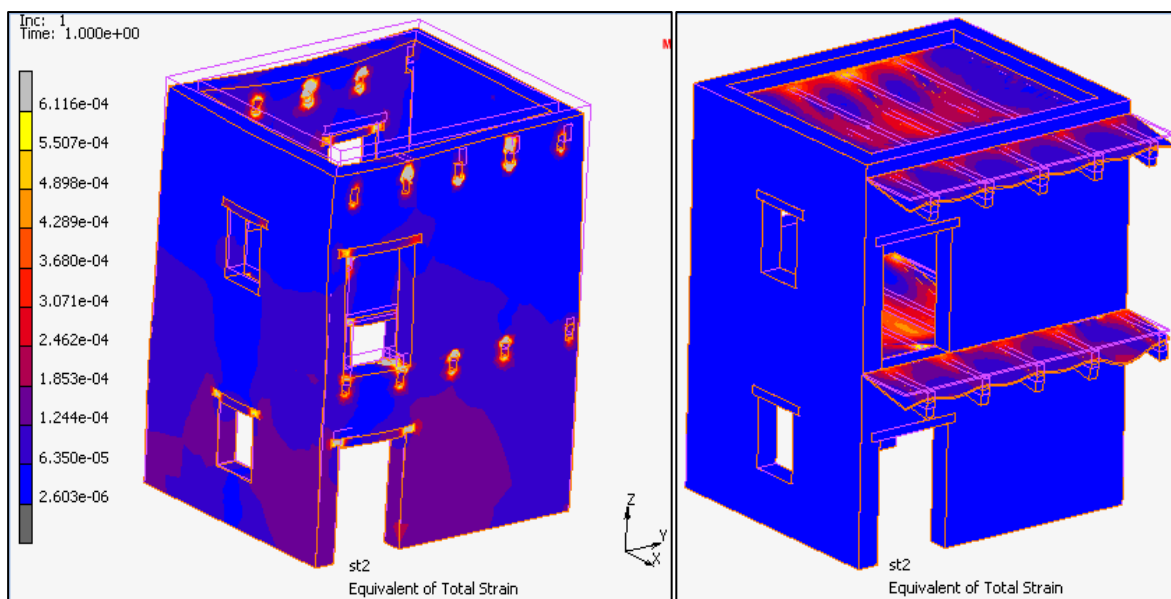


Εικόνα 86. Λεπτομέρεια παραμόρφωσης ξύλινων στοιχείων

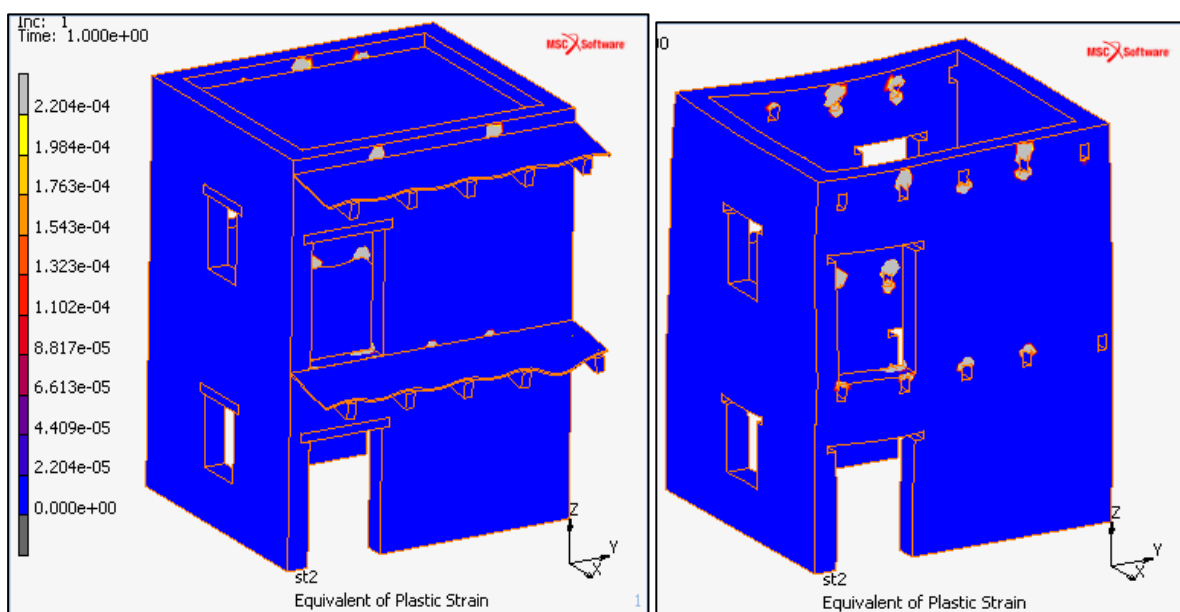
Στα στιγμιότυπα της Εικόνας 88 φαίνεται η παραμόρφωση που λαμβάνει ο φορέας κατά τον άξονα y . Η παραμόρφωση του φορέα ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με την παραμόρφωση κατά τον άξονα x (έντονο βέλος κάμψης ανάμεσα στις στηρίξεις στις δοκούς και τα ξύλινα δάπεδα), και επιπροσθέτως εμφανίζεται και παραμόρφωση καθ' ύψος των ακμών του κτιρίου.



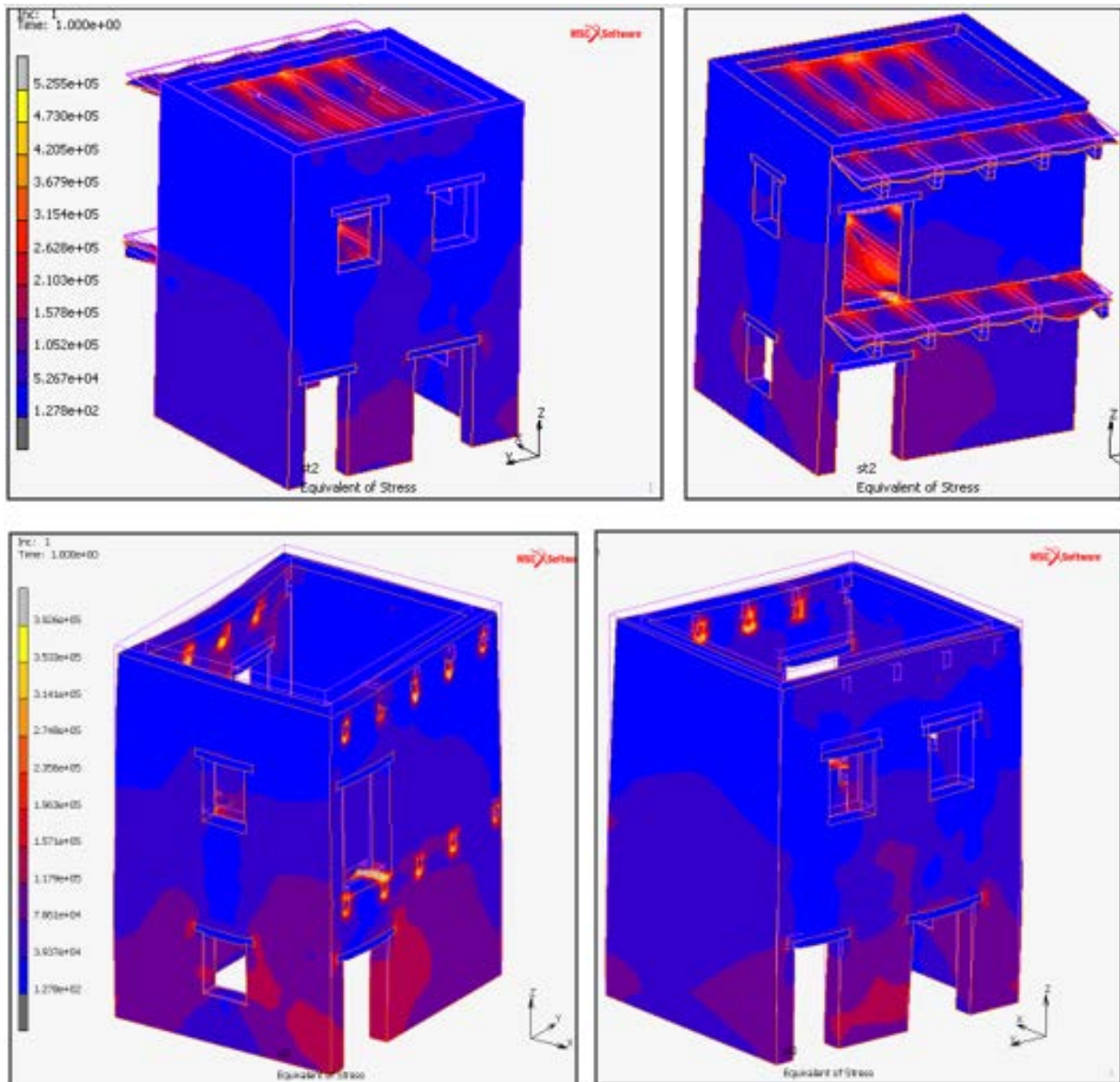
Εικόνα 87. Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα y .



Εικόνα 88. Ισοδύναμη ολική παραμόρφωση



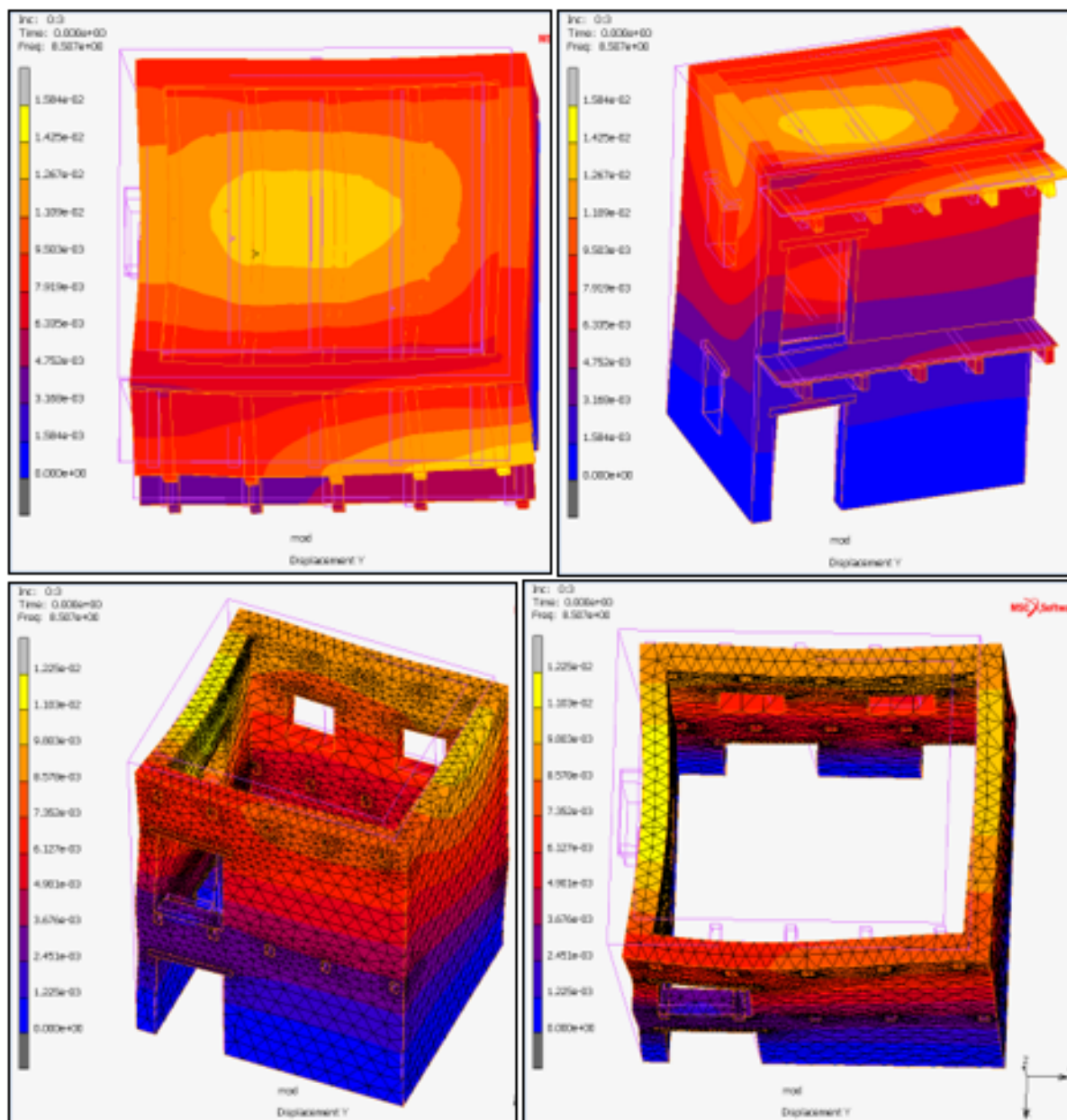
Εικόνα 89. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.



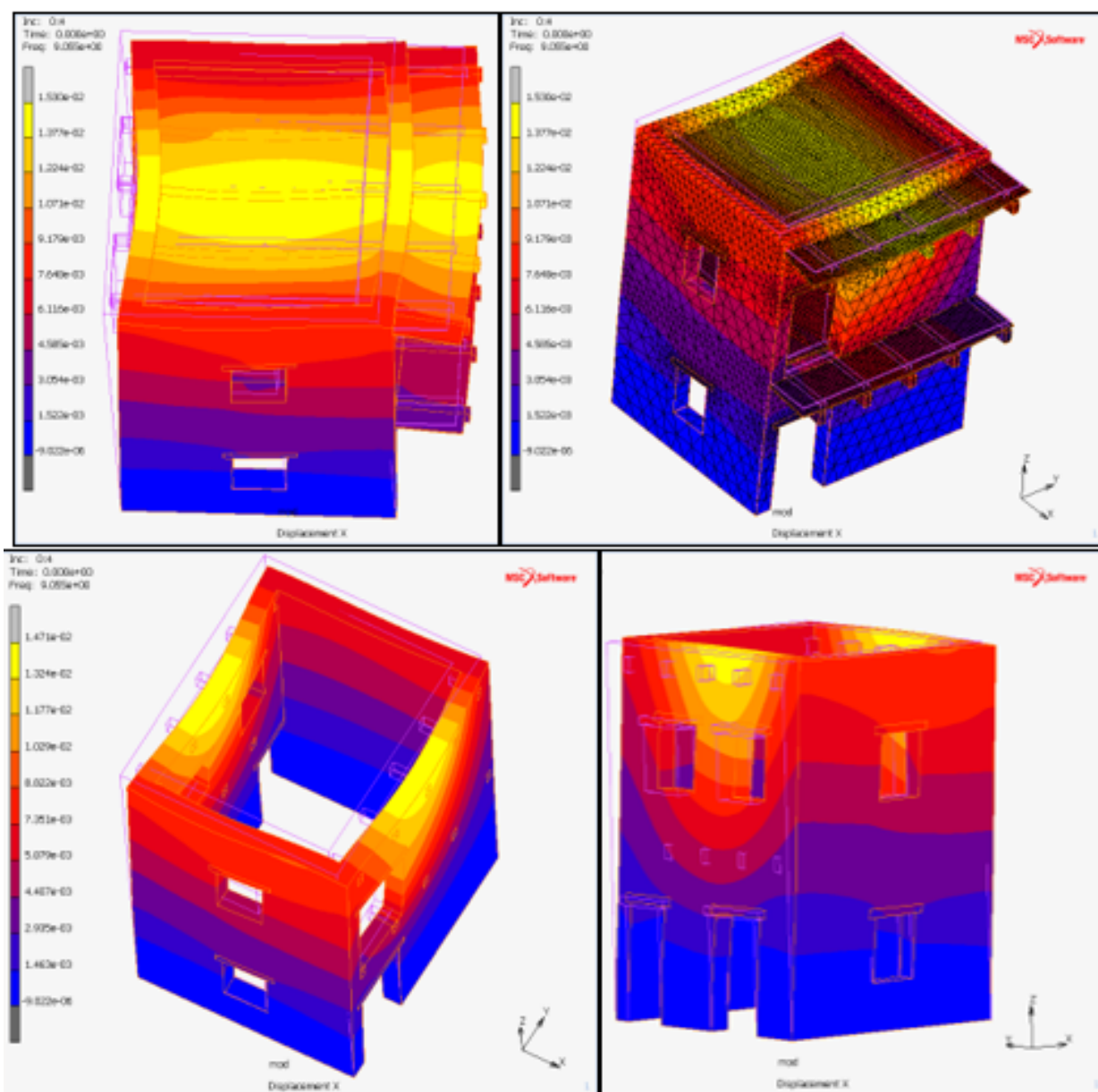
Εικόνα 90. Ισοδύναμες τάσεις

Αναλύοντας τα χρωματικά αποτελέσματα των Εικόνων 89, 90 και 91 επιβεβαιώνεται άλλη μια φορά η εμφάνιση έντονων εφελκυστικών τάσεων στις θέσεις των δοκαριών, των ξύλινων πατωμάτων και πέριξ των ανοιγμάτων, ενώ οι τάσεις που εμφανίζονται στο υπόλοιπο προσομοίωμα είναι σχεδόν αμελητέες.

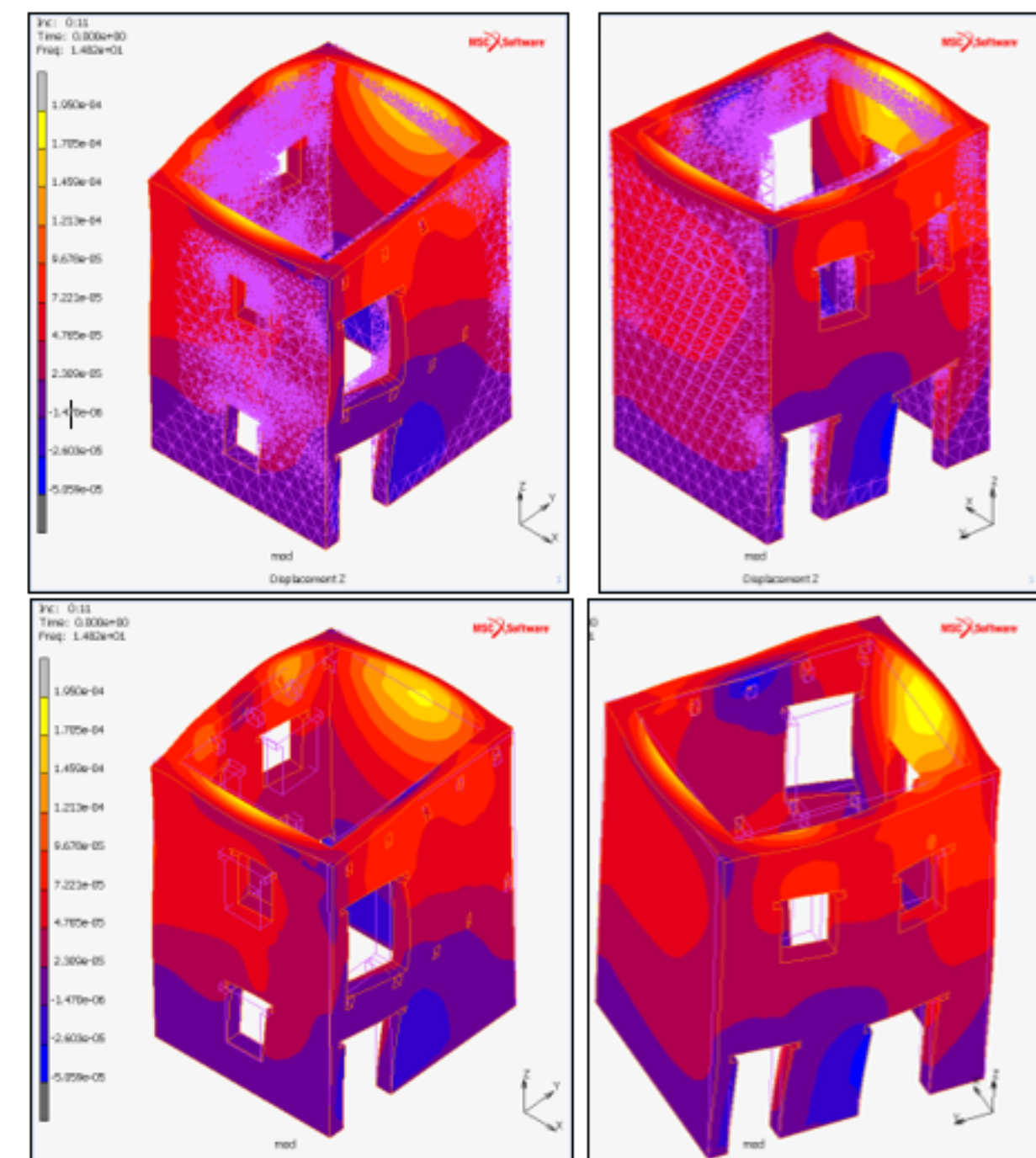
6.2 ΑΠΟΤΟΛΕΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ



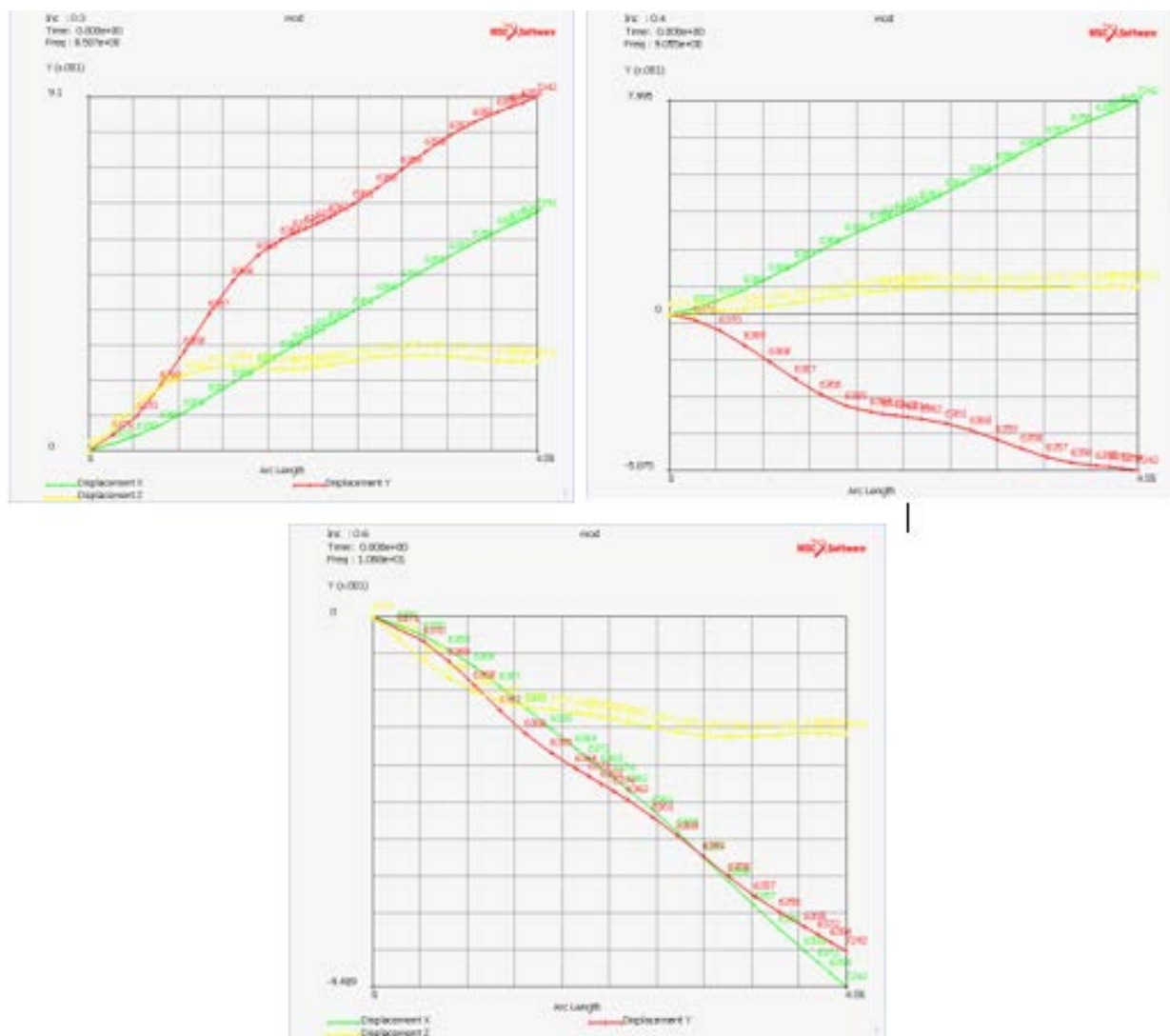
Εικόνα 91. Συχνότητα κατά κύριο λόγο μεταφορικής ταλάντωσης στον άξονα y. Freq:8,507 Hz



Εικόνα 92. Συχνότητα κατά κύριο λόγο μεταφορικής ταλάντωσης στον άξονα x. Freq: 9,055 Hz



Εικόνα 93. Συχνότητα ταλάντωσης στον άξονα z. Freq: 14,82 Hz



Εικόνα 94. Μετατόπιση κατά x-y-z σε συνάρτηση με το μήκος για τους κόμβους στηθαίου και βάσης της τομής Γ του αρχικού μοντέλου.

Στην **πρώτη ιδιοσυχνότητα**, στα 8.507Hz, το κτίριο ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στον άξονα y . Η **δεύτερη ζητούμενη ιδιοσυχνότητα** ταλάντωσης στον άξονα x είναι στα 9,055 Hz και η **τρίτη ζητούμενη ιδιοσυχνότητα**, είναι στα 14,82 Hz .

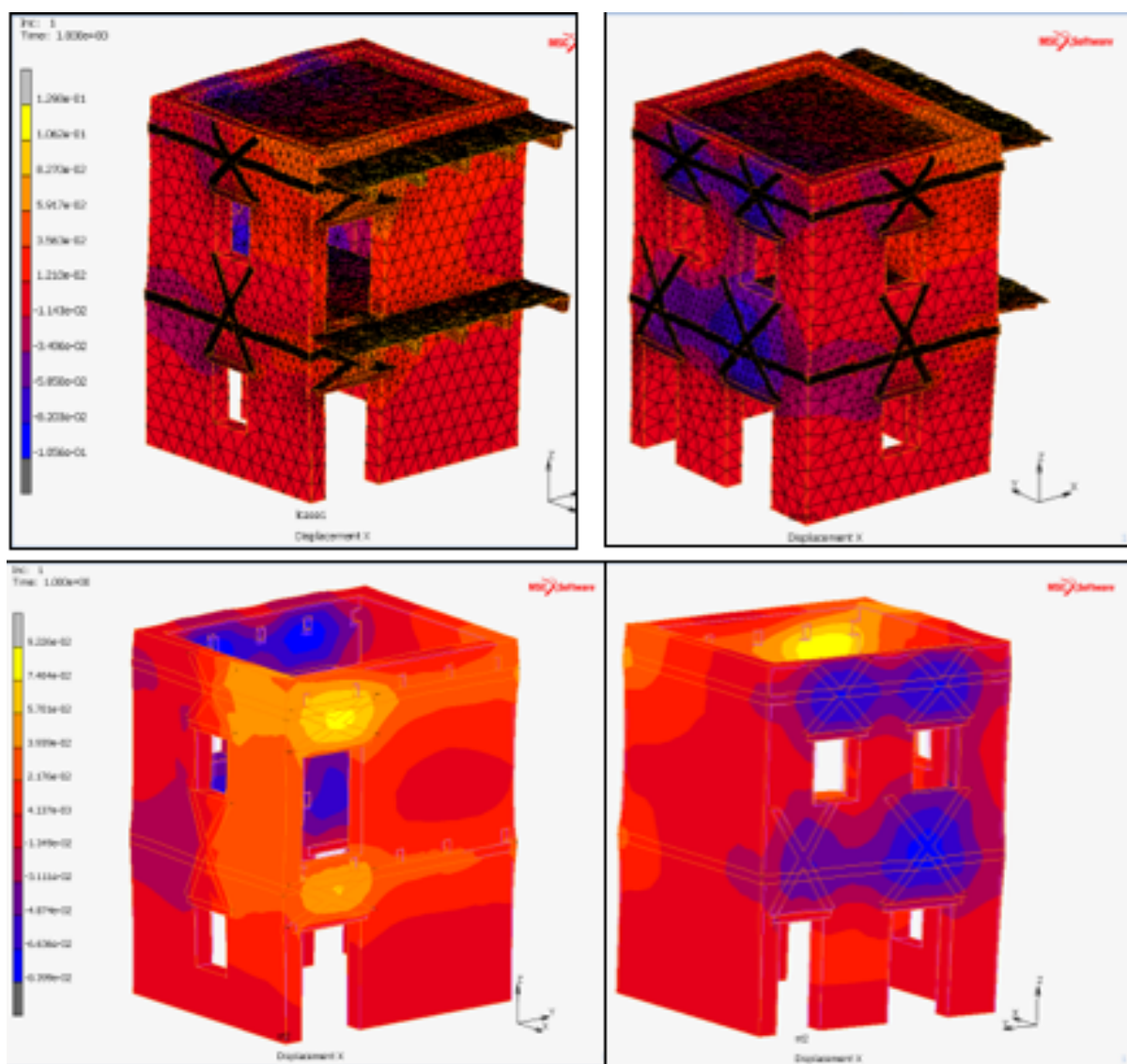
Συμπερασματικά, επιτεύχθηκε να δημιουργηθεί ένα προσομοίωμα με πολύ παρόμοια χαρακτηριστικά με το μοντέλο αναφοράς από άποψη διακριτοποίησης, μηχανικών ιδιοτήτων και φορτίσεων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την προσομοίωση στις ζητούμενες ιδιοσυχνότητες. Στις εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση του με απεικόνιση όλων των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν, καθώς και με απεικόνιση της τοιχοποιίας και των ξύλινων ανωφλίων ώστε να παραχθεί μια ευκρινέστερη εικόνα της ταλάντωσης και να γίνει εστίαση στον μηχανισμό της τοιχοποιίας, ο οποίος θα ενισχυθεί με την χρήση F.R.P. Επιπλέον παρουσιάζονται τα διαγράμματα όπου φαίνεται η μετατόπιση κατά x - y - z σε συνάρτηση με το μήκος.

Τα γραφήματα αποκτήθηκαν με την λειτουργία Node path, λαμβάνοντας τις μετρήσεις από τους κόμβους βάσης και στηθαίου του μοντέλου στην Τομή Γ.

Τα γραφήματα στις Εικόνες 95, 103 ανταποκρίνονται στις μετατοπίσεις στους άξονες x - y - z της Τομής Γ (Εικόνα 97). Αποτελούν ενδεικτικά της συμπεριφοράς του κτιρίου και όχι απόλυτη εικόνα, καθώς σε οποιοδήποτε άλλο σημείο για τη δεδομένη χρονική στιγμή, το γράφημα θα μπορούσε να έχει διαφορετική μορφή.

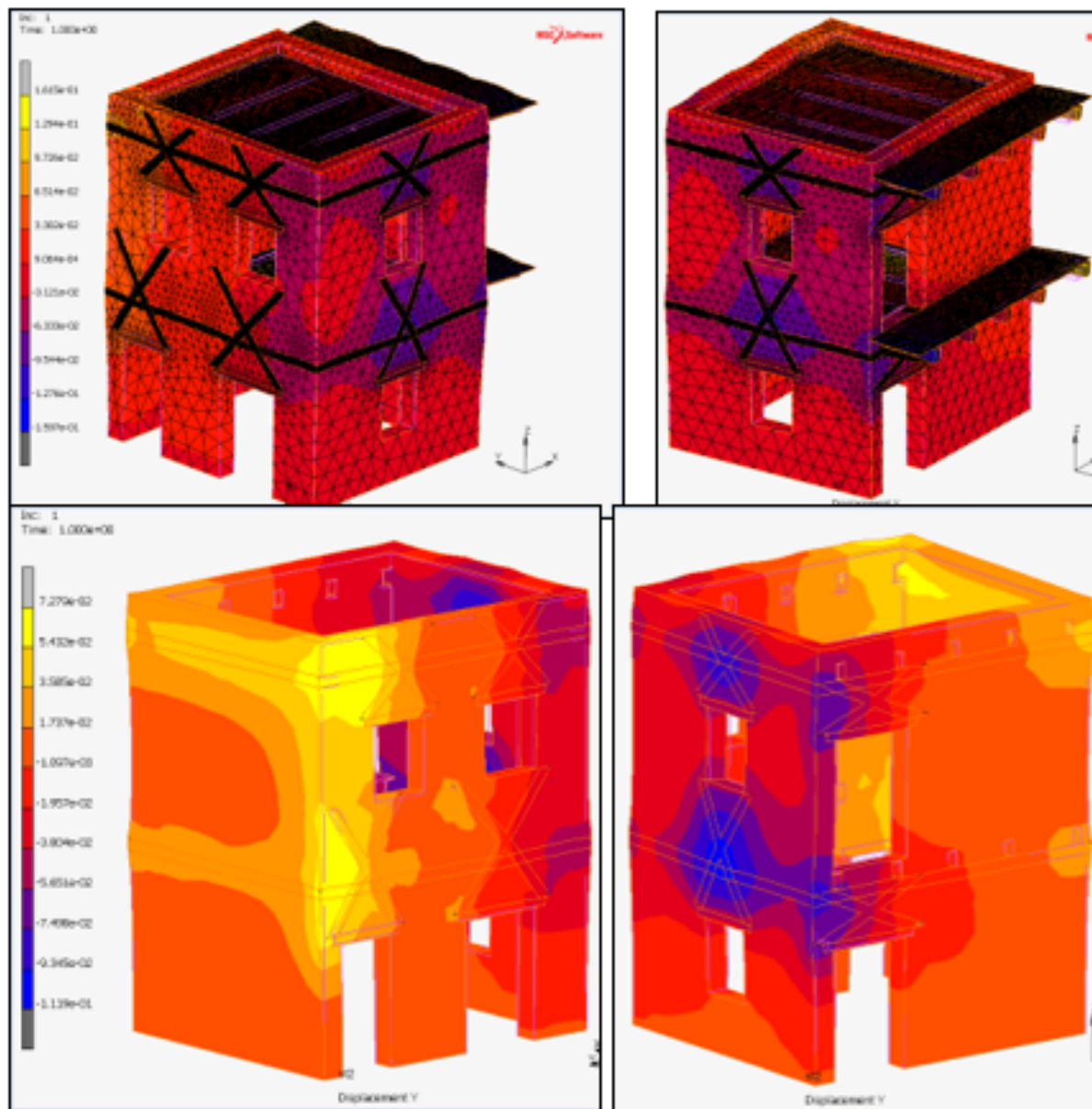
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Όπως γίνεται εμφανές και στις Εικόνες 96, 97 οι μετατοπίσεις στα σημεία περίξ των ινοπλισμένων πολυμερών έχουν αρνητικό πρόσημο. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς οι ταινίες ασκούν ένα είδος περίσφιγξης στις περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται. Η τοποθέτησή τους στα σημεία που φαίνονται και στις εικόνες (ανώφλια και πλησίον ανοιγμάτων) είναι στρατηγική, καθώς εκεί αναπτύσσονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις σε άοπλη τοιχοποιία, τις οποίες και είναι επιθυμητό να παραλάβουν τα FRP.

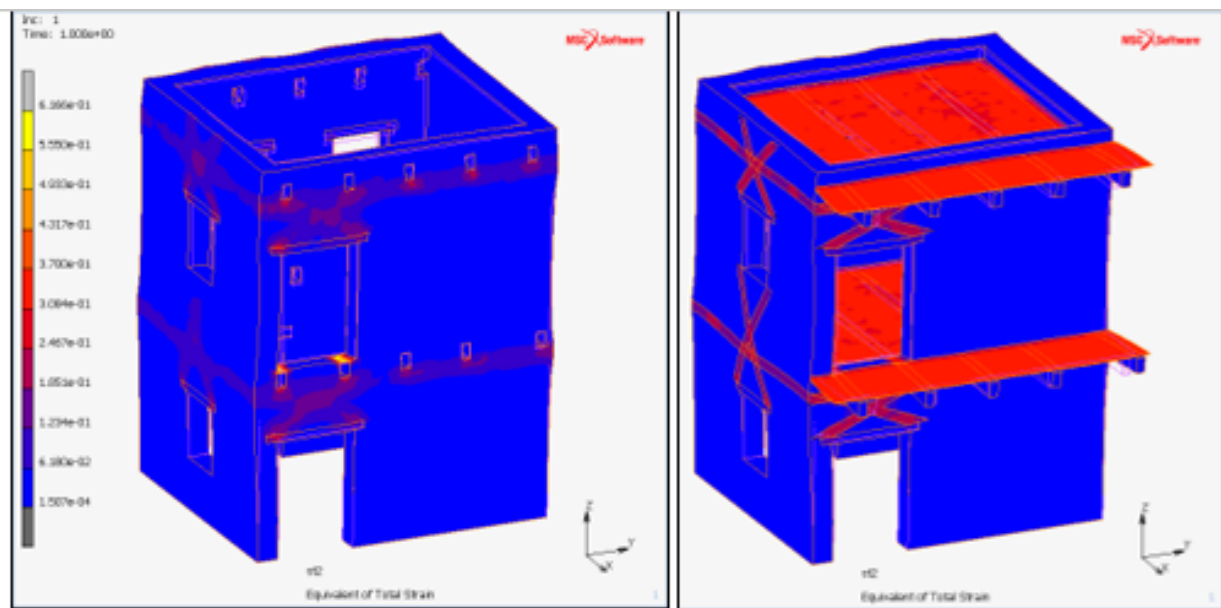


Εικόνα 95. Μετατόπιση κατά x ενισχυμένου μοντέλου.

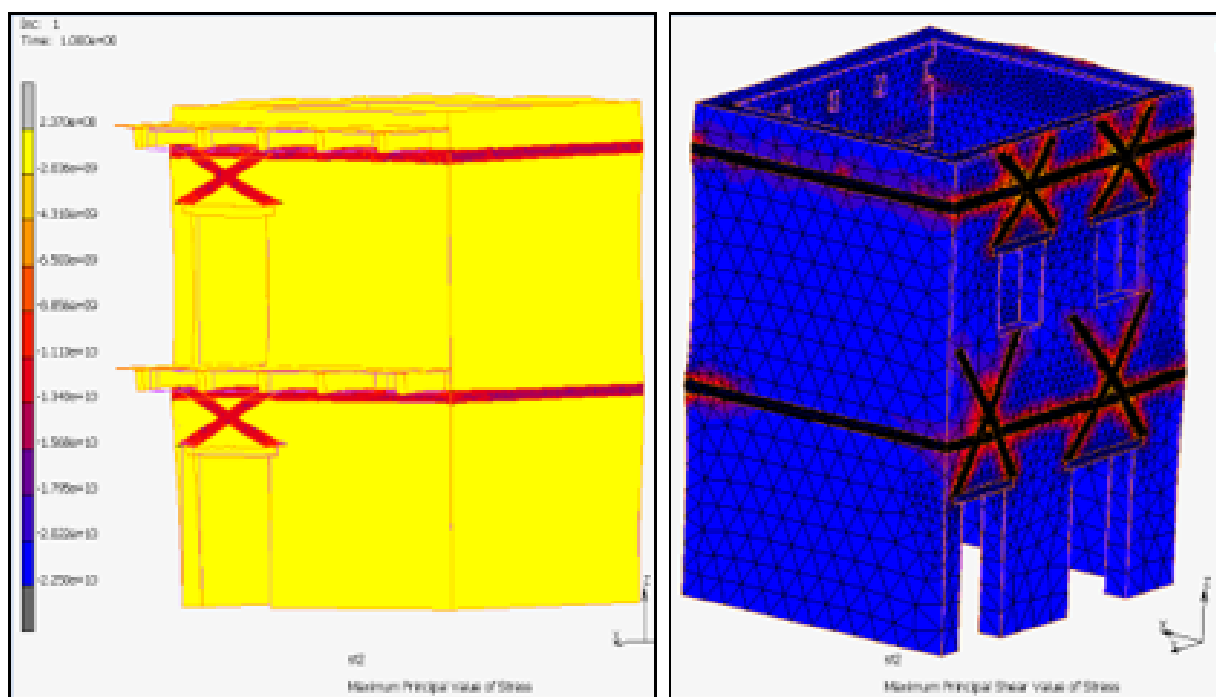
Αντίστοιχα και στις μετατοπίσεις στον άξονα y και για τον ίδιο λόγο είναι αρνητικές και συγκεντρώνονται στις περιοχές εφαρμογής των χιαστί FRP στην Βορεινή και πλάγια όψη.



Εικόνα 96. Μετατόπιση κατά y ενισχυμένου μοντέλου.



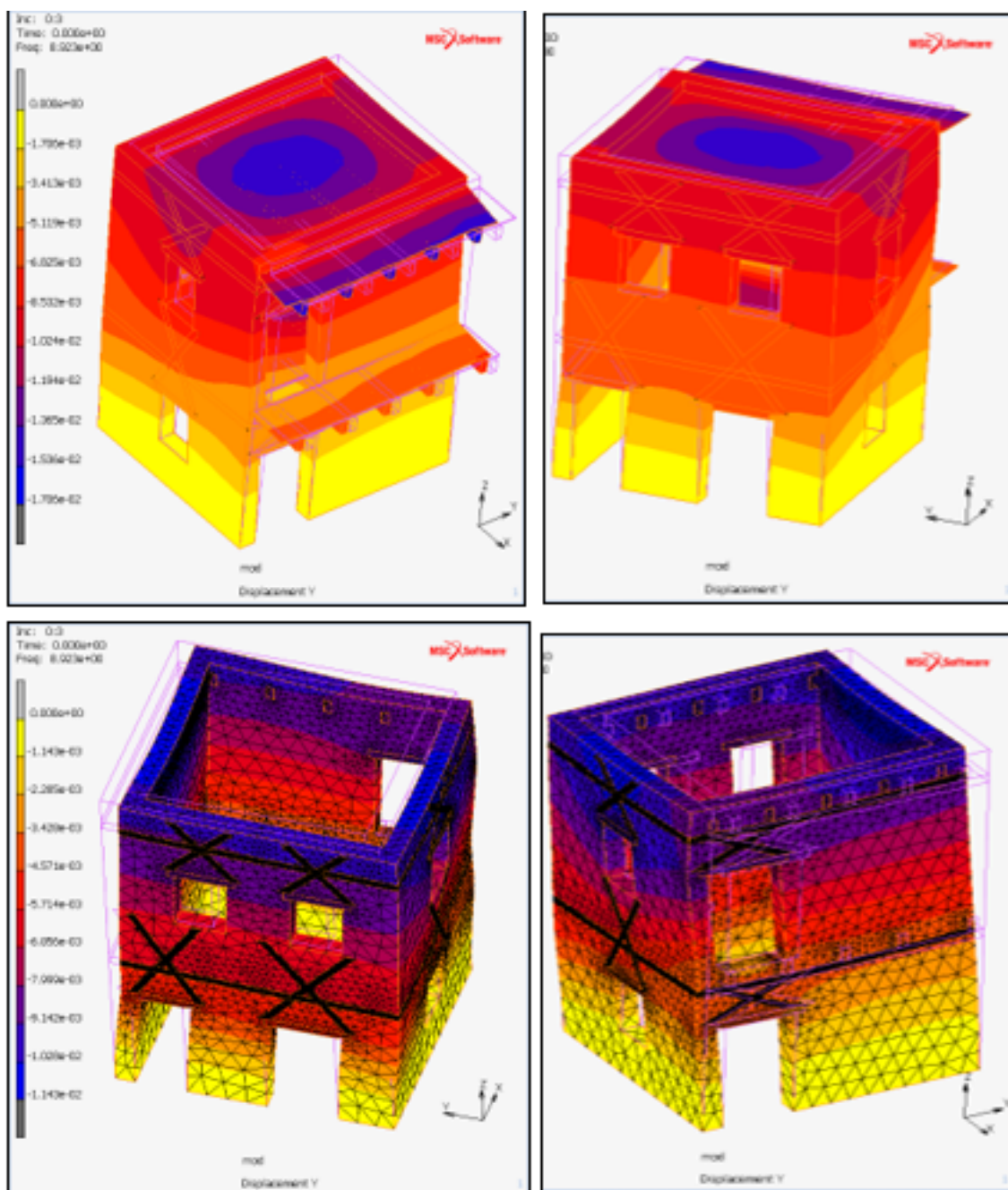
Εικόνα 97. Ισοδύναμη Ολική παραμόρφωση.



Εικόνα 98. Μέγιστη κύρια τάση

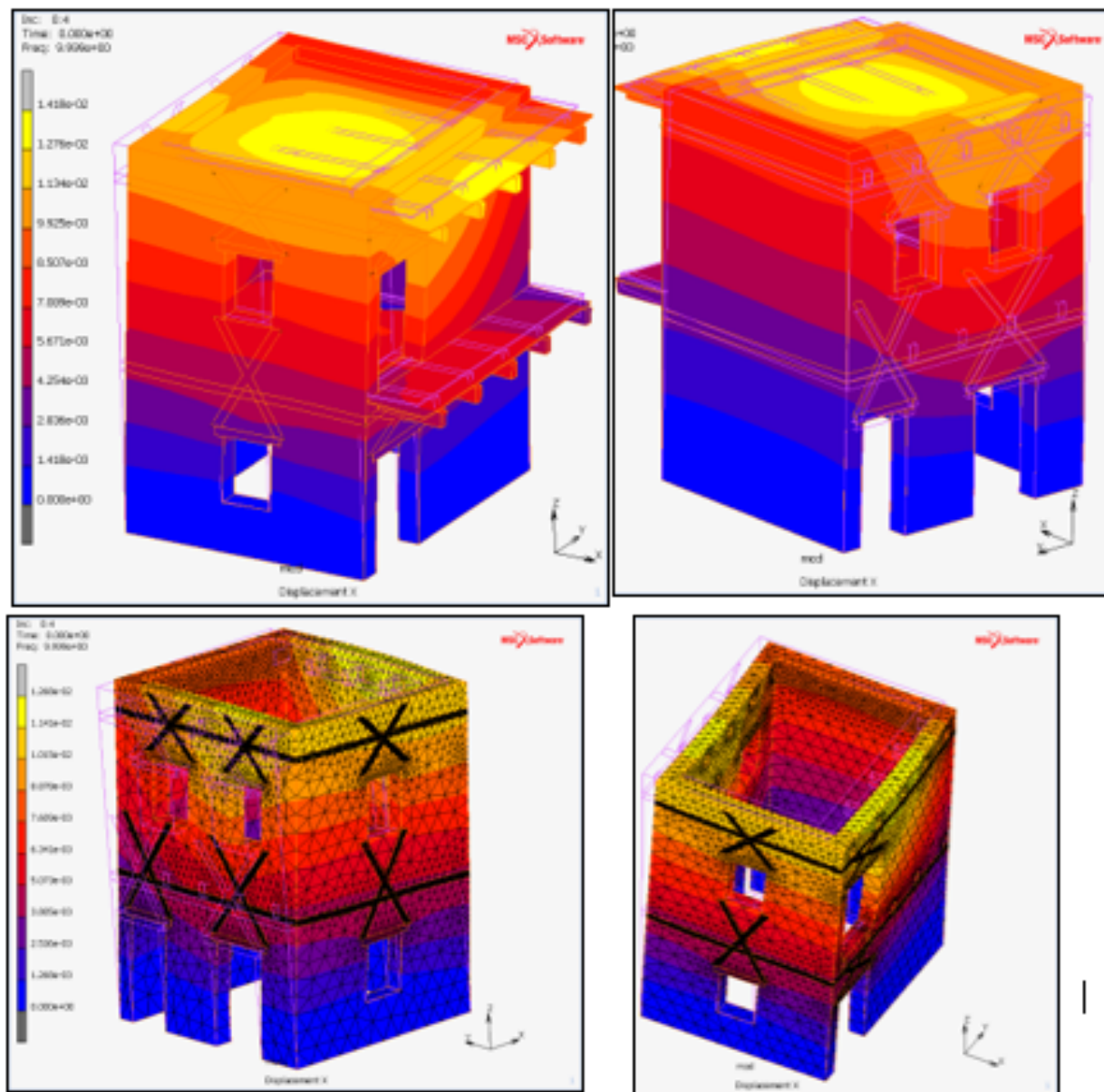
6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Το μοντέλο, όπως και πριν την ενίσχυση, ταλαντώνεται αρχικά στον άξονα y , μόνο που τώρα η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης είναι στα 8,923Hz, σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης πριν την ενίσχυση, που ήταν στα 8,507Hz.



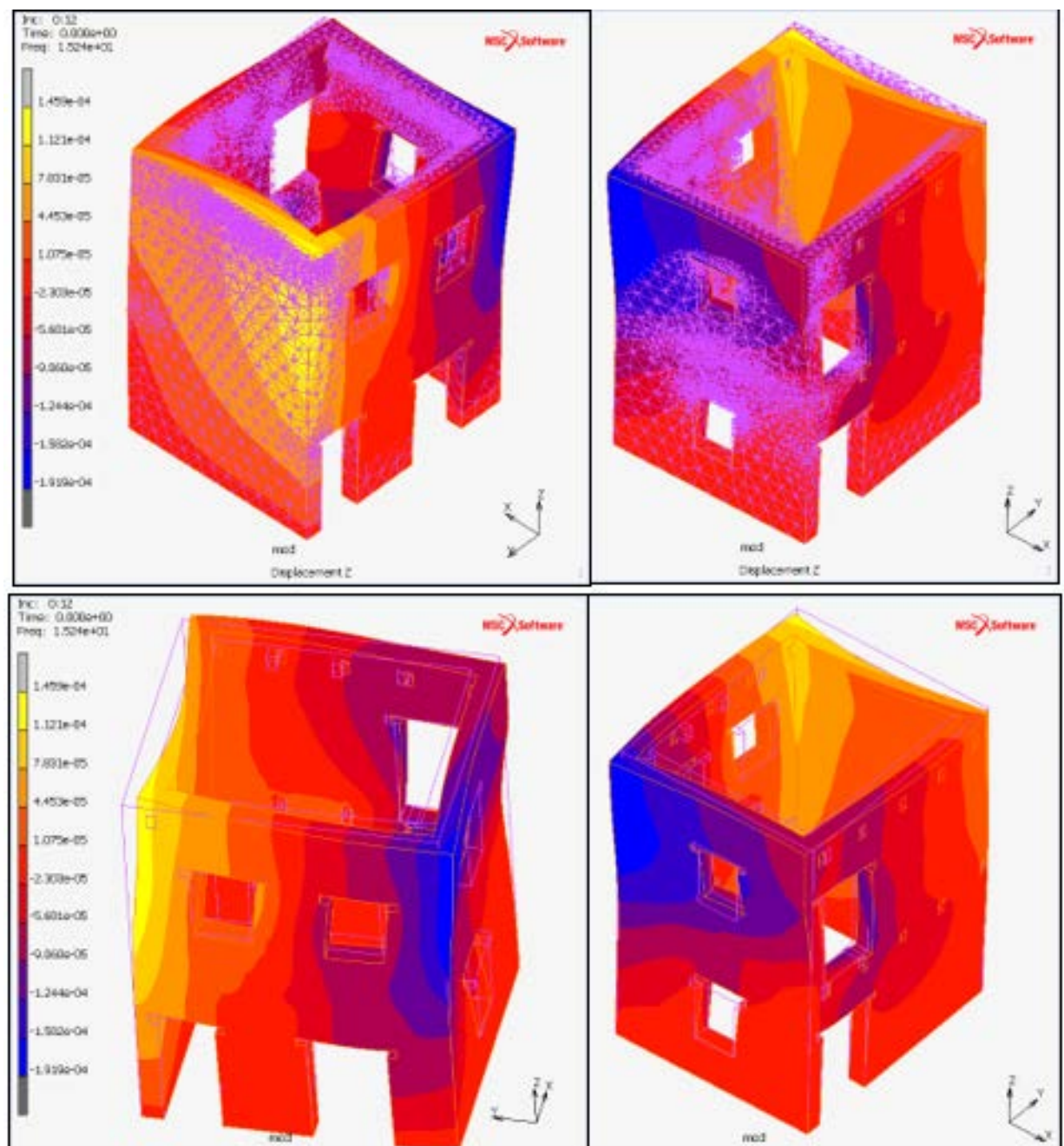
Εικόνα 99. Συχνότητα ταλάντωσης στον άξονα y . $Freq: 8,923Hz$

Έπειτα, το ενισχυμένο μοντέλο ταλαντώνεται κατά τον άξονα x με ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης 9,999Hz σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης πριν την ενίσχυση, που ήταν 9,055Hz.

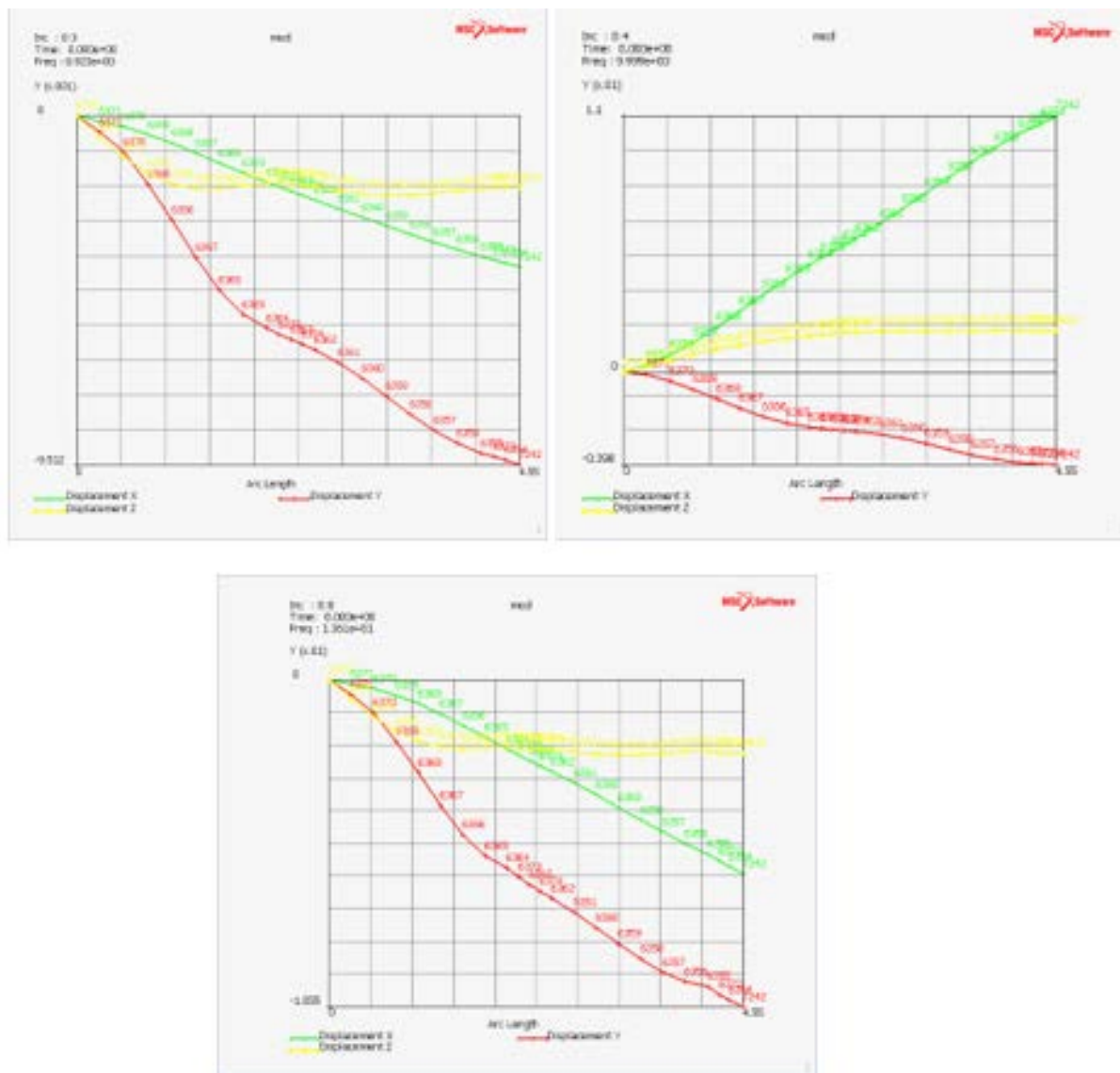


Εικόνα 100. Συχνότητα ταλάντωσης στον άξονα x. Freq:9,999 Hz

Τέλος, το ενισχυμένο μοντέλο ταλαντώνεται κατά τον άξονα z και παρουσιάζει στρέψη με ιδιοσυχνότητα 13,61Hz σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης πριν την ενίσχυση που ήταν στα 10,68Hz.



Εικόνα 101. Συχνότητα ταλάντωσης στον άξονα z. Freq:15,24 Hz



Εικόνα 102. Μετατόπιση κατά x-y-z σε συνάρτηση με το μήκος για τους κόμβους στηθαίου και βάσης της τομής Γ του ενισχυμένου μοντέλου.

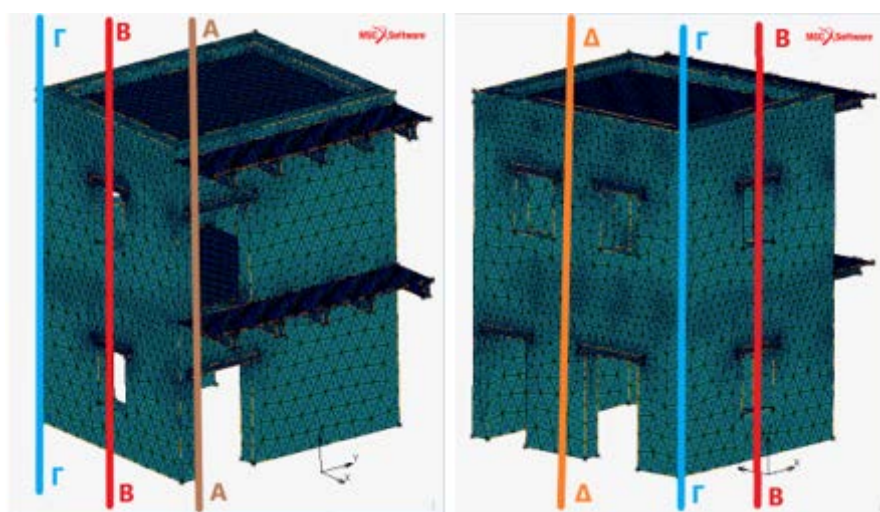
6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ ΒΑΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Μετά την δημιουργία του φορτίου Loadcase το οποίο περιέχει τις εξής συνθήκες φόρτισης:

- Το φορτίο της βαρύτητας
- Την πάκτωση στην βάση
- Το επιφανειακό κατανεμημένο φορτίο στους ορόφους
- Το σεισμικό φορτίο που εφαρμόστηκε στους κόμβους της βάσης,

Επιλέχθηκε να ακολουθηθεί χρονικός βηματισμός (0.01sec) ίδιος με τις μετρήσεις που εισήχθησαν στο πρόγραμμα και να προσομοιωθούν τα πρώτα 5 δευτερόλεπτα του σεισμού από τα συνολικά 29 δευτερόλεπτα των μετρήσεων. Ο λόγος είναι, ότι στο μοντέλο αναφοράς μελετήθηκαν τα πρώτα 4,50 δευτερόλεπτα της σεισμικής δόνησης και όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως στόχος είναι να επιτευχθεί ταύτιση με αυτό. Επιπλέον τα πρώτα 5 δευτερόλεπτα είναι αρκετά για να καταγραφούν στην προσομοίωση τα δύο μέγιστα μετατόπισης χρονικά σημεία του σεισμού.

Για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα θα εξεταστούν τέσσερις κατακόρυφες τομές, όπως φαίνονται στην εικόνα παρακάτω. Με αυτές τις τομές θα γίνουν εμφανείς οι μετατοπίσεις στα δύο σημεία του φορέα (ένα στην βάση και ένα στο στηθαίο) κατά την διάρκεια της σεισμικής καταπόνησης.



Εικόνα 103. Τομές A,B,Γ,Δ για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

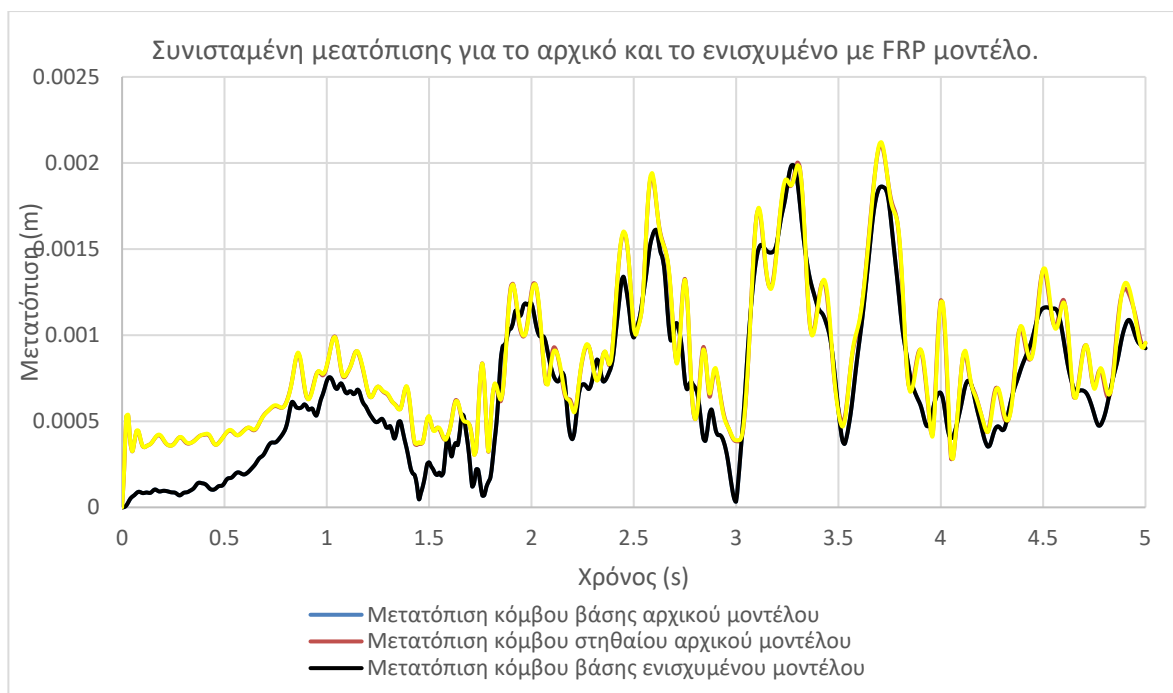
6.5.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ

ΑΡΧΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΚΟΜΒΟΙ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΕΣ Α – Β – Γ – Δ)

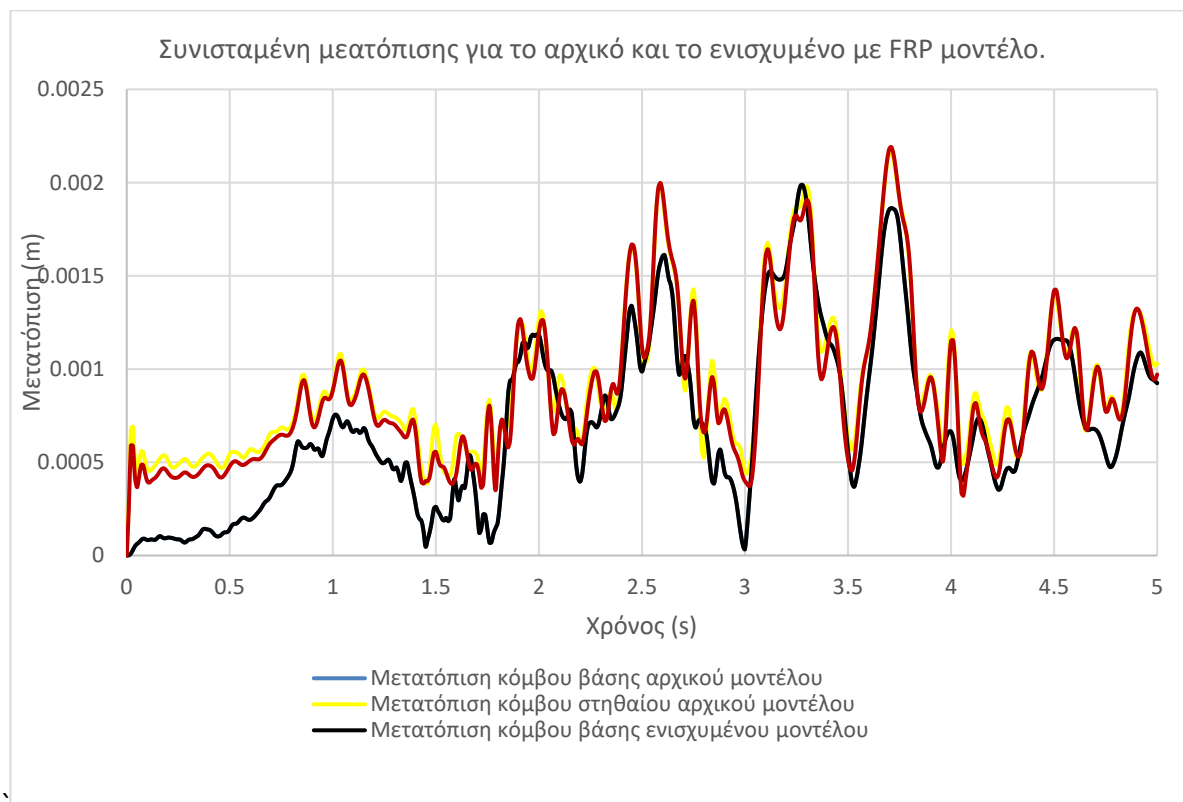
Οι διαθέσιμες μετρήσεις για τη σεισμική φόρτιση που αξιοποιήθηκαν σ' αυτή τη διπλωματική εργασία και προέρχονται από την Ιταλική ερευνητική ομάδα διέθεταν δεδομένα ταλάντωσης και κατά τη διεύθυνση x και κατά τη διεύθυνση y (δεδομένα υπήρχαν και για τη διεύθυνση z , αλλά δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία). Για το λόγο αυτό και παρόλο που αρχικά είχε αποφασιστεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση με αναλογίες φόρτισης 1 προς 3 του άξονα y προς τον άξονα x , εν τέλει έγινε ανάλυση με τη χρήση αυτούσιων των αριθμητικών δεδομένων και για τους δυο άξονες.

Η ταυτόχρονη εφαρμογή της σεισμικής δόνησης στους δυο άξονες έχει ως αποτέλεσμα τα γραφήματα των Εικόνων 105 έως 108, στα οποία φαίνεται η συνισταμένη της μετατόπισης για κάθε χρονικό βήμα για τον κόμβο της βάσης και τον κόμβο του στηθαίου στις Τομές Α-Β-Γ-Δ. Χάριν σύγκρισης, παρατίθενται στα ίδια γραφήματα η συνισταμένη μετατόπισης και για το αρχικό μοντέλο και για το ενισχυμένο μοντέλο. Σημειώνεται εδώ, πως αν τα γραφήματα κατασκευάζονταν για κάθε συνιστώσα της μετατόπισης ξεχωριστά, αυτό θα είχε τη μορφή της σεισμικής δόνησης στον αντίστοιχο άξονα.

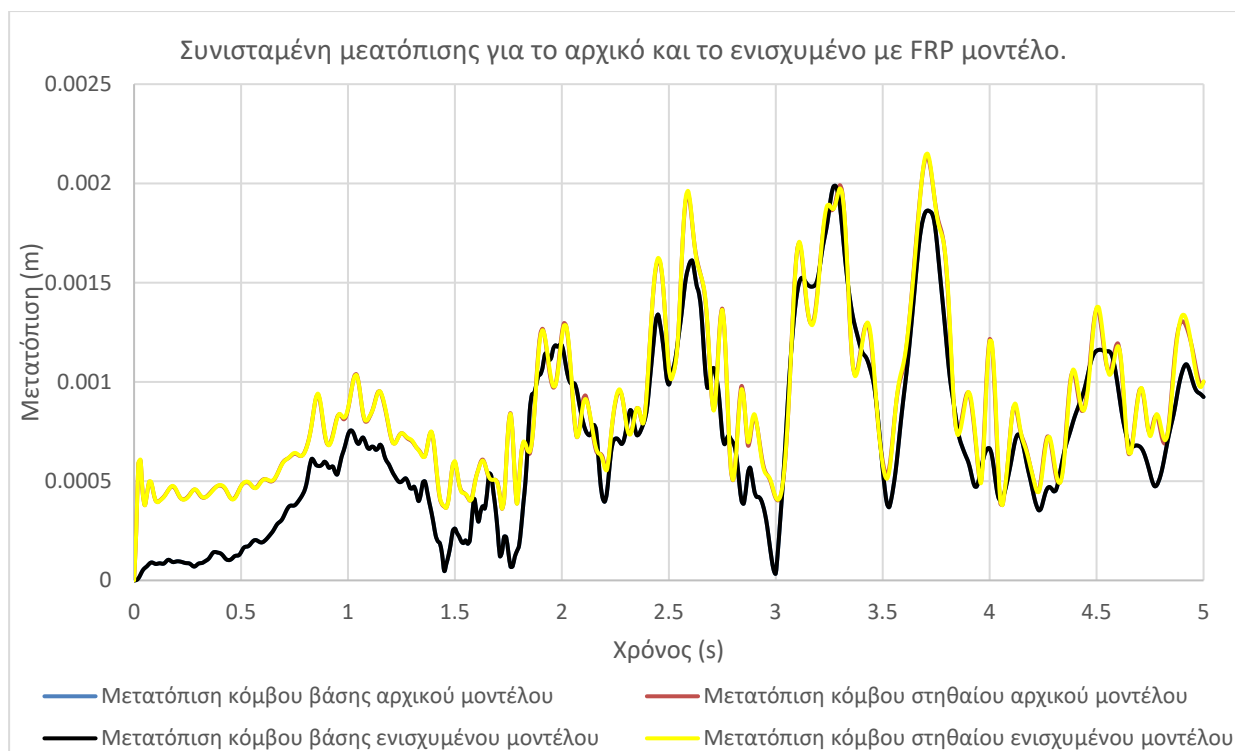
Τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα των μετατοπίσεων ταυτίζονται χρονικά για τις δύο θέσεις εφαρμογής του σεισμού, με τη μεγαλύτερη μετατόπιση να είναι λίγο παραπάνω από 2 χιλιοστά και να εμφανίζεται στα 4 sec για τον κόμβο του στηθαίου και λίγο μετά τα 3 sec για τον κόμβο της βάσης γύρω στα 2 χιλιοστά, επίσης. Σε γενικές γραμμές, η συνισταμένη της μετατόπισης κόμβου και στηθαίου για τις δυο Τομές εμφανίζουν πολύ μεγάλες ομοιότητες.



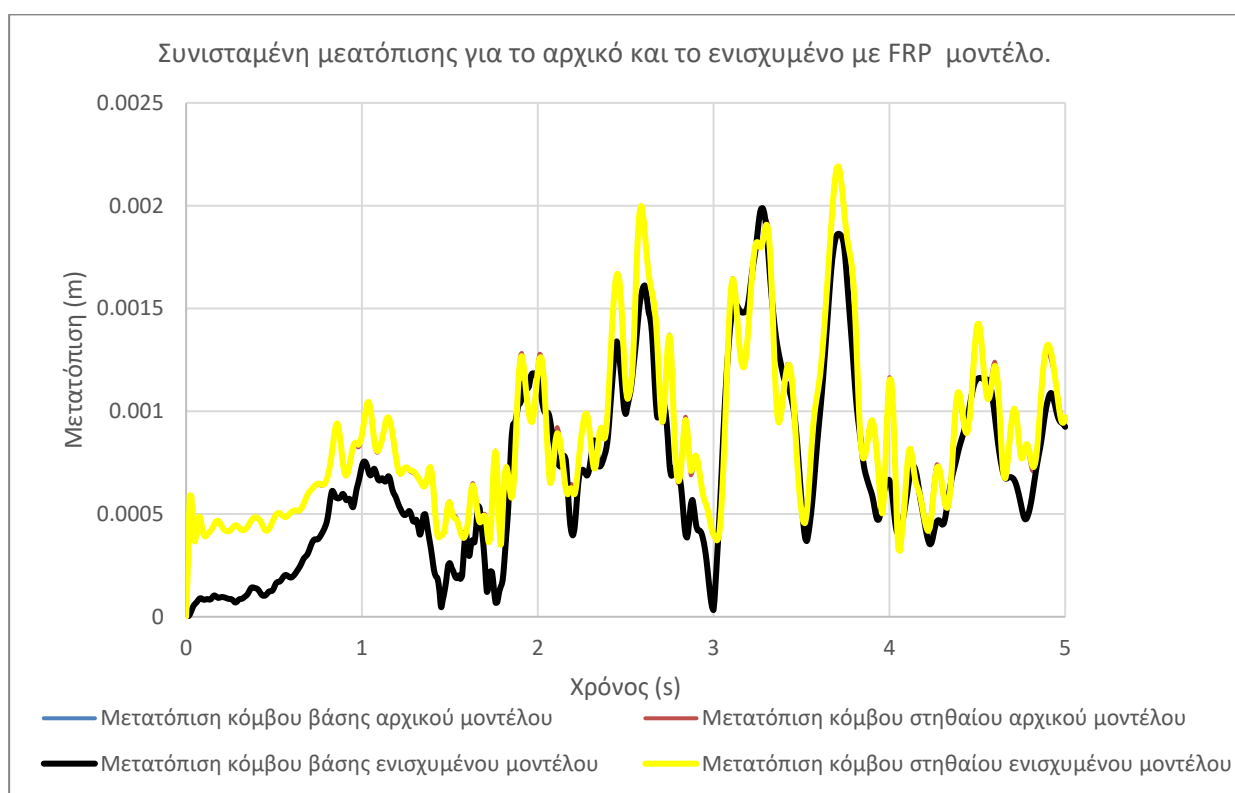
Εικόνα 104. Συνισταμένη μετατόπισης για το αρχικό και το ενισχυμένο με FRP μοντέλο (κόμβος βάσης και στηθαίου Τομής Γ)



Εικόνα 105. Συνισταμένη μετατόπισης για το αρχικό και το ενισχυμένο με FRP μοντέλο (κόμβος βάσης και στηθαίου Τομής Α).

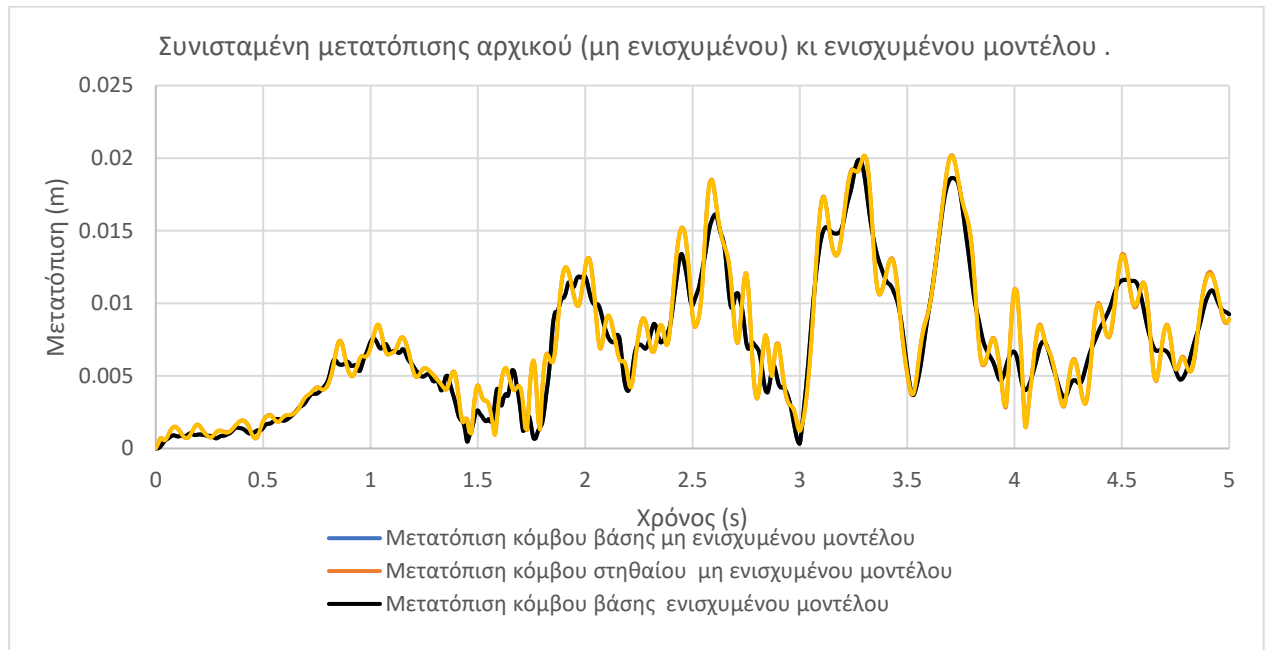


Εικόνα 106. Συνισταμένη μετατόπισης για το αρχικό και το ενισχυμένο με FRP μοντέλο (κόμβος βάσης και στηθαίου Τομής Β).

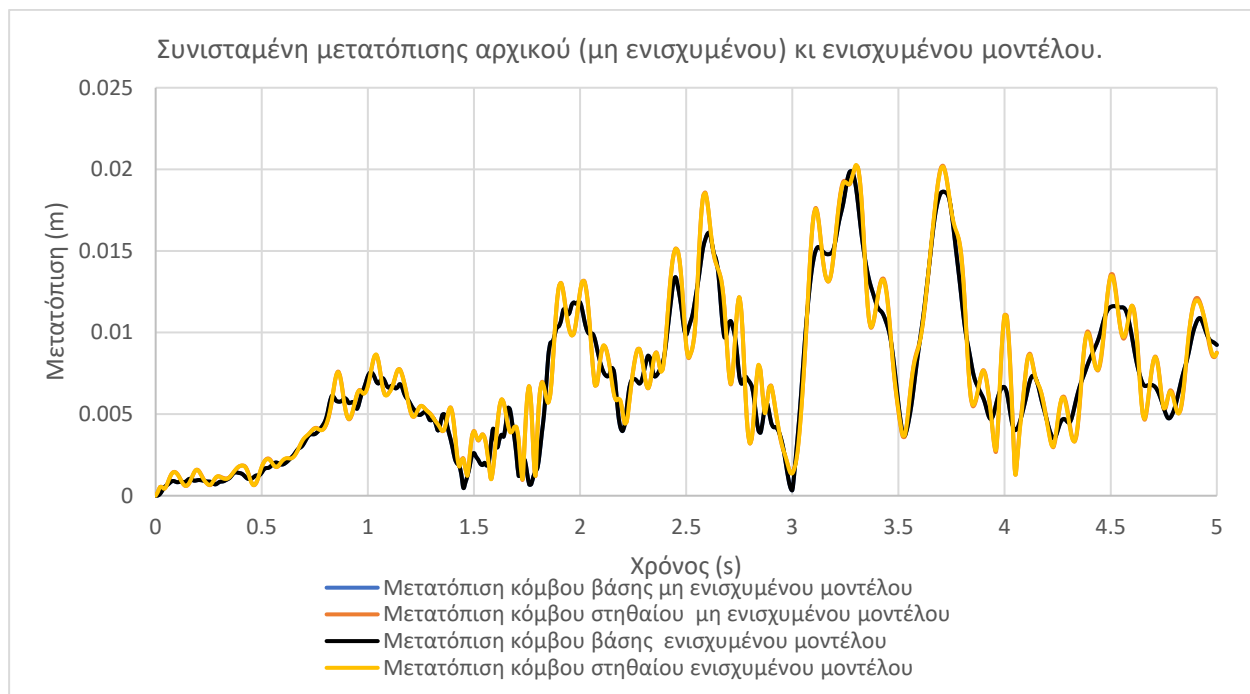


Εικόνα 107. Συνισταμένη μετατόπισης για το αρχικό και το ενισχυμένο με FRP μοντέλο (κόμβος βάσης και στηθαίου Τομής Δ).

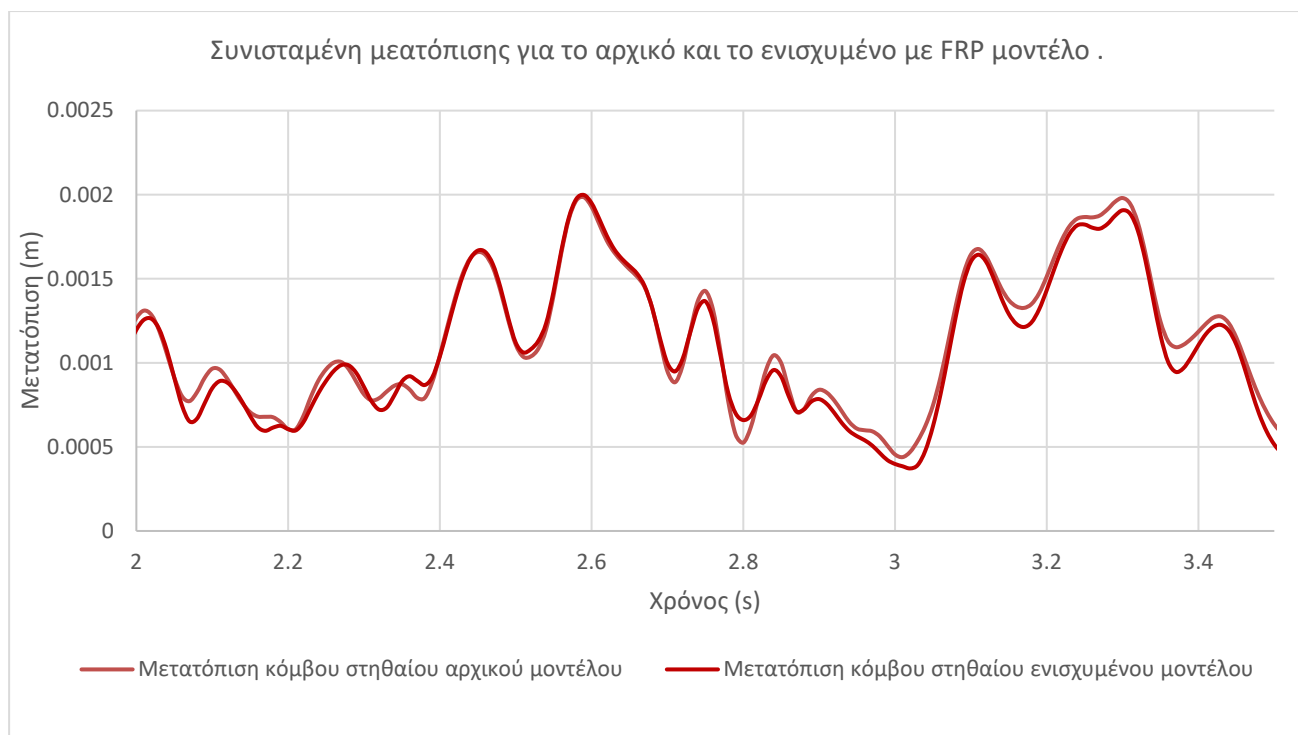
6.5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ (Χ10) ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΚΟΜΒΟΣ ΒΑΣΗΣ , ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΤΟΜΕΣ Α – Γ)



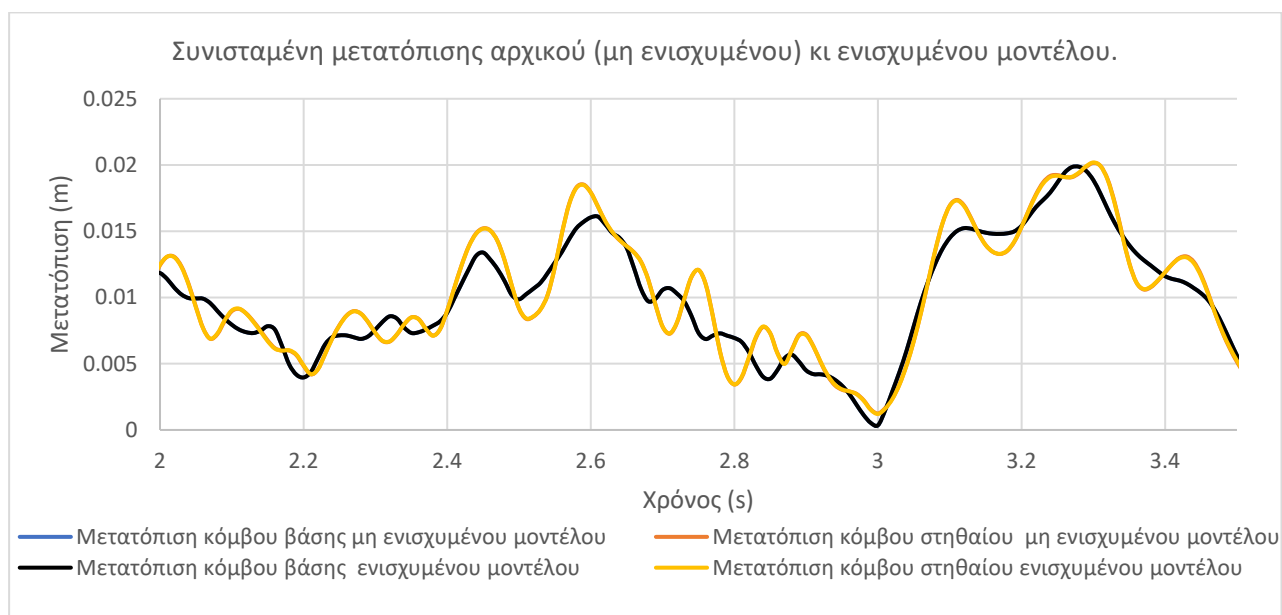
Εικόνα 108. Συνισταμένη μετατοπίσεων αρχικού κι ενισχυμένου μοντέλου(κόμβος βάσης και στήθαιου Τομής Α) για την επαυξημένη (x10) ένταση σεισμού.



Εικόνα 109. Συνισταμένη μετατοπίσεων αρχικού κι ενισχυμένου μοντέλου(κόμβος βάσης και στήθαιου Τομής Γ) για την επαυξημένη (x10) ένταση σεισμού.



Εικόνα 110. Μεγέθυνση συνισταμένης μετατοπίσεων ενισχυμένου μοντέλου (κόμβος στηθαίου Τομής Α) 2 - 3,5 sec



Εικόνα 111. Μεγέθυνση συνισταμένης μετατοπίσεων ενισχυμένου μοντέλου (κόμβος βάσης και στηθαίου Τομής Α) 2 - 3,5 sec για την επαυξημένη (x10) ένταση σεισμού.

	Τομή Α		Τομή Β		Τομή Γ		Τομή Δ	
Είδος δοκιμής	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Χρονικό βήμα (s)	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Χρονικό βήμα (s)	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Χρονικό βήμα (s)	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Χρονικό βήμα (s)
Αρχικό μοντέλο, πραγματική ένταση σεισμού	0.002179	3.71	0.002149	3.71	0.00212	3.71	0.0021907	3.71
Αρχικό μοντέλο, επαυξημένη ένταση σεισμού	0.020195	3.71	-		0.20237	3.3	-	
Ενισχυμένο μοντέλο, πραγματική ένταση σεισμού	0.002160	3.71	0.002133	3.71	0.002104	3.71	0.00217	3.71
Ενισχυμένο μοντέλο, επαυξημένη ένταση σεισμού	0.020193	3.3	-		0.020268	3.3	-	

Πίνακας. 11 Συνοπτικά αποτελέσματα συνισταμένης μετατόπισης.

Όπως φαίνεται και στα συνοπτικά αποτελέσματα για τα μέγιστα των μετατοπίσεων σε κάθε περίπτωση, τη μεγαλύτερη μετατόπιση εμφανίζει το αρχικό μοντέλο με την επαυξημένη, κατά δέκα, ένταση σεισμού κι αμέσως μετά, με ελάχιστη διαφορά (0,01%), ακολουθεί το ενισχυμένο μοντέλο με την επαυξημένη ένταση σεισμού. Όσον αφορά τώρα την πραγματική ένταση του σεισμού, μεγαλύτερη μετακίνηση εμφανίζει το αρχικό μοντέλο, όπως αναμενόταν, παρουσιάζοντας διαφορά μετακίνησης της τάξεως του 8,7% από το ενισχυμένο μοντέλο. Επιπροσθέτως, η δεκαπλάσια ένταση σεισμού δίνει δεκαπλάσια μετακίνηση. Αυτό που παραμένει κοινό για την πλειοψηφία των προσομοιωμάτων είναι το χρονικό βήμα εμφάνισης του απόλυτου μέγιστου, το οποίο είναι στα 3,71 sec.

Αξίζει, επιπλέον να παρατηρηθεί, ότι για την πραγματική ένταση σεισμού, ο κόμβος της βάσης εμφανίζει καθυστέρηση στην ανάπτυξη μετακίνησης, με τιμές μετακίνησης οι οποίες μέχρι το 1 sec είναι αμελητέες σε σχέση με τον κόμβο του στηθαίου, ο οποίος δείχνει άμεσα να μετακινείται και να διατηρεί καθ' όλη τη διάρκεια του σεισμού μεγαλύτερες μετακινήσεις πράγμα που είναι αναμενόμενο. Αυτό δεν συμβαίνει για την δεκαπλάσια ένταση σεισμού, στα γραφήματα της οποίας παρατηρείται σχεδόν ταυτόχρονη και πανομοιότυπη συμπεριφορά στη μετακίνηση σχετικά με το χρόνο. Αισθητή είναι και η καθυστέρηση ταλάντωσης των κόμβων του στηθαίου σε σχέση με τους κόμβους της βάσης .

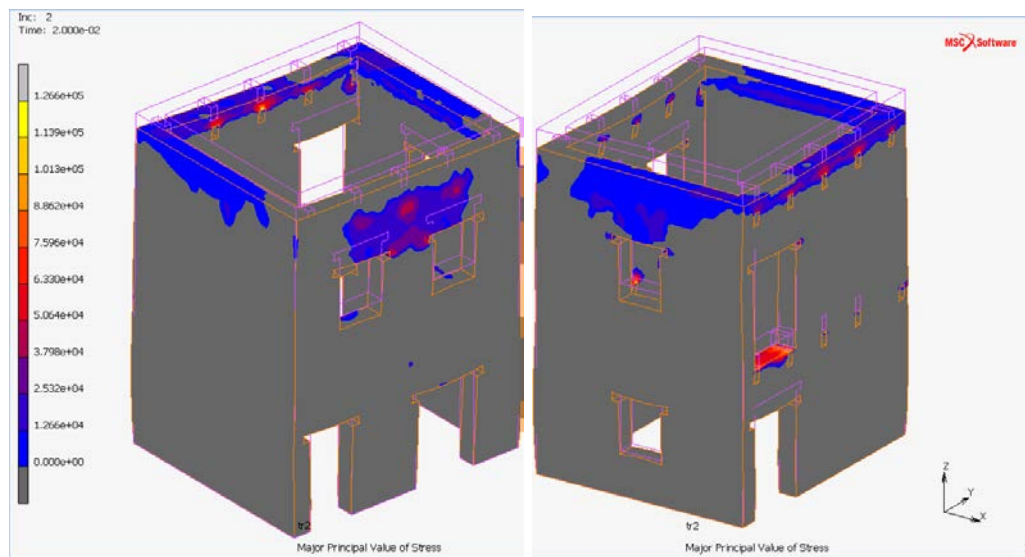
6.6 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗΣ

Στα μοντέλα που ακολουθούν εξετάζονται οι περιοχές που εμφανίζεται εφελκυσμός και οι περιοχές που εμφανίζεται θλίψη .

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν ίδιες ρυθμίσεις στην χρωματική κλίμακα του προγράμματος για το αρχικό, αλλά και για το ενισχυμένο μοντέλο. Αναλυτικά, ο παράγοντας κλιμάκωσης παραμόρφωσης του μοντέλου ορίστηκε στο 450 (deformation scaling factor). Στα στιγμιότυπα που παρουσιάζονται φαίνεται το περίγραμμα του αρχικού μοντέλου και το περίγραμμα του παραμορφωμένου μοντέλου με χρωματικές διαβαθμίσεις, χρησιμοποιώντας 10 χρωματικά επίπεδα απεικόνισης. Για να απεικονιστούν οι περιοχές που εμφανίζεται ο εφελκυσμός και οι περιοχές που εμφανίζεται θλίψη εξετάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου «Επικρατούσας έντασης» (major principal value of stress). Ο χρόνος προσομοίωσης είναι τα 5 second και το χρονικό βήμα είναι 0,01 second, ίδιο με τις διαθέσιμες μετρήσεις. Παρακολουθώντας την προσομοίωση εντοπίστηκε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της έντασης . Απομονώνοντας τις θετικές τιμές προσδιορίζονται οι εφελκυστικές δυνάμεις και αντίστοιχα απομονώνοντας τις αρνητικές τιμές εντοπίζονται οι θλιπτικές δυνάμεις .

Αρχικά θα διερευνηθεί το **μοντέλο χωρίς την ενίσχυση**. Παρακάτω παρουσιάζονται στιγμιότυπα από χαρακτηριστικές στιγμές που εμφανίζονται οι μέγιστες **εφελκυστικές** δυνάμεις και οι μέγιστες **θλιπτικές** δυνάμεις.

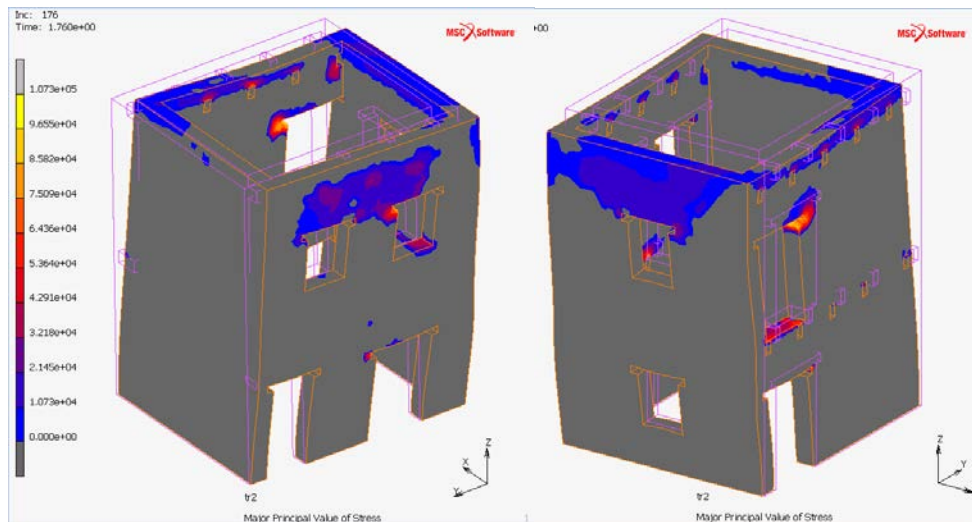
6.6.1. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ



Εικόνα 112. Αποτελέσματα εφελκυσμού για το χρονικό βήμα 0,02 sec.

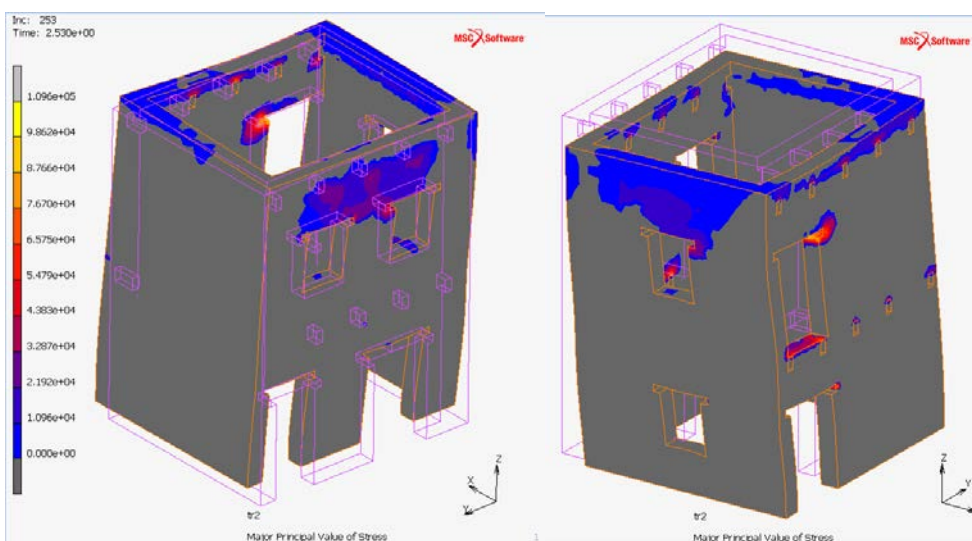
Για το χρονικό βήμα των **0,02 sec**, παρατηρούνται με μπλε χρώμα αποτελέσματα εφελκυσμού στη στέψη του κτιρίου και ανάμεσα στα παράθυρα του πρώτο ορόφου. Οι περιοχές εφελκυσμού γίνονται πιο έντονες γύρω από τα σημεία όπου οι ξύλινες δοκοί διακόπτουν την τοιχοποιία, εμφανίζοντας μεγέθη της τάξεως των 126.600 N. Η περιοχή στην οποία αναπτύσσεται εφελκυσμός αναμενόταν απολύτως, καθώς οι διαφορές των ιδιοτήτων των υλικών (ξύλο – τοιχοποιία) δημιουργούν έναν τύπο ανομοιογένειας στο προσομοίωμα, με τις ξύλινες δοκούς, ως τα πιο ελαστικά στοιχεία της κατασκευής, να συγκεντρώνουν γύρω τους τις μεγαλύτερες θετικές τάσεις. Παράλληλα οι δοκοί που έχουν θεωρηθεί πλήρως πακτωμένοι στην τοιχοποιία παραμορφώνονται δημιουργώντας εντάσεις στα σημεία στήριξής τους.

Το ίδιο εμφανίζεται και στην πρόσθια πλευρά του προσομοιώματος, με επιπρόσθετη εμφάνιση έντονου εφελκυσμού της τάξεως των 12.660 N. στο πρέκι του παραθύρου του Α' Ορόφου. Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις (126.600 N) αναπτύσσονται στην είσοδο του Α' Ορόφου καθώς το πάχος του συγκεκριμένου σημείου είναι πολύ μικρό.



Εικόνα 113. Αποτελέσματα εφελκυσμού για το χρονικό βήμα 1,76 sec.

Ο ίδιος μηχανισμός συμπεριφοράς εμφανίζεται και για το χρονικό βήμα των **1,76 sec**, μόνο που σε αυτή την περίπτωση οι τιμές εφελκυσμού έχουν μειωθεί ελαφρώς σε σχέση με τα 0,02 sec. Εδώ το μέγιστο εμφανίζεται στα 107.300 N .Και εντοπίζεται στα πρέκια και τις γωνίες των ανοιγμάτων καθώς και περιμετρικά των ανοιγμάτων για τις διαμπερείς δοκούς.

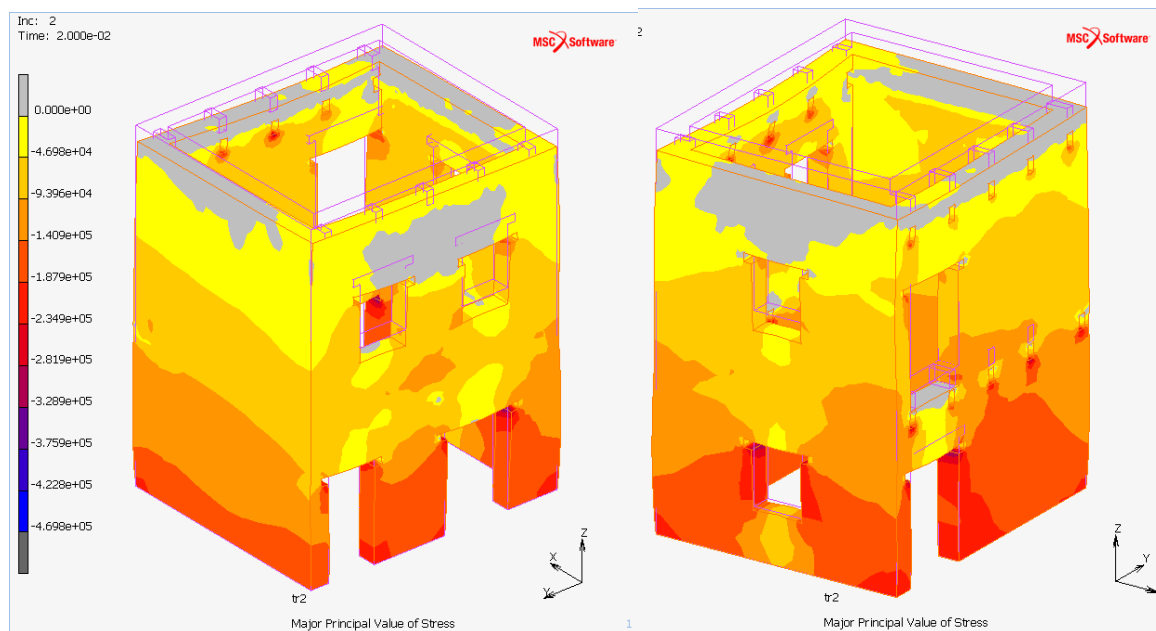


Εικόνα 114. Αποτελέσματα εφελκυσμού για το χρονικό βήμα 2,53 sec.

Στα **2,53 sec** για το αρχικό προσομοίωμα, ο μηχανισμός απόκρισης του κτιρίου παραμένει ακριβώς ο ίδιος, με ελαφρώς αυξημένες τις μέγιστες τιμές εφελκυσμού και συγκεκριμένα στα 109600 N , ενώ τώρα έντονος εφελκυσμός παρουσιάζεται περιορισμένος και στην άνω δεξιά γωνία της πόρτας του ισογείου. Μελετώντας την προσομοίωση στο σύνολο της παρατηρήσαμε

ότι οι εφελκυστικές δυνάμεις αναπτύσσονται σταδιακά στο μοντέλο και οι μέγιστες τιμές του κυμαίνονται στα (81000-85000 N) και σε πιο σπάνια (87000-89000 N).

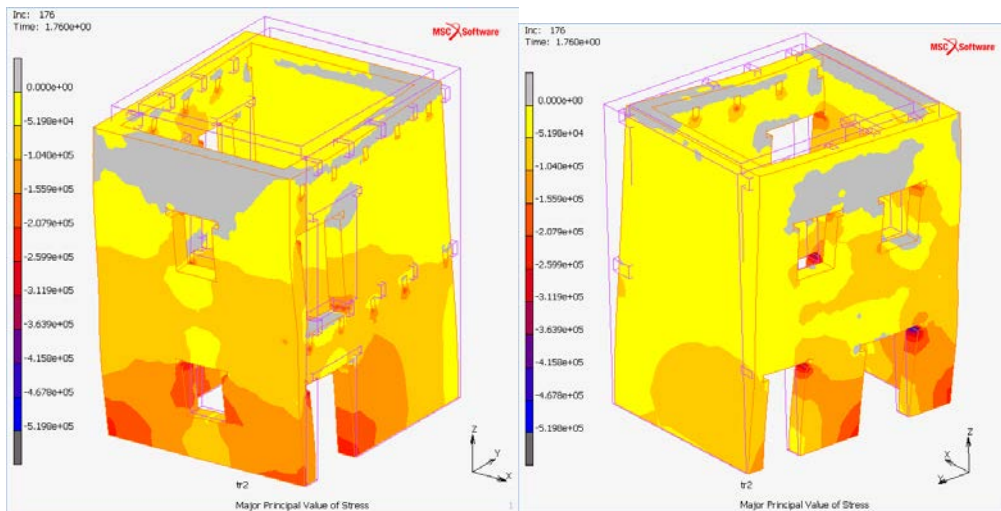
6.6.2. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΘΛΙΨΗΣ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ



Εικόνα 115. Αποτελέσματα θλίψης για το χρονικό βήμα 0,02 sec.

Στα πρώτα **0,02** sec έντονη θλίψη της τάξεως των -328.900 N εμφανίζεται στη βάση του κτιρίου και κυρίως στις γωνίες των ανοιγμάτων, ενώ το φαινόμενο εξασθενεί κατακόρυφα προς τη στέψη του κτιρίου, όπου και η θλίψη εξαλείφεται τελείως. Μάλιστα, οι περιοχές στις οποίες εξαλείφεται η θλίψη είναι οι αντίστοιχες που εμφανίζουν εφελκυσμό για το ίδιο χρονικό βήμα.

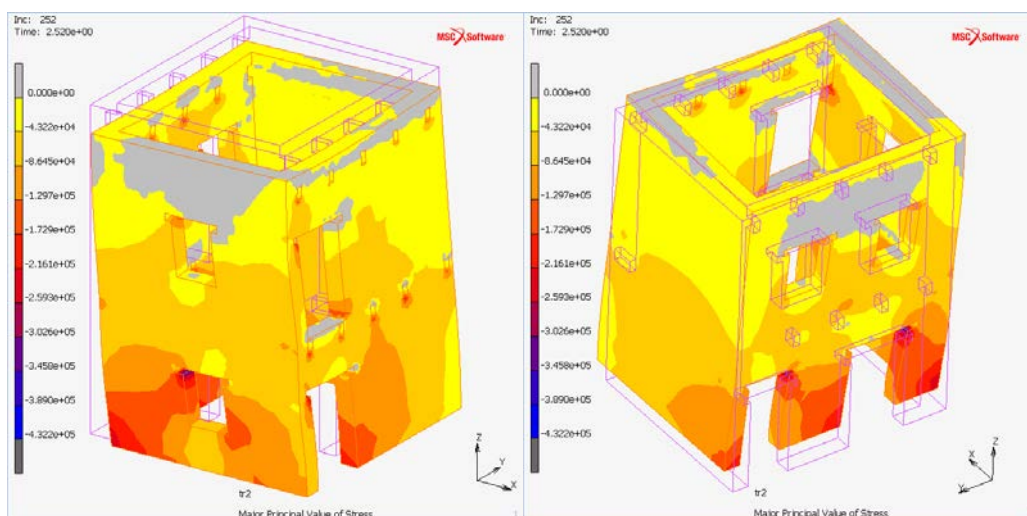
Θλίψη εμφανίζεται και στις πρόσθιες πλευρές, οι οποία επίσης έχει μεγαλύτερες τιμές στη βάση του κτιρίου. Διαγράφεται με τη μορφή τραπεζίου, το οποίο έχει ως άνω βάση το ανώφλι του παραθύρου της αριστερής πλευράς και ως κάτω βάση τη βάση του κτιρίου, με μια εξασθένιση στο κέντρο της. Εξασθένιση εμφανίζεται επίσης και εδώ ανοδικά προς την οροφή του κτιρίου, με τη μορφή τριγώνων στα πλάγια των πλευρών, ακόμα περισσότερο με τη μορφή ρόμβου στο άνω κέντρο της πλευράς, ξανά τριγωνικά εκατέρωθεν του ρόμβου στον Α' Όροφο και εξαφανίζεται τελικώς στη στέψη του προσομοιώματος.



Εικόνα 116. Αποτελέσματα θλίψης για το χρονικό βήμα 1,76 sec.

Ίδια ακριβώς μορφή εμφάνισης της θλίψης σε μικρότερη κλίμακα παρουσιάζονται στην πρόσθια όψη του κτιρίου για το χρονικό βήμα των **1,76 sec**. Επιπλέον φαινόμενο είναι η καθ' ύψος απόκλιση της δεξιάς ακμής του κτιρίου από την κατακόρυφο. Πάντως σε κάθε περίπτωση, οι γωνίες της βάσης του κτιρίου φέρουν τη μεγαλύτερη καταπόνηση σε θλίψη.

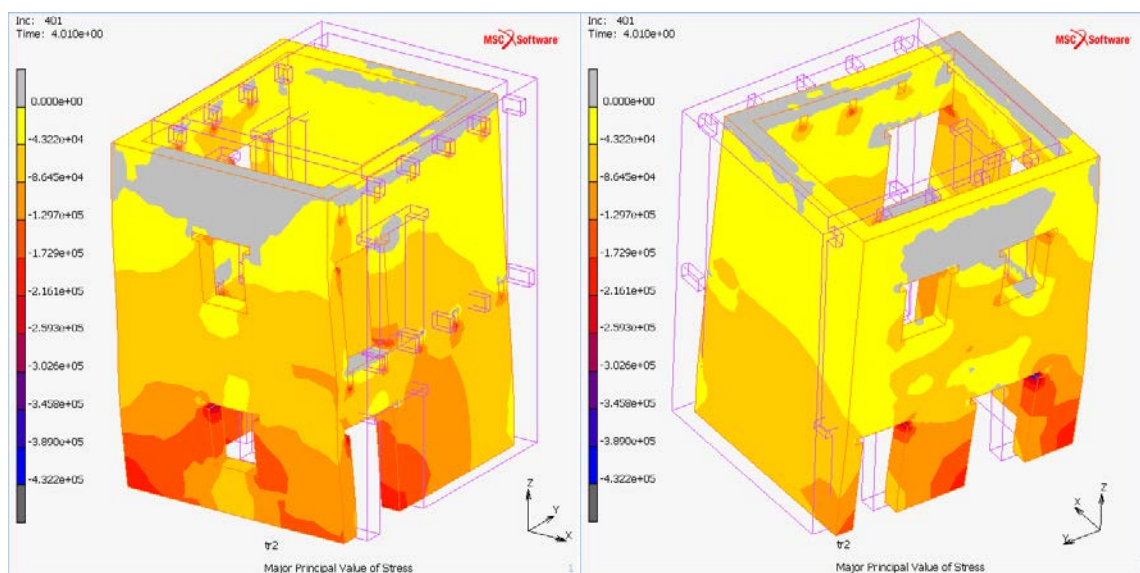
Στην όπισθεν όψη για τα 1,76 sec το κτίριο στην πλειοψηφία του φαίνεται να βρίσκεται υπό θλίψη, με εξαίρεση τις περιοχές γύρω από τις ξύλινες διαμπερείς δοκούς και τη στέψη του κτιρίου, ενώ εξακολουθεί να υφίσταται η απόκλιση της πλευράς καθ' ύψος από την κατακόρυφο. Στο χρονικό βήμα αυτό, εμφανίζονται έντονες περιοχές θλίψης της τάξεως των -3.026 N στις γωνίες αντιδιαμετρικά των τοιχοποιιών ανάμεσα στα ανοίγματα του ισογείου.



Εικόνα 117. Αποτελέσματα θλίψης για το χρονικό βήμα 2,52 sec.

Όμοια εικόνα παρουσιάζεται και στο χρονικό βήμα των **2,52 sec** με αυξημένες τιμές θλίψης στη βάση που εξασθενούν προς τα πάνω, ενώ ιδιαιτέρως καταπονείται η αριστερή γωνία της βάσης, η οποία τώρα φαίνεται να μετακινείται προς το κέντρο της πλευράς δημιουργώντας απόκλιση από την κατακόρυφο, αντίστροφη απ' αυτή που έλαβε χώρα στα 1,76 sec. Αυτό που παραμένει σταθερό κι εδώ και σε όλα τα στιγμιότυπα της θλίψης είναι η εξάλειψη των θλιπτικών τάσεων περίξ των ξύλινων δοκών στη στέψη του κτιρίου.

Σε αντίθεση με την πρόσθια όψη των 2,52 sec, στην όπισθεν όψη παρουσιάζεται απόκλιση και στις δυο άκρες τις κατακόρυφου καθ' ύψος του κτιρίου, ενώ φαίνεται μεγάλη μετακίνηση ολόκληρης της όπισθεν πλευράς κατά την οριζόντιο.

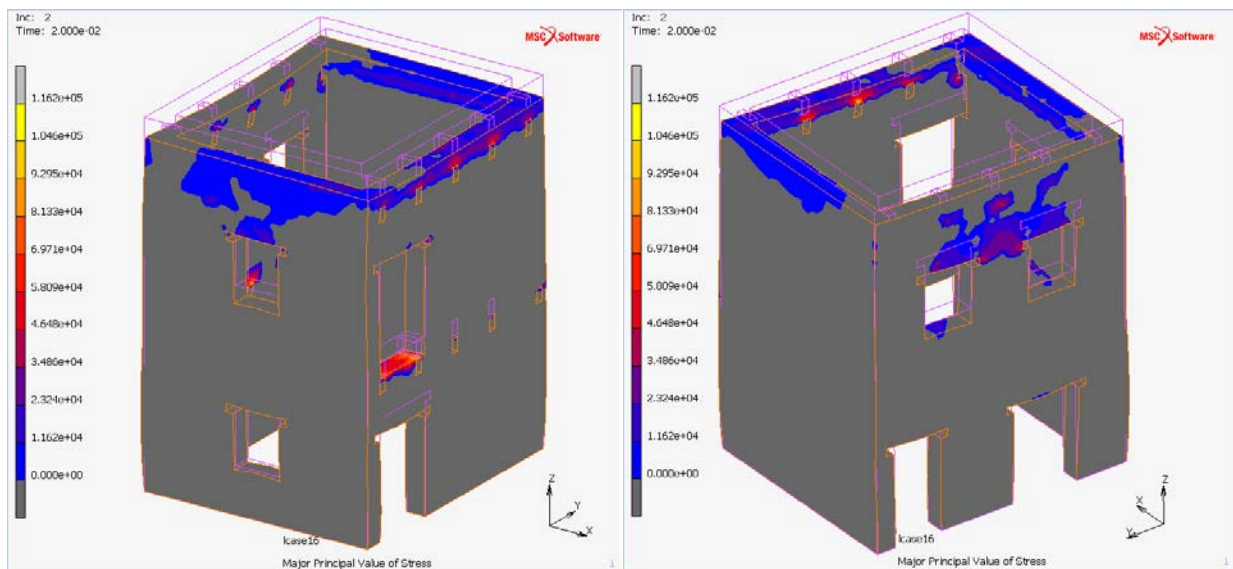


Εικόνα 118. Αποτελέσματα θλίψης για το χρονικό βήμα 4,01 sec.

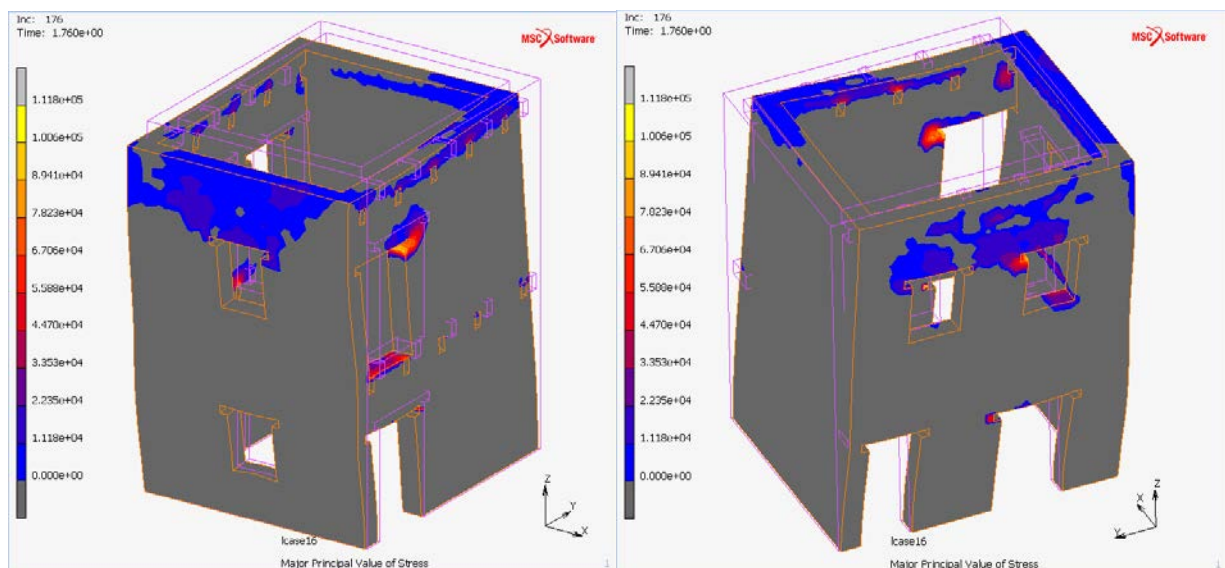
Ίδιες τάξεις θλιπτικών τάσεων με παρόμοιους μηχανισμούς εμφάνισής τους παρουσιάζονται και στο χρονικό βήμα των 4,01 sec. Μετακίνηση εμφανίζεται εδώ και κατακόρυφα αλλά και οριζόντια στις πλευρές του κτιρίου. Καταπονείται και πάλι κυρίως η βάση του κτιρίου και μένει ανεπηρέαστη στη θλίψη η στέψη του προσομοιώματος.

6.6.3. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

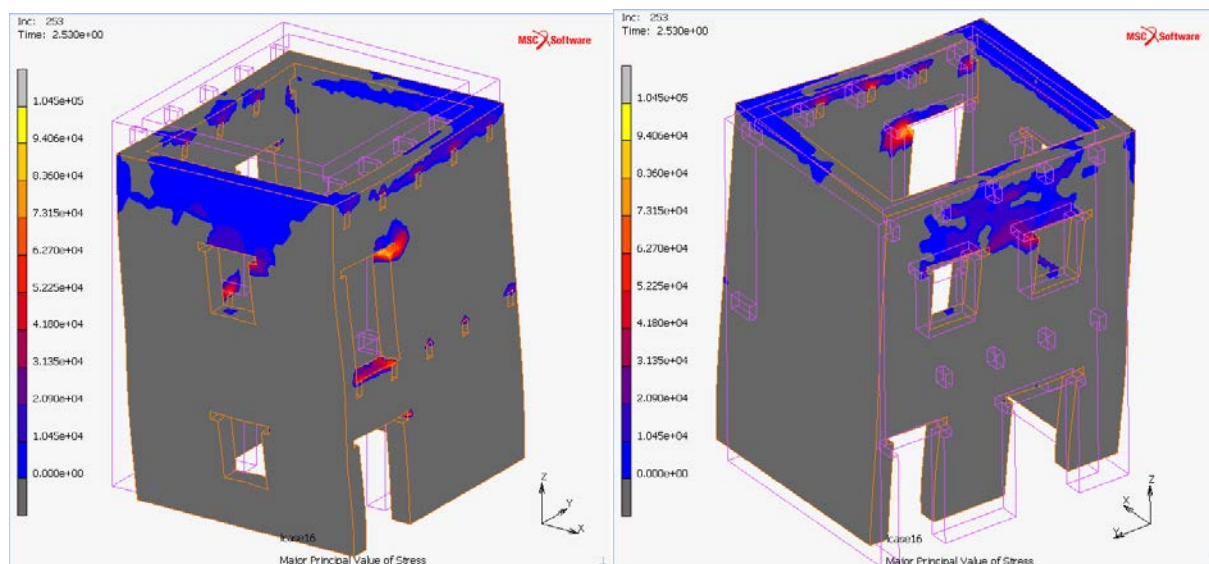
Χάριν σύγκρισης, λήφθηκαν στιγμιότυπα εφελκυσμού και θλίψης για το ενισχυμένο προσομοίωμα στα ίδια χρονικά βήματα με τα στιγμιότυπα του αρχικού μοντέλου, έτσι ώστε να γίνει ευκολότερη η οπτικοποίηση των διαφορών ανάμεσα στα δυο διαφορετικά προσομοιώματα.



Εικόνα 119. Αποτελέσματα εφελκυσμού ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 0,02 sec.



Εικόνα 120. Αποτελέσματα εφελκυσμού ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 1,76 sec.

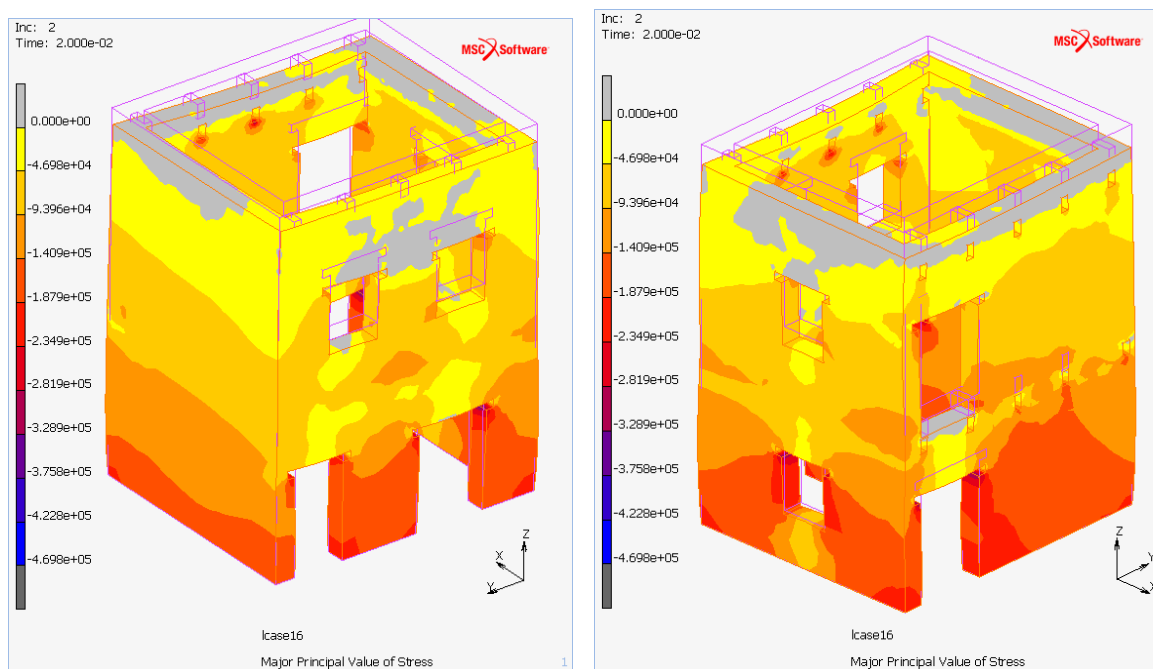


Εικόνα 121. Αποτελέσματα εφελκυσμού ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 2,53 sec.

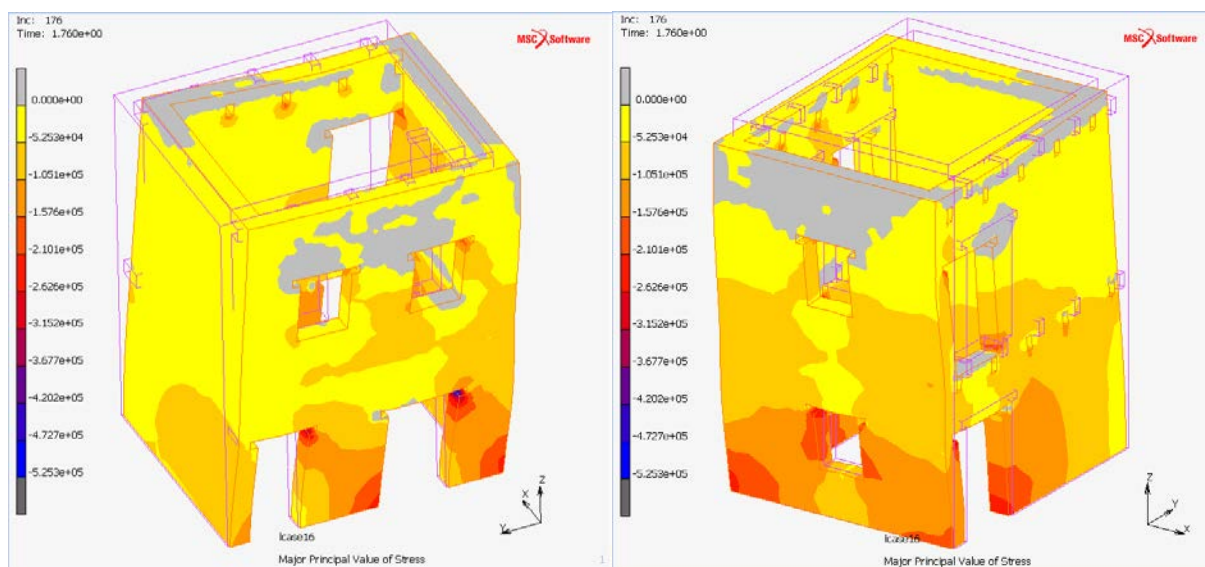
Στις εικόνες 124, 125, 126 γίνεται εμφανές πως ο μηχανισμός ανάπτυξης εφελκυσμού είναι πανομοιότυπος, με ποσοτικές διακυμάνσεις μεγίστων, που κυμαίνονται στα **116200 N** για τα **0,02 sec**, στα **111800 N** για τα **1,76 sec** και στα **104500 N** για τα **2,53 sec**. Εντονότερα φαινόμενα εμφανίζονται στην άνω δεξιά γωνία και το πρέκι του παραθύρου του Α' Ορόφου στην πρόσθια όψη. Η στέψη του κτιρίου εμφανίζει κι εδώ, όπως και στην περίπτωση του μη ενισχυμένου μοντέλου μέτριας τάσης φαινόμενα εφελκυσμού με κάποιες αυξημένες τιμές γύρω από τα ξύλινα δοκάρια της οροφής.

Όσο αυξάνονται τα χρονικά βήματα παρατηρείται και απόκλιση από την αρχική θέση του προσομοιώματος, η οποία γίνεται αντιληπτή στο βήμα 1,76 sec, όπου η στέψη του κτιρίου μετακινείται από την αρχική του θέση και ακόμα εντονότερη στο βήμα 2,53, όπου και η βάση του κτιρίου εμφανίζεται μετακινημένη σε σχέση με το αρχικό περιτύπωμα του κτιρίου.

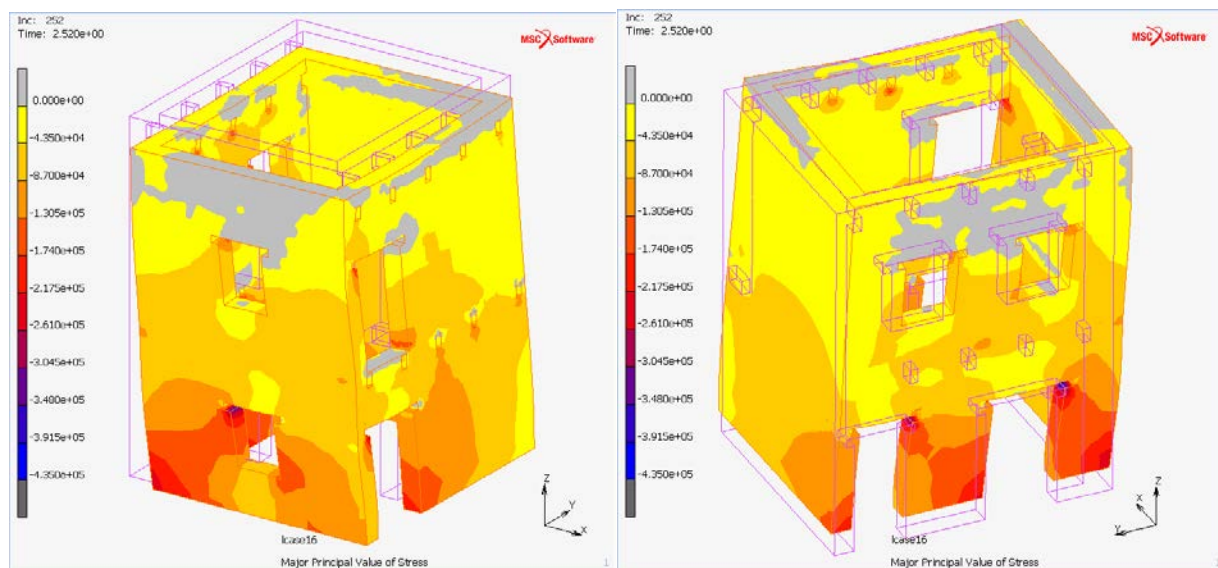
6.6.4. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΘΛΙΨΗΣ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ



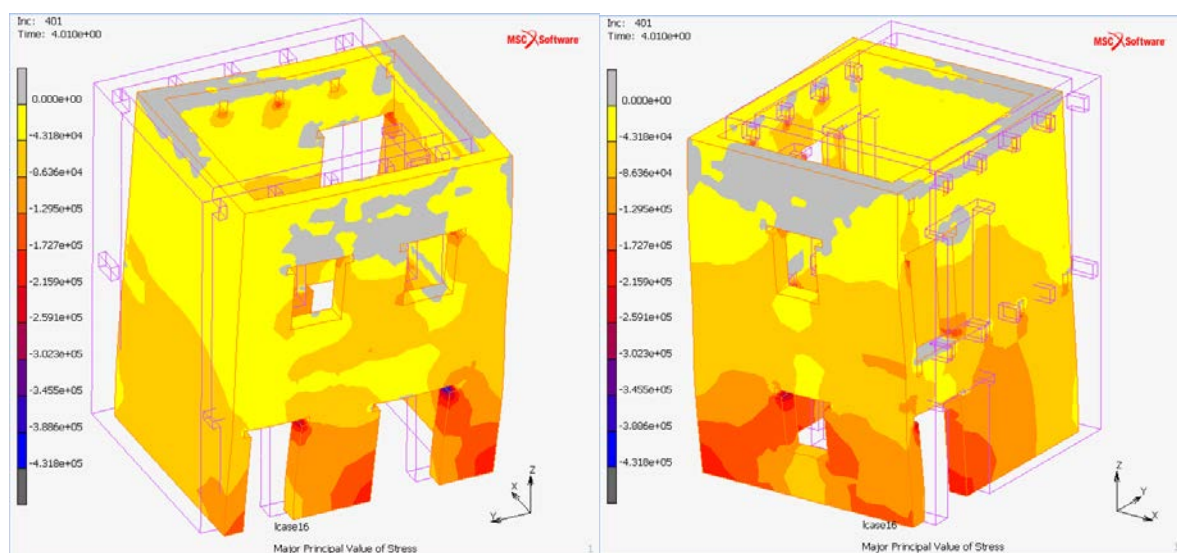
Εικόνα 122. Αποτελέσματα θλίψης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 0,02 sec.



Εικόνα 123. Αποτελέσματα θλίψης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 1,76 sec.



Εικόνα 124. Αποτελέσματα θλίψης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 2,52 sec.



Εικόνα 125. Αποτελέσματα θλίψης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 4,01 sec.

Και στην περίπτωση της θλίψης τα οπτικά αποτελέσματα εντατικοποίησης και εξασθένησης των θλιπτικών φαινομένων εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές. Η βάση και ιδιαιτέρως οι γωνίες των ελεύθερων ακμών της βάσης καταπονούνται σε μεγαλύτερο βαθμό και συγκεκριμένα κυμαίνεται στα **-525300 N** για τα **1,76 sec**, στα **-435000 N** για τα **2,52 sec** και στα **-431800 N** για τα **4,01 sec**. Τα φαινόμενα εξασθενούν καθ' ύψος, ενώ εξαλείφονται τελείως στις περιοχές που υπήρχε σχηματική εμφάνιση των φαινομένων εφελκυσμού.

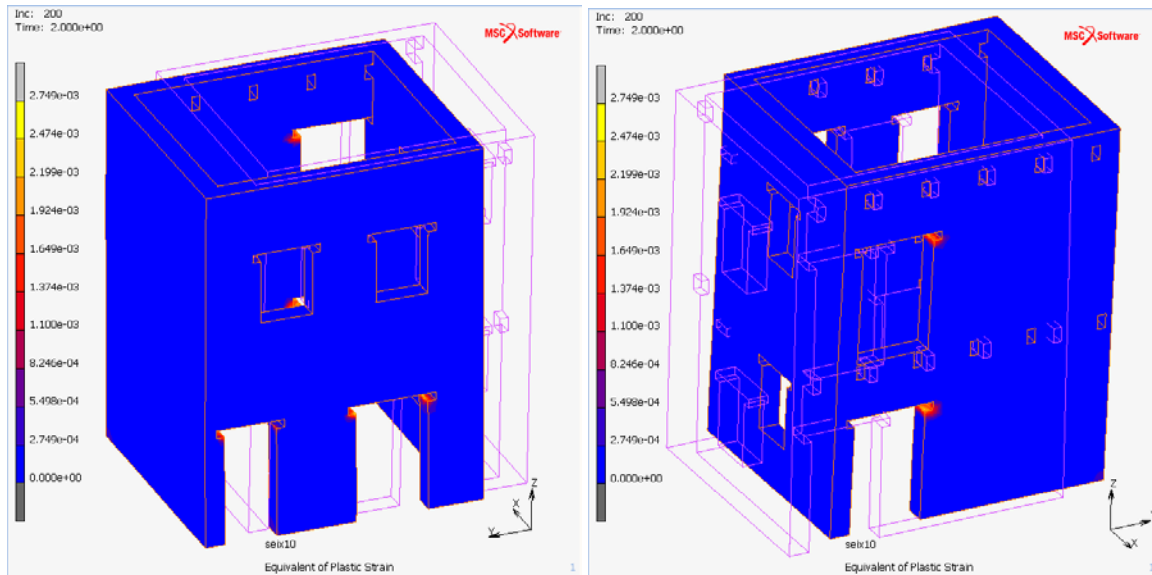
6.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η χρονοϊστορία του σεισμού που χρησιμοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα της Ιταλίας και χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία είχε υποστεί επεξεργασία, με αποτέλεσμα να μην μπορεί το πρόγραμμα να πραγματοποιήσει διπλή ολοκλήρωση σωστά. Πιο συγκεκριμένα, μετά την ολοκλήρωση προέκυπτε μια καμπύλη με ανοδική πορεία αλλόκοτης μορφής. Έπειτα από δική μας επέμβαση εξήχθη το διάνυσμα της μετατόπισης για το κάθε χρονικό βηματισμό (0.01s). Δημιουργήθηκε ένα καινούριο αρχείο με επεξεργασμένες μετρήσεις, το οποίο εισήχθη στο πρόγραμμα σαν πίνακας (table) και μετά από διπλή ολοκλήρωση προέκυψε το γράφημα του σεισμού με αρμονική μορφή, χωρίς απότομες διακυμάνσεις.

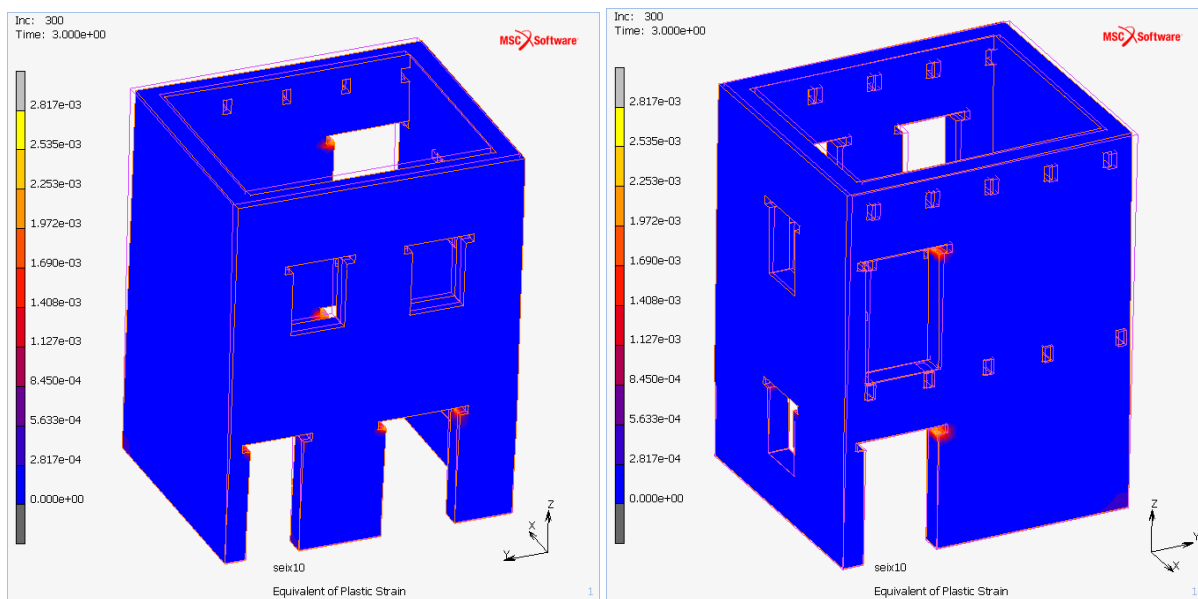
Ωστόσο, πλαστική παραμόρφωση η οποία αναμενόταν, να φανεί σε στοιχεία της κατασκευής δεν εμφανίστηκε. Αιτία γι' αυτό είναι η μειωμένη κλίμακα έντασης με την οποία εφαρμόστηκε η σεισμική δόνηση στην κατασκευή. Υπενθυμίζεται ότι, εφαρμόστηκε μειωμένη η ένταση λόγω του μειωμένου μεγέθους του προσομοιώματος, Αυτό δεν ήταν ικανό να προκαλέσει πλαστικές παραμορφώσεις στο φορέα, οπότε πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές με δεκαπλάσια ένταση, ώστε να επιβεβαιωθεί η θεώρηση αυτή.

Η πλαστική παραμόρφωση (Normal Plastic Strain) προκύπτει στο πρόγραμμα MARC με την εισαγωγή του ελαστοπλαστικού νόμου υλικού και συγκεκριμένα Parabolic Mohr Coulomb και την χρήση έξι κριτηρίων αστοχίας (Μέγιστη Εφελκυστική και Θλιπτική αντοχή για τους άξονες (x-y-z)), τα οποία υποδεικνύουν σε ποια διεύθυνση εμφανίζεται μεγαλύτερος εφελκυσμός και σε ποια θλίψη. Η αξιολόγηση των τάσεων που προκύπτουν γίνεται με τα εν λόγω κριτήρια και συγκεκριμένα με τον λόγο των υπολογισθέντων τάσεων προς την τιμή του εκάστοτε κριτηρίου, που σχετίζεται με τα όρια του υλικού. Λόγος μεγαλύτερος της μονάδας υποδεικνύει υπέρβαση των τάσεων, η οποία απεικονίζεται και χρωματικά στα στιγμιότυπα από το πρόγραμμα.

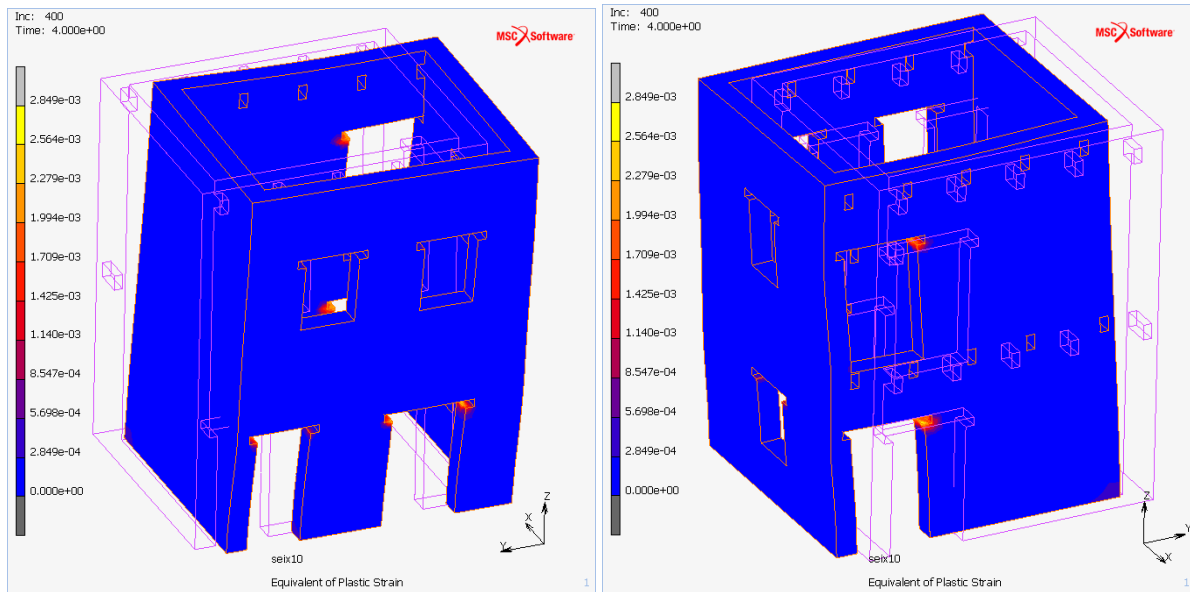
6.7.1. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΗ ΔΕΚΑΠΛΑΣΙΑ ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ



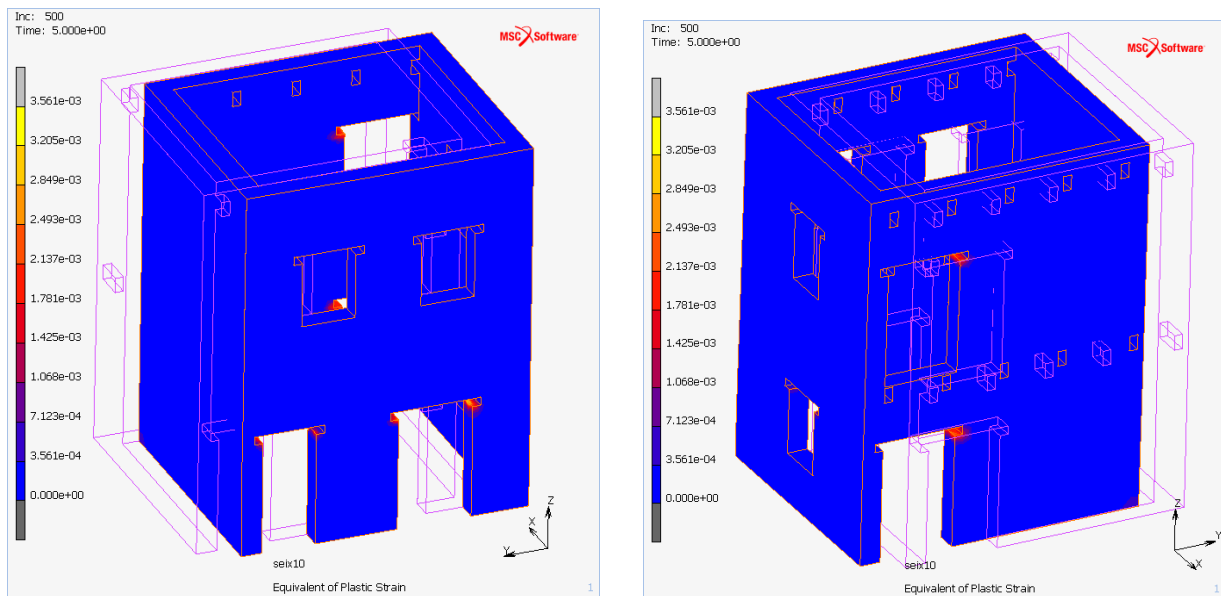
Εικόνα 126. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης αρχικού μοντέλου για το χρονικό βήμα 200 sec.



Εικόνα 127. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης αρχικού μοντέλου για το χρονικό βήμα 300 sec.



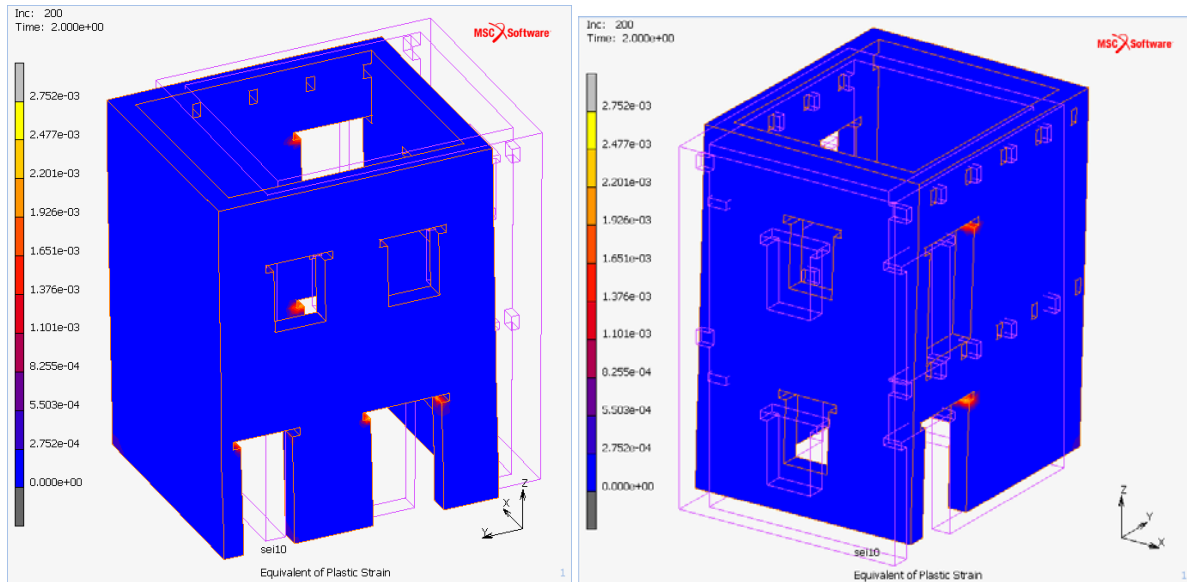
Εικόνα 128. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης αρχικού μοντέλου για το χρονικό βήμα 400 sec.



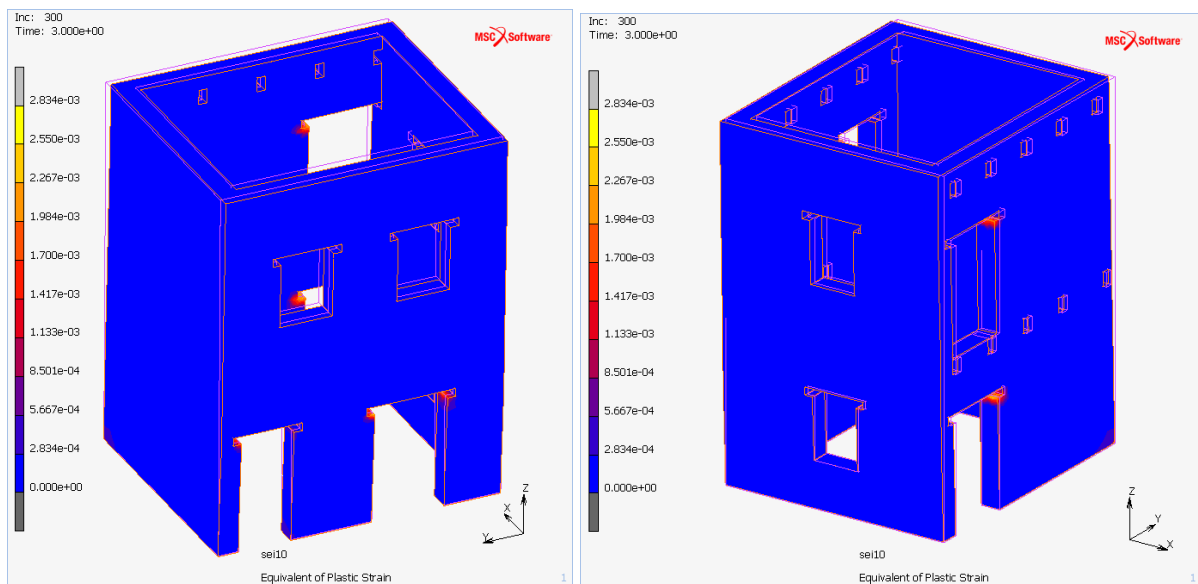
Εικόνα 129. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης αρχικού μοντέλου για το χρονικό βήμα (500 5sec).

Όπως γίνεται σαφές από τις εικόνες, ακόμα και για τη δεκαπλάσια ένταση σεισμού, το μοντέλο δεν ανέπτυξε πλαστική παραμόρφωση, παραμόνο στις γωνίες των ανοιγμάτων, όπου παρουσιάζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώνο και τιμή στα **0,002749 N** από το χρονικό βήμα **200**, μέχρι τα **0,003561 N**. Στο χρονικό βήμα **500**. Αυτό που είναι έντονα αντιληπτό είναι οι μετακινήσεις και στους τρεις άξονες $x - y - z$ από την αρχική θέση του προσομοιώματος.

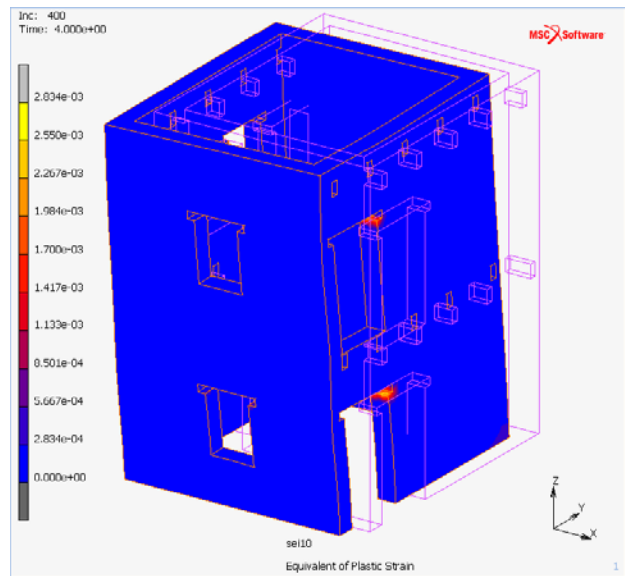
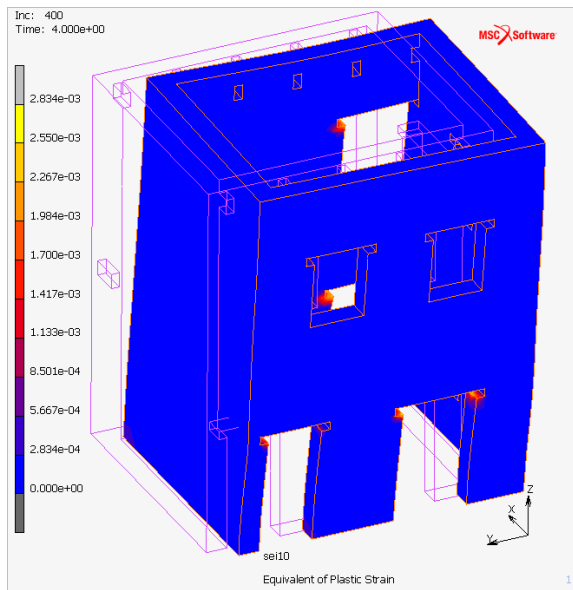
6.7.2. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΗ ΔΕΚΑΠΛΑΣΙΑ ΕΝΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ



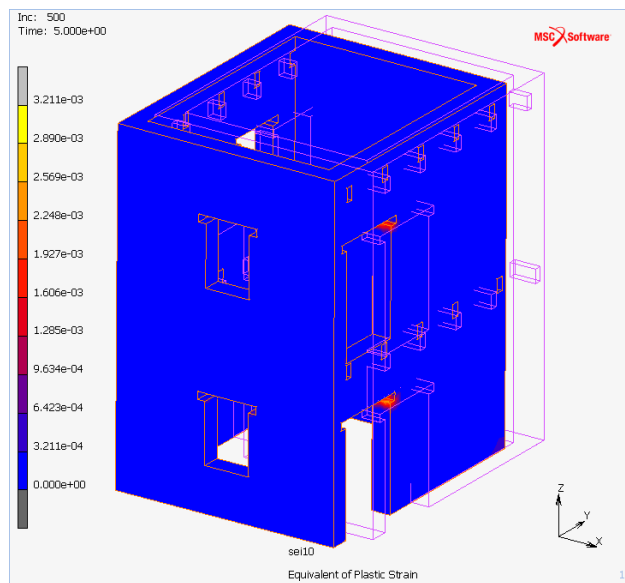
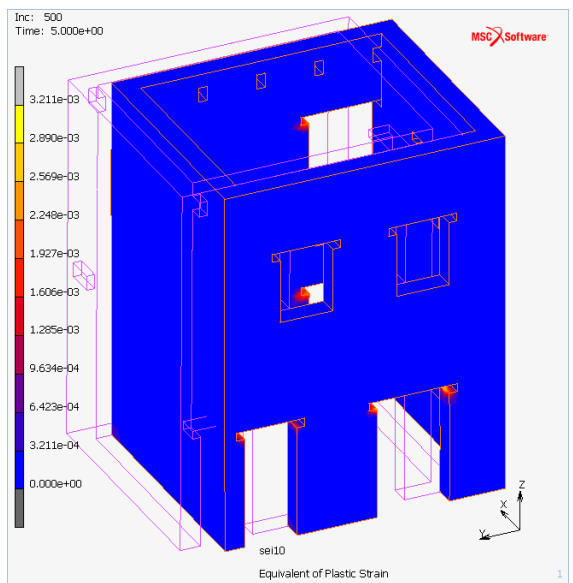
Εικόνα 130. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό θήμα 200 (2sec).



Εικόνα 131. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό θήμα 300 (3sec).



Εικόνα 132. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 400 (4sec).



Εικόνα 133. Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης ενισχυμένου μοντέλου για το χρονικό βήμα 500 (5sec).

Μελέτη των εικόνων του ενισχυμένου προσομοιώματος για την επαυξημένη ένταση σεισμού δείχνουν κι εδώ επίσης ότι, το μοντέλο δεν ανέπτυξε πλαστική παραμόρφωση, παραμόνο στις γωνίες των ανοιγμάτων, όπου παρουσιάζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα και τιμή στα **0,002753 N** από το χρονικό βήμα 200, μέχρι τα **0,003211 N**. Τελικά παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι ελαφρώς διαφοροποιημένες από το μη ενισχυμένο μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Κατόπιν επεξεργασίας και σύγκρισης των αποτελεσμάτων που δίνουν τα διαφορετικά είδη επιλύσεων εξάγονται δεδομένα τα οποία, συνδυαστικά με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και προγενέστερα πειράματα, μπορούν να δώσουν αξιόπιστα συμπεράσματα για της συμπεριφορά των FRP στην ενίσχυση των κατασκευών, αλλά και τη συμπεριφορά των ίδιων των ενισχυμένων κατασκευών, από τη φάση της αποκατάστασής τους κι έπειτα.

Το άρθρο αναφοράς (Michele Betti, 2014) σε πολλά σημεία ήταν πολύ περιληπτικό και οι πληροφορίες δεν ήταν επαρκείς και σαφείς για τις ανάγκες της εργασίας . Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια των υπολογισμών των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας χρειάστηκε να αλλαχθεί η συνοχή (cohesion c) για να προκύψουν ορθά αποτελέσματα από τους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον, για το ξύλο χρειάστηκε να αντληθούν τα δεδομένα των μηχανικών τους χαρακτηριστικών από παλαιότερη εργασία της ίδιας ερευνητικής ομάδας.

Η διακριτοποίηση των επιμέρους όγκων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων σε μορφή τριγωνικού πλέγματος. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε αυτόματα η δημιουργία του πλέγματος και ο συντελεστής της πυκνότητας της διακριτοποίησης διαφέρει στους επιμέρους όγκους καθώς επηρεάζεται από τις διαστάσεις και τις ιδιότητες του κάθε υλικού, καταλήγοντας εν τέλει να έχει 117.772 στοιχεία (elements) και 35.418 κόμβους (nodes). Επισημαίνεται κι εδώ ότι η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα των κόμβων του πλέγματος και αντίστοιχα ένα πιο πυκνό πλέγμα αυξάνει το υπολογιστικό κόστος και την διάρκεια της ανάλυσης (αυξάνεται το σύνολο των αριθμητικών εξισώσεων).

Η πρώτη επιβεβαίωση, ότι το μοντέλο προσομοίωσης ανταποκρίθηκε στην πραγματικότητα και κατ' επέκταση ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν σωστή, είναι οι περιοχές στις οποίες εμφανίζεται εφελκυσμός. Πιο συγκεκριμένα, ο εφελκυσμός που εμφανίζεται είναι μέσα στις κύριες τάσεις και στις περιοχές που αναμενόταν λόγω της διαφορετικότητας των ιδιοτήτων των υλικών, όπως στα ξύλινα πρέκια, ανάμεσα στ' ανοίγματα, τα χιαστί, τα

διαγώνια, τις γωνίες, δηλαδή σημεία που αναμένονταν αστοχίες, παρομοίως με τ' αποτελέσματα του μοντέλου αναφοράς.

Επιτεύχθηκε ταυτοποίηση του μοντέλου με τις πειραματικές και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών από τους ερευνητές επομένως τ αποτελέσματα μας είναι συγκρίσιμα με το μοντέλο αναφοράς.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλύσεων του αρχικού προσομοιώματος και του ενισχυμένου εμφανίζουν μικρές διαφορές με ευνοϊκότερες τις τιμές του μοντέλων με FRP. Αυτό συμβαίνει καθώς η εν λόγω μέθοδος αποκατάστασης κι ενίσχυσης των κατασκευών αποτελεί έναν ήπιο, μη παρεμβατικό τρόπο θωράκισής τους ενάντια στα σεισμικά φορτία, καθώς παρουσιάζουν υψηλό λόγο αντοχής και δυσκαμψίας προς τη μάζα. Χαρακτηρίζεται μη παρεμβατική μέθοδος καθώς η τοποθέτησή τους δεν επιφέρει μεγάλη αύξηση της μάζας της φέρουσας κατασκευής και δεν αλλοιώνει τη γεωμετρία του κτιρίου.

Η επιλογή του μικρού πλάτους λωρίδων ήταν στην παρούσα περίπτωση ιδανική, καθώς περιόρισε τις επιζήμιες εφελκυστικές τάσεις, χωρίς να επιφέρει αύξηση των θλιπτικών τάσεων στα σημεία εφαρμογής τους ή εμφάνιση θλίψης σε σημεία που κανονικά δεν θα αναμενόταν.

Η δεύτερη επιβεβαίωση, ότι το μοντέλο προσομοίωσης λειτούργησε σωστά, σύμφωνα με το φάσμα σεισμού που εισήχθη, είναι η μορφή των γραφημάτων της συνισταμένης μετατόπισης. Σε αυτά παρατηρείται ότι οι τιμές μετατόπισης των υπό εξέταση κόμβων ταυτίζεται με τις τιμές μετατόπισης του φάσματος του σεισμού.

Η εύρεση, ωστόσο, των δεδομένων του σεισμού Colfiorito ήταν δύσκολη, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα διαδικτυακά ή σε κάποια επίσημη βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμη η επικοινωνία με την αρχική ερευνητική ομάδα των Michele Betti, Luciano Galano και Andrea Vignoli, η οποία παρείχε τα σχετικά δεδομένα. Φυσικά, δεν είναι ο μόνος σεισμός που παρουσιάζει ενδιαφέρον, αλλά θεωρήθηκε σημαντικό να εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία, καθώς οι προγενέστεροι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο αναφοράς εκτελέστηκαν με συνθήκες ταλάντωσης του συγκεκριμένου σεισμού κι έτσι προκύπτουν συγκρίσιμα αποτελέσματα. Επιπλέον, οι προδιαγραφές κατασκευής του προσομοιώματος συνάδουν με τις προδιαγραφές κατασκευών που διέπουν την περιοχή εκδήλωσης του σεισμού, η οποία βρίσκεται ιστορικών μνημείων και παλαιών κτισμάτων από φέρουσα λιθοδομή.

Ήταν, λοιπόν, πολύ ενδιαφέρον να μελετηθεί ένα αντίστοιχο προσομοίωμα σε πραγματικές συνθήκες δόνησης.

Για την αποκόμιση σφαιρικότερων, πληρέστερων αποτελεσμάτων, μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με διαφοροποιημένους παράγοντες όπως τον τύπο, τη θέση και το μέγεθος των FRP. Διαφοροποιήσεις θα μπορούσαν να ενταχθούν στη μελέτη με την επιλογή διαφορετικών σεισμών που έχουν εκδηλωθεί στην Ιταλία, αλλά και σε άλλες χώρες που παρουσιάζουν πλούτο λιθόκτιστων κατασκευών. Τέλος, ένα καλό μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είναι η αλλαγή των κριτηρίων αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αναπτυσσόμενων τάσεων, έτσι ώστε να προκύψει η ιδανικότερη αναλογία συμμετοχής των FRP στην κατασκευή, ώστε να προσφέρει τα βέλτιστα επιθυμητά αποτελέσματα με τις λιγότερες αρνητικές παράπλευρες επιδράσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agarwal, B. D. (1990, January). Analysis and Performance of Fiber Composites. *Journal of Engineering Sector of Engineering Colleges - Al-Azhar University*(15).
- Ahmed El-Gendy, T. S. (2018, October). Experimental Investigation of Unreinforced Masonry Walls with Openings Strengthened by Different Techniques. *Al-Azhar university civil engineering Research Magazine (CERM)*, 4(40).
- Arduini, & Nanni. (1997). Behaviour of Pre-cracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets. 1(2).
- Charalambides, P., & Evans, A. (1989). Debonding Properties of residually Stressed Brittle-Matrix Composites. *J. of the American Ceramic Society*, 72.
- Chopra, A. K. (2010). *Δυναμική των κατασκευών* (Τρίτη εκδ.). California: Γκιούρδας Μ.
- Daniel, I., Anastassopoulos, G., & Lee, J. (1992). Failure Mechanisms and Interfacial Shear Strength in Brittle-Matrix composites. *Advances in Experimental Mechanics and Biomimetics (Edited by W.F. Jones and J.M. Whitney)*, 29.
- Galano L, V. A. (2001). Resistenza a taglio di murature di pietrame: analisi comparata della rappresentatività di tipiche prove di taglio in situ”. Genoa-Italy. Ανάκτηση January 2004
- Garbin, E., Galati, N., Nanni, A., Modena, C., Valluzzi, M.R. (2007). Provisional design guidelines for the strengthening of masonry structures subjected to in-plane loading. USA.
- Gdoutos, E., Giannakopoulou, A., & Zacharopoulos, D. (1999). Stress and Failure analysis of Brittle Matrix Composites, Part II: Failure analysis. *International J. of Fracture*, 98.
- Hatzinikolas, M., & Korany, Y. (2005). *Masonry Design for Engineers and Architects*. Canadian Masonry Publications.
- Heiza, K., Nabil, A., & Meleka, N. (2014). *State-of-the Art Review: Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques*.

Hernan Santa-Maria, P. A. (2011, March). Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP. *Construction and Building Materials*, 3(25), σσ. 1172-1180.

[http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Reviewe. \(χ.χ.\).](http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Reviewe. (χ.χ.).)

[http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Reviewe. \(χ.χ.\).](http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Reviewe. (χ.χ.).) Ανάκτηση από http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Reviewe.

Lekkas. (2000). Influence of local soil conditions on intensity distribution in Cesi (Italy) during the Umbria earthquakes (September 1997. *Influence of local soil conditions on intensity distribution in Cesi (Italy) during the Umbria earthquakes (September 1997*. Thessaloniki.

Luh, E., & Evans, A. (1978). High-Temperature Mechanical Properties of a Ceramic Matrix Composite. *J. of the American Ceramic Society*, 70.

Marshall, D., Cox, N., & Evans, A. (1985). The Mechanics of Matrix Cracking in Brittle-. *Acta Metallurgica*, 11.

Michele Betti, L. G. (2014). Comparative analysis on the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings with flexible diaphragms. *Engineering Structures*(61), σσ. 195-208.

Mojca Jarc Simonič, S. G. (2014). Testing and analysis of walls strengthened with FRP. *Gradevinar-Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*.

Myers, J. (2011). 9th Australasian Masonry Conference. *Strengthening unreinforced masonry structures using externally bonded fiber reinforced polymer systems*. New Zealand.

Prota, A. M. (2008). Assessment of Design Formulas for In-Plane FRP Strengthening of Masonry Walls,. 12(6).

Strang, G. (1988). *Linear algebra and its applications*. Brooks/Cole.

- Triantafillou, T. (1998). Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy- Bonded FRP Laminates, *Journal of Composites for Construction*. 2(22).
- Wang, Q. C. (2006, November). Seismic shear capacity of brick masonry wall reinforced by GFRP. *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)*(7), σσ. 563-580.
- Zacharopoulos, D. (2004). Stability Analysis of Crack Path using the Strain Energy Density Theory. *J. of Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 41.
- Zacharopoulos, Z. (1998). Fracture Instability of Reinforced Panel with Cracks Emanating from Hole. *J. of Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 29.
- Zhuge, Y. (2010, December). FRP-Retrofitted URM Walls under In-Plane Shear Review and Assessment of Available Models. *Journal of Composites for Construction*(14).
- Αντωνιάς, Μ. (2016). ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΩΝ - ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Γεωργίου, Λ. (2007). ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ, ΓΙΑ ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ. Πολυτεχνείο Πατρών.
- Νοβίδης, Δ. (2008). Σχεδιασμός Ενισχύσεων - Επισκευών Στοιχείων Ο/Σ με Επικόλληση Σύνθετων Ινοπλισμένων Πολυμερικών Οπλισμών (ΙΟΠ) σε Επιφανειακές Εγκοπές. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (ΔΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος.
- Οικονομάκη, Χ. (2016). Ενισχύσεις κατασκευών με σύνθετα υλικά (πρόγραμμα FRPs). Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Παπανικολάου, Γ., & Μουζάκης, Δ. (2007). Σύνθετα υλικά. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Σταθόπουλος, Θ. (2009). Αντισεισμικές ενισχύσεις με σύνθετα υλικά. Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων ΤΕΙ Πειραιά.
- Τριανταφύλλου, Α. (2013). Δομικά Υλικά. Εκδόσεις: Τριανταφύλλου Αθανάσιος.

