



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

---

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
"Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών  
και Αειφόρος Ανάπτυξη"

του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σεισμική συμπεριφορά κτιρίου από ΩΣ με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένου με ινοπλισμένα  
πολυμερή»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή:

**Δημήτριος Καρόπουλος (Α.Μ. 92)**

Επιβλέπων καθηγητής:

**Χρήστος Γιαρλέλης**

---

**Αθήνα, Μάρτιος 2021**

Copyright © Καρόπουλος Δημήτριος, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς πολυώροφης κατασκευής από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα η οποία έχει ενισχυθεί με Ινοπλισμένα Πολυμερή. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επάρκειά της πριν την ενίσχυση και ακολούθως διαμορφώνεται ένα σενάριο επέμβασης με Ινοπλισμένα Πολυμερή, προκειμένου να βελτιωθεί η συνολική στάθμη επιτελεστικότητας του δομήματος. Η ανάλυση Pushover της κατασκευής πριν και μετά την επέμβαση γίνεται με τη χρήση του ακαδημαϊκού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Etabs. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων κατέδειξαν ότι ναι μεν υπήρξε μετά την ενίσχυση μια σχετική βελτίωση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής, ωστόσο διαπιστώνεται ότι θα πρέπει η εφαρμογή των Ινοπλισμένων Πολυμερών πρέπει να γίνεται στοχευμένα στα ευπαθή μέλη του κτηρίου (δοκοί ή υποστυλώματα) προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερα δυναμικά χαρακτηριστικά αλλά και εξοικονόμηση χρημάτων.

## **ABSTRACT**

The purpose of this master thesis is to investigate the seismic behavior of multi-storey reinforced concrete construction which has been reinforced with Fiber Reinforced Polymers. Specifically, its adequacy is examined before reinforcement and then a scenario of intervention with Fibers is developed in order to improve the overall level of performance of the structure. Pushover analysis of the structure before and after surgery is performed using the Etabs finite element academic software. The results of the analyzes showed that although there was a relative improvement in the seismic response of the structure after the reinforcement, it is found that the application of Reinforced Polymers should be targeted at the vulnerable members of the building (beams or columns) in order to achieve better dynamics. features but also save money.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σεισμική συμπεριφορά κτιρίου από ΩΣ με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένου με ινοπλισμένα πολυμερή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT .....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες .....	12
1.2.Συστατικά των σύνθετων .....	13
1.2.1.Ίνες.....	13
1.2.2.Άνθρακας .....	13
1.2.3.Γυαλί.....	14
1.2.4. Aramid.....	14
1.3.Μήτρες .....	15
1.4.Ενίσχυση συστημάτων .....	15
1.4.1.Γενικές αρχές αποκατάστασης .....	15
1.4.2.Συστήματα ενίσχυσης FRP.....	18
1.4.2.1.Συστήματα φύλλων .....	19
1.4.2.2.Συστήματα πλακών .....	20
1.4.2.3.Συστήματα NSMR .....	20
1.5.Μορφές αστοχίας μελών ενισχυμένων με FRP .....	21
1.5.1. Αστοχία των ινών FRP .....	21
1.5.2.Αστοχία στην αγκύρωση.....	22
1.6. Σκοπός της εργασίας.....	23
1.7. Διατάξεις τοιχοπληρώσεων που επηρεάζουν δυσμενώς την απόκριση του φορέα. ..	24

1.8. Ανομοιόμορφη κατανομή των τοιχοπληρώσεων καθ' ύψος .....	24
1.9 Ασύμμετρη διάταξη των τοιχοπληρώσεων σε κάτοψη.....	26
1.10. Διακοπή τοιχοπληρώσεων καθ' ύψος εντός του ορόφου .....	26
1.11. Μηχανισμοί αστοχίας τοιχοπληρωμένων πλαισίων .....	27
Μηχανισμός αστοχίας (Α):.....	29
Μηχανισμός αστοχίας (Β): .....	29
Μηχανισμός αστοχίας (C):.....	29
Μηχανισμός αστοχίας (D):.....	29
Μηχανισμός αστοχίας (E):.....	29
1.12. Περιγραφή του περιεχομένου των κεφαλαίων της εργασίας.....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ .....</b>	<b>31</b>
2.1. Γεωμετρία κτηρίου και παραδοχές.....	31
2.2.Ορισμός των διατομών των δομικών στοιχείων της κατασκευής.....	34
2.3.Ενισχυμένες διατομές κτηρίου με σύνθετα υλικά .....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>39</b>
3.1. Γενικά .....	39
3.2.Κτήριο χωρίς τοιχοπληρώσεις .....	39
3.3. Κτήριο με τοιχοπληρώσεις.....	47
3.4.Κτήριο με ύπαρξη pilotis.....	55
3.5.Συγκριτική αξιολόγηση 3 σεναρίων ενίσχυσης με FRP.....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>66</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>67</b>

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 1: FRP που χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις κτηρίων .....	13
Εικόνα 2: Ιδιότητες διαφορετικών ινών και τυπικού ενισχυτικού χάλυβα.....	14
Εικόνα 3: Απεικόνιση διαφόρων μεθόδων αποκατάστασης δοκών (Triantafillou and Plevris, 1992).....	18
Εικόνα 4: Συστήματα ενίσχυσης FRP που εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία. Προσαρμόστηκε από το Täljsten (2006) .....	19
Εικόνα 5: Μορφές διατμητικής αστοχίας μέλους ενισχυμένο με FRP Täljsten (2006).....	21
Εικόνα 6: Μορφές διατμητικής ενίσχυσης δοκού με χρήση FRP (Täljsten (2006)).....	23
Εικόνα 7: Γεωμετρία κτηρίου χωρίς τοιχοπληρώσεις .....	32
Εικόνα 8: Γεωμετρία κτηρίου με τοιχοπληρώσεις.....	33
Εικόνα 9: Γεωμετρία κτηρίου με τοιχοπληρώσεις και ισόγειο pilotis.....	33
Εικόνα 10: Ορισμός υλικού ενίσχυσης FRP ανθρακονημάτων στο Etabs.....	37
Εικόνα 11: Εφαρμογή FRP ανθρακονήματος πάχους 2mm περιμετρικά των διατομών υποστυλωμάτων .....	37
Εικόνα 12: Λεπτομέρεια εφαρμογής FRP στην περίμετρο της διατομής των υποστυλωμάτων .....	38
Εικόνα 13: 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις κατά Χ. $T_x=1.015 \text{ sec}$	39
Εικόνα 14: 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις κατά Υ. $T_y=0.975 \text{ sec}$	40
Εικόνα 15: 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις στροφή κατά φ. $T_\phi=0.867 \text{ sec}$ .....	40
Εικόνα 16: Διαγράμματα ροπών ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q.....	41
Εικόνα 17: Εντός επιπέδου τέμνουσες και ροπές υποστυλώματος σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q .....	42
Εικόνα 18: Αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q.....	42

Εικόνα 19: Pushover X, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 110.6 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	43
Εικόνα 20: Pushover X, τερματισμός αλγορίθμου. Φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 149 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	43
Εικόνα 21: Καμπύλη Pushover X αντίστασης φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP .....	44
Εικόνα 22: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 68.7 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	45
Εικόνα 23: Pushover Y, τερματισμός αλγορίθμου. Φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 163.6 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	45
Εικόνα 24: Καμπύλη Pushover Y αντίστασης φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP .....	46
Εικόνα 25: 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις κατά X. $T_x=0.163\text{sec}$ .....	47
Εικόνα 26: 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις κατά X. $T_y=0.129\text{ sec}$ .....	47
Εικόνα 27: 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις στροφή κατά X. $T_\phi=0.085\text{ sec}$ .....	48
Εικόνα 28: Διαγράμματα ροπών ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q.....	49
Εικόνα 29: Εντός επιπέδου τέμνουσες και ροπές υποστυλώματος σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα με τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q .....	49
Εικόνα 30: Αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα με τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q .....	50
Εικόνα 31: Pushover X, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 4.8 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	50



Εικόνα 32: Pushover X, τελευταίο βήμα τερματισμού του αλγορίθμου. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 39.3 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	51
Εικόνα 33: Καμπύλη Pushover X αντίστασης φορέα με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP .....	51
Εικόνα 34: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 23.3 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	52
Εικόνα 35: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 90.5 mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	53
Εικόνα 36: Καμπύλη Pushover Y αντίστασης φορέα με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP .....	53
Εικόνα 37: 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με pilotis κατά X. $T_x=0.528\text{sec}$ .....	55
Εικόνα 38: 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή Ενισχυμένου φορέα κατά Y. $T_y=0.502\text{ sec}$ .....	56
Εικόνα 39: 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή Ενισχυμένου φορέα στρεπτική. $T_\varphi=0.472\text{sec}$ .....	56
Εικόνα 40: Διαγράμματα ροπών ενισχυμένου φορέα pilotis για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q .....	57
Εικόνα 41: Εντός επιπέδου τέμνουσες και ροπές υποστυλώματος σε ενισχυμένο φορέα pilotis.....	58
Εικόνα 42: Αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές υποστυλώματος σε ενισχυμένο φορέα pilotis.....	58
Εικόνα 43: Pushover X, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 20.1mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	59
Εικόνα 44: Pushover X, στάδιο τερματισμού του αλγορίθμου. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 45.3mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	59
Εικόνα 45: Καμπύλη Pushover X αντίστασης φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP .....	60

Εικόνα 46: Pushover Υ, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 9.4mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	61
Εικόνα 47: Pushover Υ, τερματισμός αλγορίθμου. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 54mm στάθμη 5 <sup>ου</sup> ορόφου .....	61
Εικόνα 48: Καμπύλη Pushover Υ αντίστασης φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP .....	62
Εικόνα 49: Καμπύλες αντίστασης 3 σεναρίων για φόρτιση Pushover Χ .....	63
Εικόνα 50: Καμπύλες αντίστασης 3 σεναρίων για φόρτιση Pushover Χ .....	64
Εικόνα 51: Φάσμα σχεδιασμού .....	65

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

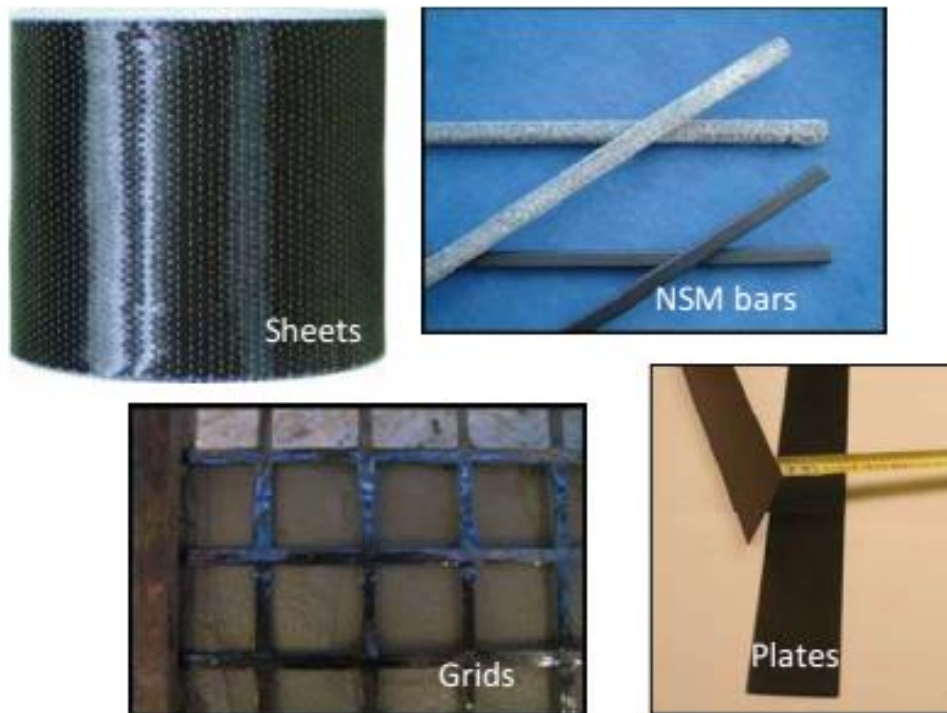
Πίνακας 1: Ιδιότητες μητρών που χρησιμοποιούνται για σύνθετα υλικά .....	15
Πίνακας 2: Διαστάσεις και οπλισμοί διατομών ισογείου .....	34
Πίνακας 3: Διαστάσεις και οπλισμός δοκών ορόφων .....	35
Πίνακας 4: Γεωμετρία και οπλισμοί υποστυλωμάτων .....	36
Πίνακας 5: Πίνακας ιδιομορφών και συντελεστών συμμετοχής μάζας για ενισχυμένο κτήριο χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων .....	41
Πίνακας 6: Βήματα Pushover X σε φορέα χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP .....	44
Πίνακας 7: Βήματα Pushover Y σε φορέα χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP .....	46
Πίνακας 8: Πίνακας ιδιομορφών και συντελεστών συμμετοχής μάζας για ενισχυμένο κτήριο με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων .....	48
Πίνακας 9: Βήματα Pushover X σε φορέα με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP .....	51
Πίνακας 10: Βήματα Pushover Y σε φορέα με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP .....	54
Πίνακας 11: Πίνακας ιδιομορφών και συντελεστών συμμετοχής μάζας για ενισχυμένο κτήριο με ύπαρξη pilotis .....	57
Πίνακας 12: Βήματα Pushover X σε φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένο με FRP .....	60
Πίνακας 13: Βήματα Pushover Y σε φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένο με FRP .....	62
Πίνακας 14: Σύγκριση εντατικών μεγεθών σε υποστύλωμα για τα 3 σενάρια μελέτης .....	63
Πίνακας 15: Σύγκριση διαθέσιμων με απαιτούμενων μετακινήσεων φορέα .....	65

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή είναι σύνθετα υλικά. Το πρώτο γνωστό σύνθετο υλικό που κατασκευάζεται από τον άνθρωπο είναι ένα δάπεδο από κόκκινο ασβέστη, άμμο και χαλίκι που βρέθηκε στη Σερβία και χρονολογείται στο 5600 π.Χ. (Wild, 2007). Τα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται από δύο ή περισσότερα συστατικά υλικά με σημαντικά διαφορετικές φυσικές και / ή χημικές ιδιότητες που παραμένουν ξεχωριστά και διακριτά σε μικροσκοπικό επίπεδο. Σε αυτή τη διατριβή, η λέξη «σύνθετα υλικά» χρησιμοποιείται για αναφορά σε ενισχυμένα με ίνες υλικά. Τα σύνθετα υλικά FRP έχουν δύο συστατικά υλικά: τις ίνες και τη μήτρα. Ο ρόλος της μήτρας είναι η υποστήριξη, προστασία και διατήρηση της σχετικής θέσης των ενσωματωμένων ινών. Απαιτείται κατανόηση του περιεχομένου αυτού του κεφαλαίου για την κατανόηση των εννοιών ενίσχυσης έναντι κάμψης ή διάτμησης με FRP

### 1.1 Σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες

Τα σχήματα και οι διαμορφώσεις των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στην οικοδομική βιομηχανία ποικίλλουν ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση τους. Τα ακρωνύμια που χρησιμοποιούνται για τη διάκριση των σύνθετων υλικών χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών ορίζονται από τον τύπο της ίνας που χρησιμοποιείται: AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers), CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) και GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers). Τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μια σειρά διαφορετικών διαδικασιών: τοποθέτηση χεριών, πλύση, χύτευση και περιέλιξη νημάτων. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται έχει ισχυρή επίδραση στην περιεκτικότητα σε ίνες ανά μονάδα όγκου του σύνθετου υλικού, η οποία μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 25% και 70%, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη διαδικασία. Εάν χρησιμοποιείται πολυστρωματισμός, όπως συμβαίνει όταν παράγονται πολυστρωματικά φύλλα (πλάκες), το κλάσμα όγκου των FRP συνήθως είναι 50-70%, ενώ για φύλλα που εφαρμόζονται με το χέρι, το κλάσμα του όγκου είναι σημαντικά χαμηλότερο (25 - 35%). Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για δομική ενίσχυση μπορεί να έχουν διαφορετικά σχήματα, όπως φύλλα, πλάκες, πλέγματα ή ράβδους (Εικόνα 1). Οι ίνες μπορεί να είναι προσανατολισμένες σε μία, δύο ή πολλαπλές κατευθύνσεις, οπότε το σύνθετο στην αγγλική του ονομασία θα περιγραφεί ως uni, bi ή multi directional, αντίστοιχα.



Εικόνα 1: FRP που χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις κτηρίων

## 1.2.Συστατικά των σύνθετων

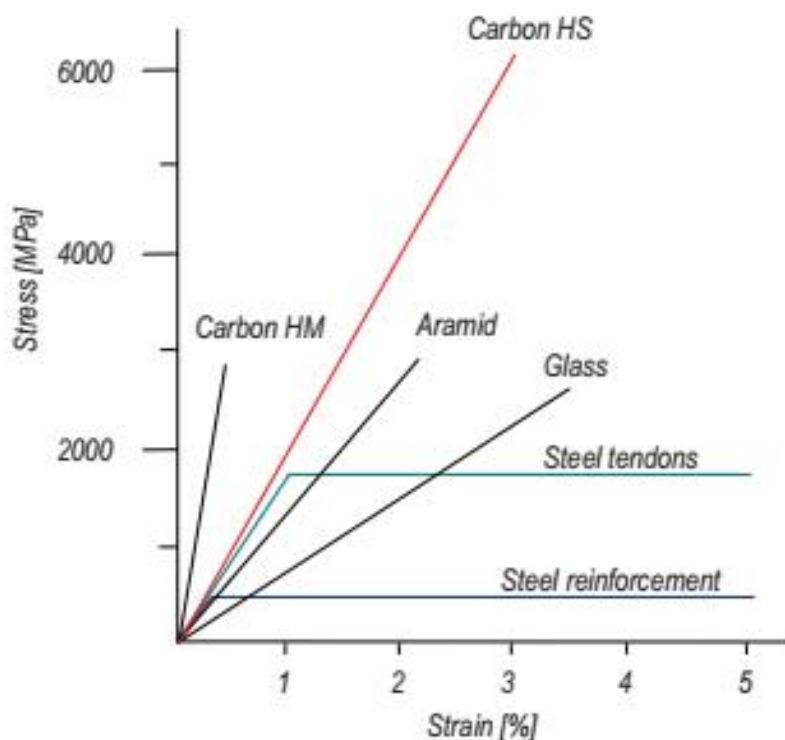
### 1.2.1.Ίνες

Η μηχανική απόδοση των σύνθετων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ίνες και τον όγκο των ινών. Οι ίνες είναι μια κατηγορία υλικών από συνεχή νήματα ή διακριτά επιμήκη κομμάτια παρόμοια με τα νήματα. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι η ακαμψία και η εφελκυστική τους τάση. Οι ίνες εμφανίζουν ανισοτροπική γραμμική ελαστική συμπεριφορά έως την αστοχία, με εξαιρετική απόδοση στη μία κατεύθυνση και κακή στις άλλες δύο. Λόγω αυτής της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς (Εικόνα 2), αστοχούν ξαφνικά και με λίγο ή καθόλου προειδοποίηση. Η αστοχία, ωστόσο, συμβαίνει συχνά σε σχετικά μεγάλη επιμήκυνση, η οποία μπορεί να φτάσει το 4% για γυαλί και 2% για τα ανθρακονήματα.

### 1.2.2.Άνθρακας

Οι ίνες άνθρακα κατασκευάζονται από πρόδρομα υλικά άνθρακα, όπως πίσσα, κυτταρίνη ή πολυακρυλονιτρίλιο με οξείδωση, ανθρακοποίηση και γραφίτιδα σε υψηλές θερμοκρασίες (3000°). Η διάμετρος ενός εγκάρσιου τμήματος κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 μm. Δύο τύποι ινών χρησιμοποιούνται συνήθως για την ενίσχυση δομών, υψηλό συντελεστή (HM) και υψηλή αντοχή (HS) · οι ιδιότητες των ινών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία παραγωγής. Οι ίνες άνθρακα συμπεριφέρονται άριστα στη φόρτιση της κόπωσης, δεν παρουσιάζουν χαλάρωση ερπυσμού, είναι ανθεκτικές σε πολλαπλούς χημικούς παράγοντες και είναι

αδιάβροχες. Επίσης έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, είναι ηλεκτρικά αγωγιμες και ενδέχεται να προκαλέσουν γαλβανική διάβρωση σε άμεση επαφή με χάλυβα (Carolin, 2003).



Εικόνα 2: Ιδιότητες διαφορετικών ινών και τυπικού ενισχυτικού χάλυβα

### 1.2.3.Γυαλί

Όσον αφορά την αναλογία αντοχής προς βάρος, οι ίνες γυαλιού είναι ένα από τα ισχυρότερα διαθέσιμα υλικά. Οι ίνες γυαλιού λαμβάνονται με επεξεργασία μιγμάτων με άμμο, καολίνη, ασβεστόλιθος και κολεμανίτη σε υψηλές θερμοκρασίες (1600°). Μεταβάλλοντας τις αναλογίες κάθε υλικού, οι ιδιότητες των γυάλινων ινών μπορούν να ρυθμιστούν. Η διάμετρος των διατομών ινών κυμαίνεται μεταξύ 5 και 24 Pm. Οι ίνες γυαλιού είναι λιγότερο ακριβές από τις ίνες άνθρακα έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται ευρύτερα σε όλο τον κόσμο. Σε σύγκριση με τις ίνες άνθρακα και αραμιδίου, οι ίνες γυαλιού εμφανίζουν πιο όλκιμη συμπεριφορά. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για χρήση σε σεισμική δομική ενίσχυση. Ωστόσο, οι ίνες γυαλιού έχουν ορισμένα ιδιαίτερα προβλήματα, όπως διάβρωση σε υψηλά επίπεδα τάσης, ευαισθησία έναντι υγρασίας και φόρτιση κόπωσης.

### 1.2.4. Aramid

Οι ίνες Aramid (ARomatic polyAMIDe) είναι προϊόντα οργανικού πολυμερούς. Παράγονται από την αντίδραση αρωματικών διαμινών με αρωματικά χλωριούχα διοξεία. Έχουν λαμπερό χρυσό χρώμα και διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ 12 και 15 μm. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ινών αραμιδίου: παρα-αραμιδίου και ίνες μετα-αραμιδίου. Έχουν πολύ ευνοϊκές μηχανικές

ιδιότητες και καλή αντοχή στην κρούση. Οι ίνες αραμιδίου είναι επίσης ανθεκτικές στη φωτιά, τη θερμότητα και τις χημικές ουσίες. Ως εκ τούτου, συνήθως χρησιμοποιούνται για κατασκευαστούν ανθεκτικά στη φλόγα ρούχα, προστατευτικά γιλέκα και κράνη, σύνθετα υλικά, αντικατάσταση αμιάντου, υφάσματα φιλτραρίσματος θερμού αέρα, ενίσχυση ελαστικών και μηχανικών προϊόντων από καουτσούκ, σχοινιά και καλώδια, πανί πανιού, αθλητικά είδη. Μια κοινή εμπορική ονομασία για ίνες αραμιδίου είναι το "Kevlar".

### 1.3.Μήτρες

Οι κύριες λειτουργίες των μητρών είναι η προστασία των ινών από το εξωτερικό περιβάλλον και η μεταφορά δυνάμεων μεταξύ των ινών. Η μήτρα είναι επομένως μεγάλης σημασίας, όπως και η ικανότητά της να παραμορφώνεται υπό υψηλή πίεση. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μητρών: θερμοπλαστικές, οι οποίες μπορούν να λιώσουν μετά τη ρύθμιση και να ξαναδιαμορφωθούν και θερμοσώματα, τα οποία είναι ισχυρότερα. Για σκοπούς ενίσχυσης, χρησιμοποιούνται θερμοστάτες. Σε ορισμένες περιπτώσεις προέρχονται από εστέρες βινυλίου, αλλά χρησιμοποιούνται συνήθως οι εποξειδικές μήτρες. Η διάρκεια ζωής του εποξικού δοχείου μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά πρόσθετα και μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Υπό κανονικές συνθήκες, είναι περίπου 30 λεπτά στους 20° C. Οι πιο σημαντικές μηχανικές ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ιδιότητες μητρών που χρησιμοποιούνται για σύνθετα υλικά

Fibres	$E_{axial}$ [GPa]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_{max}$ [%]	$\nu$ [-]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Thermoplastics</b>					
Polypropylene	1.0-1.4	20-40	300	0.3	0.9
Polyetheretheketone	3.6	170	50	0.3	1.3
Polyamide	1.4-2.8	60-70	40-80	0.3	1.14
<b>Thermosets</b>					
Epoxy	2-5	35-100	1-6	0.35-0.4	1.1-1.4
Polyester	2-4.5	40-90	1-4	0.37-0.39	1.2-1.5
Vinylester	3	70	5	0.35	1.2

### 1.4.Ενίσχυση συστημάτων

#### 1.4.1.Γενικές αρχές αποκατάστασης

Οι δομές έχουν τέσσερις καθοριστικές ιδιότητες: τη φέρουσα ικανότητα, την αντοχή, τη λειτουργικότητα και την αισθητική τους. Από αυτές οι τρεις πρώτες θεωρούνται οι πιο

σημαντικές, κυρίως για λόγους ασφάλειας και άνεσης. Όταν μια από αυτές τις λειτουργίες δεν εκπληρώνεται, μια κατασκευή μπορεί να χρειάζεται:

1) Συντήρηση - μέτρα που έχουν ληφθεί για να διασφαλιστεί ότι η δομή συνεχίζει να λειτουργεί στο επιθυμητό επίπεδο. Για παράδειγμα, οι χαλύβδινες γέφυρες πρέπει να χρωματίζονται περιοδικά για να αποφευχθεί η διάβρωση.

2) Επισκευή - αναβαθμίσεις στη δομή για να διασφαλιστεί ότι λειτουργεί στο αρχικό της επίπεδο σχεδίασης. Για παράδειγμα, μια κατασκευή που έχει υποστεί ζημιά από σεισμό θα πρέπει να επισκευαστεί ώστε να επιτευχθεί και πάλι το επίπεδο απόδοσης πριν από το σεισμό.

3) Αναβάθμιση - μέτρα που έχουν ληφθεί για την αύξηση της απόδοσης μιας δομής σε υψηλότερο επίπεδο. Για παράδειγμα, εάν το φορτίο κυκλοφορίας σε μια γέφυρα αυξανόταν, θα ήταν απαραίτητο να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα.

Στο υπόλοιπο αυτής της διατριβής, αυτές οι δράσεις αναφέρονται συλλογικά ως «μέθοδοι αποκατάστασης» και συζητούνται στο πλαίσιο της ενισχυμένης κατασκευής από σκυρόδεμα. Μία τεχνική για την αποκατάσταση είναι η αύξηση της διατομής των βασικών δομικών στοιχείων με διαφορετικά υλικά όπως το κονίαμα σκυροδέματος που εφαρμόζεται με το χέρι, το σκυρόδεμα, ή χυτευμένο σκυρόδεμα, (βλέπε σχήμα 3α και γ). Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις όπου η ικανότητα συμπίεσης του δομικού στοιχείου είναι ανεπαρκής. Ωστόσο, η προσθήκη επιπλέον υλικού στη δομή προσθέτει επιπλέον φορτίο και αυτή η μέθοδος αποκατάστασης μπορεί να είναι μάλλον αναποτελεσματική στην αύξηση τη χωρητικότητα της δομής.

Ο σχηματισμός μιας ισχυρής διεπαφής μεταξύ του νέου και του παλαιού υλικού είναι ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα και μια ικανοποιητική λύση δεν μπορεί να βρεθεί πάντα. Αυτά τα δύο ζητήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή · τα σχέδια πρέπει να καταρτίζονται και να εφαρμόζονται μόνο από έμπειρους μηχανικούς. Ωστόσο, η μέθοδος είναι μάλλον οικονομική: χρησιμοποιεί κοινά δομικά υλικά και η κατασκευή δεν απαιτεί δεξιότητες πέρα από αυτές που χρησιμοποιούνται στην κανονική κατασκευή. Αυτοί οι παράγοντες αντισταθμίζονται από το γεγονός ότι η λειτουργική χρήση της δομής μπορεί να είναι αδύνατη ή δραστικά περιορισμένη κατά τη διεξαγωγή των εργασιών αποκατάστασης Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό θα προκαλέσει απώλεια χρημάτων.

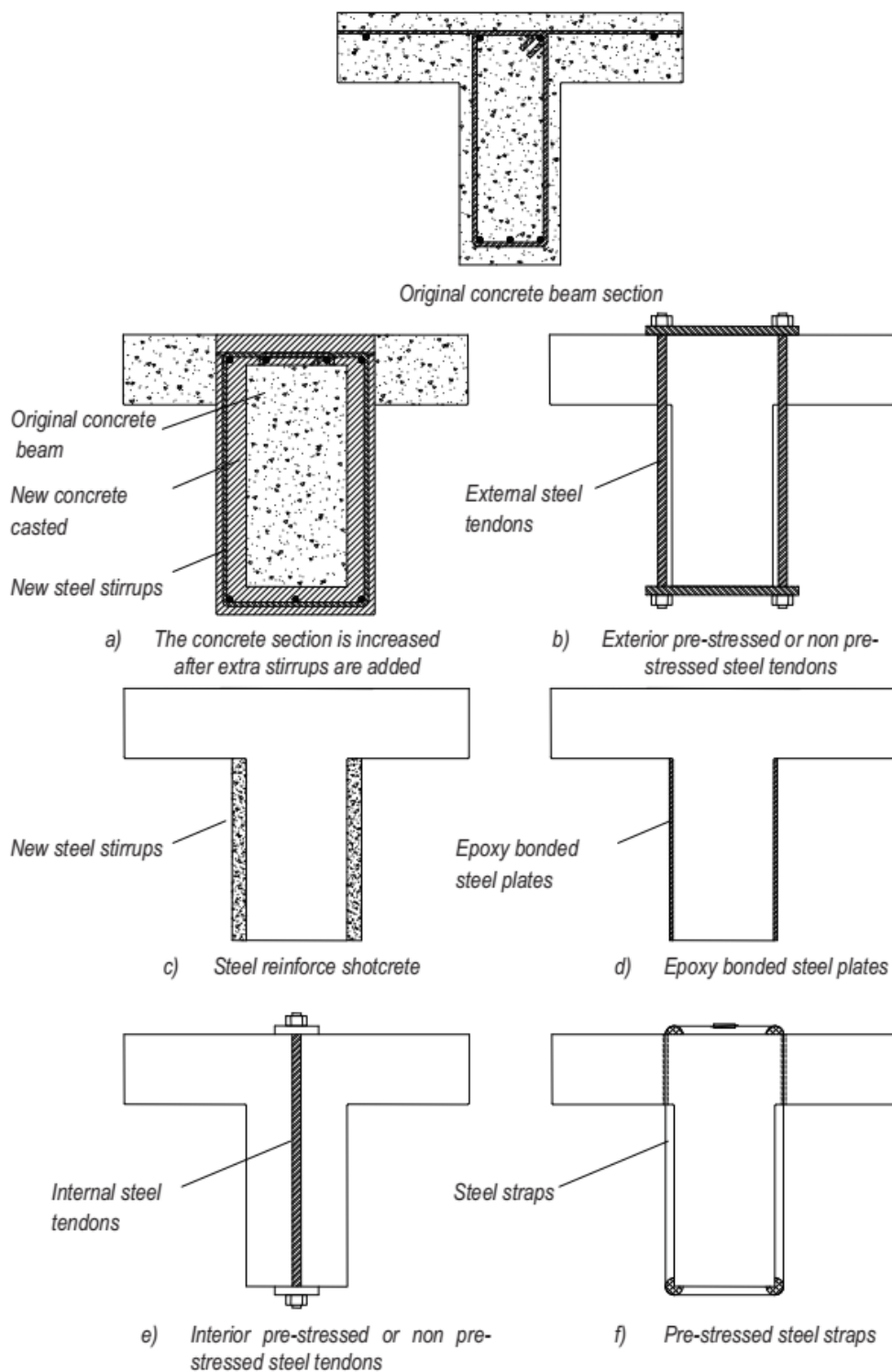
**Η συγκόλληση πλακών** (Σχήμα 3δ) είναι μια μέθοδος αποκατάστασης δομών που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 (Täljsten, 1994). Περιλαμβάνει την προσθήκη υλικού με υψηλή ακαμψία και αντοχή σε εφελκυσμό στην πλευρά τάνυσης ενός στοιχείου χρησιμοποιώντας ένα συνδετικό μέσο για να χρησιμεύσει ως εξωτερική ενίσχυση.



Δύο από τις πρώτες μελέτες πραγματοποιήθηκαν στη Γαλλία (L'Hermite, 1967; Bresson 1971) σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένες με χαλύβδινες πλάκες.

Ένα μειονέκτημα είναι ότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι πλάκες είναι πολύ βαριές για να τοποθετηθούν στο χώρο εργασίας και μπορεί να είναι απαραίτητη η εφαρμογή επιπλέον πίεση κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης εάν εφαρμοστούν ανάποδα. Ένας άλλος είναι ο υψηλός κίνδυνος διάβρωσης, γεγονός που καθιστά τις πλάκες ακριβές για συντήρηση. Η σύνδεση πλακών FRP δεν πάσχει από αυτά τα μειονεκτήματα, καθιστώντας την μια ελκυστική λύση που έχει αρχίσει να αποκτά ευρεία αποδοχή σε όλο τον κόσμο. Οι πρωτοπόροι σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν τους Meier et al. (1992), Triantafyllou and Plevris (1992), Täljsten (1994), Nanni et al. (1995), van Gemert (1996), ενώ πολλοί άλλοι μελετητές έχουν αναφέρει επιτυχημένες εφαρμογές συγκόλλησης FRP. Η εφαρμογή της πλάκας FRP θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

**Η προένταση** είναι μια μέθοδος ενίσχυσης του σκυροδέματος για την εξουδετέρωση των εσωτερικών τάσεων που παράγονται από τη δράση των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων κατά τη διάρκεια ζωής ενός δομικού μέλους. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Η πρώτη ονομάζεται προένταση και περιλαμβάνει την ένταση του χάλυβα πριν χυτεύεται σκυρόδεμα· δεν ισχύει για την αποκατάσταση. Η δεύτερη ονομάζεται μετά-ένταση και μερικές φορές χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση δομών όταν είναι απαραίτητη για την αύξηση της οριακής κατάστασης συντήρησής τους. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ένταση του χάλυβα μετά τη χύτευση του σκυροδέματος και την ένταση με τενόντες υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, όπως ενίσχυση από χάλυβα ή ράβδους FRP, στο επιθυμητό επίπεδο. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες αγκυρώσεις για τους τενόντες, δεδομένου ότι μεγάλο μέρος της δύναμης τάνυσης μπορεί να χαθεί λόγω υπερβολικής παραμόρφωσης ή αστοχίας της αγκύρωσης. Τα τοπικά φαινόμενα που έχουν αυτά τα συστήματα αγκύρωσης στο στοιχείο πρέπει να προσεχθούν, καθώς είναι συνήθως απαραίτητο να δημιουργηθούν οπές στη δομή για να στερεωθεί το σύστημα αγκύρωσης. Τα συστήματα μετά την ένταση μπορούν να ενσωματωθούν στο σκυρόδεμα (Σχήμα 3ε) ή να τοποθετηθούν στο εξωτερικό (Σχήμα 3β και στ), και μπορεί να είναι είτε συνδεδεμένα είτε χωρίς σύνδεση. Στην περίπτωση ορισμένων γεφυρών και των περισσότερων εφαρμογών αποκατάστασης, τα συστήματα μετά την ένταση είναι τοποθετημένα έξω από τα δομικά μέλη και αναφέρονται ως συστήματα μετά την ένταση (PTI, 2006).



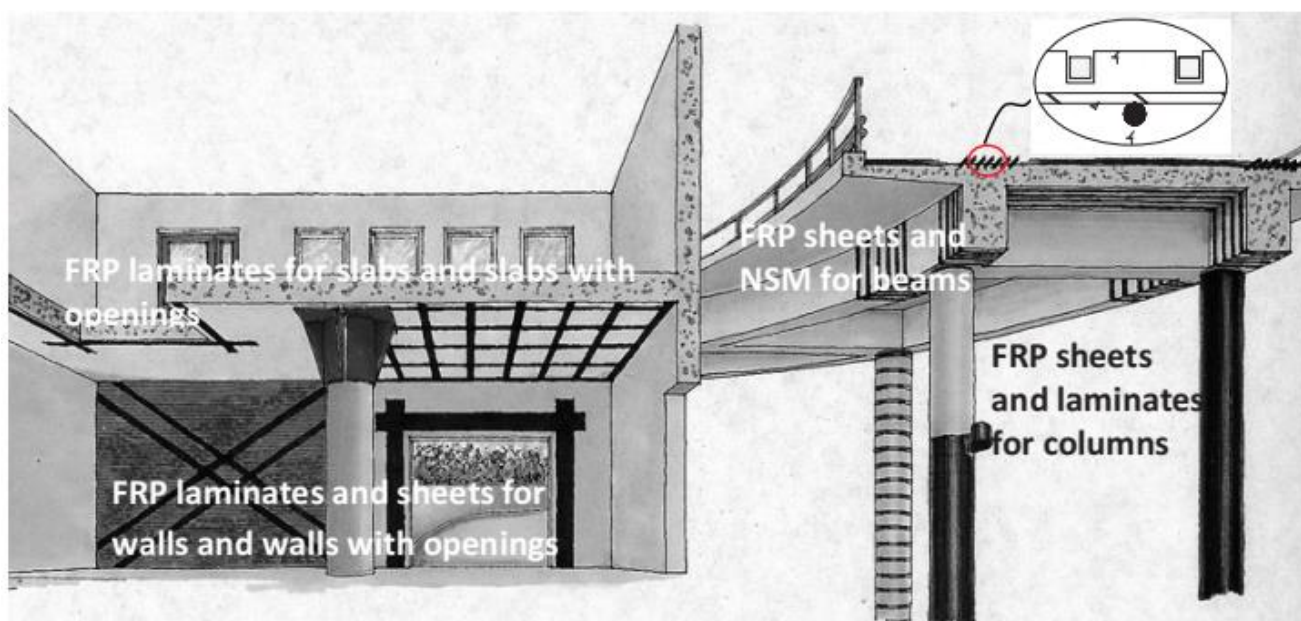
Εικόνα 3: Απεικόνιση διαφόρων μεθόδων αποκατάστασης δοκών (Triantafyllou and Plevris, 1992)

#### 1.4.2. Συστήματα ενίσχυσης FRP

Τα περισσότερα από τα στοιχεία μιας δομής μπορούν να ενισχυθούν με FRP σύνθετα υλικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους όπως προσθήκη υλικού ή μόρφωση πλαισίου του στοιχείου, τα FRP είναι σχεδόν αισθητικά «αόρατα» και εάν το πρόγραμμα ενίσχυσης είναι καλά σχεδιασμένο, το στοιχείο δεν θα εμφανίζει δομικές

αδυναμίες. Κατά την ενίσχυση μιας δομής με FRP, είναι σημαντικό να τηρούμε τους ακόλουθους τρεις κανόνες (Täljsten, 2006):

- 1) Η επιφάνεια πρέπει να προετοιμαστεί για την ενίσχυση. Αυτή η ζήτηση ικανοποιείται όταν η περιοχή καθαριστεί από άλλα υλικά μέχρι το αποκαλύπτεται ηχητικό σκυρόδεμα. Η επιφάνεια πρέπει να είναι απαλλαγμένη από νερό, γράσο και σκόνη.
- 2) Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πρέπει να είναι τουλάχιστον 10°C κατά την εφαρμογή του συστήματος ενίσχυσης. Αυτό θα επιτρέψει τη βέλτιστη σκλήρυνση της κόλλας.
- 3) Μετά την εγκατάσταση, το σύνθετο υλικό πρέπει να προστατεύεται, κατά περίπτωση, από πυρκαγιά, βανδαλισμό ή έντονη θερμική ακτινοβολία. Διάφορα εμπορικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθεί για αυτό, συμπεριλαμβανομένων πυρίμαχων χρωμάτων, γύψου ή άλλων συστημάτων που μπορεί να θεωρηθούν κατάλληλα.



Εικόνα 4: Συστήματα ενίσχυσης FRP που εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία. Προσαρμόστηκε από το Täljsten (2006)

Η εικόνα 4 απεικονίζει τρία συστήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως για την ενίσχυση δομών με FRPs σήμερα. Οι ακόλουθες ενότητες παρέχουν πιο λεπτομερείς περιγραφές για αυτά συστήματα.

#### 1.4.2.1. Συστήματα φύλλων

Τα συστήματα φύλλων εφαρμόζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος και επομένως αναφέρονται ως EBR (εξωτερικά συγκολλημένες ενισχύσεις). Αυτό το σύστημα αποτελείται από εποξειδικό αστάρι, στόκο, ξηρές ίνες και ρητίνη. Πριν από την εγκατάσταση του συστήματος, η επιφάνεια του σκυροδέματος προετοιμάζεται όπως περιγράφεται από την προηγούμενη παράγραφο. Το αστάρι στη συνέχεια εφαρμόζεται · εάν η επιφάνεια είναι πολύ

τραχιά, λειαίνεται με στόκο. Ένα λεπτό στρώμα με εποξική κόλλα χαμηλού ιξώδους εφαρμόζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος και το φύλλο ινών άνθρακα ξεδιπλώνεται και τεντώνεται πάνω από την εμποτισμένη επιφάνεια. Τα κενά αέρα στην περιοχή επαφής απομακρύνονται χρησιμοποιώντας έναν ελαστικό κύλινδρο και εφαρμόζεται ένα νέο στρώμα κόλλας. Τα φύλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως έχουν πλάτος 200-400 mm και βάρος 200-400 g/m<sup>2</sup>. Επειδή τα φύλλα μπορούν να τοποθετηθούν σε σχεδόν οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρογγυλεμένες τομές ή όπου απαιτείται πλήρης συσκευασία.

#### **1.4.2.2.Συστήματα πλακών**

Τα συστήματα πλακών (laminates) θεωρούνται επίσης συστήματα EBR και έχουν τα ακόλουθα συστατικά: αστάρι, συγκολλητικό και σύνθετο πολυστρωματικό υλικό. το αστάρι μπορεί να είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται με φύλλα, η κόλλα είναι διαφορετική. Υψηλή πάστα γεμάτη ιξώδες όπως εποξική χρησιμοποιείται ως η συγκολλητική ουσία, εφαρμοσμένη σε στρώμα πάχους 1-2 mm. Τα ελάσματα έχουν πάχος 1,2 mm και ποικίλα πλάτη, συμπεριλαμβανομένων 50, 70, 100, 150 m ή σχεδόν οποιασδήποτε άλλης ζητούμενης τιμής. Θεωρητικά, δεν υπάρχει ανώτερο όριο όσον αφορά το μήκος τους, αλλά για πρακτικούς λόγους όπως η μεταφορά ή ο χειρισμός παραδίδονται σε ρολά όχι περισσότερο από 200 μέτρα. Το πολυστρωματικό σύστημα είναι λιγότερο χρονοβόρο από αυτό των φύλλων και περιλαμβάνει την εφαρμογή του ασταριού, ακολουθούμενο από την εφαρμογή της κόλλας στο έλασμα με ελαφρώς μεγαλύτερο πάχος κατά μήκος των διαμήκων αξόνων. Το επόμενο βήμα είναι να εφαρμοσθεί το έλασμα στο επιφάνεια (συνήθως με roller) με αρκετή πίεση για να διασφαλιστεί ότι το πάχος της κόλλας είναι σταθερό σε ολόκληρη την επιφάνεια. Αυτό το σύστημα είναι κατάλληλο για επίπεδες επιφάνειες όπως δοκοί, τοίχοι και πλάκες.

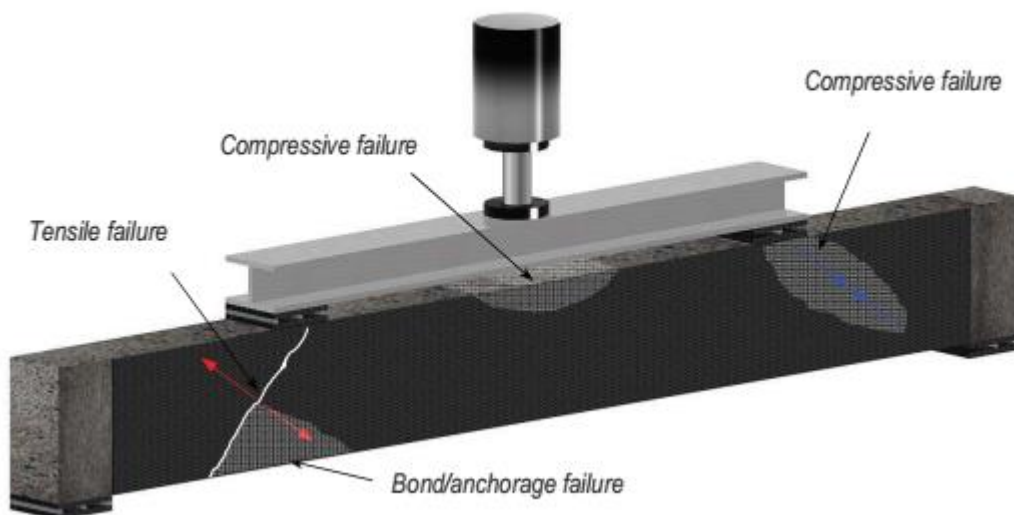
#### **1.4.2.3.Συστήματα NSMR**

Το σύστημα NSMR αποτελείται από κόλλα και ράβδους. Η κόλλα που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι δύο τύπων: εποξειδική ή υψηλής ποιότητας τσιμεντοκονίαμα. Μπορεί να έχει διαφορετικές διαμορφώσεις διατομής · οι διατομές που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι ορθογώνιες ή στρογγυλές. Το εμβადόν διατομής των ράβδων είναι περίπου 30 -100 mm και το μήκος τους κυμαίνεται μεταξύ 2 και 200 m. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι η τοποθέτηση της ράβδου μέσα σε μια προιονωτή υποδοχή. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για το σύστημα NSMR είναι η ποιότητα και το πάχος του σκυροδέματος. Πρέπει να προηγηθεί έλεγχος πριν προιονισθούν οι εγκοπές, δεδομένου ότι συνήθως απαιτείται βάθος 25 mm. Αμέσως μετά την κοπή των σχισμών, η επιφάνεια πρέπει

να είναι απαλλαγμένη από σκόνη και στάχτες σκυροδέματος. Εάν χρησιμοποιείται εποξειδική κόλλα, η επιφάνεια της σχισμής πρέπει να είναι στεγνή· εάν χρησιμοποιείται τσιμεντοκονίαμα, η επιφάνεια πρέπει να ενυδατωθεί αφού καθαριστεί. Αυτό το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους επιφανειών επιπέδου και δεν είναι ευαίσθητο σε ατέλειες.

### 1.5.Μορφές αστοχίας μελών ενισχυμένων με FRP

Η διατμητική συμπεριφορά των δοκών RC είναι περίπλοκη και ο σχεδιασμός τους βασίζεται σε ημι-αναλυτικές σχέσεις. Η πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς τους αυξάνεται περαιτέρω όταν λαμβάνεται υπόψη η ενίσχυση με FRP. Αυτή η υποεπάρκεια εντοπίζει και συζητά τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία έναντι διάτμησης των ενισχυμένων δοκών FRP. Έχουν εντοπιστεί δύο βασικοί τρόποι αστοχίας των ενισχυμένων δοκών FRP (Εικόνα 5): ρήξη των ινών και αστοχία αγκύρωσης.



Εικόνα 5: Μορφές διατμητικής αστοχίας μέλους ενισχυμένο με FRP Täljsten (2006)

#### 1.5.1. Αστοχία των ινών FRP

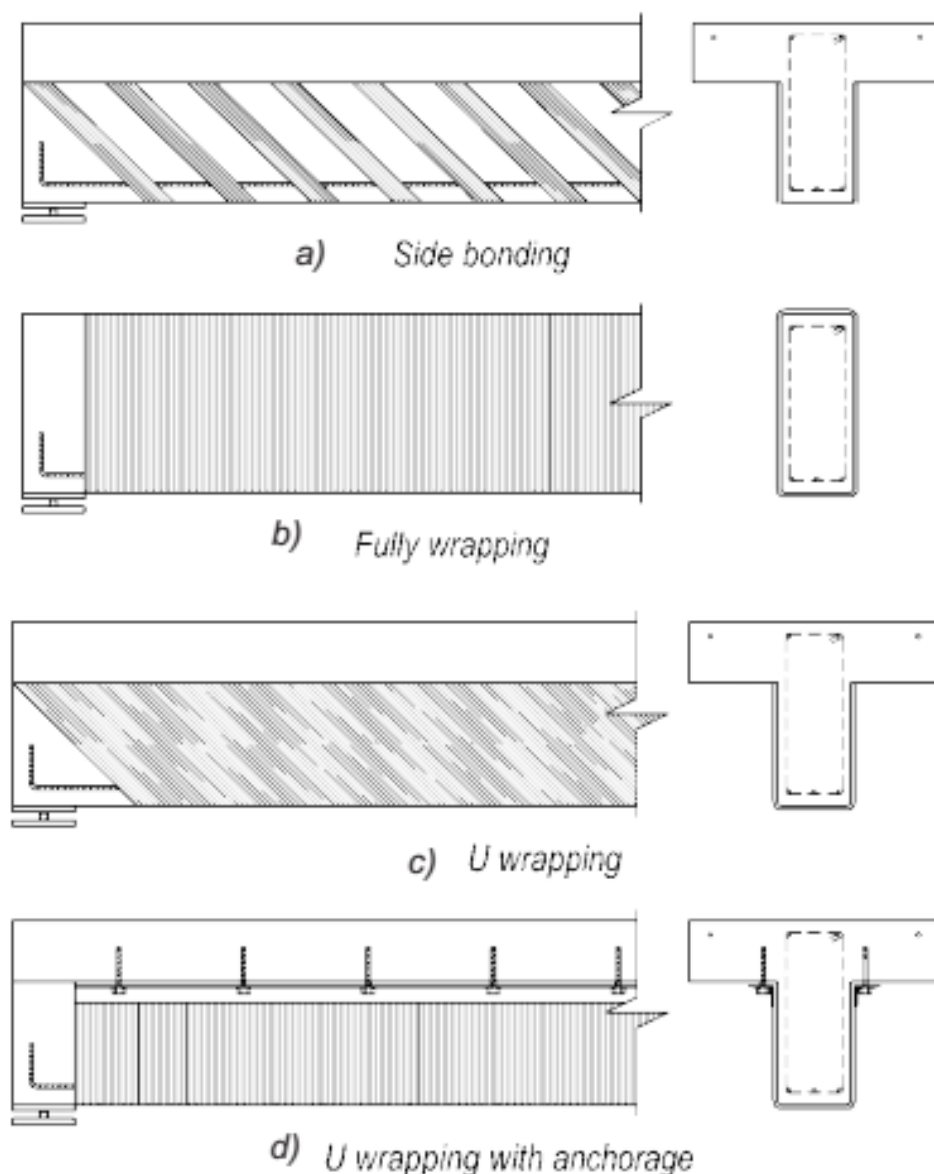
Αυτό συμβαίνει όταν η τάση εφελκυσμού στις ίνες υπερβαίνει την αντοχή εφελκυσμού τους. Χαρακτηρίζεται από ταχεία προοδευτική αστοχία των ινών στο σύνθετο υλικό, ειδικά για φύλλα· στις περισσότερες περιπτώσεις, η αστοχία έχει ψαθυρή μορφή. Ο προσανατολισμός

των ινών σε σχέση με το κύριο στέλεχος στο σκυρόδεμα επηρεάζει την ακαμψία του σύνθετου υλικού.

### 1.5.2. Αστοχία στην αγκύρωση

Η αστοχία αγκύρωσης είναι επίσης γνωστή ως αστοχία αποσύνδεσης, Διέπεται από τις ιδιότητες των ασθενέστερων υλικών σε επαφή, δηλαδή από το σκυρόδεμα και την κόλλα. Όταν η διατμητική ισχύς ενός από αυτά τα δύο είναι πολύ μεγάλη, η μεταφορά δύναμης καθίσταται αναποτελεσματική και εμφανίζεται η «ολίσθηση» στο σκυρόδεμα, μεταξύ του σκυροδέματος και της κόλλας, στην κόλλα ή μεταξύ της κόλλας και των ινών. Η πιο συχνά παρατηρούμενη αστοχία αποσύνδεσης εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, επειδή το σκυρόδεμα είναι το πιο αδύναμο στοιχείο αυτής της «αλυσίδας αλληλεπίδρασης». Ο τρόπος αστοχίας μιας ενισχυμένης δοκού εξαρτάται επίσης από τη διαμόρφωση της ενισχυμένης δοκού (Εικόνα 6). Μία διαμόρφωση που πρέπει να αποφεύγεται είναι η πλευρική σύνδεση που απεικονίζεται στο Σχήμα 6α, η οποία είναι πολύ επιρρεπής σε αστοχία αποσύνδεσης λόγω του περιορισμένου μήκους αγκύρωσης και στις δύο άνω και κάτω πλευρές. Η πλήρως τυλιγμένη διαμόρφωση (Εικόνα 6 β) είναι η ασφαλέστερη, καθώς μπορεί να αστοχήσει μόνο με ρήξη ινών, αλλά αυτό το είδος ελεύθερης διαμόρφωσης πολύ σπάνια χρησιμοποιείται κατά την ενίσχυση των δοκών σε μια δομή.

Η πιο διαδεδομένη διαμόρφωση είναι πιθανώς το τυλιγμένο σύστημα. Δεδομένου ότι οι δοκοί συνδέονται με πλάκες και μπορούν έτσι να αντιμετωπίζονται ως τμήματα T, αυτή η διαμόρφωση (Σχήμα 6 γ) πρέπει να είναι ασφαλέστερη από τις υπόλοιπες. Ωστόσο, συνιστάται μηχανική αγκύρωση κατά την ενίσχυση σημαντικών δομικών στοιχείων όπως δοκών που υποστηρίζουν την πλάκα (Σχήμα 6 δ). Πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα κατά την ενίσχυση των συνεχών δοκών επειδή η συμπεριφορά τους επηρεάζεται από την παραλλαγή και την αλληλεπίδραση των δομικών μελών που μπορεί να αλληλεπιδράσουν το ένα στο άλλο με διάφορους περίπλοκους τρόπους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν ενισχύονται περιοχές στήριξης, για τις οποίες η εφελκυστική πλευρά θα βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πλάκα.



Εικόνα 6: Μορφές διατμητικής ενίσχυσης δοκού με χρήση FRP (Täljsten (2006))

### 1.6. Σκοπός της εργασίας .

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός πενταώροφου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένου με Ινοπλισμένα Πολυμερή έναντι συγκεκριμένων σεισμικών δράσεων. Η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του κτιρίου θα γίνει με τη βοήθεια της ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Θα εξετασθεί επιπροσθέτως η συμπεριφορά του ενισχυμένου κτηρίου με συμπερίληψη των τοιχοπληρώσεων των ορόφων, ούτως ώστε να διερευνηθεί αν είναι σημαντική η συνεισφορά τους ακόμα και αν το κτήριο έχει υποστεί επεμβάσεις. Για το σκοπό αυτό πρέπει στις επόμενες υποενότητες να εξεταστεί από βιβλιογραφικής άποψης ποια είναι η επίδραση των τοιχοπληρώσεων σε μια κατασκευή.

### **1.7. Διατάξεις τοιχοπληρώσεων που επηρεάζουν δυσμενώς την απόκριση του φορέα.**

Οι τοίχοι πλήρωσης κατέχουν σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση σεισμικής έντασης και γενικότερα στη συμπεριφορά των κατασκευών έναντι σεισμικών δράσεων. Μέσα από τη διαδικασία μελετών που πραγματοποιήθηκαν έχουν διαπιστωθεί σε μεγάλο βαθμό η ευμενής και η δυσμενής επίδραση των τοίχων πλήρωσης στην απόκριση των κατασκευών.

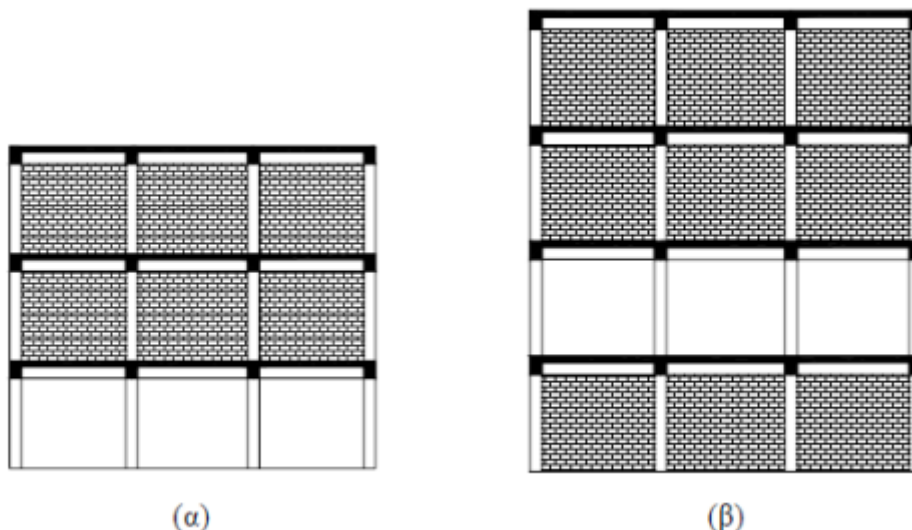
Οι θετικές επιδράσεις των τοιχοπληρώσεων που έχουν διαπιστωθεί είναι η αύξηση της υπεραντοχής, η αύξηση της πλευρικής δυσκαμψίας των κτιρίων καθώς επίσης και η αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας. Αντιθέτως οι αρνητικές επιδράσεις των τοίχων πλήρωσης είναι η εμφάνιση ‘μαλακού ορόφου’ είτε στο ισόγειο (πιλοτή) είτε σε ενδιάμεσο μη τοιχοπληρωμένο όροφο, καθώς επίσης και η δημιουργία κοντών υποστυλωμάτων.

Προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι τοίχοι πλήρωσης έχουν ευμενή ή δυσμενή επιρροή στην σεισμική συμπεριφορά μιας κατασκευής θα πρέπει να ελεγχθεί η διάταξή τους σε κάτοψη, σε τομή αλλά και μέσα στα φατνώματα οπλισμένου σκυροδέματος. Οι τοίχοι πλήρωσης που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι κατά μήκος της περιμέτρου του κτιρίου και δεν έχουν ασυνέχειες καθ’ ύψος, έχουν ευνοϊκή επιρροή στη σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου. Αυτή η ευμενής επιρροή είναι σημαντική ειδικά για πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος αφού αυξάνουν την αντοχή τους σε οριζόντια φορτία όπως είναι οι σεισμοί. Επίσης αυξάνεται η συνολική πλευρική δυσκαμψία των φορέων και έτσι μειώνονται οι μετακινήσεις λόγω σεισμού και κατά συνέπεια τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως, τα οποία προκαλούν την τελική κατάρρευση της κατασκευής με την επίδραση σεισμικών φορτίων. Στην πραγματικότητα όμως, σπάνια μπορεί να υπάρξουν φορείς με γεωμετρία που να καθορίζεται από συμμετρίες και η διάταξη των τοιχοπληρώσεων να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε κάτοψη και τομή. Ως συνήθως στις περισσότερες περιπτώσεις η διάταξη των τοιχοπληρώσεων καθώς και η γεωμετρία του φορέα χαρακτηρίζεται από σημαντική ασυμμετρία και μη κανονικότητα, με αποτέλεσμα να οδηγήσει σε πιθανή δυσμενή επιρροή των τοιχοπληρώσεων στην απόκριση του φορέα κατά τη σεισμική διέγερση.

### **1.8. Ανομοιόμορφη κατανομή των τοιχοπληρώσεων καθ’ ύψος.**

Μια χαρακτηριστική περίπτωση δυσμενούς διάταξης των τοίχων πλήρωσης είναι η ανομοιόμορφη κατανομή τους καθ’ ύψος όπως φαίνεται στο σχήμα 1 παρακάτω.





Σχήμα 1: Ανομοιόμορφη διάταξη των τοιχοπληρώσεων καθ' ύψος

Στις παραπάνω διατάξεις υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να δημιουργηθεί, έπειτα από σεισμική δράση, μηχανισμός “μαλακού ορόφου”. Αυτό συμβαίνει επειδή οι όροφοι που έχουν τοίχους πλήρωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και παράλληλα δεν μπορούν να αναπτύξουν ανελαστικές παραμορφώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συγκέντρωση των παραμορφώσεων στον μη τοιχοπληρωμένο όροφο, κάτι που τον κάνει ιδιαίτερα εύκαμπτο.

Πιο συγκεκριμένα, στον μη τοιχοπληρωμένο όροφο αναπτύσσεται μηχανισμός με τη μορφή πλαστικών αρθρώσεων που συγκεντρώνουν τις μετακινήσεις της κατασκευής και εκδηλώνονται στην κορυφή και τη βάση του ορόφου. Οι μετακινήσεις αυτές οδηγούν σε φαινόμενα δευτέρας τάξεως και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αδυναμία των υποστυλωμάτων να φέρουν τα κατακόρυφα φορτία.

Τα αποτελέσματα που έχουν αξιολογηθεί έπειτα από σεισμούς αποδεικνύουν ότι οι πολυκατοικίες οπλισμένου σκυροδέματος με *pilotis* είναι η χαρακτηριστικότερη περίπτωση ευάλωτων δομικών συστημάτων.

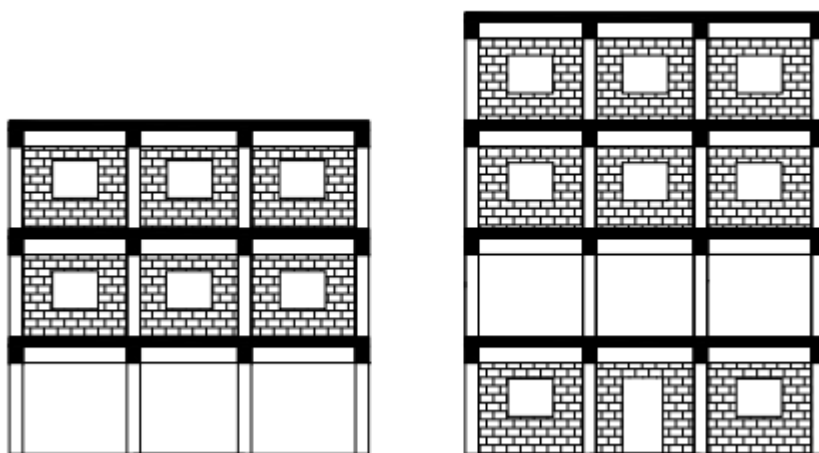
Τέλος μπορούμε να πούμε ότι η ύπαρξη τοίχων πλήρωσης σε έναν όροφο δεν σημαίνει απαραίτητα ότι έχει αποκλειστεί το ενδεχόμενο ανάπτυξης μαλακού ορόφου. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου ένα κτίριο οδηγείται σε κατάρρευση όταν μερικώς ή πλήρως τοιχοπληρωμένα ισόγεια μετατρέπονται σε πιλοτή λόγω πρόωρης πλήρους αστοχίας των τοίχων πλήρωσης.

### 1.9 Ασύμμετρη διάταξη των τοιχοπληρώσεων σε κάτοψη

Όταν οι τοίχοι πλήρωσης παρουσιάζουν ασυμμετρίες στον τρόπο διάταξής τους σε κάτοψη εμφανίζεται εκκεντρότητα μεταξύ του κέντρου μάζας και του ενεργού κέντρου δυσκαμψίας του κτιρίου. Το αποτέλεσμα αυτής της εκκεντρότητας είναι η ανάπτυξη στρέψης περί τον κατακόρυφο άξονα, όταν στην κατασκευή υποβάλλονται σεισμικές φορτίσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα γωνιακά κτίρια που συνήθως έχουν τοίχους πλήρωσης σε δύο συνεχόμενες πλευρές, χωρίς αυτό να ισχύει και στην απέναντι πλευρά. Η εκκεντρότητα σε τέτοια κτίρια δημιουργεί στρεπτική απόκριση που επιβαρύνει τα στοιχεία της κατασκευής στην πλευρά της κάτοψης με τις λιγότερες τοιχοπληρώσεις.

### 1.10. Διακοπή τοιχοπληρώσεων καθ' ύψος εντός του ορόφου

Η ομοιόμορφη κατανομή των τοίχων πλήρωσης περιμετρικά του κτιρίου δεν εξασφαλίζει την ευμενή επιρροή τους. Όταν οι τοιχοπληρώσεις διακόπτονται καθ' ύψος εντός του ορόφου, όπως για παράδειγμα στη στάθμη της ποδιάς των παραθύρων σε όλο το μήκος του φαντώματος, παρατηρείται η δημιουργία κοντών υποστυλωμάτων. Βασικό χαρακτηριστικό των κοντών υποστυλωμάτων κυρίως όταν αυτά βρίσκονται στον κατώτατο όροφο είναι η αστοχία τους σε διάτμηση και η δημιουργία ρωγμών.



Σχήμα 2: Διακοπή τοιχοπληρώσεων καθ' ύψος ενός φαντώματος.

Επίσης, όταν οι τοίχοι πλήρωσης έχουν μεγάλη δυσκαμψία, υψηλή αντοχή και περιβάλλονται από αδύνατα πλαίσια, ενδέχεται να προκαλέσουν τοπικές αστοχίες στα

γειτονικά στοιχεία. Οι αστοχίες αυτές, δημιουργούνται από τη διαγώνια δύναμη που ασκεί ο τοίχος στο πλαίσιο προκαλώντας διατμητική αστοχία στο υποστύλωμα η οποία συνεχίζεται και στον υπερκείμενο κόμβο.

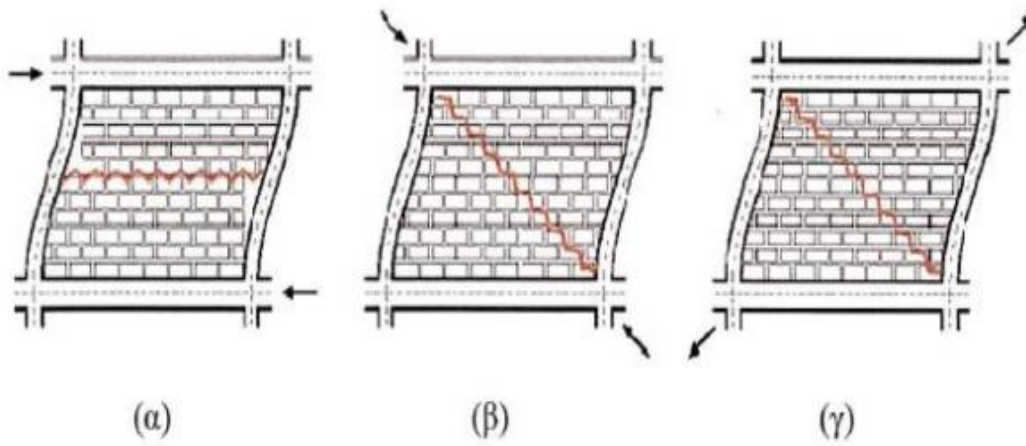
### 1.11. Μηχανισμοί αστοχίας τοιχοπληρωμένων πλαισίων

Έπειτα από ένα μεγάλο πλήθος εργασιών και πειραμάτων έχει αποδειχθεί ότι η συνολική συμπεριφορά ενός τοιχοπληρωμένου πλαισίου εξαρτάται άμεσα από την αλληλεπίδραση της τοιχοπλήρωσης με το περιβάλλον πλαίσιο. Ως επί το πλείστον η συνολική πλευρική αντίσταση του συστήματος δεν αναλύεται ως άθροισμα των δύο επιμέρους (πλαισίου και τοιχοπλήρωσης) για τον λόγο ότι ο τρόπος που αλληλεπιδρούν τα δύο μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά το μηχανισμό αντίστασης που αναπτύσσει το καθ' ένα ξεχωριστά. Για χαμηλά επίπεδα πλευρικής φόρτισης μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι όλο το τοιχοπληρωμένο πλαίσιο συμπεριφέρεται σαν σύνολο. Όσο αυξάνεται το δυναμικό πλευρικό φορτίο η τοιχοπλήρωση αρχίζει να αποκολλάται από το περιμετρικό πλαίσιο στις δύο απέναντι γωνιές (κάτω αριστερά και πάνω δεξιά αν πρόκειται για φόρτιση με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά), ενώ ανάμεσα στις άλλες δύο γωνιές που παραμένουν σε επαφή με το πλαίσιο (πάνω αριστερά και κάτω δεξιά) αναπτύσσεται μηχανισμός θλιβόμενης διαγωνίου.

Ωστόσο, ο μηχανισμός της θλιβόμενης διαγωνίου που αναφέρθηκε παραπάνω δεν είναι ο μοναδικός που έχει παρατηρηθεί. Πολλές παράμετροι παίζουν ρόλο για το ποιος κύριος μηχανισμός αντίστασης και αστοχίας θα αναπτυχθεί. Οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν τον κύριο μηχανισμό αντίστασης και αστοχίας που θα αναπτυχθεί είναι η σχετική δυσκαμψία και η αντοχή του συστήματος πλαισίου – τοιχοπλήρωσης, καθώς επίσης και ο τρόπος όπλισης του περιμετρικού πλαισίου.

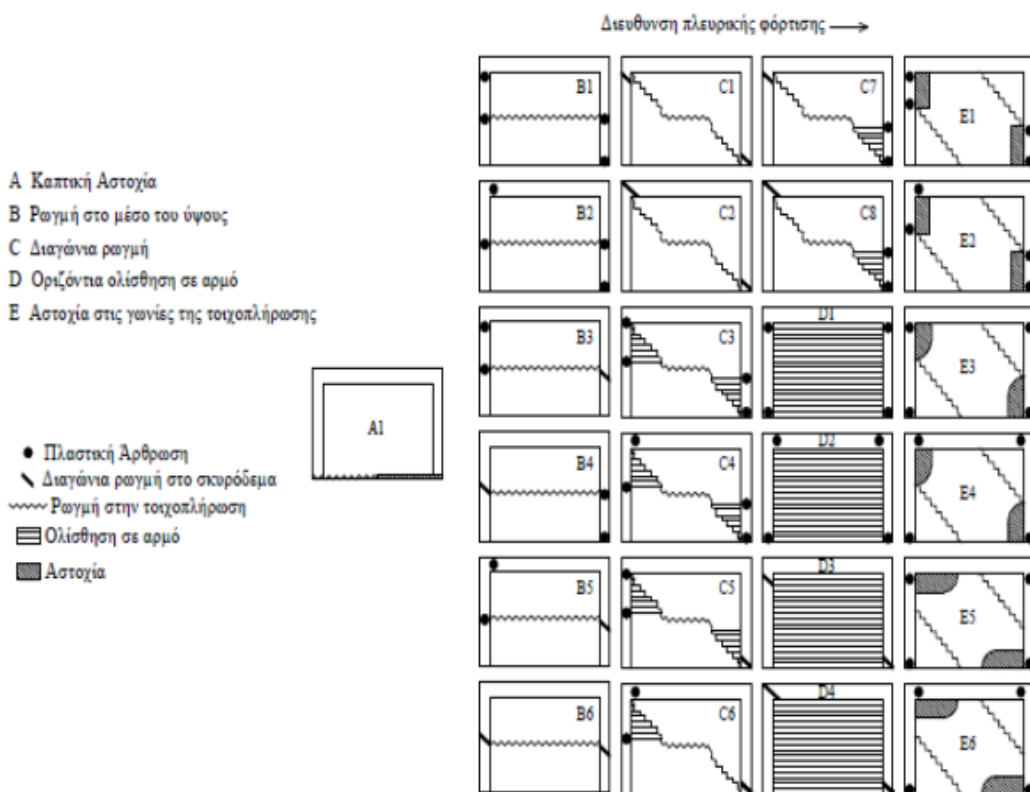
Οι κυριότεροι μηχανισμοί αστοχίας είναι οι εξής:

- Η διατμητική αστοχία (ολίσθησης).
- Η αστοχία θλιβόμενης διαγωνίου.
- Η αστοχία διαγωνίου λόγω εφελκυσμού.
- Η εφελκυστική αστοχία λόγω καμπτικών δυνάμεων.



Σχήμα 3: Κυριότερες μορφές αστοχίας τοιχοπληρώσεων: (α) διαμητική αστοχία, (β) αστοχία θλιβόμενης διαγωνίου, (γ) αστοχία διαγωνίου λόγω εφελκυσμού.

Στην συνέχεια στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται και περιγράφονται πιο αναλυτικά οι κυριότεροι μηχανισμοί αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί στις διάφορες πειραματικές εργασίες πάνω σε τοιχοπληρωμένα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 4: Μηχανισμοί αστοχίας τοιχοπληρωμένων πλαισίων (Shing 2002)

**Μηχανισμός αστοχίας (A):**

Στον μηχανισμό αστοχίας (A) ο τρόπος αστοχίας στη βάση της τοιχοπλήρωσης είναι καθαρά καμπτικός, όπου δημιουργείται εφελκυσμός στο ένα άκρο και θλίψη στο άλλο. Ο μηχανισμός αυτός σπάνια εμφανίζεται. Αναπτύσσεται κυρίως σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης όπου δεν υπάρχει διαχωρισμός πλαισίου και τοιχοπλήρωσης. Ως συνήθως εμφανίζεται σε λυγηρά πλαίσια που έχουν μεγάλο ύψος με ελάχιστο διαμήκη οπλισμό στα υποστυλώματα. Το χαμηλό ποσοστό οπλισμού που υπάρχει στα υποστυλώματα οδηγεί στην πρόωρη διαρροή του διαμήκους οπλισμού των υποστυλωμάτων που βρίσκονται στην πλευρά της φόρτισης. Σε συνήθη επίπεδα φόρτισης όμως παρουσιάζεται αποκόλληση της τοιχοπλήρωσης από το πλαίσιο.

**Μηχανισμός αστοχίας (B):** Ο δεύτερος μηχανισμός είναι αυτός της διατμητικής αστοχίας ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια οριζόντια ρωγμή στην τοιχοπλήρωση, η οποία συνήθως εμφανίζεται στην θέση του αρμού και οδηγεί στη εμφάνιση κοντών υποστυλωμάτων. Στα υποστυλώματα δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις ενώ ως συνήθως τα υποστυλώματα αστοχούν διατμητικά αναπτύσσοντας διαγώνιες ρωγμές.

**Μηχανισμός αστοχίας (C):**

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μηχανισμό θλιβόμενης διαγωνίου όπου αναπτύσσεται στην τοιχοπλήρωση μια διαγώνια ρωγμή η οποία ξεκινά από την γωνιά που ασκείται το φορτίο και καταλήγει στην απέναντι γωνιά ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συνοδεύεται και από ολίσθηση σε ενδιάμεσο αρμό. Σε αυτή την περίπτωση η τοιχοπλήρωση λειτουργεί σαν θλιβόμενη διαγώνιος η οποία συνήθως οδηγεί σε ψαθυρή αστοχία και αναπτύσσει πλαστικές αρθρώσεις ή διατμητικές ρωγμές στα μέλη του οπλισμένου σκυροδέματος.

**Μηχανισμός αστοχίας (D):**

Σε αυτό το μηχανισμό έχουμε την περίπτωση όπου αναπτύσσονται οριζόντιες ρωγμές σχεδόν σε όλους τους αρμούς της τοιχοπλήρωσης. Αυτό συμβαίνει όταν η διατμητική αντοχή του κονιάματος που έχει χρησιμοποιηθεί είναι πάρα πολύ μικρή. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να οδηγήσει σε μια πλάστιμη συμπεριφορά του πλαισίου συνολικά με υψηλά ποσοστά απόσβεσης σε δυναμική απόκριση υπό την προϋπόθεση όμως ότι τα υποστυλώματα δεν θα αστοχήσουν διατμητικά.

**Μηχανισμός αστοχίας (E):**

Και σε αυτό τον μηχανισμό έχουμε περίπτωση μηχανισμού θλιβόμενης διαγωνίου όπως στην περίπτωση (C), στην οποία όμως αναπτύσσονται δύο παράλληλες ρωγμές στον τοίχο. Ως συνήθως ο μηχανισμός αυτός συνοδεύεται από αστοχία στις γωνίες στα άκρα της

θλιβόμενης διαγωνίου ενώ σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχουν ταυτόχρονα αστοχίες και στο κέντρο του φατνώματος.

### **1.12. Περιγραφή του περιεχομένου των κεφαλαίων της εργασίας.**

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα αναφέρονται οι παραδοχές της, οι δυνατότητές της και τα μειονεκτήματά της, ενώ γίνεται και μία περιγραφή των αποτελεσμάτων που μπορούμε να πάρουμε από αυτήν.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η ευμενής και η δυσμενής επιρροή των τοιχοπληρώσεων στη σεισμική συμπεριφορά ενός κτιρίου και παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι μέθοδοι προσομοίωσής τους σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης γίνεται αναφορά στα είδη προσομοιωμάτων και στις διατάξεις συγκεκριμένων κανονισμών (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Ευρωκώδικας 8 και κείμενο FEMA 356) που σχετίζονται με τις τοιχοπληρώσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του υπό εξέταση κτιρίου. Περιγράφεται η μέθοδος προσομοίωσης των δομικών στοιχείων και εφαρμόζεται η pushover ανάλυση. Στη συνέχεια γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και επαναλαμβάνεται η διαδικασία της ανάλυσης, αφού έχει γίνει προσομοίωση και της τοιχοποιίας.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### 2.1. Γεωμετρία κτηρίου και παραδοχές

#### Περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κτιρίου.

Πρόκειται για ένα πενταώροφο κτίριο με συμμετρική κάτοψη (κανονικό σε κάτοψη) και με μεταβολή δυσκαμψίας ανά όροφο καθώς μεταβάλλονται με μικρή διαβάθμιση οι διατομές των υποστυλωμάτων. Θα εξετασθούν τρεις παραλλαγές του κτιρίου, πλαίσιο, πλήρως τοιχοπληρωμένο και τοιχοπληρωμένο με πιλοτή.

#### Παραδοχή

##### A) ΦΟΡΤΙΑ

##### A) 1) ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΦΟΡΤΙΑ

##### A) 1.1) ΜΟΝΙΜΑ

Ίδιο βάρος οπλισμένου σκυροδέματος	25.00 KN/m <sup>3</sup>
------------------------------------	-------------------------

Ίδιο βάρος δομικού χάλυβα	78,50 KN/m <sup>3</sup>
---------------------------	-------------------------

Επικάλυψη δαπέδων και εσωτερικά χωρίσματα	1,00 KN/m <sup>2</sup>
---	------------------------

Δρομικές οπτοπλινθοδομές	2,10 KN/m <sup>2</sup>
--------------------------	------------------------

Μπατικές οπτοπλινθοδομές	3,60KN/m <sup>2</sup>
--------------------------	-----------------------

Επικάλυψη δώματος	2,00 KN/m <sup>2</sup>
-------------------	------------------------

##### A) 1.2) ΚΙΝΗΤΑ

Δαπέδων γενικώς	2,00 KN/m <sup>2</sup>
-----------------	------------------------

Δαπέδων εξωστών	5,00KN/m <sup>2</sup>
-----------------	-----------------------

Δαπέδων δώματος	1,00 KN/m <sup>2</sup>
-----------------	------------------------

##### A) 2) ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΦΟΡΤΙΑ

##### A) 2.1) ΣΕΙΣΜΟΣ (σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ.)

Σεισμική επιτάχυνση εδάφους	$\alpha=0,16$
-----------------------------	---------------

Κατηγορία σεισμικής επικινδυνότητας εδάφους	B
---	---

Κατηγορία σπουδαιότητας	$\Sigma 2(\gamma=1)$
-------------------------	----------------------

Συντελεστής θεμελίωσης	$\theta=0,9$
------------------------	--------------

## B) ΥΛΙΚΑ

## ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Ποιότητα σκυροδέματος

 $f_{ck}=16 \text{ Mpa}$  $f_{cm}=25 \text{ MPa}$ 

Χάλυβας οπλισμού

St3 (S400)

## ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

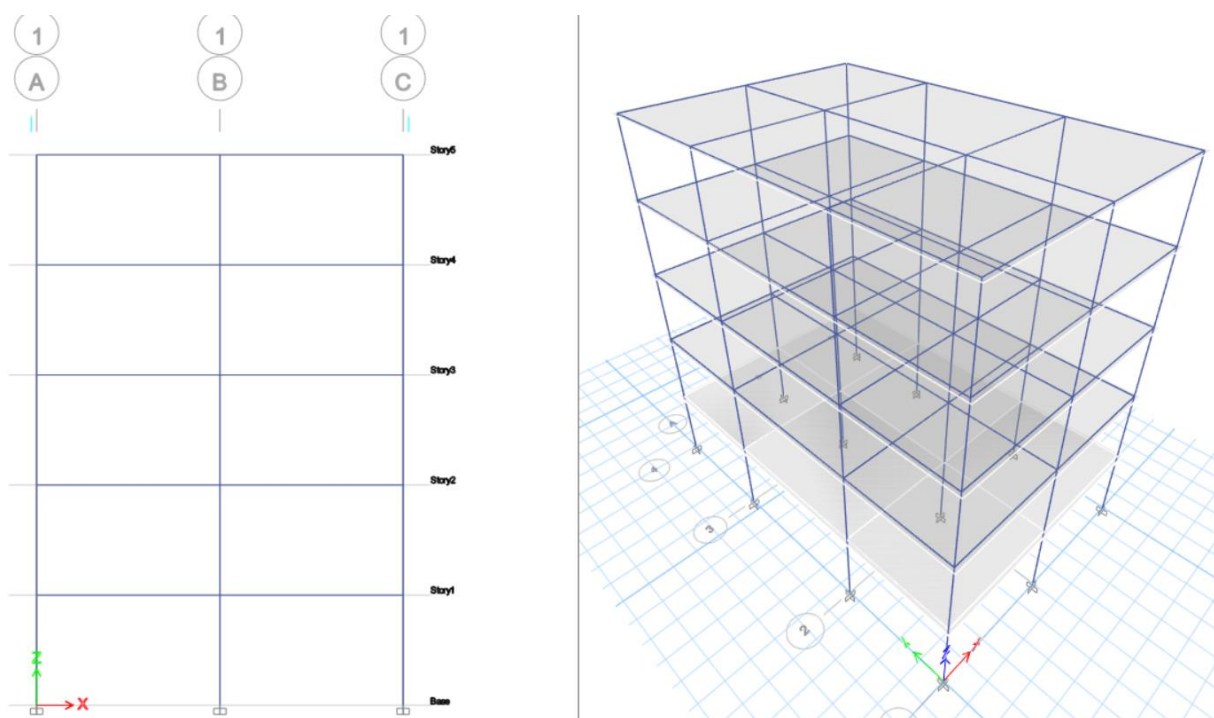
Ποιότητα σκυροδέματος

C20/25

Χάλυβας οπλισμού

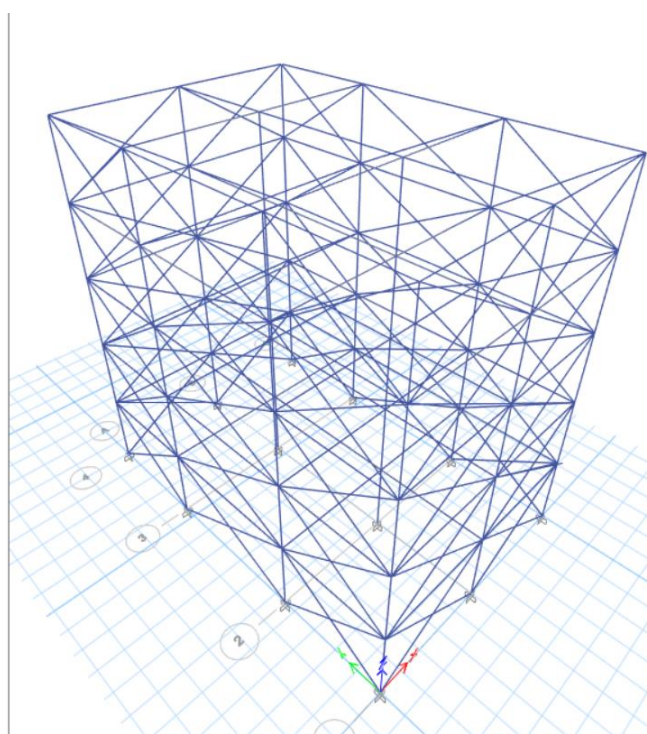
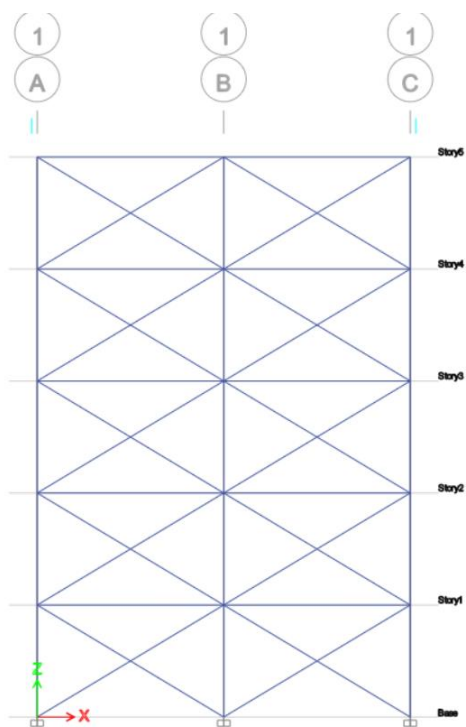
S500s

Όπως φαίνεται παραπάνω, το υλικό κατασκευής του κτιρίου είναι το σκυρόδεμα ποιότητας C20/25 και ο χάλυβας οπλισμού είναι ποιότητας S400. Σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ, η αντιπροσωπευτική τιμή των υφιστάμενων υλικών είναι ίση με την μέση τιμή, για έλεγχο σε όρους παραμορφώσεων, ή την μέση τιμή μειωμένη κατά μία τυπική απόκλιση, για έλεγχο σε όρους δυνάμεων. Η μέση τιμή, για συγκεκριμένο δομικό στοιχείο (ή ομάδα ομοειδών στοιχείων), είναι η διαπιστωμένη ονομαστική, ενώ η ονομαστική τυπική απόκλιση εξαρτάται κυρίως από το είδος του υλικού καθώς και την ποιότητα και την περίοδο κατασκευής.

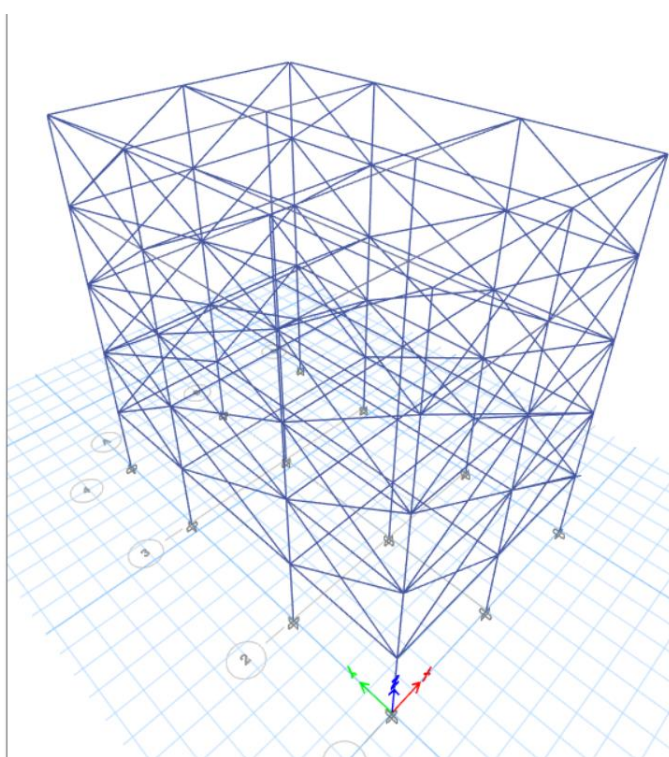
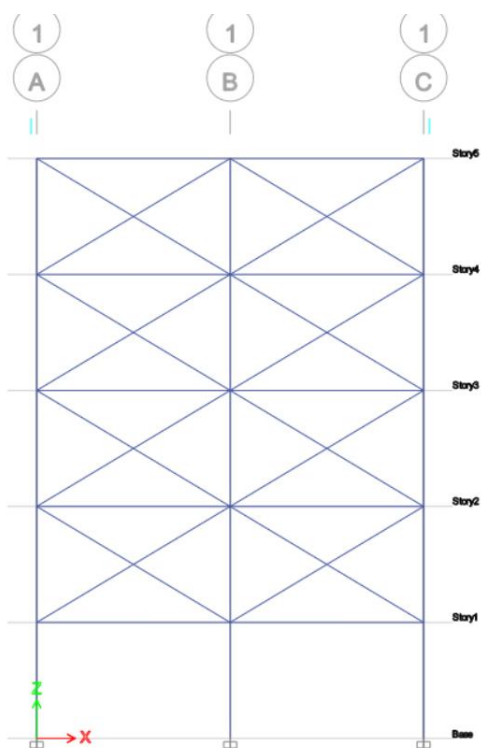


Εικόνα 7: Γεωμετρία κτηρίου χωρίς τοιχοπληρώσεις





Εικόνα 8: Γεωμετρία κτηρίου με τοιχοπληρώσεις



Εικόνα 9: Γεωμετρία κτηρίου με τοιχοπληρώσεις και ισόγειο pilotis

## 2.2.Ορισμός των διατομών των δομικών στοιχείων της κατασκευής.

Οι δοκοί του κτιρίου είναι ορθογωνικής διατομής. Η γεωμετρία και οι οπλισμοί των υποστυλωμάτων του Α ορόφου είναι ίδιοι με αυτούς των υπερκείμενων ορόφων. Οι διαστάσεις και ο διαμήκης οπλισμός τους παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Διαστάσεις και οπλισμοί διατομών ισογείου

		ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΡΙΞΗ	ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΡΙΞΗ	ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗ	ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗ
ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΔΟΚΩΝ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΝΩ ΠΕΛΜΑ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΩ ΠΕΛΜΑ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΝΩ ΠΕΛΜΑ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΩ ΠΕΛΜΑ
ΙΣΟΓΕΙΟ					
D1_IS	20/60	2Φ12+2Φ10	2Φ12+2Φ10	4Φ10+2Φ16	2Φ10
D2_IS	20/60	4Φ10+2Φ16	2Φ10	2Φ12+2Φ10	2Φ12+2Φ10
D3_IS	20/60	2Φ14	2Φ12	5Φ14+2Φ12	2Φ12
D4_IS	20/60	5Φ14+2Φ12	2Φ14	2Φ12	2Φ14
D5_IS	20/60	2Φ14	2Φ12	5Φ14+2Φ12	2Φ12
D6_IS	20/60	5Φ14+2Φ12	2Φ14	2Φ12	2Φ14
D7_IS	20/60	2Φ12+2Φ10	2Φ12+2Φ10	5Φ14+2Φ10	2Φ10
D8_IS	20/60	2Φ10+5Φ14	2Φ14	2Φ12+2Φ14	2Φ12+2Φ14
D9_IS	20/60	2Φ10	2Φ10	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10
D10_IS	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12
D11_IS	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10	2Φ10	2Φ10
D12_IS	20/60	2Φ10	2Φ10	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10
D13_IS	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12
D14_IS	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10	2Φ10	2Φ10
D15_IS	20/60	2Φ12+2Φ10	2Φ12+2Φ10	2Φ10+4Φ14+1Φ16	2Φ10
D16_IS	20/60	2Φ10+4Φ14+1Φ16	2Φ14	2Φ10+4Φ14+1Φ16	2Φ14
D17_IS	20/60	2Φ10+4Φ14+1Φ16	2Φ10	4Φ10	4Φ10

Πίνακας 3: Διαστάσεις και οπλισμός δοκών ορόφων

		ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΡΙΞΗ	ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΡΙΞΗ	ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗ	ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗ
ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΔΟΚΩΝ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΝΩ ΠΕΛΜΑ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΩ ΠΕΛΜΑ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΝΩ ΠΕΛΜΑ	ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΩ ΠΕΛΜΑ
D1_A	20/60	3Φ10	3Φ10	4Φ10+3Φ12	2Φ10
D2_A	20/60	4Φ10+3Φ12	2Φ10	3Φ10	3Φ10
D3_A	20/60	2Φ14	2Φ12	5Φ14+2Φ12	2Φ12
D4_A	20/60	5Φ14+2Φ12	2Φ14	2Φ12	2Φ14
D5_A	20/60	2Φ14	2Φ12	5Φ14+2Φ12	2Φ12
D6_A	20/60	5Φ14+2Φ12	2Φ14	2Φ12	2Φ14
D7_A	20/60	3Φ10	3Φ10	2Φ10+5Φ14	2Φ10
D8_A	20/60	2Φ10+5Φ14	2Φ14	1Φ10+2Φ14	1Φ10+2Φ14
D9_A	20/60	3Φ10	3Φ10	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10
D10_A	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12
D11_A	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10	3Φ10	3Φ10
D12_A	20/60	2Φ10	2Φ10	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10
D13_A	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ12
D14_A	20/60	2Φ10+2Φ12+2Φ14	2Φ10	2Φ10	2Φ10
D15_A	20/60	3Φ10	3Φ10	2Φ10+5Φ14	2Φ10
D16_A	20/60	2Φ10+5Φ14	2Φ14	2Φ10+5Φ14	2Φ14
D17_A	20/60	2Φ10+5Φ14	2Φ10	3Φ10	3Φ10

Τα υποστυλώματα του κτιρίου έχουν ορθογωνική διατομή. Η επικάλυψη των οπλισμών είναι 2 εκατοστά. Η γεωμετρία και οι οπλισμοί των υποστυλωμάτων του Α ορόφου είναι ίδιοι με

αυτούς των υπερκείμενων ορόφων. Οι διαστάσεις και ο διαμήκης οπλισμός τους παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Γεωμετρία και οπλισμοί υποστυλωμάτων

Όροφος	Υποστυλώματα	b (cm)	h (cm)	Διαμήκης (As)	Συνδετήρες
ΙΣΟΓΕΙΟ	K1	40	40	8Φ18	Φ8/20
	K2	45	30	8Φ16	Φ8/20
	K3	40	40	8Φ18	Φ8/20
	K4	35	45	8Φ18	Φ8/20
	K5	50	50	16Φ20	Φ8/20
	K6	30	45	8Φ16	Φ8/20
	K7	35	45	8Φ18	Φ8/20
	K8	50	50	16Φ20	Φ8/20
	K9	30	45	8Φ16	Φ8/20
	K10	40	40	8Φ18	Φ8/20
	K11	45	35	8Φ18	Φ8/20
	K12	40	40	8Φ18	Φ8/20
Α' ΟΡΟΦΟΣ	K1	35	35	4Φ20	Φ8/20
	K2	40	30	8Φ14	Φ8/20
	K3	35	35	4Φ20	Φ8/20
	K4	30	40	8Φ14	Φ8/20
	K5	45	45	12Φ20	Φ8/20
	K6	30	40	8Φ14	Φ8/20
	K7	30	40	8Φ14	Φ8/20
	K8	45	45	12Φ20	Φ8/20
	K9	30	40	8Φ14	Φ8/20
	K10	35	35	4Φ20	Φ8/20
	K11	40	30	8Φ14	Φ8/20
	K12	35	35	4Φ20	Φ8/20

### 2.3.Ενισχυμένες διατομές κτηρίου με σύνθετα υλικά

Θα ενισχυθούν οι διατομές υποστυλωμάτων όλου του κτηρίου με FRP με ανθρακονήματα που έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες.

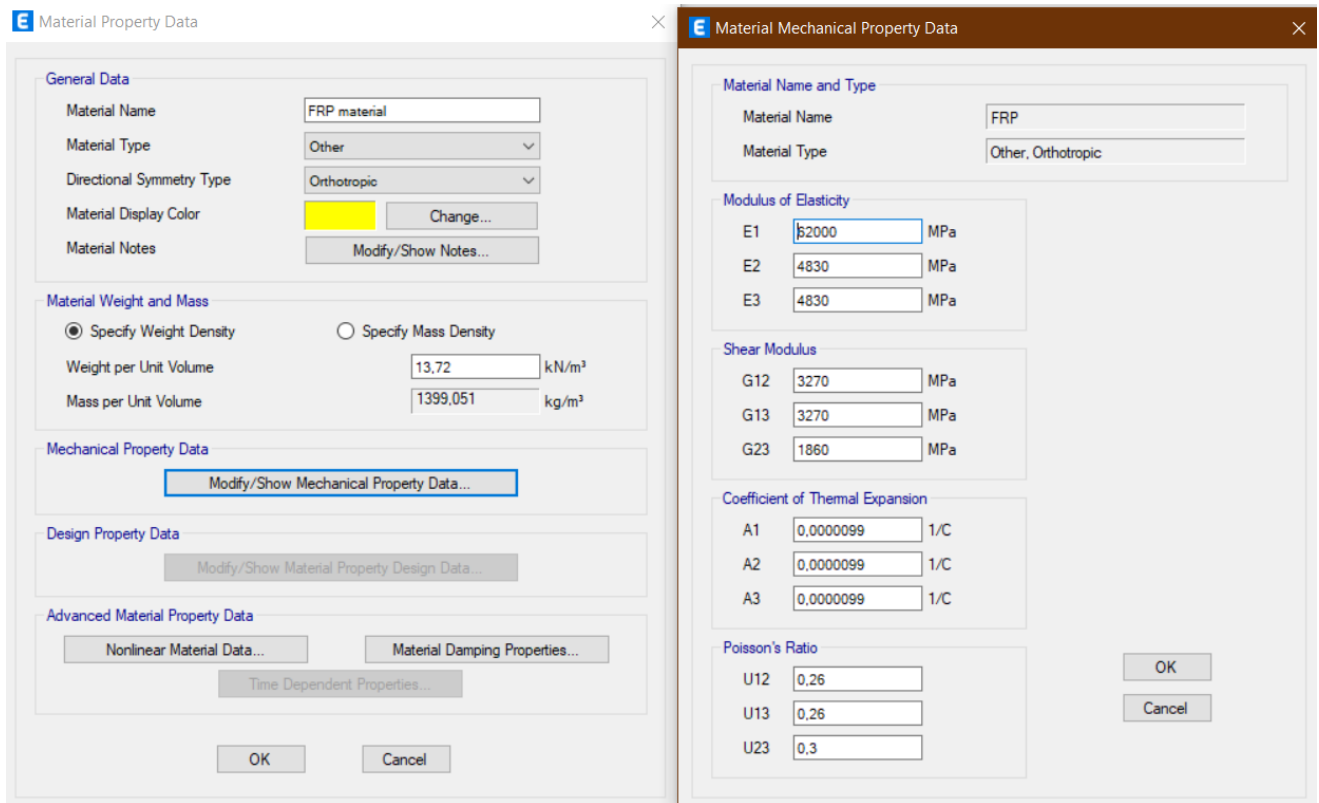
$$\text{Βάρος FRP} = 1.4 \text{ kgr/dm}^3 = 1400 \text{ kgr/m}^3 = 13.72 \text{ kN/m}^3$$

Μέτρο Ελαστικότητας FRP (ορθοτροπικό υλικό με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας ανά διεύθυνση) :  $E_x = E_1 = 62000 \text{ MPa}$ ,  $E_y = E_z = E_2 = E_3 = 4830 \text{ MPa}$  (Σημειώνεται ότι ο άξονας x στο etabs είναι ο άξονας 1 και ο άξονας y έχει ονομασία 2 ενώ ο άξονας z έχει ονομασία 3).

Μέτρο Διάτμησης FRP (ορθοτροπικό υλικό με διαφορετικό μέτρο διάτμησης ανά διεύθυνση):  $G_{xy} = G_{12} = 3270 \text{ MPa}$ ,  $G_{xz} = G_{13} = 3270 \text{ MPa}$ ,  $G_{yz} = 1860 \text{ MPa}$

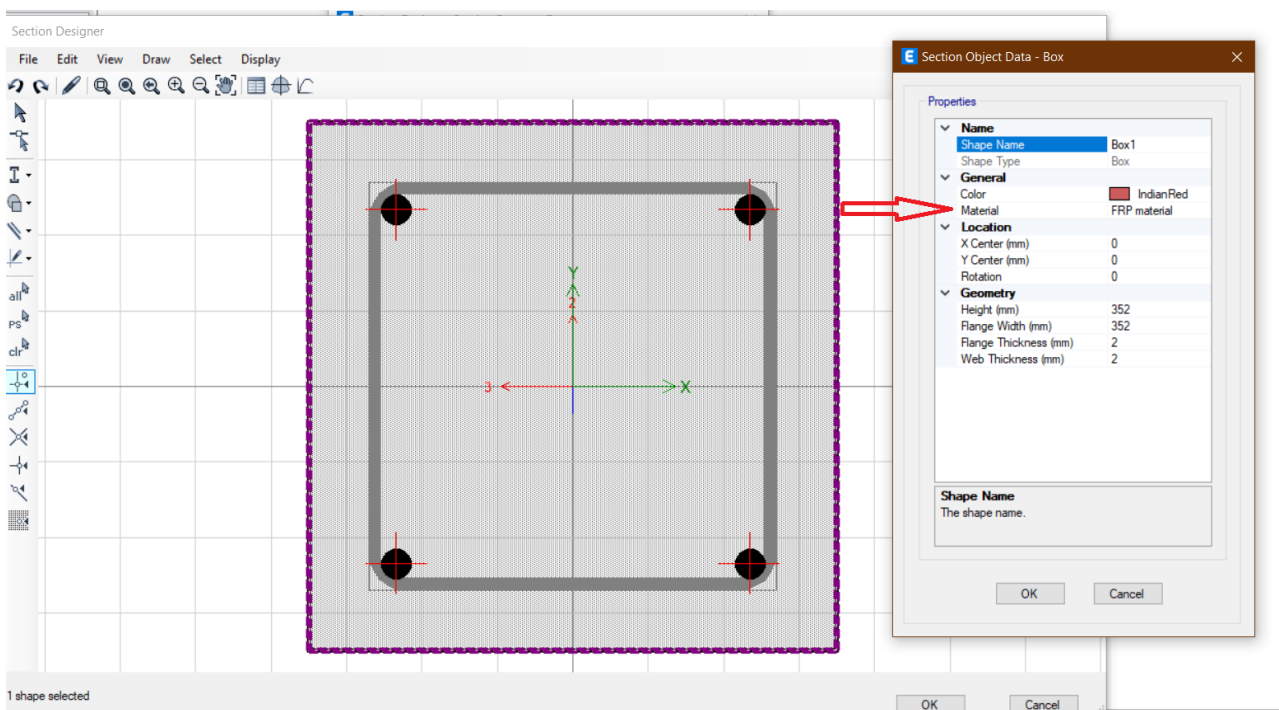
Λόγος Poisson FRP (ορθοτροπικό υλικό με διαφορετικό λόγο Poisson ανά διεύθυνση):

$$\nu_{xy} = \nu_{12} = 0.26, \nu_{xz} = \nu_{13} = 0.26, \nu_{yz} = 0.30$$

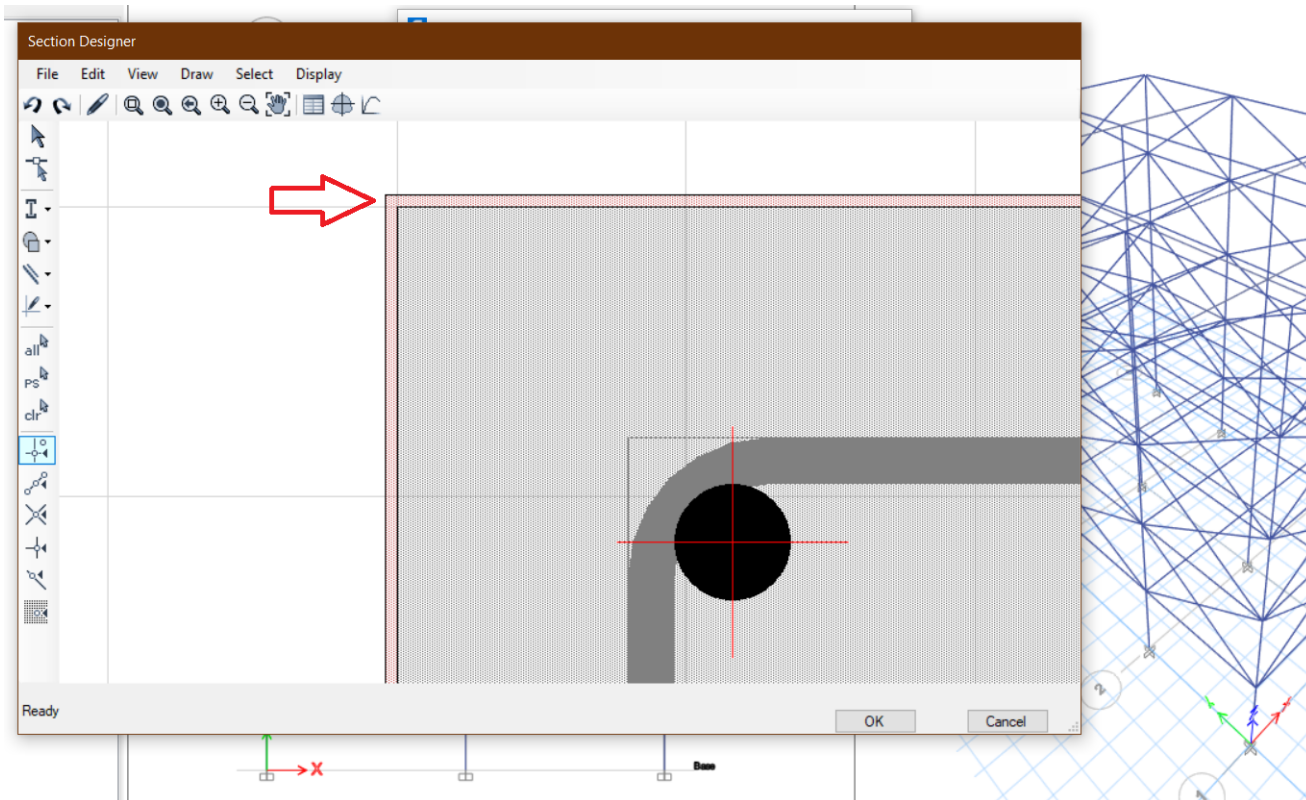


Εικόνα 10: Ορισμός υλικού ενίσχυσης FRP ανθρακονημάτων στο Etabs

Το πάχος του FRP θα είναι ίσο με 2mm. Με τη χρήση του εργαλείου Section Designer στο Etabs μορφώνω τη σύνθετη διατομή των υποστυλωμάτων (για όλες τις διαφορετικές διατομές που έχουν ορισθεί από τον αρχικό φορέα). Αυτό φαίνεται ενδεικτικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 11: Εφαρμογή FRP ανθρακονήματος πάχους 2mm περιμετρικά των διατομών υποστυλωμάτων



Εικόνα 12: Λεπτομέρεια εφαρμογής FRP στην περίμετρο της διατομής των υποστυλωμάτων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα εκτελεσθούν οι αναλύσεις στους 3 διαφορετικούς φορείς. Στον πρώτο φορέα χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων, στον δεύτερο φορέα με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων και στον 3<sup>ο</sup> φορέα με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων και ταυτόχρονη ύπαρξη pilotis. Και οι 3 αυτοί φορείς έχουν ενισχυμένα υποστυλώματα με FRP με την μεθοδολογία προσομοίωσης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Οι 3 αυτοί φορείς θα συγκριθούν με τις αναλύσεις που έγιναν με τους αντίστοιχους μη ενισχυμένους φορείς. Τα σημεία που θα εξετάσουμε θα είναι:

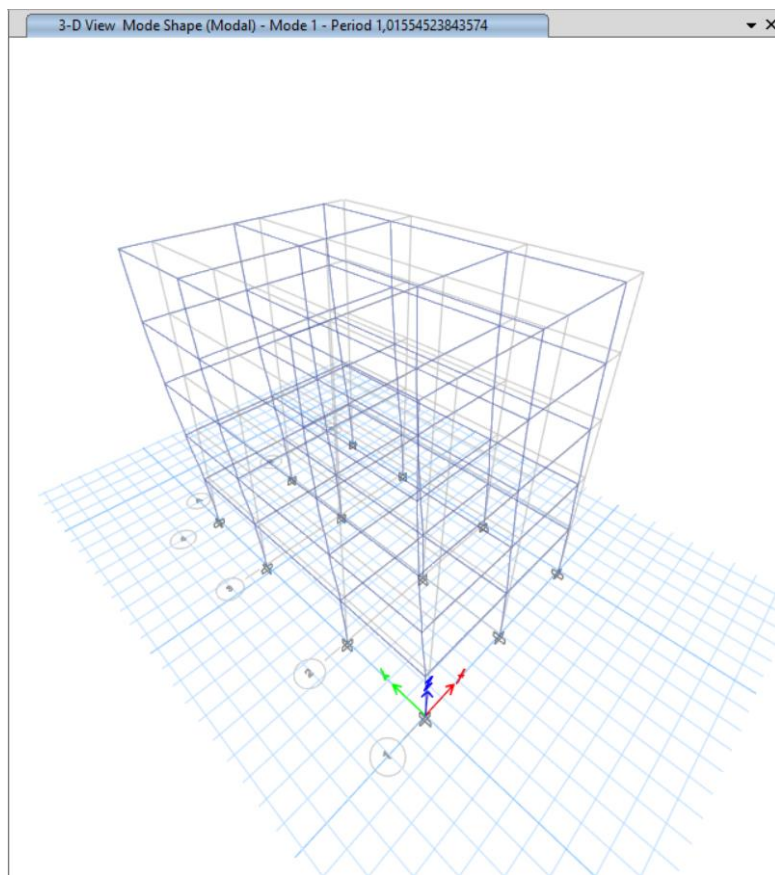
A. Ιδιομορφική ανάλυση

B. Βασικός Συνδυασμός Φόρτισης (1.35G+1.5Q)

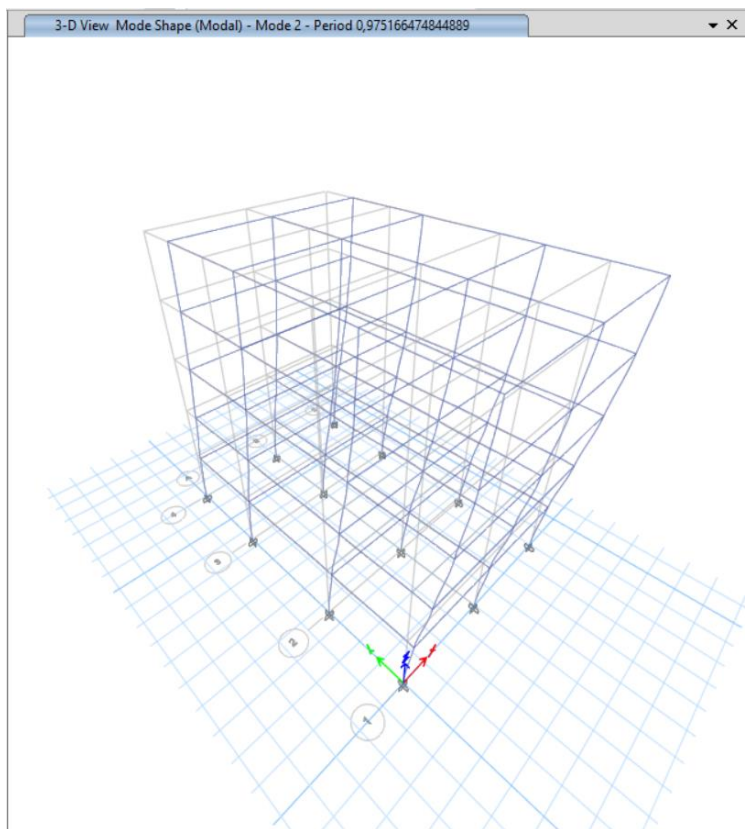
Γ. Pushover με την 1<sup>η</sup> ιδιομορφική συνιστώσα κατά X και κατά Y

### 3.2.Κτήριο χωρίς τοιχοπληρώσεις

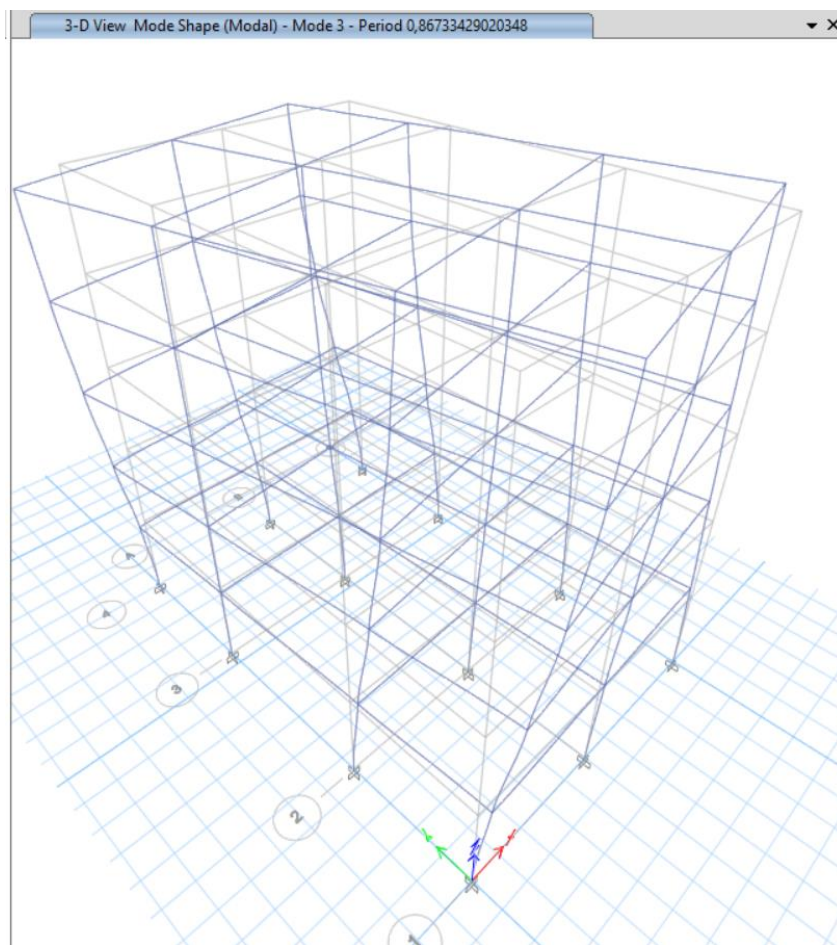
Στον ενισχυμένο με FRP φορέα χωρίς όμως τοιχοπληρώσεις διακρίνουμε (ενδεικτικά) τα ακόλουθα στιγμιότυπα παραμόρφωσης κατά την 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup>, και 3<sup>η</sup> ιδιομορφή.



Εικόνα 13: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις κατά X.  $T_x=1.015 \text{ sec}$



Εικόνα 14: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις κατά Υ.  $T_y=0.975 \text{ sec}$



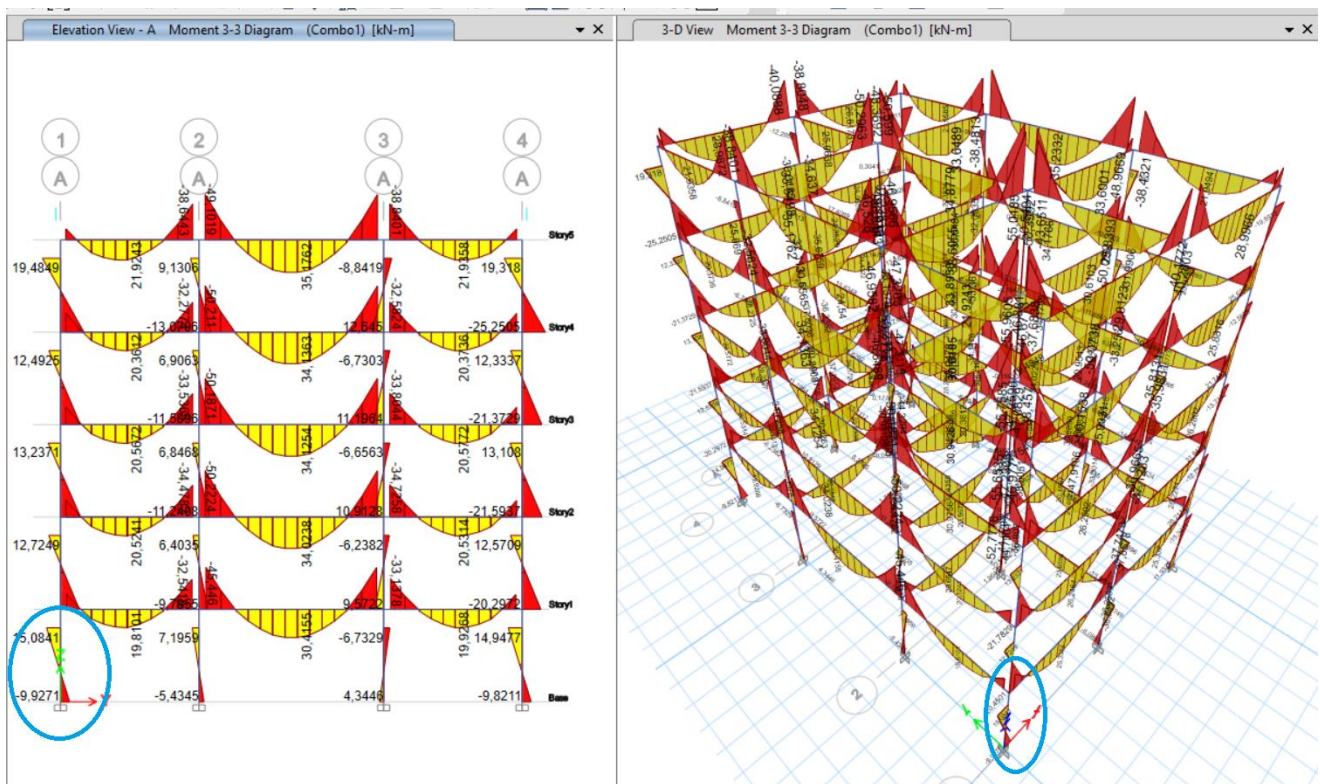
Εικόνα 15: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις στροφή κατά φ.  $T_\varphi=0.867 \text{ sec}$



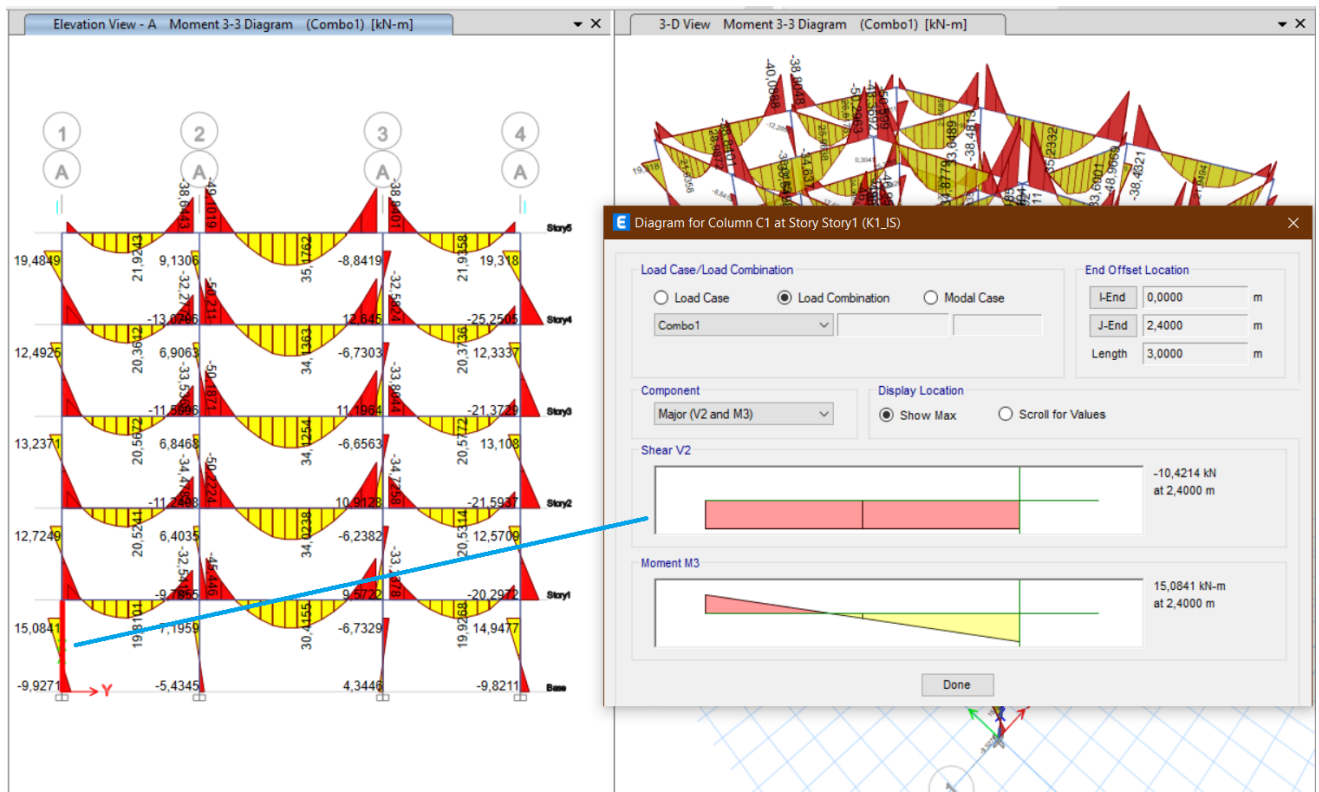
Πίνακας 5: Πίνακας ιδιομορφών και συντελεστών συμμετοχής μάζας για ενισχυμένο κτήριο χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων

Mode	Period	SumUX	SumUY	SumRZ
	sec			
1	1,016	0,8159	0	0,000004642
2	0,975	0,8159	0,8161	0,0001
3	0,867	0,8159	0,8162	0,8155
4	0,332	0,9209	0,8162	0,8155
5	0,318	0,9209	0,9209	0,8155
6	0,284	0,9209	0,9209	0,9197
7	0,194	0,9651	0,9209	0,9197
8	0,186	0,9651	0,965	0,9197
9	0,167	0,9651	0,965	0,9639
10	0,138	0,9894	0,965	0,9639
11	0,133	0,9894	0,9894	0,9639
12	0,12	0,9894	0,9894	0,9886

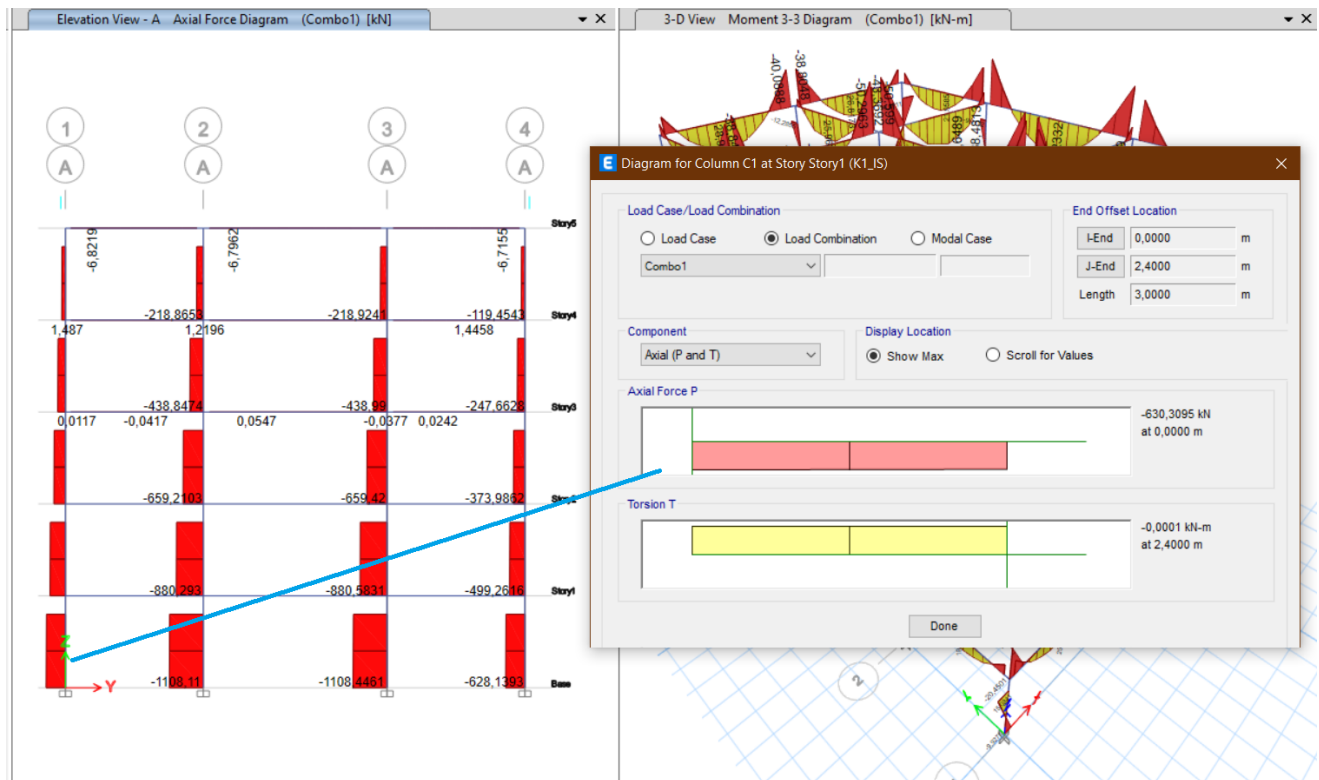
Ενδεικτικά παραθέτουμε ένα στιγμιότυπο οθόνης από το διάγραμμα ροπών του φορέα για το βασικό συνδυασμό και τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για ένα ακραίο υποστύλωμα (σημειώνεται με κύκλο στο ακόλουθο στιγμιότυπο).



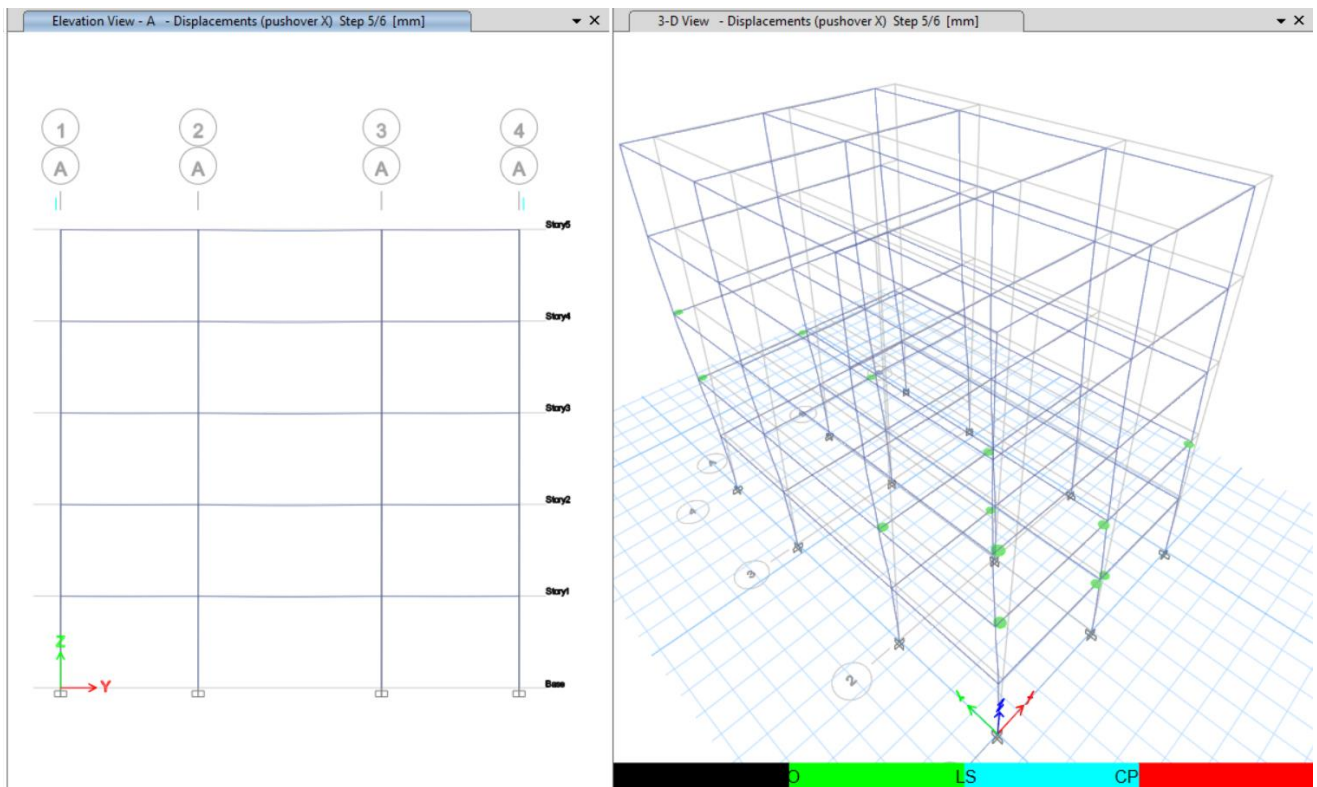
Εικόνα 16: Διαγράμματα ροπών ενισχυμένου φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



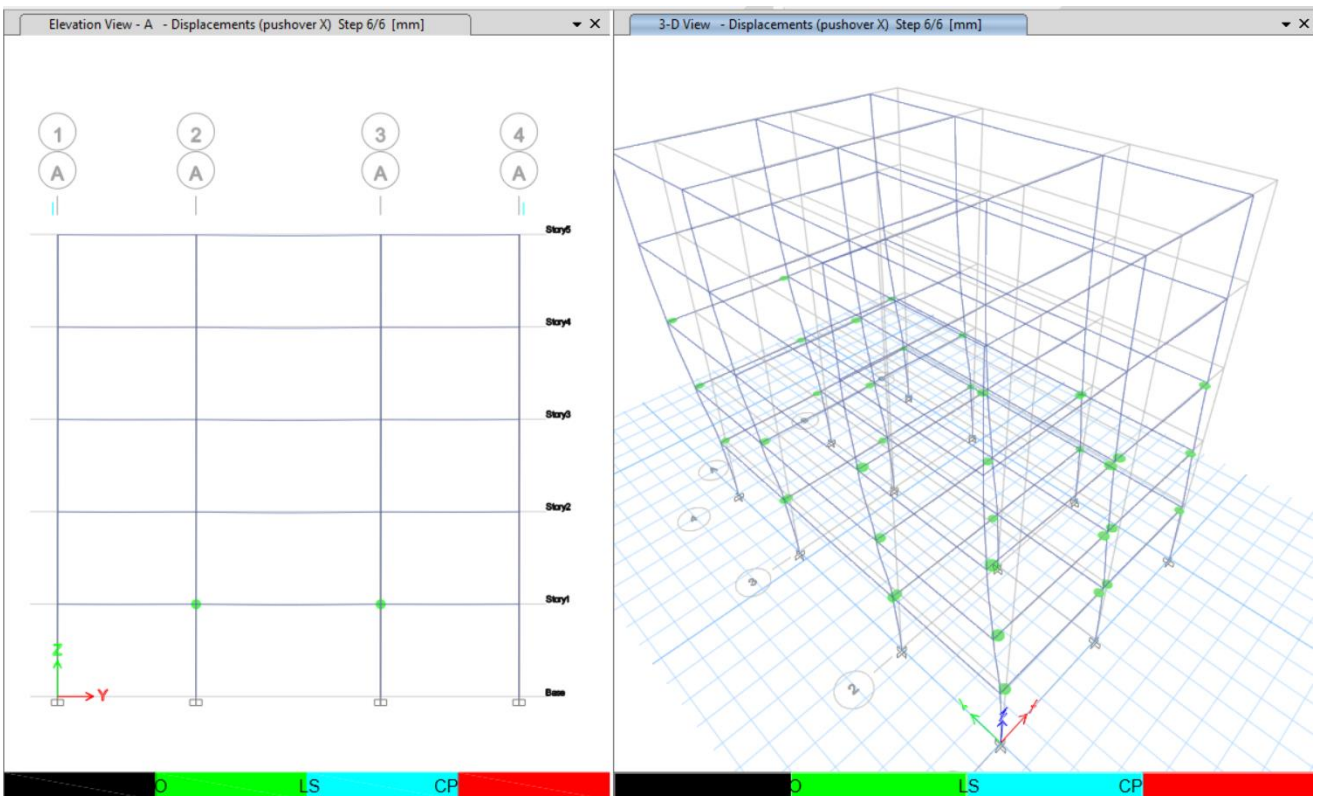
Εικόνα 17: Εντός επιπέδου τέμνουσες και ροπές υποστυλώματος σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



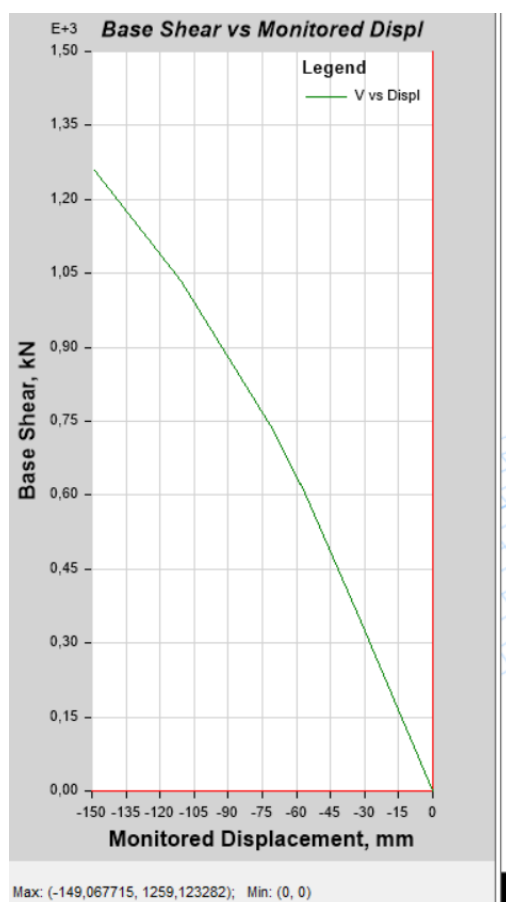
Εικόνα 18: Αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



Εικόνα 19: Pushover X, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 110.6 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 20: Pushover X, τερματισμός αλγορίθμου. Φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 149 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



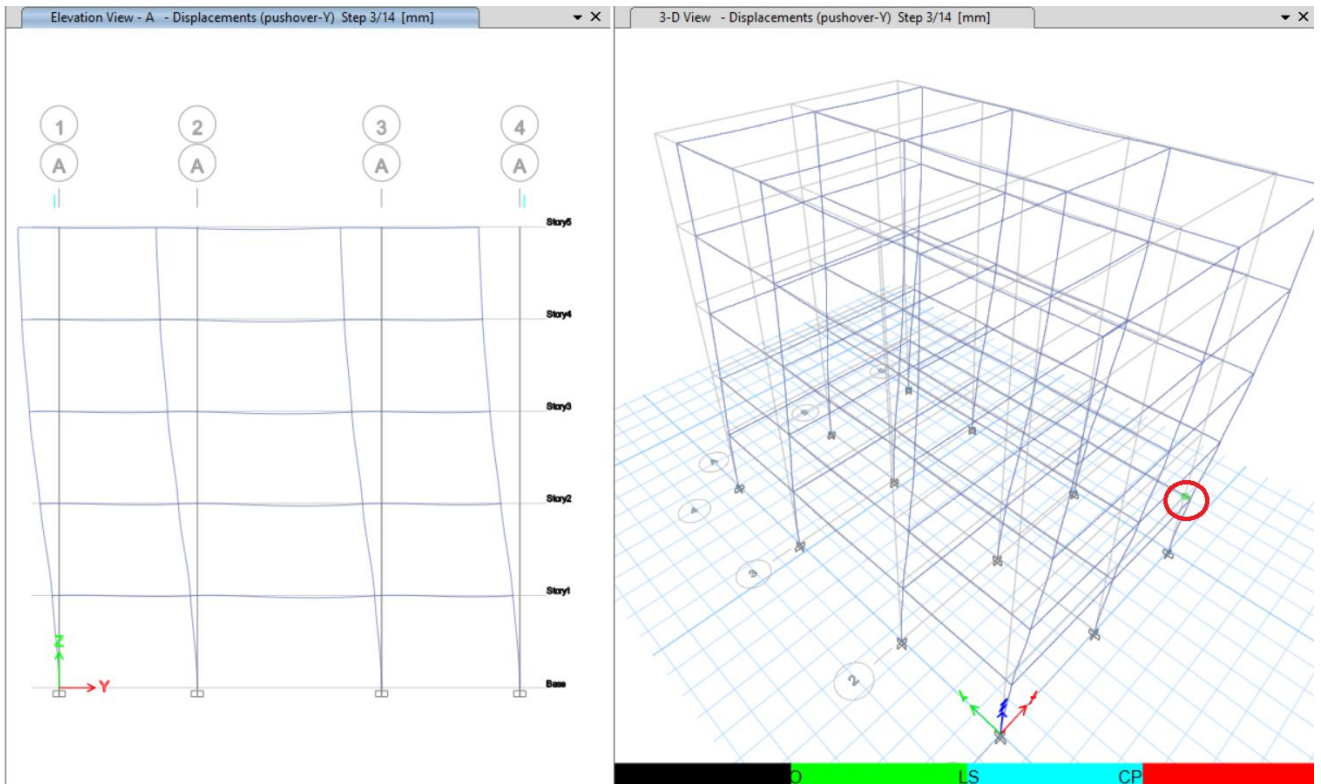
Εικόνα 21: Καμπύλη Pushover X αντίστασης φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP

Πίνακας 6: Βήματα Pushover X σε φορέα χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP

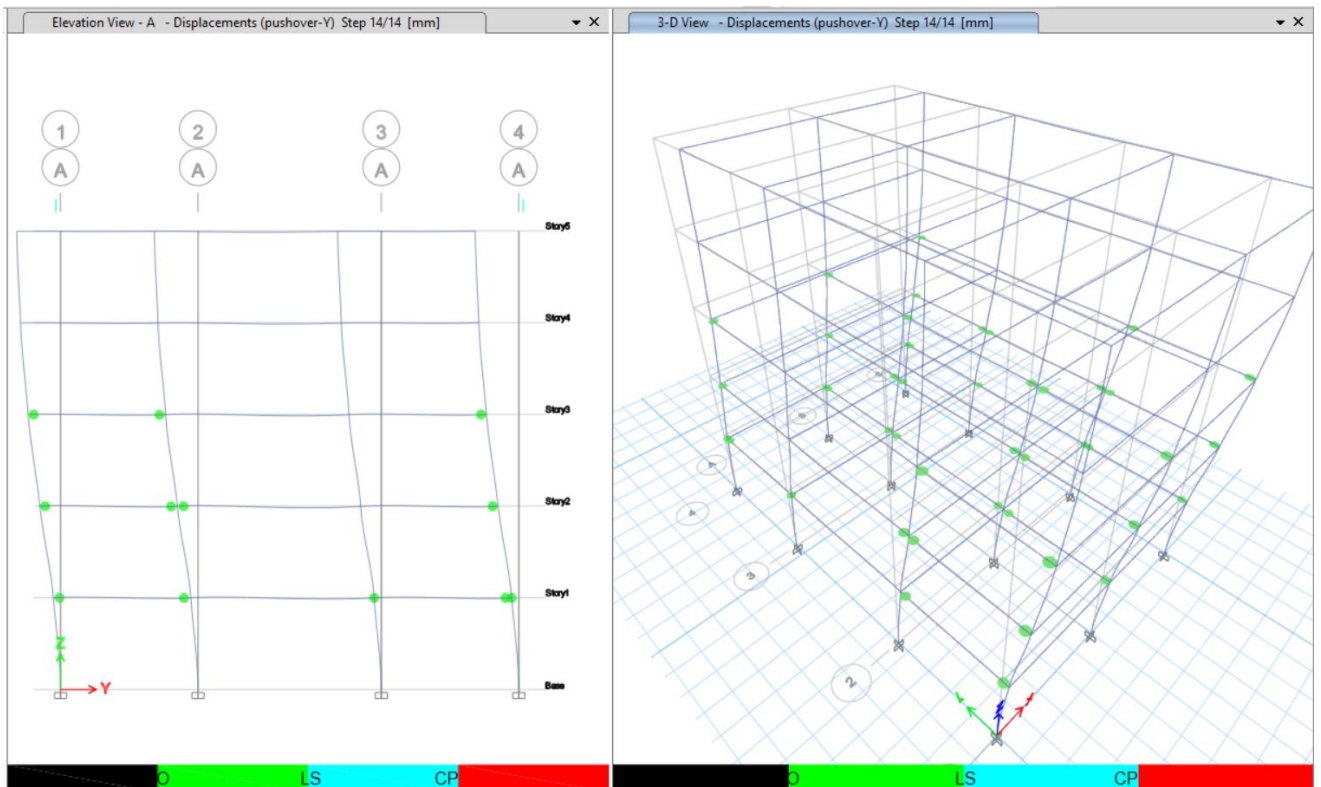
Step	Monitored Displ mm	Base Force kN	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	290	0	0	0	290
1	-33,4	361,8464	290	0	0	0	290
2	-58,3	622,9683	290	0	0	0	290
3	-58,6	624,0533	290	0	0	0	290
4	-69,7	728,3026	290	0	0	0	290
5	-110,6	1035,0752	277	13	0	0	290
6	-149,1	1259,1233	252	38	0	0	290

Από τον ανωτέρω πίνακα διαπιστώνουμε ότι στην φόρτιση Pushover X καμία διατομή δεν υπερβαίνει τη στάθμη επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση (Immediate Occupancy) όταν τερματίζεται ο αλγόριθμος με τον έλεγχο μέγιστης μετακίνησης ορίου στον κόμβο του άνω ορόφου του φορέα. Συγκεκριμένα, 38 διατομές (υποστυλωμάτων και δοκών) φτάνουν σε κατάσταση πλαστικής άρθρωσης σε επίπεδο επιτελεστικότητας IO και ο φορέας εξαντλεί τις αντοχές του (με δημιουργία μηχανισμού) χωρίς να φτάσει καμία διατομή σε αυξημένα επίπεδα επιτελεστικότητας. Επίσης βλέπουμε μια τέμνουσα βάση (1259.12kN) η οποία

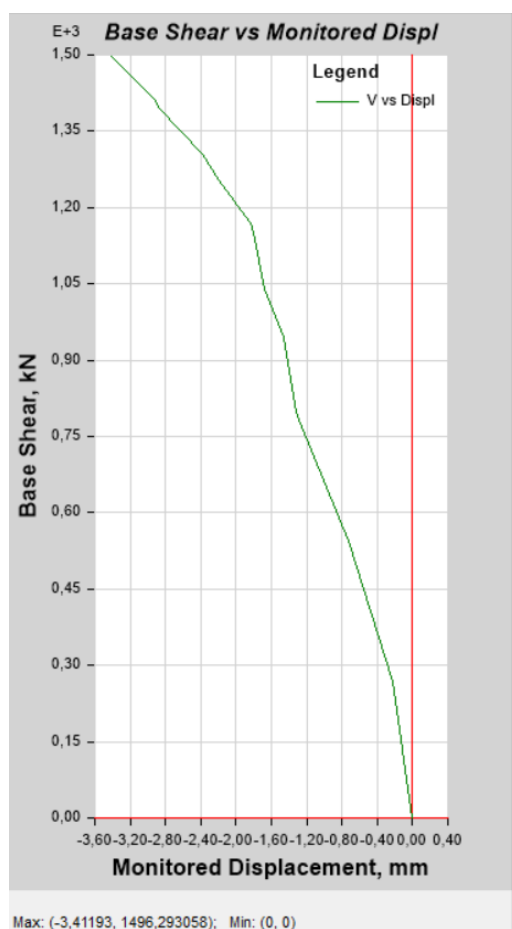
είναι (όπως θα δούμε και στη συνέχεια) σαφώς χαμηλότερη από τα 2 σενάρια τοιοπληρώσεων (με ύπαρξη ή χωρίς την ύπαρξη pilotis).



Εικόνα 22: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας χωρίς τοιοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 68.7 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 23: Pushover Y, τερματισμός αλγορίθμου. Φορέας χωρίς τοιοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 163.6 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



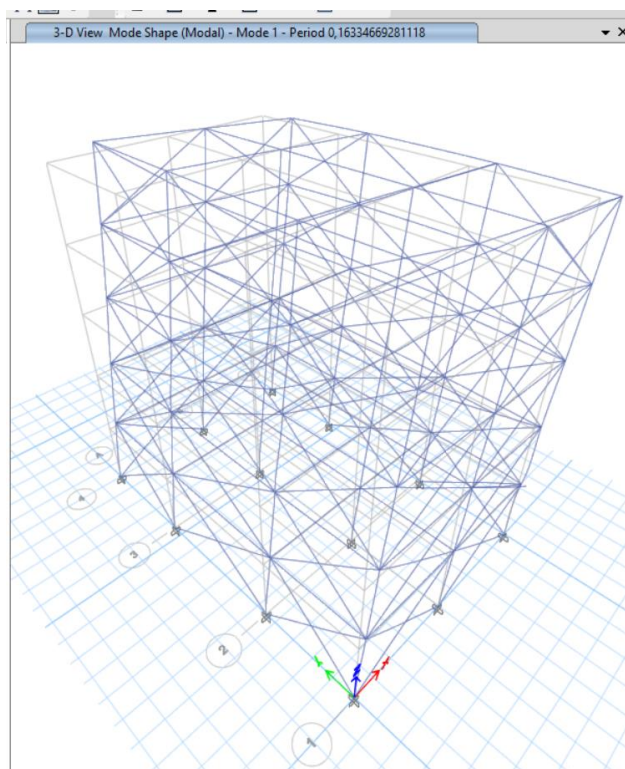
Εικόνα 24: Καμπύλη Pushover Y αντίστασης φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP

Πίνακας 7: Βήματα Pushover Y σε φορέα χωρίς ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP

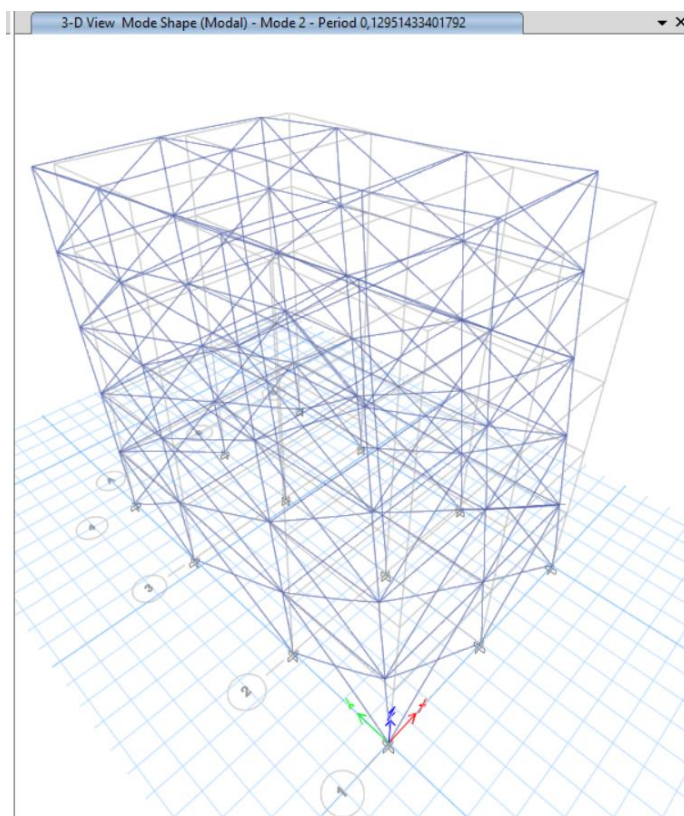
Step	Monitored Displ mm	Base Force kN	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	290	0	0	0	290
1	-0,2	267,9054	290	0	0	0	290
2	-0,7	543,5955	290	0	0	0	290
3	-1,3	781,9203	289	1	0	0	290
4	-1,3	798,0204	289	1	0	0	290
5	-1,5	944,7503	284	6	0	0	290
6	-1,7	1040,6741	276	14	0	0	290
7	-1,8	1152,0434	268	22	0	0	290
8	-1,8	1168,872	266	24	0	0	290
9	-1,9	1173,5866	265	25	0	0	290
10	-2,2	1254,4706	262	28	0	0	290
11	-2,4	1305,4733	258	32	0	0	290
12	-2,9	1396,2458	252	38	0	0	290
13	-2,9	1411,3029	252	38	0	0	290
14	-3,4	1496,2931	245	45	0	0	290

### 3.3. Κτήριο με τοιχοπληρώσεις

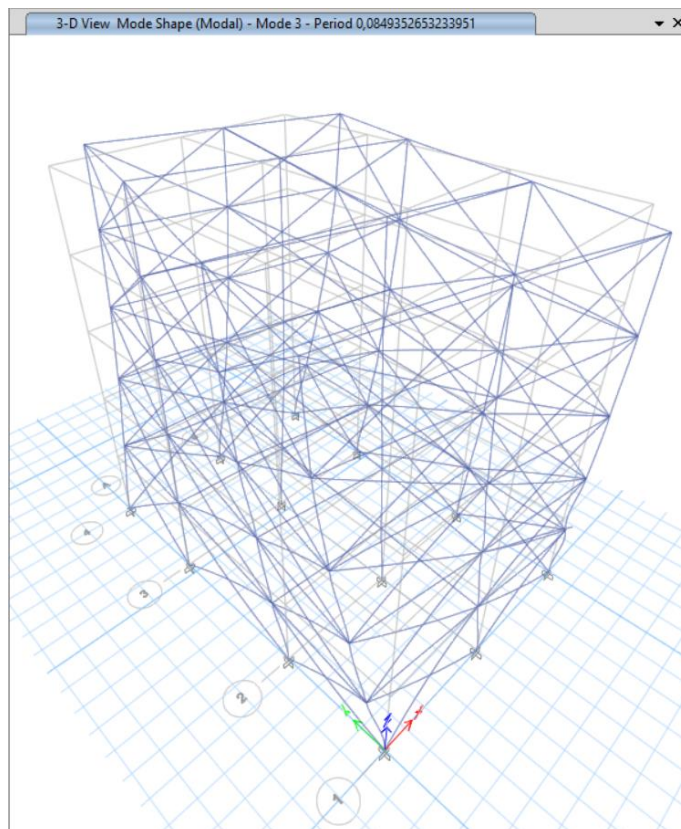
Στον ενισχυμένο φορέα διακρίνουμε (ενδεικτικά) τα ακόλουθα στιγμιότυπα παραμόρφωσης κατά την 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup>, και 3<sup>η</sup> ιδιομορφή.



Εικόνα 25: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις κατά Χ.  $T_x=0.163\text{sec}$



Εικόνα 26: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις κατά Χ.  $T_y=0.129\text{ sec}$



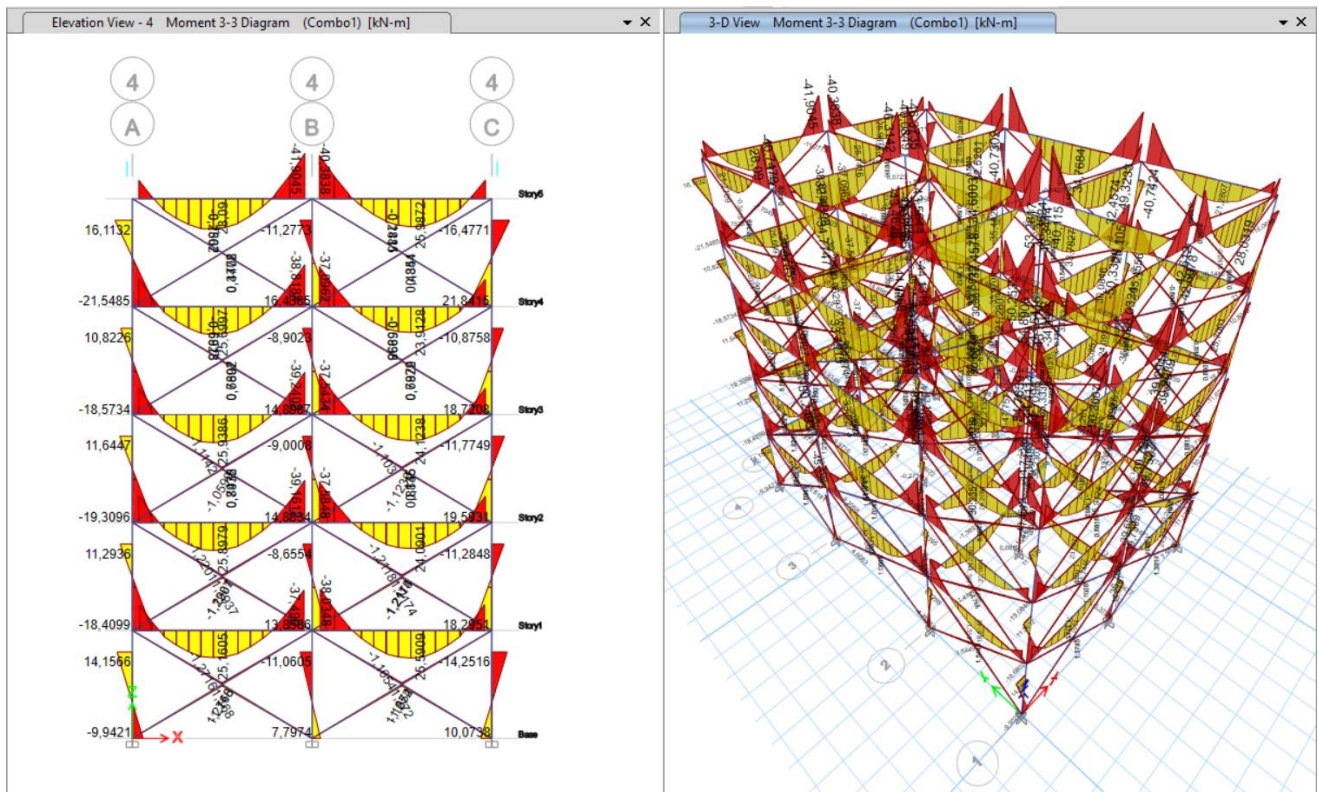
Εικόνα 27: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις στροφή κατά Χ.  $T\varphi=0.085 \text{ sec}$

Πίνακας 8: Πίνακας ιδιομορφών και συντελεστών συμμετοχής μάζας για ενισχυμένο κτήριο με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων

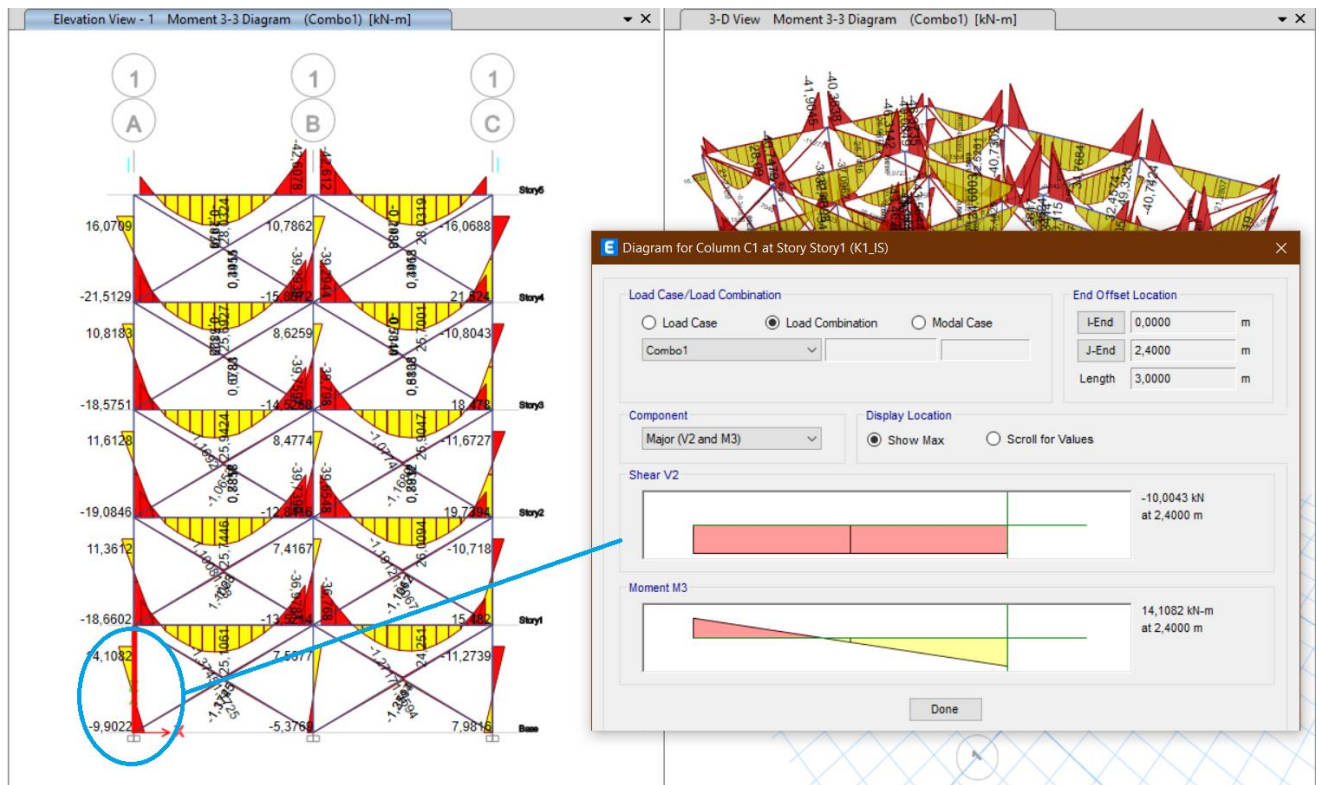
Mode	Period	SumUX	SumUY	SumRZ
	sec			
1	0,163	0,7979	9,06E-06	0,0003
2	0,13	0,798	0,8165	0,0003
3	0,085	0,7981	0,8165	0,875
4	0,055	0,9453	0,8165	0,8752
5	0,043	0,9453	0,9537	0,8752
6	0,035	0,9803	0,9537	0,8752
7	0,031	0,9881	0,9537	0,8757
8	0,03	0,9881	0,9537	0,9671
9	0,027	0,9881	0,9856	0,9671
10	0,022	0,9881	0,991	0,9671
11	0,022	0,9999	0,991	0,9683
12	0,02	0,9999	0,991	0,9894

Ενδεικτικά παραθέτουμε ένα στιγμιότυπο οθόνης από το διάγραμμα ροπών του φορέα για το βασικό συνδυασμό και τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για ένα ακραίο υποστύλωμα (σημειώνεται με κύκλο στο ακόλουθο στιγμιότυπο).

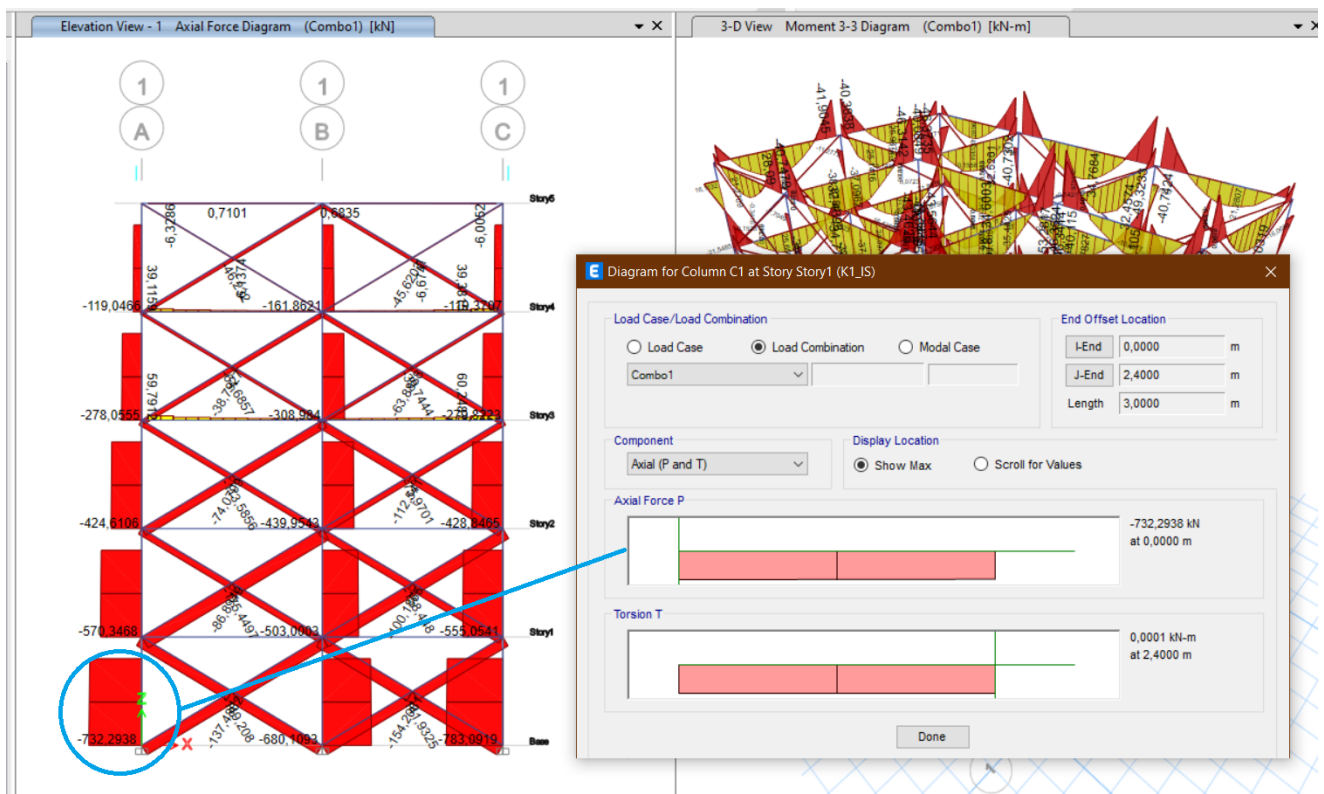




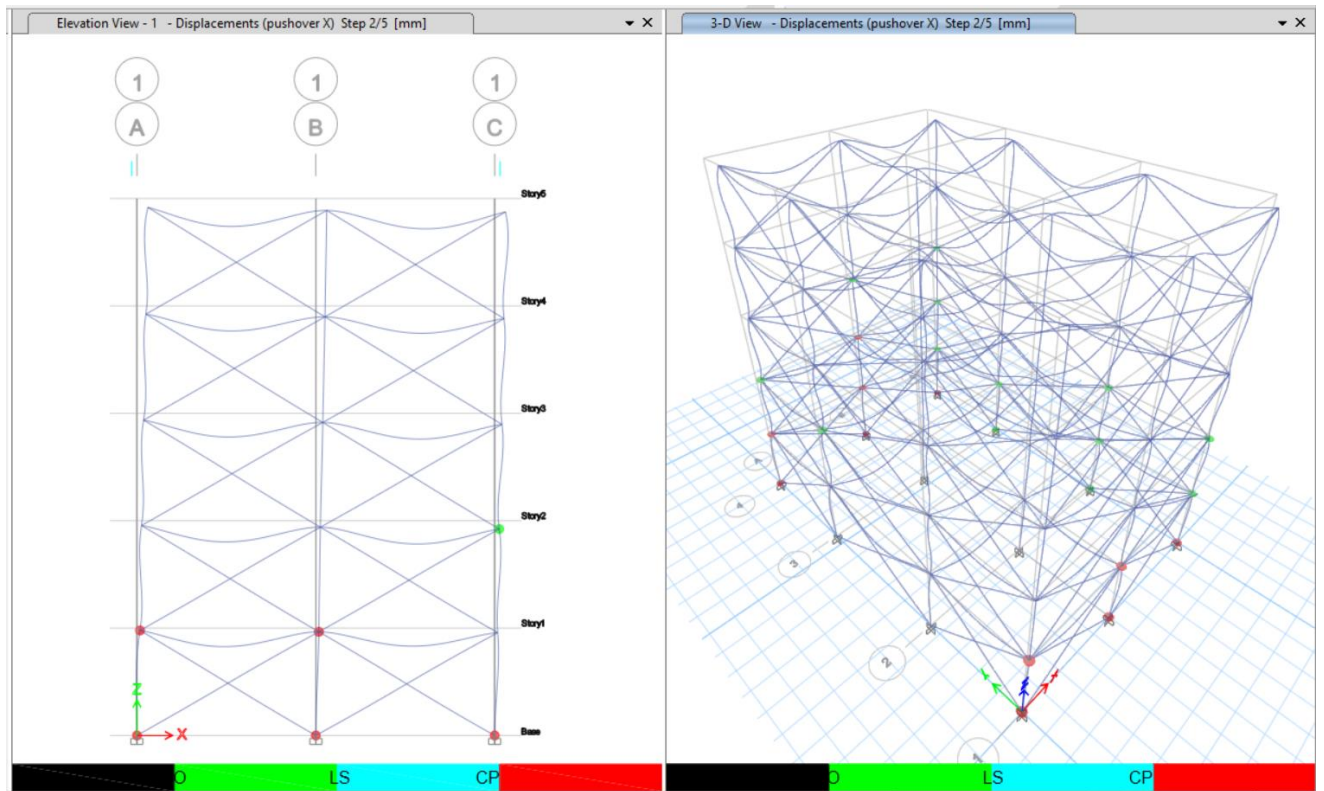
Εικόνα 28: Διαγράμματα ροπών ενισχυμένου φορέα με τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



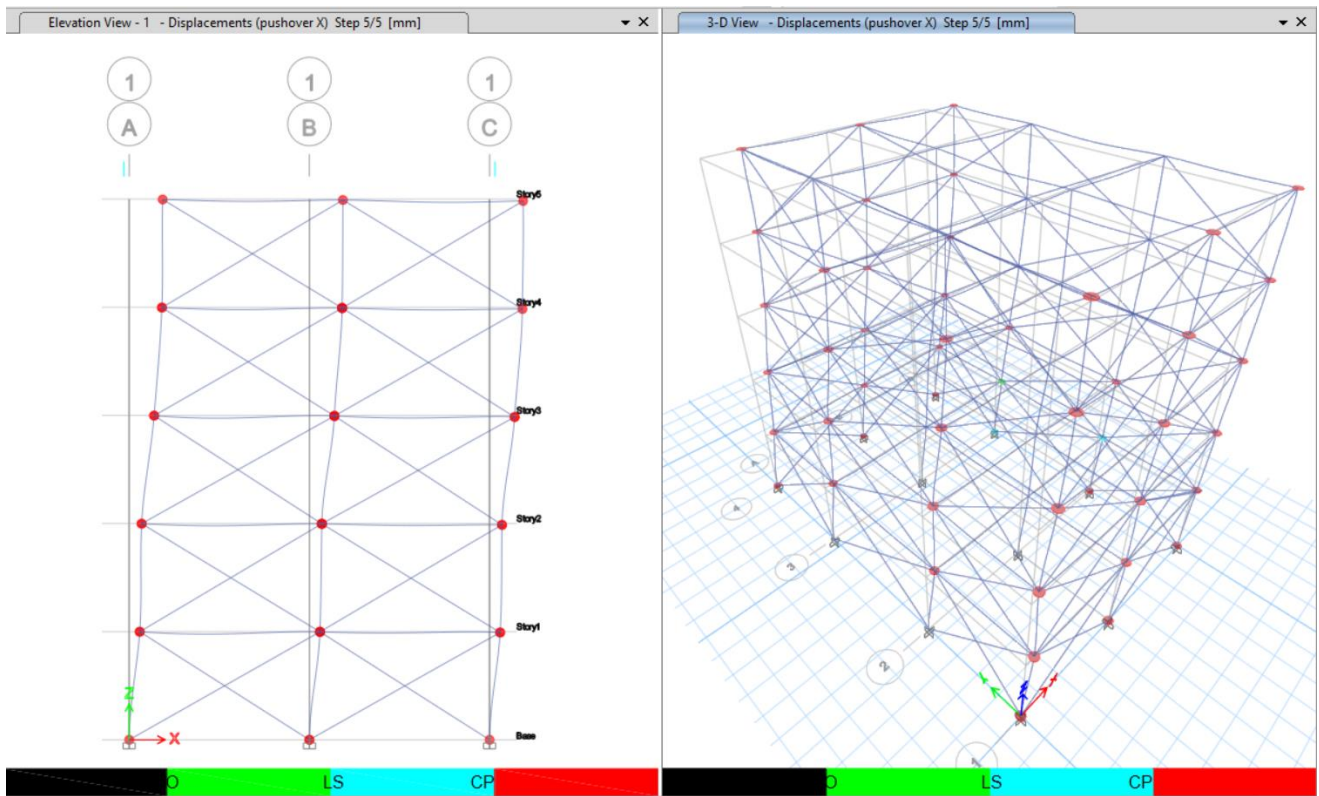
Εικόνα 29: Εντός επιπέδου τέμνουσες και ροπές υποστυλώματος σε υποστύλωμα σε ενισχυμένο φορέα με τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



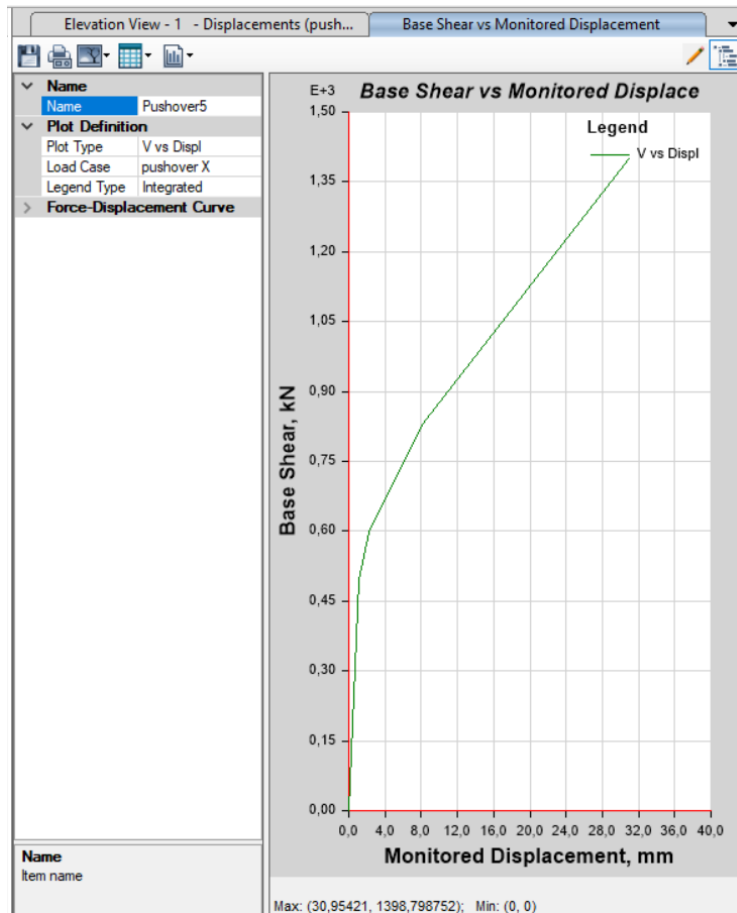
Εικόνα 30: Αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές σε υποστήλωμα σε ενισχυμένο φορέα με τοιχοπληρώσεις και FRP για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



Εικόνα 31: Pushover X, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστήλωματα. Μέγιστη μετακίνηση 4.8 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 32: Pushover X, τελευταίο βήμα τερματισμού του αλγορίθμου. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένους με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 39.3 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου

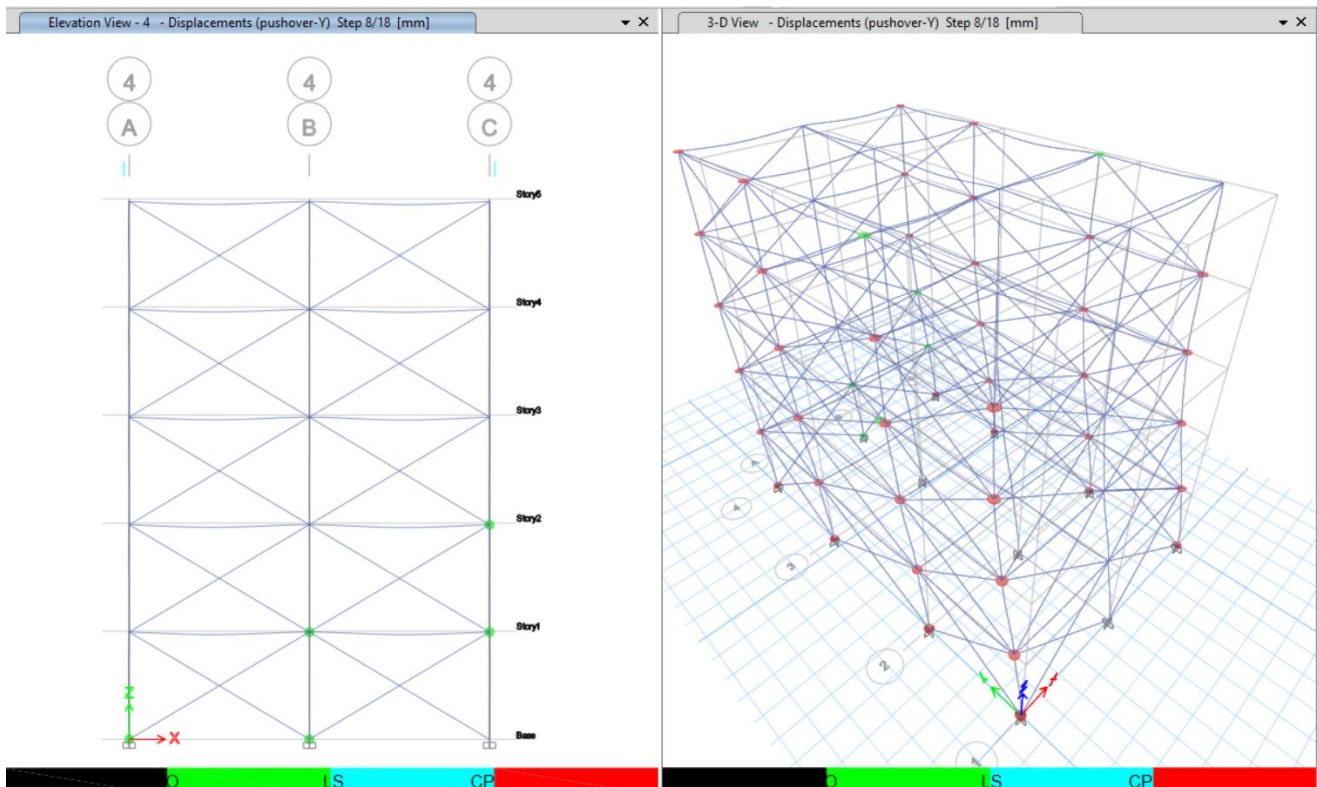


Εικόνα 33: Καμπύλη Pushover X αντίστασης φορέα με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένους με FRP

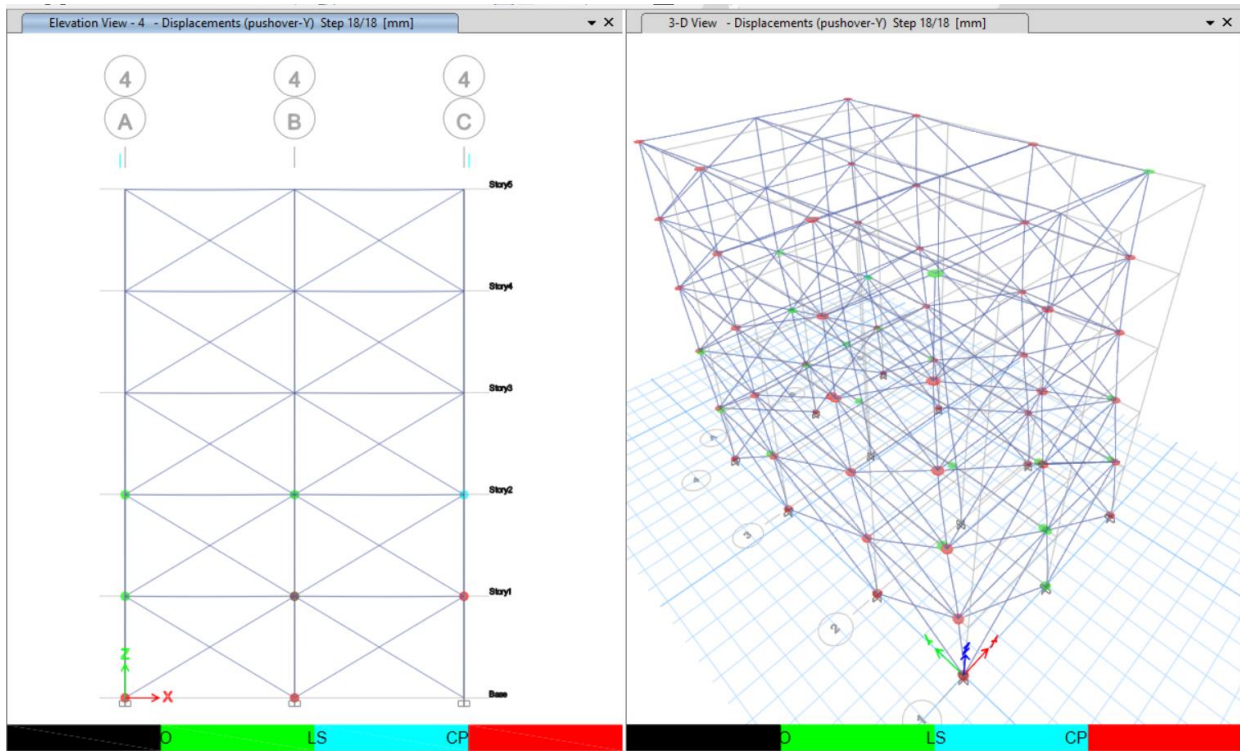
Πίνακας 9: Βήματα Pushover X σε φορέα με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP

Step	Monitored Displ mm	Base Force kN	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	490	0	0	0	490
1	0,00000841	0,0047	490	0	0	0	490
2	1	495,9942	457	20	0	13	490
3	2,2	597,9527	436	25	4	25	490
4	8,1	829,2142	401	13	3	73	490
5	31	1398,7988	368	5	2	115	490

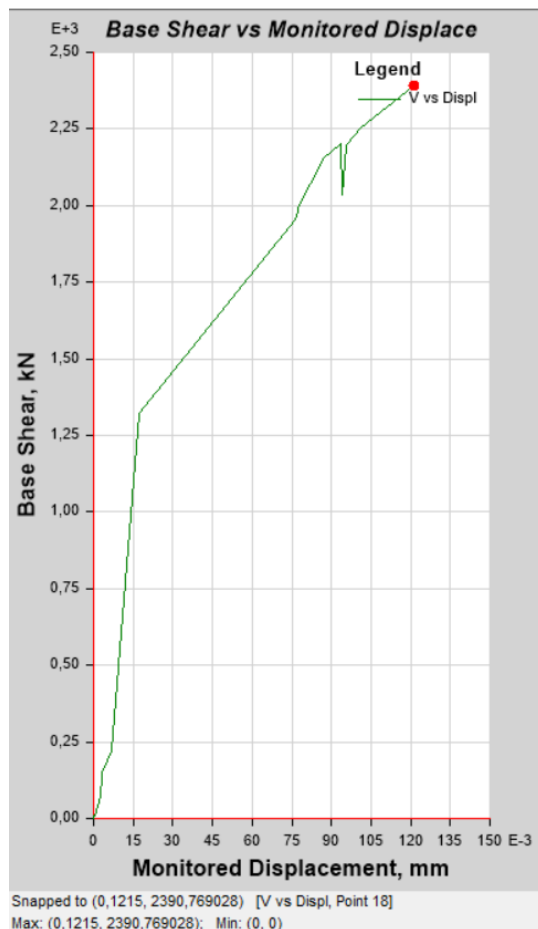
Διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια ομαλή μετάβαση από την ελαστική περιοχή προς την κατάρρευση, καθώς αρκετές διατομές κινούνται πρώτα στην κατηγορία επιτελεστικότητας «Άμεση Χρήση / Immediate Occurance». Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, χωρίς τις τοιχοπληρώσεις επί της στάθμης pilotis, οι περισσότερες διατομές παρουσίαζαν μια πιο «ψαθυρή» συμπεριφορά και πήγαιναν απευθείας σε χαμηλότερη κατηγορία επιτελεστικότητας (κάτι που είναι εν γένει δυσμενές για τη συνολική συμπεριφορά του κτηρίου).



Εικόνα 34: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένους με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 23.3 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 35: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 90.5 mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 36: Καμπύλη Pushover Y αντίστασης φορέα με τοιχοπληρώσεις ενισχυμένος με FRP

Στο ανωτέρω διάγραμμα διαπιστώνουμε ένα ενδιαφέρον στοιχείο, μια προσωρινή απομοίωση της αντοχής του φορέα και κατόπιν περαιτέρω αύξηση της δυσκαμψίας του μέχρι να φτάσει στην αστοχία σε μετέπειτα στάδιο. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται όταν έχουμε αστοχία κάποιας τοιχοπλήρωσης και συνηθίζει μετά την στιγμιαία αποφόρτισή του ο φορέας να συνεχίζει να μπορεί να αναλαμβάνει ψευδοστατικά επταυξητικά φορτία. Μάλιστα κρίνεται ως και επιθυμητή (από άποψη πλαστιμότητας) μια συμπεριφορά του φορέα όπου βλέπουμε αστοχία μη φέροντων μελών, δηλαδή των τοιχοπληρώσεων. Μάλιστα, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, δεν παρουσιάζεται η ίδια συμπεριφορά αν έχουμε τοιχοπληρώσεις αλλά έχουμε και ύπαρξη pilotis στο ισόγειο, κάτι που υποδηλώνει πως οι διατομές τοιχοπληρώσεων που αστόχησαν στην εν λόγω ανάλυση, ανήκουν στην στάθμη του ισόγειου (που είναι εν τέλει και η κρισιμότερη στάθμη και καθορίζει τη συνολικότερη δυναμική και μετελαστική συμπεριφορά του φορέα, ιδιαίτερα τώρα που έχουμε εισαγάγει και ενισχύσεις υποστυλωμάτων με FRP).

Πίνακας 10: Βήματα Pushover Y σε φορέα με ύπαρξη τοιχοπληρώσεων ενισχυμένο με FRP

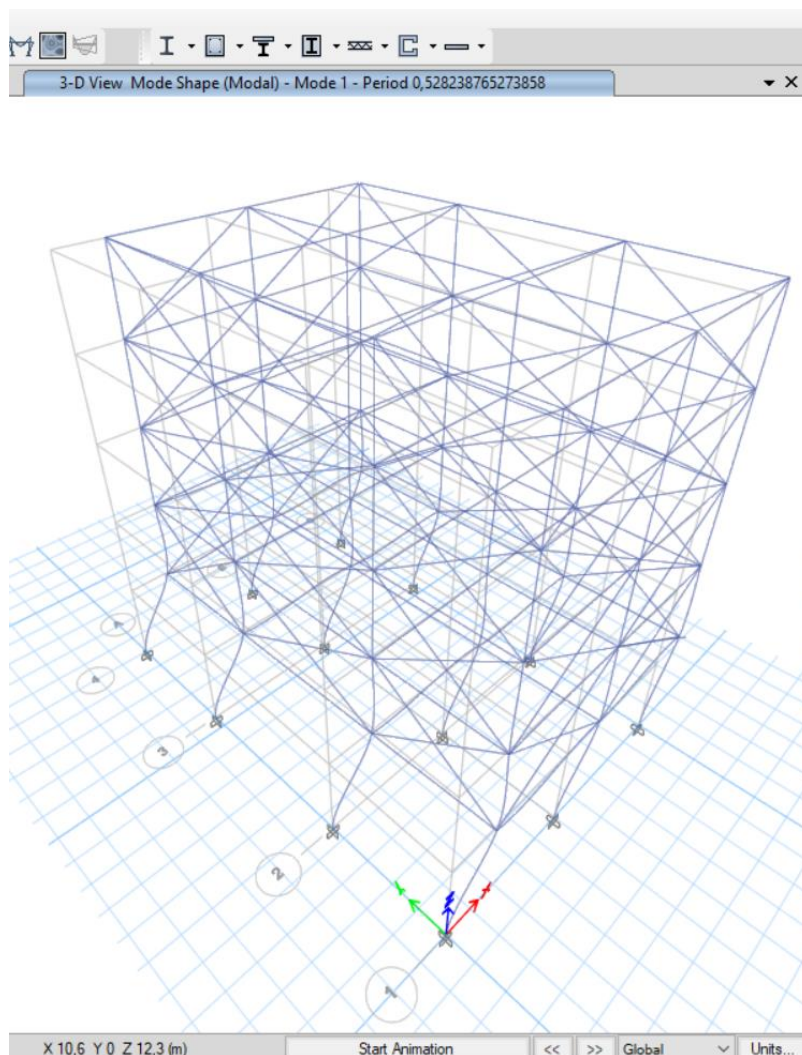
Step	Monitored Displ mm	Base Force kN	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	490	0	0	0	490
1	0,000004	0,5188	490	0	0	0	490
2	0,000241	8,0037	490	0	0	0	490
3	0,0002644	9,3688	490	0	0	0	490
4	0,002447	74,0817	488	2	0	0	490
5	0,003005	138,6333	484	6	0	0	490
6	0,00322	148,742	484	6	0	0	490
7	0,00679	222,6066	482	8	0	0	490
8	0,01732	1321,195	376	10	0	104	490
9	0,1	1955,8961	364	10	3	113	490
10	0,1	1981,3181	363	11	2	114	490
11	0,1	1996,028	360	13	3	114	490
12	0,1	2155,8998	341	19	4	126	490
13	0,1	2204,2391	338	19	2	131	490
14	0,1	2033,2876	338	19	2	131	490
15	0,1	2196,2718	338	19	2	131	490
16	0,1	2197,4966	338	19	2	131	490
17	0,1	2250,3175	334	21	1	134	490
18	0,1	2390,769	328	25	2	135	490

Σημειώνεται πως για το αντίστοιχο κτήριο χωρίς ύπαρξη FRP η Pushover κατά X έδινε μέγιστη μετακίνηση ίση με 90.01 mm (έναντι 31 mm) Διαπιστώνουμε ότι η εφαρμογή FRP συνολικά στα υποστυλώματα του φορέα οδηγεί σε μικρότερες διαθέσιμες μετελαστικές

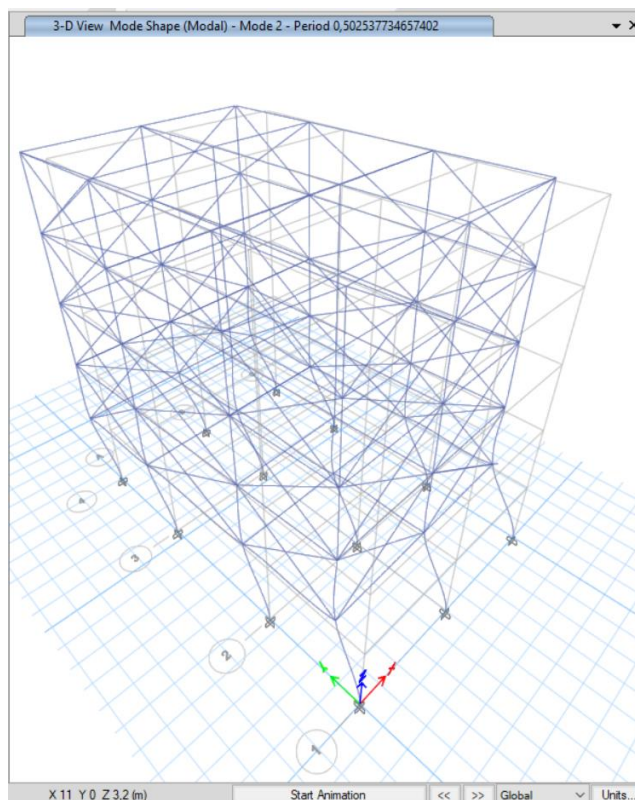
μετακινήσεις σε σχέση με το φορέα χωρίς FRP, αλλά τουλάχιστον, στην περίπτωση του τοιχοπληρωμένου φορέα διαπιστώνουμε μια ευνοϊκότερη συνολική συμπεριφορά και μια πιο ομαλή κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων κατά την εξέλιξη του σχηματισμού τους μέχρι τον τερματισμό του αλγορίθμου.

### 3.4.Κτήριο με ύπαρξη pilotis

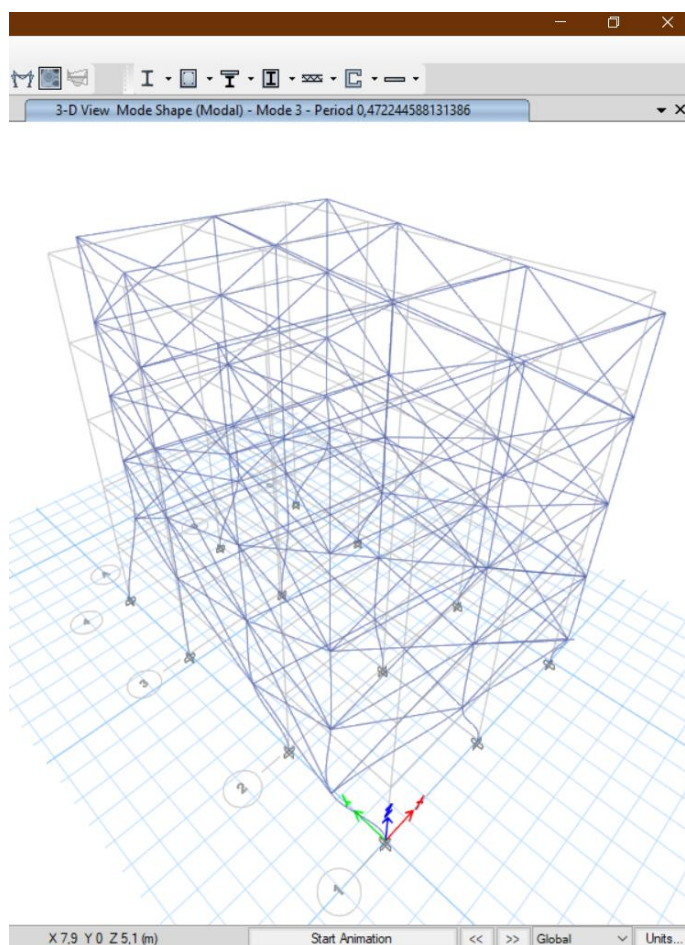
Στον ενισχυμένο φορέα διακρίνουμε (ενδεικτικά) τα ακόλουθα στιγμιότυπα παραμόρφωσης κατά την 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup>, και 3<sup>η</sup> ιδιομορφή.



Εικόνα 37: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή ενισχυμένου φορέα με pilotis κατά X.  $T_x=0.528\text{sec}$



Εικόνα 38: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή Ενισχυμένου φορέα κατά Υ.  $T_y=0.502 \text{ sec}$



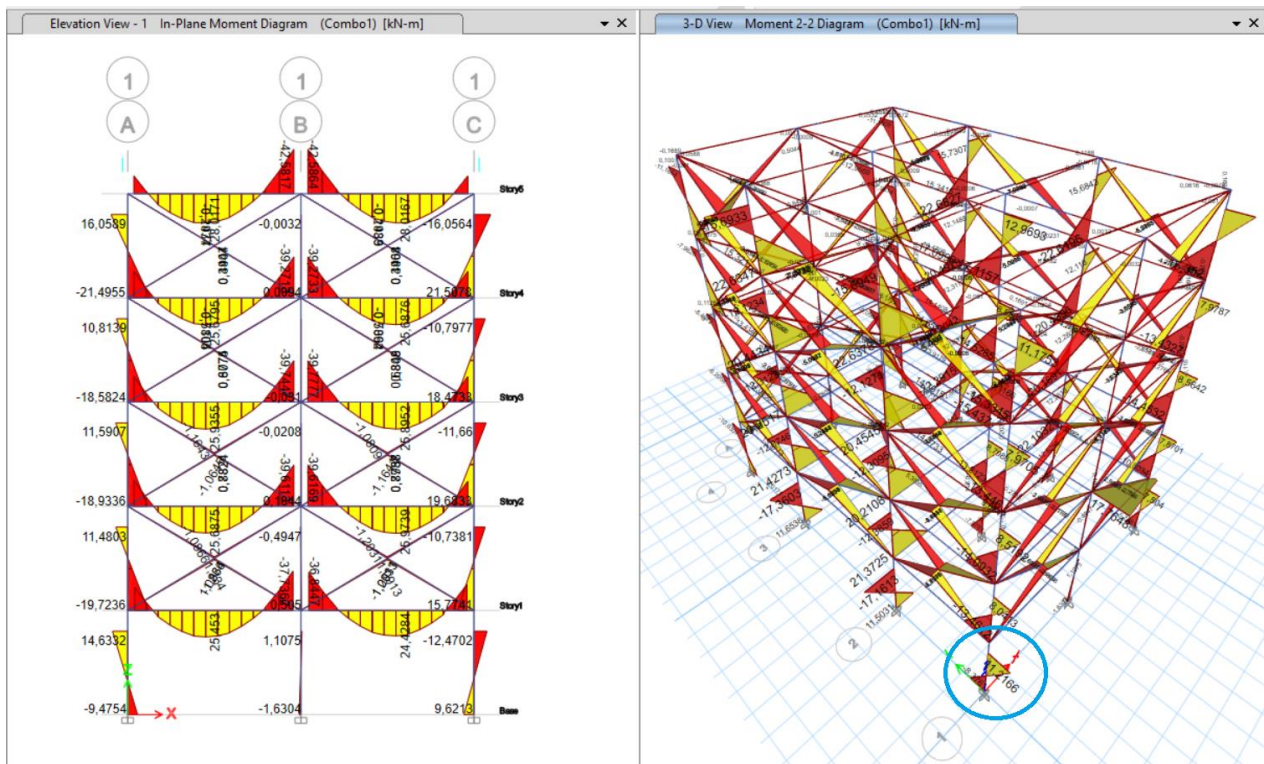
Εικόνα 39: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή Ενισχυμένου φορέα στρεπτική.  $T_\varphi=0.472 \text{ sec}$



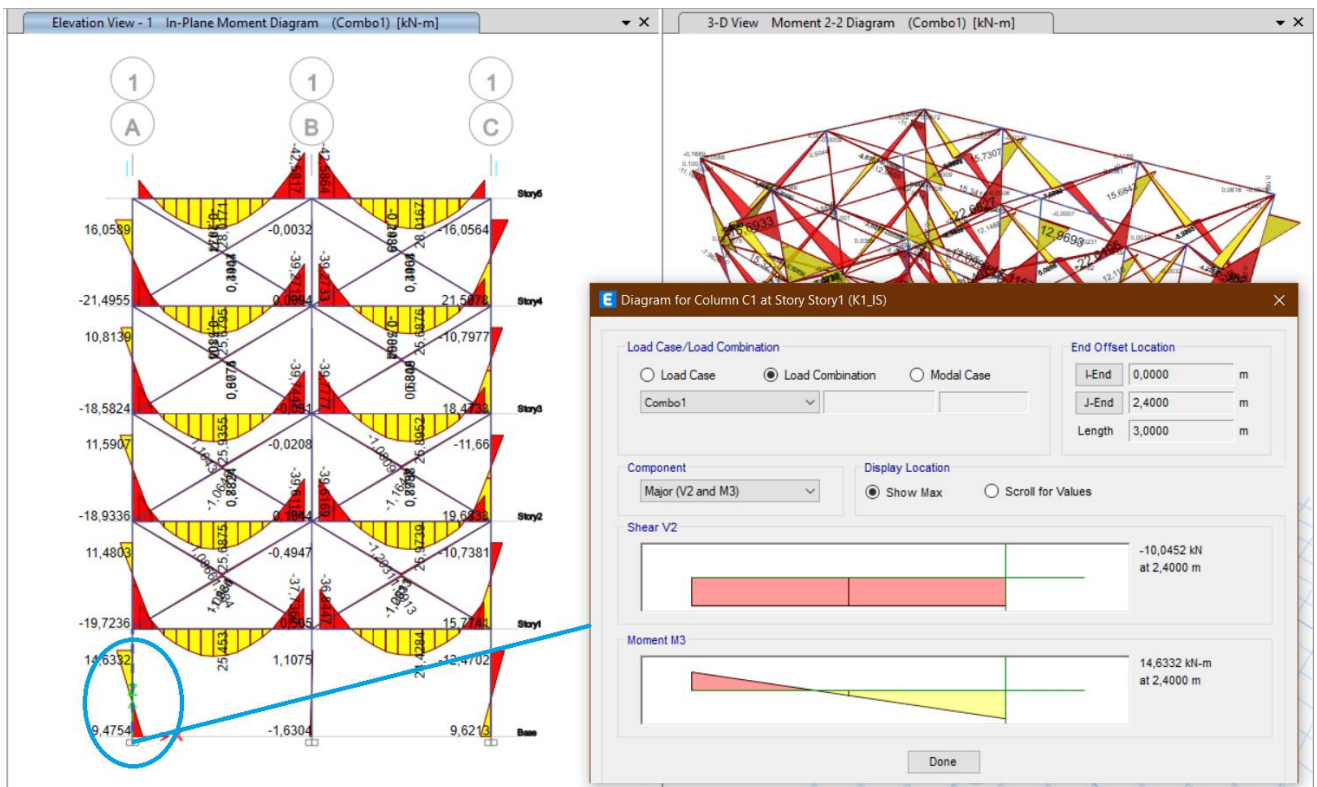
Πίνακας 11: Πίνακας ιδιομορφών και συντελεστών συμμετοχής μάζας για ενισχυμένο κτήριο με ύπαρξη pilotis

Mode	Period	SumUX	SumUY	SumRZ
	sec	(%)	(%)	(%)
1	0,528	0,9943	0	0,0043
2	0,503	0,9944	0,9875	0,0161
3	0,472	0,9986	0,9994	0,9999
4	0,084	0,9999	0,9994	0,9999
5	0,065	0,9999	1	0,9999
6	0,039	1	1	0,9999
7	0,038	1	1	1
8	0,031	1	1	1
9	0,029	1	1	1
10	0,023	1	1	1
11	0,022	1	1	1
12	0,021	1	1	1

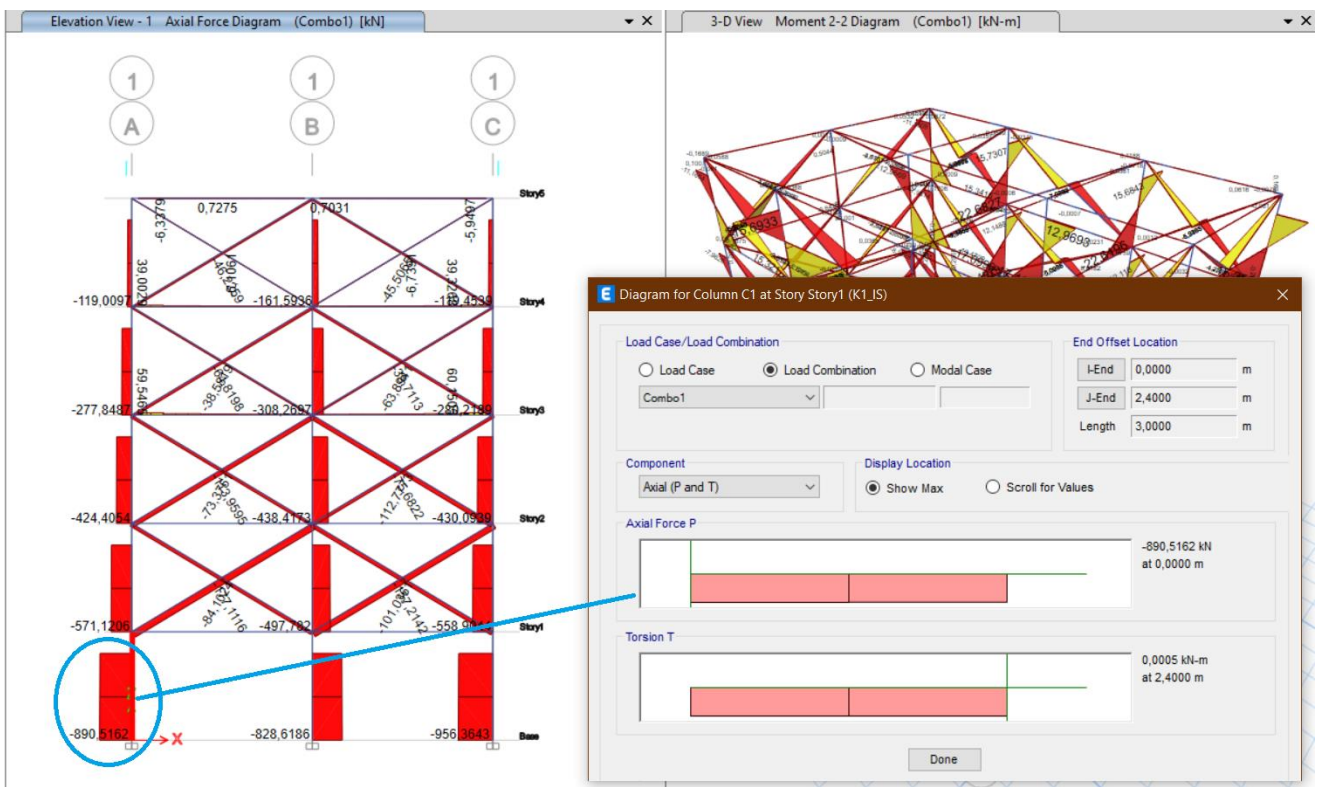
Ενδεικτικά παραθέτουμε ένα στιγμιότυπο οθόνης από το διάγραμμα ροπών του φορέα για το βασικό συνδυασμό και τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για ένα ακραίο υποστύλωμα (σημειώνεται με κύκλο στο ακόλουθο στιγμιότυπο).



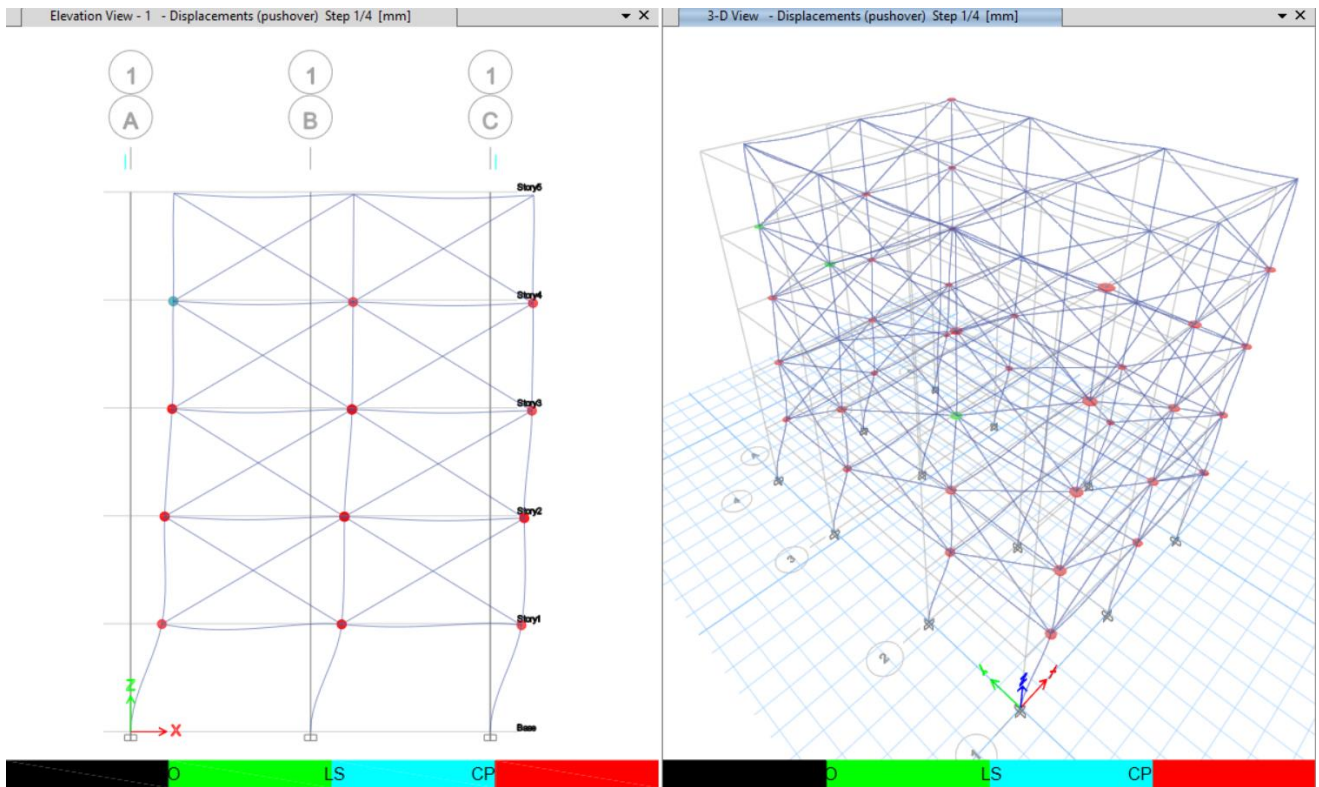
Εικόνα 40: Διαγράμματα ροπών ενισχυμένου φορέα pilotis για βασικό συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.5Q



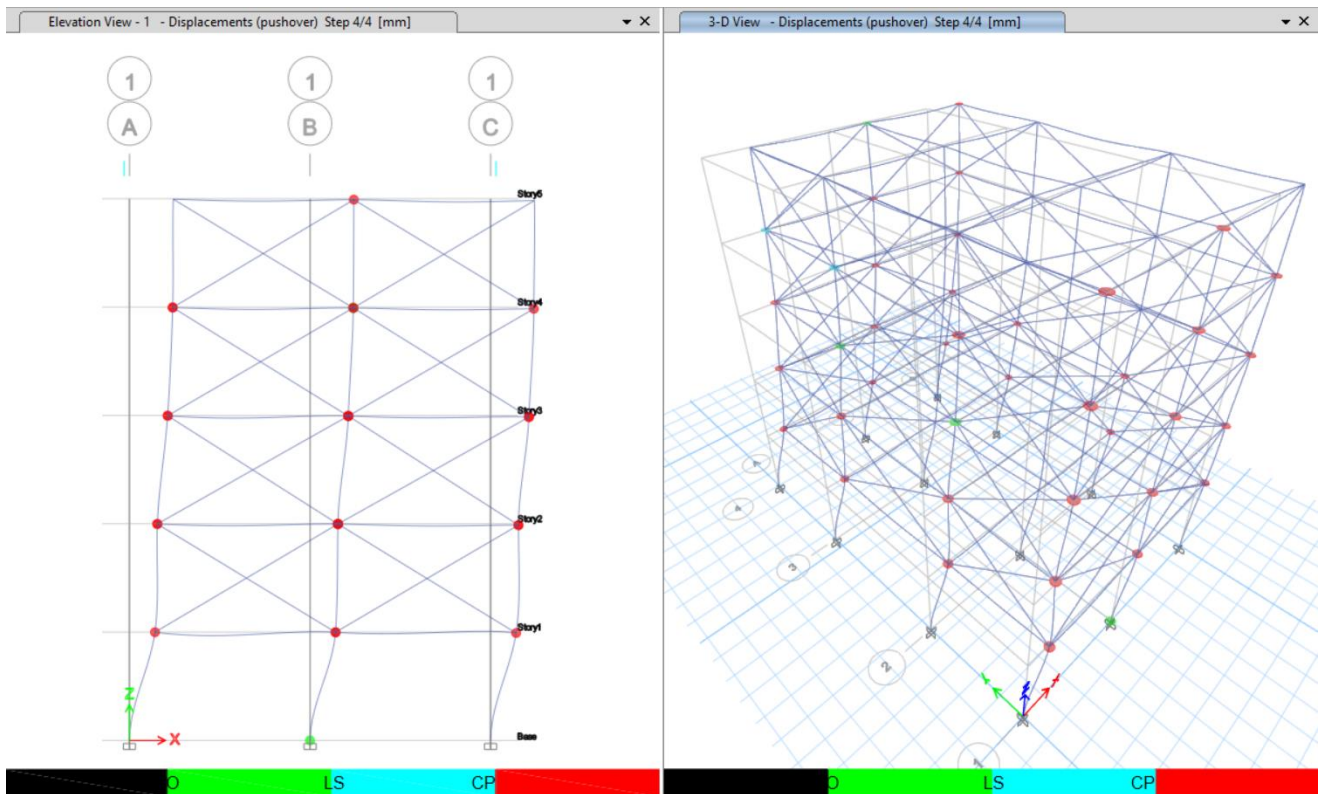
Εικόνα 41: Εντός επιπέδου τέμνουσες και ροπές υποστυλώματος σε ενισχυμένο φορέα pilotis



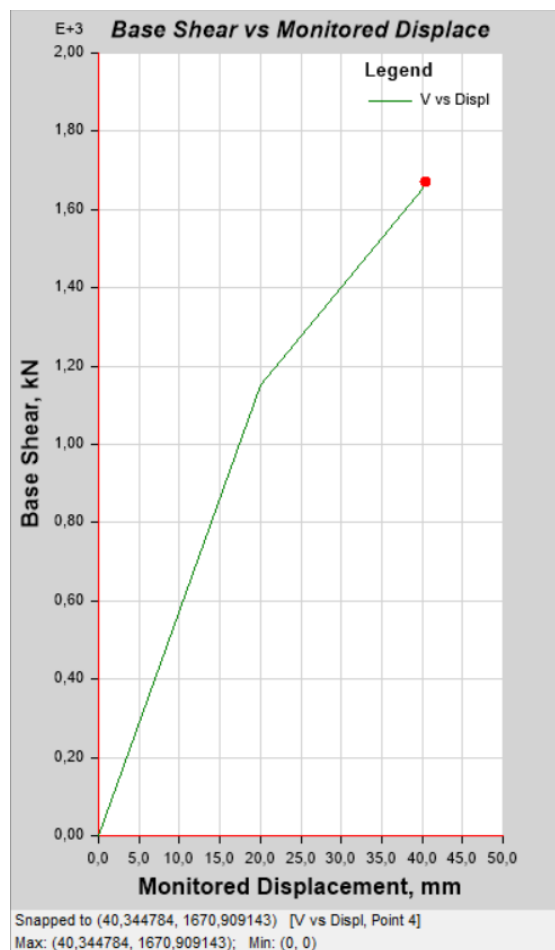
Εικόνα 42: Αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές υποστυλώματος σε ενισχυμένο φορέα pilotis



Εικόνα 43: Pushover X, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 20.1mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 44: Pushover X, στάδιο τερματισμού του αλγορίθμου. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 45.3mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου

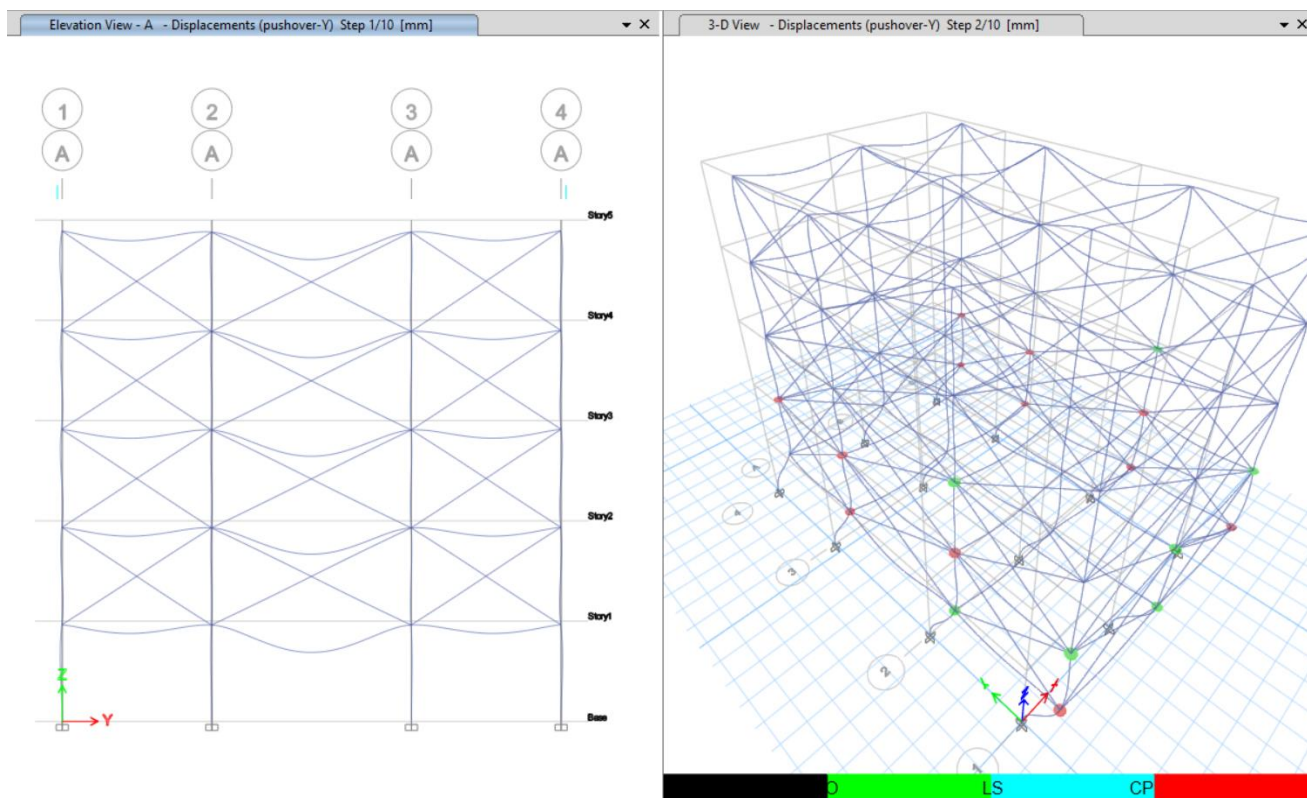


Εικόνα 45: Καμπύλη Pushover X αντίστασης φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP

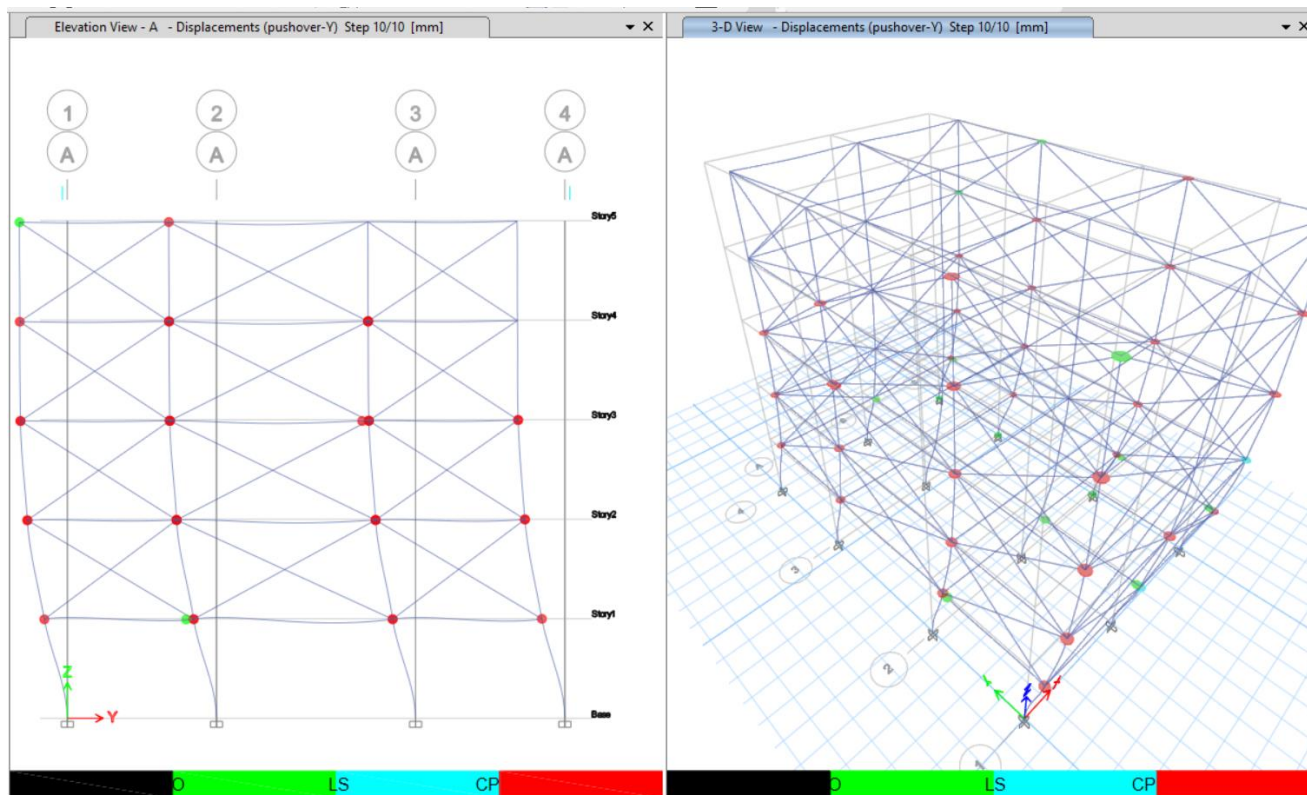
Πίνακας 12: Βήματα Pushover X σε φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένο με FRP

Step	Monitored Displ	Base Force	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
	mm	kN					
0	0	0	450	0	0	0	450
1	20	1151,1404	372	6	1	71	450
2	40	1652,0211	360	5	2	83	450
3	40	1662,918	359	6	2	83	450
4	40,3	1670,9091	359	6	2	83	450

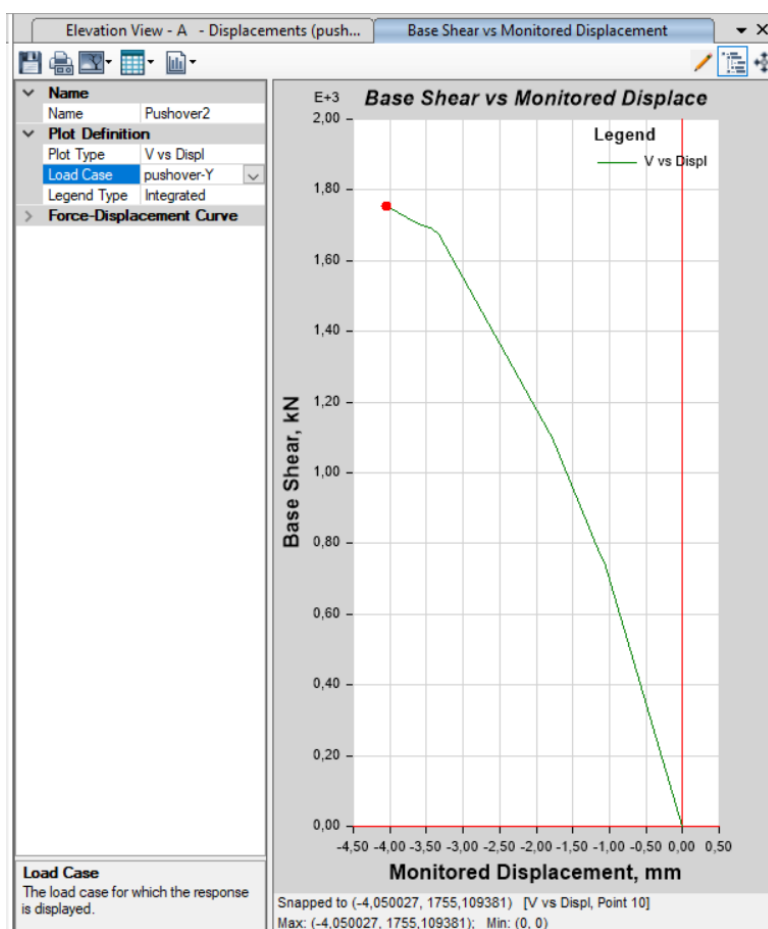
Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι στην Pushover κατά τον X άξονα, για κτήριο με ύπαρξη pilotis, αρκετές διατομές (κυρίως υποστυλωμάτων) παίρνουν κατευθείαν στην στάθμη επιτελεστικότητας οιωνεί κατάρρευσης (71 στο σύνολο στην στάθμη CP) κάτι που αποδεικνύει ότι ναι με χάρη στα FRP ενισχύθηκε σημαντικά η δυσκαμψία του φορέα, ωστόσο μειώθηκε η δυνατότητα ανάληψης παραμορφώσεων και ουσιαστικά ο φορέας δεν έχει σημαντικό μετελαστικό κλάδο.



Εικόνα 46: Pushover Y, εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 9.4mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 47: Pushover Y, τερματισμός αλγορίθμου. Φορέας με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματα. Μέγιστη μετακίνηση 54mm στάθμη 5<sup>ου</sup> ορόφου



Εικόνα 48: Καμπύλη Pushover Y αντίστασης φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένος με FRP

Πίνακας 13: Βήματα Pushover Y σε φορέα με ύπαρξη pilotis ενισχυμένο με FRP

Step	Monitored Displ mm	Base Force kN	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	450	0	0	0	450
1	-0,000004	0,0031	450	0	0	0	450
2	-1,1	747,2255	420	9	1	20	450
3	-1,1	765,118	416	9	1	24	450
4	-1,8	1109,377	392	8	1	49	450
5	-1,8	1112,2337	392	8	1	49	450
6	-3,3	1674,3742	365	5	3	77	450
7	-3,4	1690,0644	364	6	2	78	450
8	-3,5	1693,5929	364	6	2	78	450
9	-3,6	1705,1573	363	7	2	78	450
10	-4,1	1755,1094	354	15	2	79	450

Σημειώνεται πως για το αντίστοιχο κτήριο χωρίς ύπαρξη FRP η Pushover κατά X έδινε μέγιστη μετακίνηση ίση με 57.8mm (έναντι 40.3 mm) και η Pushover κατά Y έδινε μέγιστη μετακίνηση ίση με 8.6mm (έναντι 4.1mm) και παρόμοιες τιμές μέγιστων τεμνουσών βάσης. Διαπιστώνουμε ότι η εφαρμογή FRP συνολικά στα υποστυλώματα του φορέα δεν ευνόησε συνολικά τη συμπεριφορά της κατασκευής και μάλιστα μείωσε τη διαθέσιμη πλαστιμότητά

της. Συνεπώς διαπιστώνουμε ότι η εφαρμογή FRP πρέπει να γίνεται στοχευμένα σε μεμονωμένα μέλη που έχουμε διαπιστώσει ότι χρίζουν ενίσχυσης.

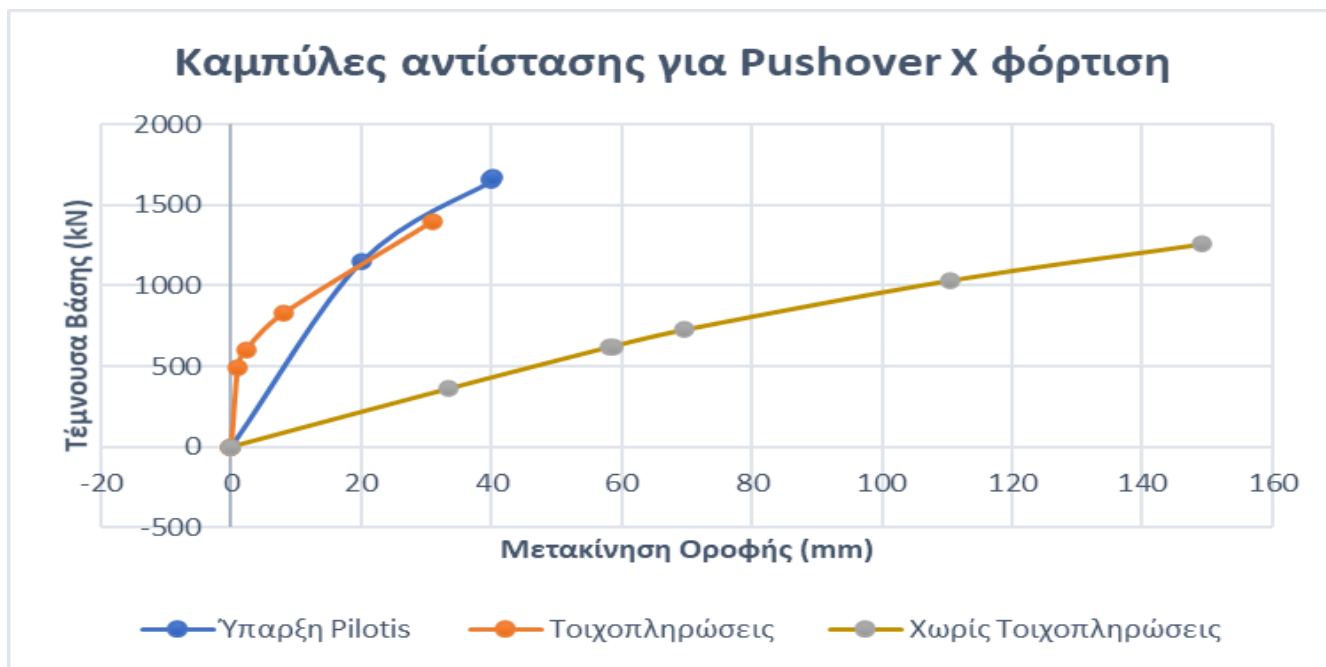
### 3.5. Συγκριτική αξιολόγηση 3 σεναρίων ενίσχυσης με FRP

Καταρχήν εξετάζουμε ενδεικτικά την κατανομή των εντατικών μεγεθών στο ενδεικτικό υποστύλωμα που παρουσιάστηκε προηγουμένως, για τα 3 σεσάρια μελέτης, φορέας ενισχυμένος με FRP στα υποστυλώματά του Α) χωρίς τοιχοπληρώσεις, Β) με τοιχοπληρώσεις Γ) με παρουσίας pilotis.

Πίνακας 14: Σύγκριση εντατικών μεγεθών σε υποστύλωμα για τα 3 σεσάρια μελέτης

	Pilotis FRP	Χωρίς Τοιχ. FRP	Τοιχοπλ. FRP	Δυσμενέστερο
Υποστύλωμα C1	ΒΑΣΙΚΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ 1.35G+1.5Q			
Τέμνουσα (kN)	-10,05	-8,19	-10	Pilotis FRP
Αξονική (kN)	-890,52	-630,31	-732,29	Pilotis FRP
Ροπή (kNm)	14,63	11,36	14,11	Pilotis FRP

Διαπιστώνουμε ότι όσον αφορά την καταπόνηση, σε όλα τα εντατικά μεγέθη δυσμενέστερο σεσάριο είναι η ύπαρξη pilotis. Είναι μάλιστα χειρότερο σεσάριο (σε τιμές απολύτων μεγεθών) ακόμα και από τον γυμνό φορέα (χωρίς τοιχοπληρώσεις). Το δεύτερο στοιχείο που εξετάζουμε είναι η σύγκριση των καμπυλών Pushover για τα 3 σεσάρια, κατά Χ και κατά Υ.



Εικόνα 49: Καμπύλες αντίστασης 3 σεναρίων για φόρτιση Pushover Χ

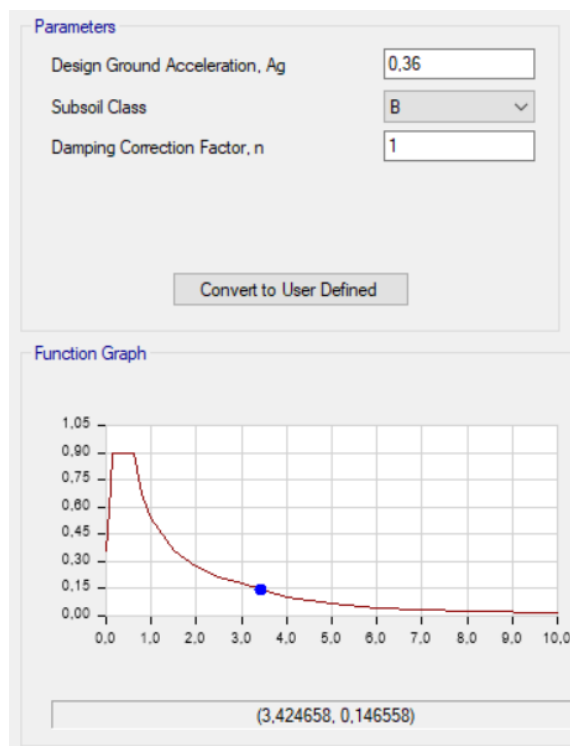


Εικόνα 50: Καμπύλες αντίστασης 3 σεναρίων για φόρτιση Pushover X

Καταρχήν παρατηρούμε ότι κατά την διεύθυνση X της φόρτισης, εν τέλει τη μεγαλύτερη διαθέσιμη δυσκαμψία την αναπτύσσει το σενάριο της Pilotis (οριακά μεν σε σχέση με την ύπαρξη τοιχοπληρώσεων). Αναμφίβολα τις μεγαλύτερες διαθέσιμες παραμορφώσεις τις αναπτύσσει το σενάριο του γυμνού φορέα. Στην περίπτωση των φορτίσεων κατά Y Pushover, διαπιστώνουμε ότι τη μέγιστη διαθέσιμη δυσκαμψία την παρέχει με αρκετή διαφορά το τοιχοπληρωμένο πλαίσιο, ενώ τη μέγιστη διαθέσιμη παραμόρφωση την πετυχαίνει ο φορέας με ύπαρξη pilotis.

Ας εξετάσουμε τώρα με βάση το φάσμα του Ευρωκώδικα τι σημαίνουν αυτά τα αποτελέσματα (προσεγγιστικά καθώς δεν μπαίνουμε στην αναλυτική επαναληπτική διαδικασία διαμόρφωσης ισοδύναμου μονοβάθμιου φορέα και «φουσκώματος» ή «ξεφουσκώματος» του ψευδοφάσματος απαίτησης επιταχύνσεων – μετακινήσεων, όπως απαιτείται κανονικά). Έστω ότι είμαστε σε κατηγορία εδάφους B (συνηθισμένος τύπος εδάφους για Ελλάδα) με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση 0.36g. Το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 όπως μάλιστα το παράγει και το ίδιο το λογισμικό του Etabs φαίνεται ακολούθως.





Εικόνα 51: Φάσμα σχεδιασμού

Εξετάζουμε τώρα τις επιταχύνσεις σχεδιασμού (με βάση την ιδιοπερίοδο X ή Y για τα 3 σενάρια ενισχυμένου φορέα με FRP που εξετάσαμε). Προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 15: Σύγκριση διαθέσιμων με απαιτούμενων μετακινήσεων φορέα

Σενάριο	Ιδιοπερίοδος (sec)	Sa (g)	Sd (mm)	Διαθέσιμη d (mm)	Έλεγχος
Pilotis Push X	0,528	0,9	62,34758	40,3	FAIL
Pilotis Push Y	0,503	0,9	56,58323	4,1	FAIL
Με Τοιχοπλ. Push X	0,163	0,9	5,941923	31	PASS
Με Τοιχοπλ. Push Y	0,13	0,81	3,401582	0,1	FAIL
Χωρίς Τοιχοπλ. Push X	1,016	0,53	135,9479	149,1	PASS
Χωρίς Τοιχοπλ. Push Y	0,975	0,55	129,9215	3,4	FAIL

Διαπιστώνεται παραπάνω ότι το χειρότερο σενάριο είναι η ύπαρξη pilotis όπου ο φορέας σε καμιά από τις δύο φορτίσεις δεν αναπτύσσει την απαιτούμενη (από το φάσμα) παραμόρφωση (πλαστιμότητα). Αντιθέτως, ακόμα και ο φορέας χωρίς τοιχοπληρώσεις, πετυχαίνει να περάσει τον έλεγχο της φόρτισης κατά X. Τέλος, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι παρόλο που ο φορέας με τοιχοπληρώσεις δεν περνάει τον έλεγχο της φόρτισης Pushover κατά Y, έχει πλησιάσει πολύ στον απαιτούμενο στόχο. Άρα διαπιστώνεται το ενδιαφέρον συμπέρασμα ότι η προσθήκη ενίσχυσης FRP σε όλα τα υποστυλώματα του φορέα είναι ευμενής όταν έχουμε πλήρη τοιχοπλήρωση, αλλά είναι δυσμενής όταν έχουμε ύπαρξη pilotis.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκεντρωτικά, από τις αναλύσεις που κάναμε στα 3 σενάρια μελέτης ενισχυμένου φορέα με FRP (φορέας γυμνός χωρίς τοιχοπληρώσεις, φορέας με τοιχοπληρώσεις, φορέας με ύπαρξη pilotis) εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Πρέπει να γίνεται στοχευμένη χρήση ενίσχυσης με FRP στα μέλη του φορέα. Άρα μια πρώτη αποτίμηση είναι πως πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική επιλογή των θέσεων που θα εφαρμοσθούν τα FRP και μάλιστα θα πρέπει (και λόγω αυξημένου κόστους) να επιλέγεται προσεκτικά και το απαιτούμενο πάχος κατά περίπτωση.
- Η παρουσία ενισχύσεων FRP σε κάποιες περιπτώσεις, αν γίνει μάλιστα και χωρίς μεγάλη παραμετροποίηση στις θέσεις και στα απαιτούμενα πάχη πολυμερών, μπορεί να οδηγήσει σε δυσμενή αποτελέσματα και όχι σε βελτιωμένο φορέα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πολύ άσχημη συμπεριφορά (από κάθε άποψη) που αναπτύσσει ο φορέας με την ύπαρξη pilotis ενώ έχει ενισχυθεί με FRP. Καταλήγουμε να θεωρούμε προτιμότερο να επιλέξουμε έναν φορέα χωρίς τοιχοπληρώσεις και χωρίς ενίσχυση με FRP καθόσον η παρουσία pilotis δημιουργεί ευκολότερα τον κρίσιμο μηχανισμό κατάρρευσης που δεν είναι άλλος από το μηχανισμό μαλακού ορόφου.
- Παρόλο που στην περίπτωση της ύπαρξης pilotis τα αποτελέσματα του ενισχυμένου φορέα δεν δίνουν την επιθυμητή συμπεριφορά, στην περίπτωση που ο φορέας είναι πλήρως τοιχοπληρωμένος, έχουμε μια σαφή βελτίωση της συμπεριφοράς του και μάλιστα πετυχαίνει να περάσει τον έλεγχο σε μία από τις δύο φορτίσεις Pushover που του επιβάλλαμε.
- Σε μελλοντική έρευνα αξίζει να συγκριθεί αυτή η μέθοδος ενίσχυσης με άλλες σε σχέση απόδοσης κόστους για να διαπιστώσουμε ποια μέθοδος ενίσχυσης συμφέρει περισσότερο (πετυχαίνει τους στόχους που θέτουμε με το ελάχιστο δυνατό κόστος και είναι και λιγότερο επεμβατική στη δομή καθώς πάντα υπάρχουν κατασκευαστικά και πρακτικά προβλήματα κατά την εφαρμογή μιας ενίσχυσης).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΡΑΦ ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ Υπομονάδα Υπερωθητική “Στατική υπερωθητική ανάλυση με βάση τους Ευρωκώδικα 8 και ΚΑΝ.ΕΠΕ.”, 2013.

Γιάννης Ζήνωνος “Επιρροή των τοιχοπληρώσεων στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος”, 2013.

Παναγιώτης Τσίκας, Στέφανος Δρίτσος “Διερεύνηση του τρόπου προσομοίωσης τοιχοπληρωμένων πλαισίων με ανοίγματα, σε κατασκευές Ο.Σ.”, 2009.

Α.Ι. Καραμπίνης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, “Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα - Τρωτότητα και Διακινδύνευση”.

Καματερή Δήμητρα “Αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και τρόποι ενίσχυσής τους”, 2013.

Κανονισμός Επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ, 2017.

Κωνσταντίνος Ρεπαπής “Αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα”, 2007.

Θ. Αντωνόπουλος “Σεισμική συμπεριφορά παλαιών κτιρίων με Pilotis και πρακτικές προτάσεις βελτίωσής της”, 2008.

Φραγκιαδάκης Δημήτριος “ Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίου με τοιχοποιία”, 2014.

Fespa 10 EC “ Αποτίμηση στατικής επάρκειας υφιστάμενης κατασκευής σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. λαμβάνοντας υπ’ όψιν την επιρροή των τοιχοπληρώσεων”, 2013.

Κωνσταντίνος Μορφίδης “ Διαδικασία αντισεισμικού υπολογισμού κατασκευών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8”, 2013.

Bresson, J. (1971). "Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures." Annales de l'institut technique, 278, pp. 35-48.

L'Hermite, R. (1967). "L'application des colles et résines dans la construction." Annales L'Institut Technique, 239, pp. 65-73.

Meier, U., Deuring, M., Meier, H., and Schwegler, G. (1992) "Strengthening of structures with CFRP laminates: research and applications in Switzerland.", Proceedings: Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ed(s): Neale, K. W. and Labossiere, P., Montreal, pp. 243–251.

Nanni, A., Ahmad, S., Albrecht, P., Altayyib, A. H., Balaguru, P. N., Ballinger, C. A., Bank, L. C., Banthia, N., Barno, D., Budelmann, H., Burgoyne, C. J., Catsman, P., Cousins, T. E., Dolan, C. W., Edwards, H., Saadatmanesh, H., Faza, S., Gale, D. M., Ganz, H. R., Gerritse, A., Goodspeed, C. H., Guglielmo, M. S., Hickman, J., Iyer, S. L., Macneil, M. E., Marsh, H., Mashima, M., Mcclaskey, C. R., Mutsuyoshi, H., Naaman, A. E., Okamoto, T., Ehsani, M. R., Oneil, E., Phoenix, S. L., Porter, M., Rahman, A. H., Ramakrishnan, V., Rizkalla, S. H., Santoh, N., Schupack, M., Sonobe, Y., Speakman, J. D., Sugita, M., Taerwe, L., Uomoto, T., and Wecharatana, M. (1995). "Abstract of - State-of-the-Art-Report on Fiber-References 95 Reinforced Plastic (Frp) for Concrete Structures." *Ac Structural Journal*, 92(5), pp. 627-628.

PTI (2006). "Post tensioning manual", Sixth Edition, Phoenix, AZ: N. Black Canyon Hwy. Post-Tensioning Institute, pp. 202, 0-9778752-0-2.

Täljsten, B. (2006). "FRP strengthening of existing concrete structures", 4th Edition, Luleå: Luleå University of Technology, p. 208, 91-89580-03-6.

Triantafillou, T. C., and Plevris, N. (1992). "Strengthening of RC Beams with Epoxy-Bonded Fiber-Composite Materials." *Materials and Structures*, 25(148), pp. 201- 211.

van Gemert, D. (1996) "Design applications and durability of plate bonding technique", *Proceedings: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Protection*, Ed(s): Dhir, R. K. and Jones, M. R., Scotland, pp. 559-569.

Wild, S.(2007)."Concrete evidence." *New Scientist*, 2588(21),p.21

