

## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΠΛΑΙΣΙΑΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ ΜΑΛΑΚΟ ΟΡΟΦΟ ΜΕΣΩ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

ΛΑΤΣΟΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ  
ΤΟΥΣΜΑΝΗΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ

### Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την αποτίμηση της αντοχής πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος, κατασκευασμένων σύμφωνα με τα παλαιά πρότυπα (προ του 85'), και την ενίσχυση τους. Εξετάζονται τρεις μέθοδοι ενίσχυσης: προσθήκη πλευρικών τοιχωμάτων – πτερυγίων, γέμισμα πλαισίων με οπλισμένο σκυρόδεμα, μεταλλικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας (χιαστί) και γίνεται σύγκριση αυτών ως προς την αντοχή, την πλαστιμότητα και τη δυσκαμψία. Επίσης μελετάται η επιρροή μαλακού ορόφου στην απόκριση των πλαισίων πριν και μετά την ενίσχυση. Η εργασία έχει γίνει με βάση τις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ (προσομοίωση, ανάλυση και ενίσχυση). Για την εκπόνηση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε η Ανελαστική Στατική Ανάλυση (Pushover) του προγράμματος SAP2000.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα είναι μια από τις πλέον σεισμογενείς Ευρωπαϊκές χώρες και τις τελευταίες δεκαετίες οι συνέπειες από τις σεισμικές δονήσεις τόσο σε ανθρώπινα θύματα, όσο και σε υλικές ζημιές είναι πολύ μεγάλες. Όταν ο πρώτος αντισεισμικός κανονισμός εισήχθη στη χώρα μας, το 1959, το βασικό νέο στοιχείο, που εισήγαγε στο σχεδιασμό των κατασκευών Ο/Σ, ήταν η απαίτηση υπολογισμού για τον καθορισμό του μεγέθους των σεισμικών δυνάμεων, ανάλογα με τη θεωρούμενη σεισμικότητα της περιοχής και τον τύπο του εδάφους. Βέβαια, η θέσπιση αντισεισμικού κανονισμού δεν σημαίνει ότι οι κατασκευές, που σχεδιάστηκαν με αυτόν, διέθεταν ικανοποιητική αντοχή σε σεισμό. Στην πραγματικότητα, η διαστασιολόγηση των μελών τέτοιων κατασκευών παρουσιάζει μικρή αντοχή σε σχέση με τις απαιτήσεις που θεσπίζουν οι σύγχρονοι κανονισμοί. Ως αποτέλεσμα, κρίνεται απαραίτητη στις περισσότερες περιπτώσεις η ενίσχυση των παλαιών κατασκευών ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη ασφάλεια. Αντικίνητρο για τη σεισμική ενίσχυση αποτελεί η έλλειψη μέχρι τώρα θεσμοθετημένων προδιαγραφών ή κανονισμών για την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό των υφιστάμενων κατασκευών. Στο πλαίσιο αυτό, υπό την αιγίδα του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.) εκπονήθηκε ερευνητικό έργο για την έκδοση του πρώτου κειμένου του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ) ο οποίος έχει ως στόχο να θέσει τις αρχές και τις μεθόδους βάση των οποίων θα γίνονται οι επεμβάσεις σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται οι διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την μελέτη τριών τεχνικών ενίσχυσης πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι εξής μέθοδοι:

- Ενίσχυση με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας
- Γέμισμα πλαισίων με οπλισμένο σκυρόδεμα
- Προσθήκη πλευρικών τοιχωμάτων σε συνέχεια υποστυλωμάτων – Τοιχώματα με πτερύγια

#### 1.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

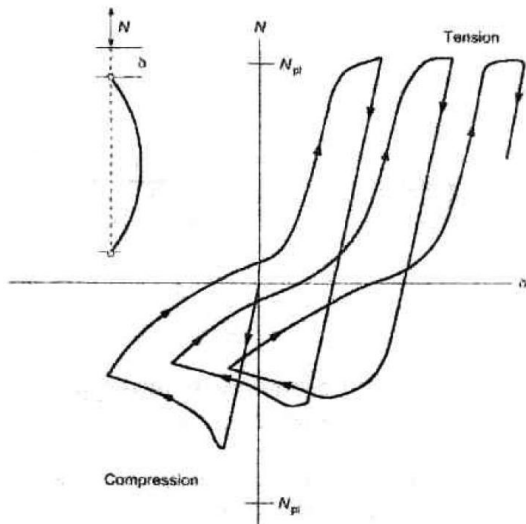
Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αντοχή σε πλευρική φόρτιση. Με την προσθήκη συνδέσμων δυσκαμψίας, οι σεισμικές δυνάμεις αναλαμβάνονται κυρίως από τις αξονικές δυνάμεις των συνδέσμων. Οι σύνδεσμοι κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των μελών με το ζύγωμα του φατνώματος σε κεντρικούς και έκκεντρους.

- Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των συνδέσμων με την υφιστάμενη κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος σε συνδέσμους με εξωτερική και εσωτερική σύνδεση (οι δεύτεροι διαχωρίζονται σε άμεσης και έμμεσης σύνδεσης)

**Χιαστί διαγώνιοι σύνδεσμοι**

Είναι η μορφή που χρησιμοποιείται πιο συχνά στην πράξη. Πρόκειται για κεντρικούς συνδέσμους που αναλαμβάνουν μόνο πλευρικά φορτία με ανάπτυξη αξονικών (εφελκυστικών και θλιπτικών) δυνάμεων. Κατά τη διαστασιολόγηση τους θεωρείται, ότι οι εφελκυστικές διαγώνιοι συνεισφέρουν στην ανάληψη των εναλλασσόμενων σεισμικών δυνάμεων, ενώ οι θλιβόμενες αγνοούνται. Σε πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης, κατά

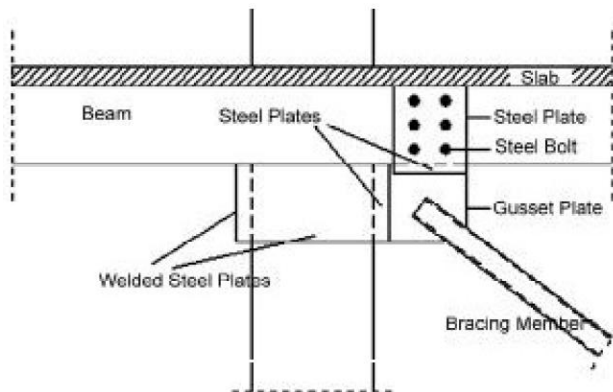


Σχήμα 1: Βρόγχος υστέρησης του συνδέσμου δυσκαμψίας[7]

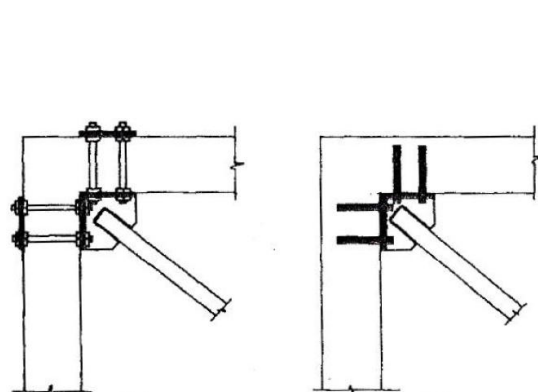
την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου τα μέλη παραμορφώνονται πλευρικά και σχηματίζουν πλαστική άρθρωση στο μέσον του μήκους τους που συνεπάγεται μείωση της αντοχής του στοιχείου σε θλίψη. Στη συνέχεια, με τη δράση εφελκυστικής δύναμης, το εφελκυσμένο μέλος αναλαμβάνει το φορτίο και διαρρέει. Ακολουθεί ο λυγισμός του θλιβόμενου μέλους.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι η σημαντική αύξηση στη διατμητική αντοχή εντός επιπέδου ενός πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος. Τα προβλήματα λυγισμού που παρουσιάζονται στα θλιβόμενα μέλη και η σχετικά φτωχή μετελαστική συμπεριφορά, έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αστοχία και την ανικανότητα απορρόφησης μεγάλου ποσοστού σεισμικής ενέργειας, κάτι που καθιστά δυσμενές το σύστημα αυτό για έναν πλάστιμο σχεδιασμό.

Όσον αφορά τη σύνδεσή τους με το υπάρχον πλαίσιο (εσωτερικά του κόμβου), αυτή μπορεί να γίνει είτε άμεσα είτε έμμεσα. Η πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται με χρήση κομβοελασμάτων στους κόμβους του πλαισίου. Η διαγώνια ράβδος συγκολλείται ή κοχλιώνεται στο γωνιακό κομβοέλασμα και αυτό, στη συνέχεια, συνδέεται κοχλιωτά ή με συγκόλληση σε γωνιακά μεταλλικά ελάσματα που είναι επικολλημένα ή αγκυρωμένα στον κόμβο δοκού - υποστυλώματος του πλαισίου. Επιτυγχάνεται παράλληλα και η ενίσχυση του κόμβου, πράγμα απαραίτητο προκειμένου να παραλάβει τις σεισμικές δυνάμεις που του προκαλούν μεγάλη καταπόνηση.



Σχήμα 2: Γωνιακό επικολλητό κομβοέλασμα[7]

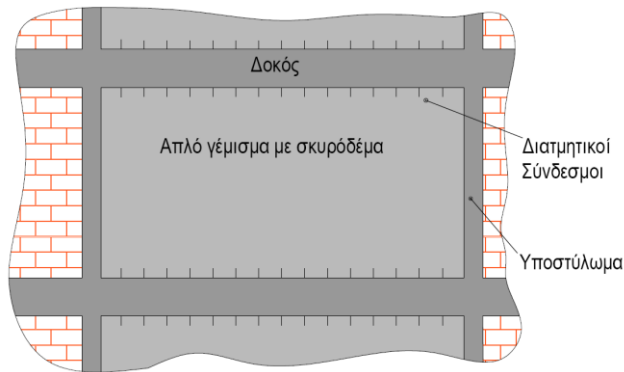


Σχήμα 3: Μορφές άμεσης σύνδεσης δικτυωτών συνδέσμων[7]

Στην δεύτερη περίπτωση, χαλύβδινα προκατασκευασμένα πλαίσια εισάγονται στο φάτνωμα και σε αυτά συνδέονται οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας, συνήθως με χρήση κομβοελασμάτων. Έτσι η μεταφορά των δυνάμεων γίνεται έμμεσα από πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος στο ενσωματωμένο μεταλλικό πλαίσιο και από αυτό στα δικτυωτά μέλη. Η διατμητική σύνδεση πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικού πλαισίου γίνεται με τη βοήθεια διατμητικών ήλων, ώστε να εξασφαλιστεί πλήρης σύνδεση [7].

## 1.2. ΓΕΜΙΣΜΑ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Γεμίσματα φανωμάτων πλαισίων από έγχυτο ή εκτοξευόμενο οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευάζονται σε επιλεγμένα πλαίσια της κατασκευής. Στην περίπτωση πλήρωσης φανώματος στο οποίο έλλειπε η πλινθοδομή, ελέγχονται λεπτομερώς οι συνέπειες γύρω από το φάτνωμα καθ' ύψος και καθ' έκταση. Το τοίχωμα συνδέεται κατά μήκος της περιμέτρου του πλαισίου με τα υποστυλώματα και τις δοκούς, χωρίς όμως ιδιαίτερη μέριμνα για τη σύνδεση αυτή. Στις περιπτώσεις που επιδιώκεται μία πιο πλάστιμη συμπεριφορά της κατασκευής, η σύνδεση γίνεται μόνο στις δοκούς, δηλαδή στο πάνω και στο κάτω μέρος του τοιχώματος, ενώ στα πλάγια μεταξύ τοιχώματος και υποστυλώματος δεν γίνεται σύνδεση και αφήνεται ένα μικρό κενό. Με αυτόν τον τρόπο δεν μεταβιβάζονται στο υποστύλωμα αυξημένες δυνάμεις από το νέο τοίχωμα.



Σχήμα 4: Ενίσχυση με έγχυτο σκυρόδεμα εντός πλαισίου

Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει το κατά πόσον τα 'απλά γεμίσματα' έχουν ευμενή επιρροή στη συμπεριφορά – απόκριση μιας κατασκευής, είναι η διάταξή τους. Γεμίσματα τα οποία κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος της περιμέτρου του κτιρίου και χωρίς ασυνέχειες καθ' ύψος, έχουν γενικά ευνοϊκό ρόλο στην αντίσταση του κτιρίου σε σεισμικά φορτία. Εκτός από την αντοχή, αυξάνουν και τη συνολική πλευρική δυσκαμψία των φορέων, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι σημαντικά μετακινήσεις εξαλείφοντας τα φαινόμενα 2ας τάξεως.

Κατασκευαστικά προβλήματα που προκύπτουν, είναι η συστολή ξήρανσης (με συνέπεια τη ρηγμάτωση της επιφάνειας) και η δυσκολία σκυροδέτησης. Για την αντιμετώπιση του πρώτου προβλήματος υπάρχουν ειδικά σκυροδέματα, όπως το πολυμερικό καθώς και διάφορα κονιάματα, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως από υψηλή πρόσφυση και μικρή συστολή ξήρανσης. Εναλλακτικά το τοίχωμα μπορεί σκυροδετείται μέχρι ένα ύψος 20cm από το κάτω πέλμα της δοκού και μετά από τη πάροδο ικανού χρόνου από την ημέρα σκυροδέτησης, συμπληρώνεται με εποξειδικό ή πολυεστερικό κονίαμα. Το δεύτερο πρόβλημα, συμβαίνει λόγω της ανεπαρκούς πρόσβασης στην κορυφή (στη περίπτωση του έγχυτου σκυροδέτησης) το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία αρμού στο πάνω μέρος, αντιμετωπίζεται με τσιμεντενέσεις ή χρήση εκτοξευόμενου[8].

## 1.3. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ – ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

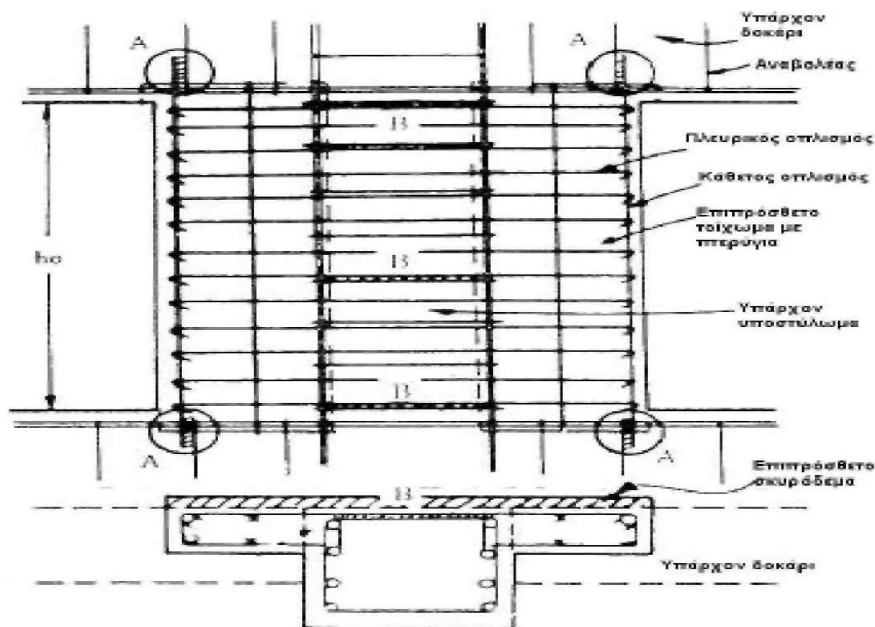
Η τεχνική της ενίσχυσης αυτής βασίζεται στην βελτίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής τοποθετώντας πλευρικά τοιχία Ο/Σ εκατέρωθεν υφιστάμενων υποστυλωμάτων και σε σύνδεση με αυτά. Η προσθήκη τοιχωμάτων γίνεται προς την επιδιωκόμενη διεύθυνση

αύξησης της αντίστασης της κατασκευής, ενώ η σύνδεση με το πλαίσιο μπορεί να είναι είτε κεντρική είτε έκκεντρη (εξωτερική τοποθέτηση). Σε γωνιακά υποστυλώματα, συνιστάται προσθήκη τοιχωμάτων και στις δύο διευθύνσεις.

Για να επιτευχθεί μονολιθική σύνδεση των νέων τοιχωμάτων με το υποστύλωμα, θα πρέπει τα δύο πλευρικά τοίχια να συνδέονται και μεταξύ τους μέσω πλευρικής ενίσχυσης και αύξησης του πάχους. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται σε φατνώματα όπου η απόσταση μεταξύ των υποστυλωμάτων είναι μικρή. Η σύσταση αυτή ισχύει για την αποφυγή αστοχίας λόγω τέμνουσας των δοκών, καθώς τα πρόσθετα περύγια μειώνουν αισθητά το καθαρό άνοιγμά τους. Πρέπει να δοθεί επίσης προσοχή στη σύνδεση υποστυλώματος και περυγίων ώστε να αποφευχθεί παραμόρφωση εκτός του επιπέδου τους. Ειδικότερα για την περίπτωση όπου τα περύγια τοποθετούνται έκκεντρα στο υποστύλωμα απαιτείται να είναι αντίστοιχα έκκεντρα και η δοκός. Ταυτόχρονα, λόγω της απαίτησης για σύνδεση των περυγίων μεταξύ τους έχουμε αύξηση του πάχους του υπάρχοντος υποστυλώματος πάνω από πέντε εκατοστά. Σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της μεθόδου παίζει η επίτευξη πλήρους σύνδεσης μεταξύ περυγίων και υποστυλώματος με χρήση βλήτρων και εκτράχυνση της επιφάνειας. Τέλος, στην περίπτωση που το νέο στοιχείο λειτουργεί ως εξωτερικός τοίχος, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της σύνδεσης [8].



Σχήμα 5: Προσθήκη περυγίων εντός πλαισίου[8]



Σχήμα 6: Υποστύλωμα με περύγια[8]

#### 1.4. ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

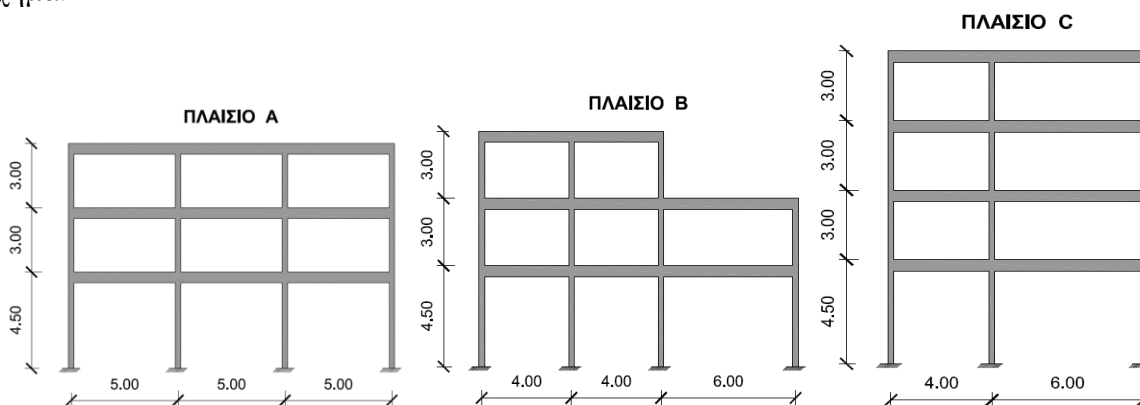
Οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας μιας κατασκευής αποτελούν συνδυασμούς μιας στάθμης επιτελεστικότητας και ενός επιπέδου της σεισμικής δράσης, που συνήθως καθορίζεται από την ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης στη διάρκεια ζωής της κατασκευής ή την ισοδύναμη περίοδο επανάληψης. Ο καθορισμός του στόχου για τον οποίο θα γίνει ο σχεδιασμός εξαρτάται από τον επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη και τη σπουδαιότητα της κατασκευής. Όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί ορίζουν με μικροδιαφορές τρεις διαφορετικές στάθμες επιτελεστικότητας για τον φέροντα οργανισμό και τα μη φέροντα στοιχεία, ανάλογα με το επίπεδο βλαβών. Οι στάθμες αυτές είναι: Άμεση χρήση μετά το σεισμό (Immediate Occupancy), Προστασία Ζωής (Life Safety), Οιονεί Κατάρρευση (Structural Stability – Collapse Prevention).

#### 2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση τριών πλαισίων με τη μέθοδο της Ανελαστικής Στατικής Ανάλυσης (Pushover), σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Τα πλαίσια αυτά αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κατασκευών της δεκαετίας του '80. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις: α) ύπαρξη τοιχοποιίας σε όλα τα φαντώματα των πλαισίων και β) απουσία τοιχοποιίας μόνο στα φαντώματα του ισογείου, περίπτωση μαλακού ορόφου – Pilotis. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ενίσχυση των πλαισίων με τις εξής μεθόδους: α) Ενίσχυση με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας β) Γέμισμα πλαισίων με οπλισμένο σκυρόδεμα και γ) Προσθήκη πλευρικών τοιχωμάτων σε συνέχεια υποστρωμάτων – πτερυγία. Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση των τριών παραπάνω μεθόδων ως προς την αντοχή, τη δυσκαμψία και τη πλαστιμότητα. Η εργασία στοχεύει επίσης στην εύρεση της στάθμης επιτελεστικότητας που επιτυγχάνεται κάθε φορά καθώς και στη διερεύνηση της απόκρισης των πλαισίων τύπου Pilotis-μαλακού ορόφου πριν και μετά την ενίσχυση. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιείται το πρόγραμμα SAP2000 v.15 καθώς και το λογισμικό Microsoft Excel.

#### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Τα τρία πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος που εξετάστηκαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

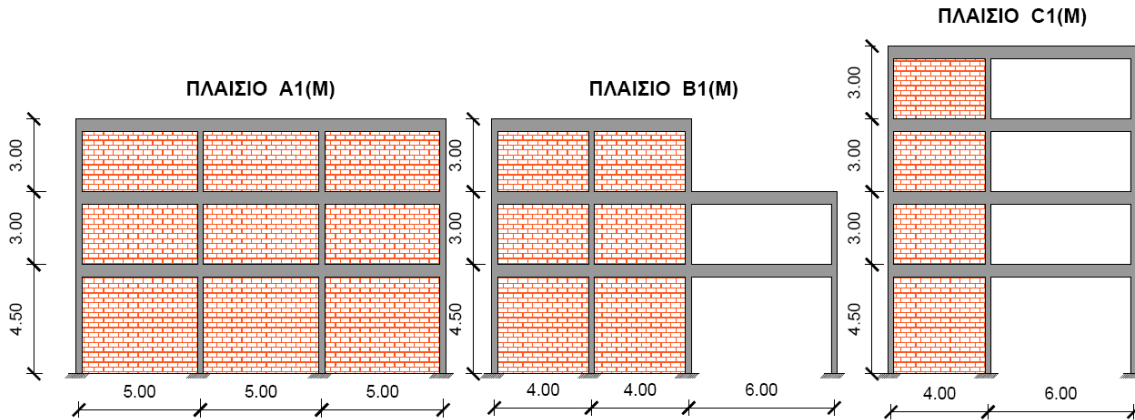


Σχήμα 7: Τύποι πλαισίων που μελετήθηκαν

Ονομασία πλαισίων: Τα γράμματα Α, Β και C αναφέρονται στο τύπο του πλαισίου, ο αριθμός δίπλα αναφέρεται στην ενίσχυση που πραγματοποιήθηκε, **1**: μη ενισχυμένος φορέας-αρχικός, **2**: ενίσχυση με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, **3**: ενίσχυση με γέμισμα από σκυρόδεμα, **4**: ενίσχυση με προσθήκη πτερυγίων και τέλος το γράμμα μέσα στη παρένθεση

δηλώνει: **M** για τοιχοποιία σε όλα τα φαντώματα και **P** για την απουσία τοιχοποιίας στο ισόγειο (μαλακός όροφος-Pilotis).

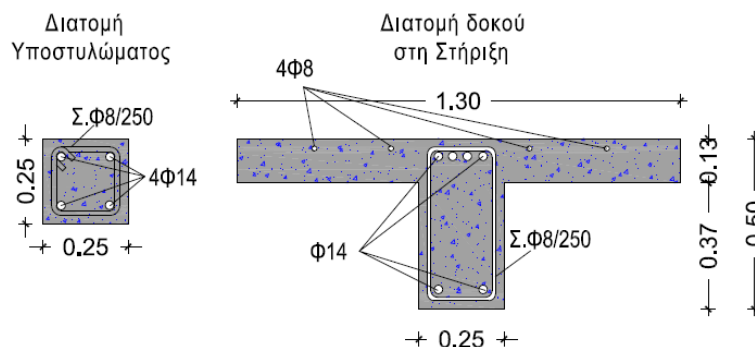
Στα φαντώματα στα οποία δεν έχει σχεδιαστεί η τοιχοποιία σημαίνει ότι δεν έχει ληφθεί υπόψη στο προσομοίωμα λόγω υπέρβασης των κανονισμών περί λυγηρότητας και όχι επειδή περιλήφθηκε.



Σχήμα 8: Τα αρχικά τοιχοπληρωμένα πλαίσια, όπως αυτά προσομοιώθηκαν

Τα υλικά, οι διατομές και τα φορτία που επιλέχθηκαν είναι τα εξής:

- Υποστυλώματα:  $0,25 \times 0,25$  m με διαμήκη οπλισμό  $4\Phi 14$  στις γωνίες και εγκάρσιο  $\Phi 8/250$  (Σχήμα: 9)
- Δοκάρια: Θεωρήθηκε πλακοδοκός με  $b_{eff} = 1.30$  m, πλάτος  $b_w = 0.25$  m, ύψος  $h = 0.50$  m, πάχος πλάκας  $h_f = 0.13$  m. Διαμήκης οπλισμός: στη στήριξη  $4\Phi 14$  πάνω και  $2\Phi 14$  κάτω, στο άνοιγμα  $4\Phi 14$  κάτω και  $2\Phi 14$  πάνω. Εγκάρσιος οπλισμός  $\Phi 8/250$
- Οπλισμός πλάκας  $\Phi 8/250$ . (Σχήμα: 9)
- Σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής  $f_c = 16$  MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E_c = 27.5$  GPa
- Χάλυβας διαμήκους οπλισμού St-IIIβ με  $f_y = 420$  MPa (για  $\Phi < 18$  mm),  $\epsilon_u = 5.25\%$ ,  $\epsilon_{su} = 1.96\%$  και εγκάρσιου St-I (λείος) με  $\epsilon_u = 9.30\%$ ,  $\epsilon_{su} = 3.48\%$ . Μέτρο ελαστικότητας:  $E_s = 210$  GPa
- Επικάλυψη οπλισμού :  $c = 20$  mm
- Τοιχοπληρώσεις: Διπλός δρομικός τοίχος πάχους  $0,20$  m με αντοχή σε λοξή θλίψη  $f_{wc,s} = 0.75$  MPa (κακή ποιότητα σφήνωσης)[3] και μέτρο ελαστικότητας  $E = 560$  MPa
- Μόνιμο φορτίο  $G = 14.61$  kN/m (συμπεριλαμβανομένου ίδιου βάρους σκυροδέματος, επικάλυψη και βάρος τοιχοποιίας, όπου υπάρχει)
- Κινητό φορτίο  $2$  kN/m<sup>2</sup> με επιφάνεια επιρροής  $4$  m<sup>2</sup> που κατανέμεται ομοιόμορφα στο μήκος της δοκού. ( $2$ ,  $1.6$  και  $1.33$  kN/m στις δοκούς με μήκος  $4$ ,  $5$  και  $6$  m αντίστοιχα)



Σχήμα 9: Οι διατομές δοκού και υποστυλώματος που προσομοιώθηκαν.

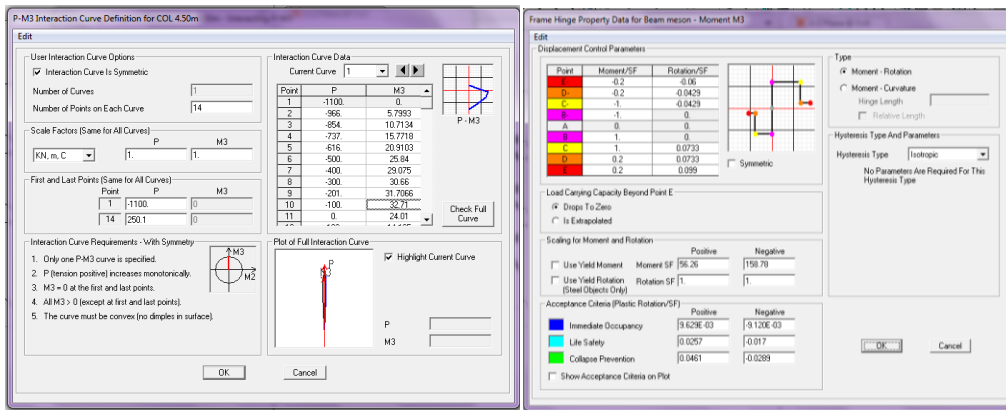
#### 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ

Για την προσομοίωση και την ανάλυση του κάθε πλαισίου ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Ορίστηκαν τα υλικά (σκυρόδεμα, τοιχοποιία) και οι διατομές του κάθε μέλους (οι διατομές σκυροδέματος δεν περιελάμβαναν τους οπλισμούς, οι οπλισμοί δόθηκαν έμμεσα όπως περιγράφεται παρακάτω.)
- Τα κατακόρυφα φορτία των στοιχείων θα συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα, ώστε να συνδυάζονται με τα οριζόντια φορτία, σύμφωνα με το σεισμικό συνδυασμό του ΕΑΚ (παρ 4.1.2.1)
- Τα οριζόντια στατικά φορτία εφαρμόζονται στη στάθμη κάθε ορόφου σύμφωνα με την κατανομή των αδρανειακών φορτίων του σεισμού [5].
- Έγινε προκαταρκτική ελαστική στατική ανάλυση για την εύρεση των αξονικών φορτίων για το συνδυασμό  $G+0.3Q$ , καθώς ήταν απαραίτητα για τον προσδιορισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων. Όταν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, κατάλληλα μεγέθη «F» και «δ» είναι η ροπή κάμψης (M) και η καμπυλότητα ( $1/r$ ). Αν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, κατάλληλα μεγέθη είναι η τέμνουσα δύναμη (V) και η γωνιακή παραμόρφωση ( $\gamma$ ). Επειδή στα στοιχεία O/Σ, οι καμπτικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν με τις διατμητικές και με τις στροφές των ακραίων διατομών λόγω εξόλκευσης των οπλισμών από την αγκύρωση, κατάλληλα μεγέθη είναι η ροπή (M) και η γωνία στροφής χορδής ( $\theta$ ).
- Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των στοιχείων έγινε με το προσομοίωμα των σημειακών πλαστικών αρθρώσεων. Για τον καθορισμό του νόμου ροπής – στροφής χορδής (M- $\theta$ ) ενός στοιχείου απαιτείται ο υπολογισμός της στροφής χορδής στη διαρροή και την αστοχία, της διαθέσιμης πλαστικής στροφής, της ροπής διαρροής και της ροπής αστοχίας της διατομής. Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν σε φύλλο εργασίας του Excel με βάση τις αναλυτικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ (Παρ 7.2 , Σχέσεις A1 – A6 του Παραρτήματος 7A καθώς και την Παρ. 9.3.1 για την εύρεση της στάθμης επιτελεστικότητας κάθε διατομής). Ο μετελαστικός κλάδος της καμπύλης λήφθηκε με κράτυνση (θετική κλίση) για λόγους αριθμητικής ευστάθειας. Σημειώνεται επίσης ότι στα στοιχεία όπου η τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση ( $V_{R1}$ ) υπολείπονταν της τέμνουσας κατά τη καμπτική διαρροή ( $V_{Mu}=M_y/L_s$ ), ο συντελεστής:  $a_v$  στην εξίσωση Σ.2 του ΚΑΝ.ΕΠΕ πήρε τη τιμή ένα. Όταν καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση ( $V_R < V_{Mu}$ ), τότε η παραμόρφωση στη διαρροή υπολογίζεται ως γινόμενο της  $\theta_y$  και του μεγέθους ( $V_R L_s$ )/ $M_y$  (όπου  $V_R$ : η αντοχή σε τέμνουσα,  $L_s$ : το μήκος διάτμησης και  $M_y$ : η ροπή διαρροής).
- Για τις δοκούς στη περιοχή των στηρίξεων, ελήφθησαν υπόψη και οι οπλισμοί της πλάκας, που βρίσκονται εντός του συνεργαζόμενου πλάτους ( $b_{eff}$ ), οι οποίοι είναι παράλληλοι με τον άξονα της δοκού και επαρκώς αγκυρωμένοι. Στις στηρίξεις των δοκών με τα εξωτερικά υποστυλώματα, η αγκύρωση του οπλισμού της πλάκας δε θεωρήθηκε ικανοποιητική και συνεπώς δε λήφθηκε υπόψη στους υπολογισμούς των απαραίτητων μεγεθών (M και  $\theta$ ). Αντίθετα στις στηρίξεις με τα μεσαία υποστυλώματα, λόγω της ευθύγραμμης αγκύρωσης του οπλισμού, θεωρήθηκε επαρκής και προσομοιώθηκε. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το ότι η δοκός στη στήριξη έχει διαφορετικό οπλισμό στο άνω και κάτω πέλμα, οδήγησε στην εισαγωγή τεσσάρων διαφορετικών νόμων M- $\theta$  για τις ακραίες δοκούς και δύο νόμων για τη μεσαία.
- Έγινε εισαγωγή των διαγραμμάτων M –  $\theta$  στο λογισμικό για τις δοκούς και τα υποστυλώματα (moment rotation data P-M3). Στο πρόγραμμα ορίστηκε και το διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής – αξονικής δύναμης [4] (P – M3 interaction curve definition) [11] της ορθογωνικής διατομής του υποστυλώματος καθώς όπως αναφέραμε

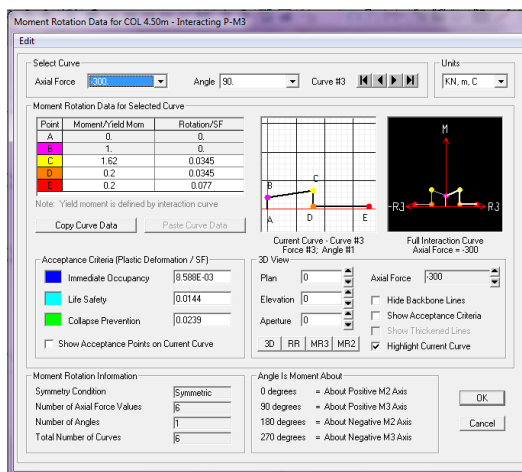
οι διατομές των υποστυλωμάτων κατά τη προσομοίωση τους στο λογισμικό δεν είχαν οπλισμούς. Σημειώνεται επίσης ότι για τα υποστυλώματα δόθηκε νόμος (M-θ) για ένα μεγάλο εύρος αξονικών δυνάμεων (ανά 100KN), έτσι ώστε το λογισμικό να είναι σε θέση, ανάλογα με τη τιμή της αξονικής που καταπονεί το υποστύλωμα (σε κάθε βήμα) μέσω γραμμικής παρεμβολής, να υπολογίσει όσο το δυνατόν καλύτερα την ανελαστική του συμπεριφορά. Τα παραπάνω φαίνονται στα (Σχήματα :10 έως 12).

- Η τοιχοποιία προσομοιώθηκε με ένα διαγώνιο θλιπτήρα, πάχους  $t=0.20$  m και πλάτους  $b = 0.1 L$ , όπου  $L$  το μήκος της διαγωνίου του φανώματος, σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Παρ. 7.4). Για παράδειγμα η διατομή της τοιχοποιίας του πλαισίου A1(M) είναι  $0.2*0.64$  για το ισόγειο και  $0.2*0.55$  για τις άνω στάθμες. Όσον αφορά την αντοχή της θλιβόμενης διαγωνίου για τη στάθμη επιτελεστικότητας B χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ (Σχήμα:13). Τοιχοποιίες που ξεπερνούσαν το όριο λυγηρότητας:  $\lambda > 30$  αμελήθηκαν ( όπως στα φανώματα με μήκος 6 m).
- Η δυσκαμψία των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος θεωρήθηκε μειωμένη για να ληφθεί υπόψη η ρηγματώση σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ [1].

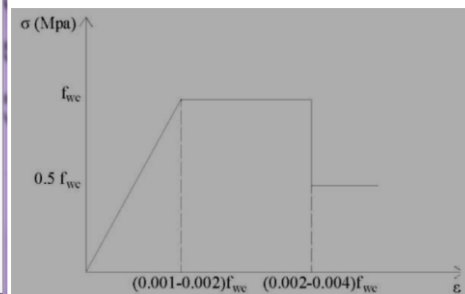


Σχήμα 10: Εισαγωγή διαγράμματος αλληλεπίδρασης ροπής – αξονικής για υποστύλωμα

Σχήμα 12: Εισαγωγή σημειακής πλαστικής άρθρωσης (M-θ) για δοκό (στήριξη με μεσαίο υποστύλωμα)



Σχήμα 11: Εισαγωγή σημειακής πλαστικής άρθρωσης (M-θ) για υποστύλωμα



Σχήμα 13: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης τοιχοποιίας σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ.



#### 4.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΧΙΑΣΤΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

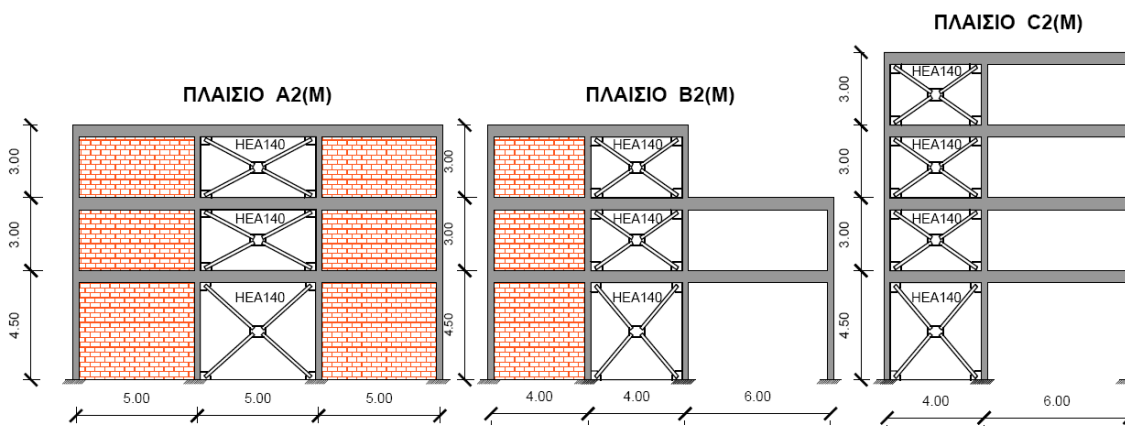
Έγινε ενίσχυση με Χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας διατομής HEA140 και ποιότητας χάλυβα S275. Επιλέχθηκε να ενισχυθούν τα μεσαία φατνώματα των πλαισίων Α και Β και το αριστερό του πλαισίου C (Σχήμα: 14) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων εισήχθη στο πρόγραμμα με βάση το Σχήμα 5.2.1 του Ευρωκώδικα 3 και τις διατάξεις της Παρ. 8.5.5 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Θεωρήθηκε άμεση εσωτερική σύνδεση των μεταλλικών συνδέσμων με τα υπάρχοντα στοιχεία σκυροδέματος, ικανή να παραλάβει τις δυνάμεις που θα αναπτυχθούν. Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι ενώθηκαν στο μέσον του μήκους τους με κοινό κομβόελασμα που μειώνει το μήκος λυγισμού του μέλους στο μισό. Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι που επιλέχθηκαν καλύπτουν τις απαιτήσεις, που περιγράφονται στις παραγράφους 8.5.5.3 και παράρτημα Γ του ΕΑΚ. Πιο συγκεκριμένα για την ανηγμένη λυγηρότητα:  $\bar{\lambda}$  ο ΕΑΚ προβλέπει:  $\bar{\lambda} = \sqrt{A \cdot f_y / N_{cr}} < 1.50$  (1). Η δυσμενέστερη περίπτωση είναι αυτή του πλαισίου Α στο ισόγειο, με μήκος λυγισμού:  $L' = L/2 = 6.72/2 = 3.36$ . Η διατομή HEA140 έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά:  $A = 31.42 \text{ cm}^2$ ,  $f_y = 270 \text{ MPa}$ ,  $I_{\min, z} = 389.3 \text{ cm}^4$ .

$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{(kL')^2}$  (2): το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, όπου  $k=1$  (αρθρώσεις).

$$A \cdot f_y = 31.42 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 275 \cdot 10^3 \text{ Kn/m}^2 = 864 \text{ Kn},$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 200 \cdot 10^6 \text{ Kn/m}^2 \cdot 389.3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{(6.72/2)^2} = 680.1 \text{ Kn}. \text{ Τελικώς: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{864}{680.1}} = 1.12 < 1.50.$$

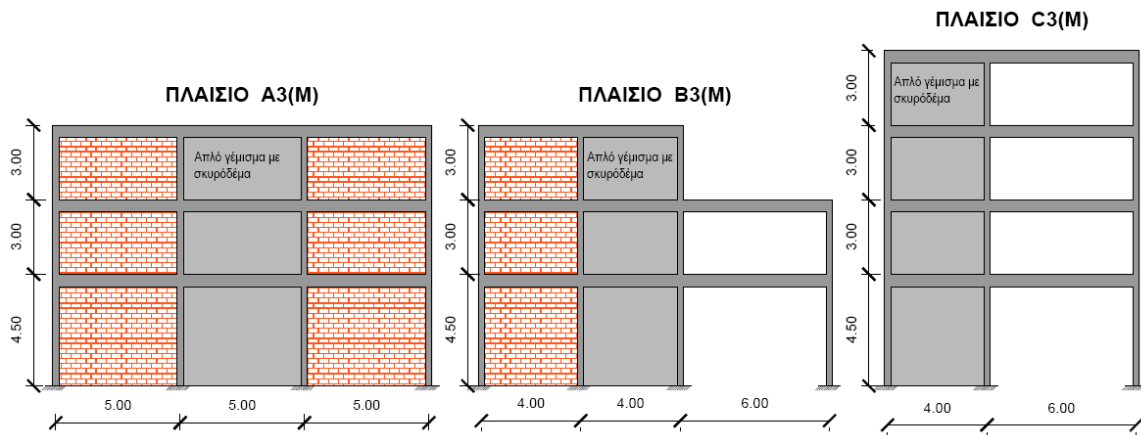
Η διαστασιολόγηση της δικτύωσης έγινε σε όρους δύναμης-παραμορφώσης, όπου για τα εφελκόμενα στοιχεία λήφθηκε η πραγματική δύναμη διαρροής, ενώ για τα θλιβόμενα το 20% του φορτίου λυγισμού τους. Η παραμόρφωση κατά την αστοχία ορίστηκε το 12-πλάσιο και το 8-πλάσιο της παραμόρφωσης διαρροής για τα εφελκόμενα και τα θλιβόμενα στοιχεία αντίστοιχα.



Σχήμα 14: Πλαίσια ενισχυμένα με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας HEA140.

#### 4.2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΓΕΜΙΣΜΑ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

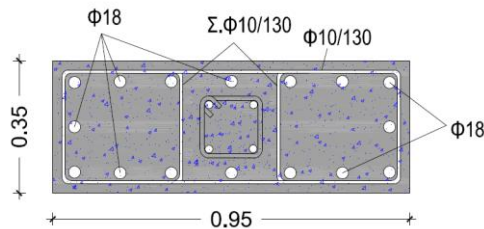
Έγινε γέμισμα φατνωμάτων με σκυρόδεμα C16/20, πάχους 0.20 m, τοποθετήθηκε διπλή εσχάρα οπλισμού Φ10/200 (B500C) και στις δύο διευθύνσεις. Επιλέχθηκε να ενισχυθούν τα μεσαία φατνώματα των πλαισίων Α και Β και το αριστερό του πλαισίου C (Σχήμα:15), όπως και στη προηγούμενη μέθοδο. Η προσομοίωση έγινε σύμφωνα με τη παράγραφο 8.5.2 του ΚΑΝ.ΕΠΕ με ένα διαγώνιο θλιπτήρα πάχους  $t = 0.20 \text{ m}$  και πλάτους  $b = 0.1 L$ , όπου  $L$  το μήκος της διαγωνίου (όμοια με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και για τη προσομοίωση της τοιχοποιίας).



Σχήμα 15: Πλαίσια ενισχυμένα με γέμισμα φατνωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα

### 4.3. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ – ΠΤΕΡΥΓΙΑ

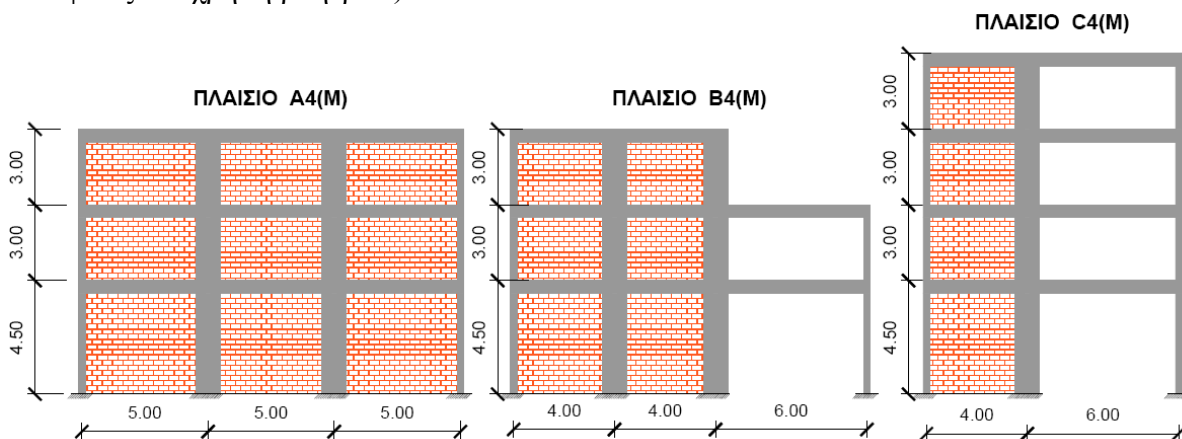
Επιλέχτηκε να γίνει ενίσχυση υποστυλωμάτων με πτερύγια μήκους 0,35 m σε κάθε μια από τις πλευρές του. Το πλάτος αυξήθηκε από 0,25 σε 0,35 m για να μπορέσει να γίνει σύνδεση



Σχήμα 16: Διατομή ενισχυμένου υποστυλώματος με πτερύγια

των δύο πτερυγίων. Η ποιότητα του νέου σκυροδέματος ήταν C16/20. Κάθε πτερύγιο είχε οπλισμό 7Φ18 και συνδετήρες Φ10/130, χάλυβας B500C. (Σχήμα:16). Τα υποστυλώματα που ενισχύθηκαν ήταν: οι δύο μεσαίες σειρές υποστυλωμάτων στα πλαίσια Α και Β και το μεσαίο υποστυλώμα στο πλαίσιο C (Σχήμα: 17). Από το παλιό υποστυλώμα καθαιρέθηκε η επικάλυψη του οπλισμού και έγινε εκτράχυνση της επιφάνειας. Για να προσομοιωθεί σωστά η στατική λειτουργία των

νέων υποστυλωμάτων έγινε υπολογισμός και εισαγωγή διαγράμματος αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης – ροπής (P-M3) και νόμου ροπής – στροφής χορδής (M-θ), όπως και παραπάνω. Θεωρήθηκε πλήρης σύνδεση παλαιού – νέου σκυροδέματος (καλές συνθήκες συνάφειας και χρήση βλήτρων).

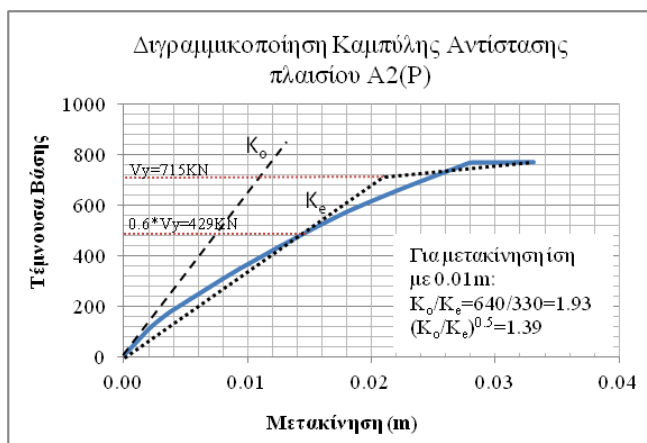


Σχήμα 17: Πλαίσια ενισχυμένα με τοιχώματα σε συνέχεια υποστυλωμάτων-πτερύγια

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Οι καμπύλες αντίστασης, οι οποίες προκύπτουν από την Ανελαστική Στατική Ανάλυση μέχρι αστοχίας του φορέα παρουσιάζονται παρακάτω, (Σχήμα: 19). Πάνω στις καμπύλες αντίστασης Τέμνουσας Βάσης - Μετακίνησης κορυφής φαίνονται οι στάθμες επιτελεστικότητας για κάθε φορέα όπως αυτές προκύπτουν από το λογισμικό SAP2000 v.15 σύμφωνα με τους νόμους υλικών (M-θ κτλ) που ορίστηκαν παραπάνω. Τα σημεία με τη τελεία (●) ορίζουν τις στάθμες επιτελεστικότητας. Η πρώτη τελεία αντιστοιχεί στην στάθμη επιτελεστικότητας: «Άμεση χρήση» (●), η δεύτερη στη «Προστασία ζωής» (●) και τέλος η τρίτη στην «Αποφυγή Οιονεί κατάρρευσης» (●). Τα σημεία με το τρίγωνο: (▲) ορίζουν τη στοχευόμενη μετακίνηση για δεδομένη περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού. Στη παρούσα εργασία γίνεται σχεδιασμός για πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης σε 50 χρόνια 10% (δηλαδή για περίοδο επανάληψης 475 χρόνια). Τέλος τα σημεία (X) και (●) αντιστοιχούν σε διατμητική αστοχία δοκού και εφελκυστική αστοχία υποστυλώματος αντίστοιχα.

Εύρεση της στοχευόμενης μετακίνησης :  $\delta_i = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \Phi_e \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2}$  (3)



Σχήμα 18: Κατασκευή ιδεατής διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης αντίστασης για το πλαίσιο A2(P)

που αντιστοιχεί στο 60% της τέμνουσας διαρροής,  $V_y$  (η δύναμη αυτή δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων). Ορίζεται η τέμνουσα διαρροής  $V_y$  από το σημείο τομής των ευθειών  $aK_e$  και  $K_e$ . Από ιδιομορφική ανάλυση υπολογίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής  $T_i$ , λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική δυσκαμψία  $K_0$ . Για να υπολογίσουμε την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο που αντιστοιχεί σε δυσκαμψία  $K_e$  χρησιμοποιούμε τη σχέση:  $T_e = T_i \sqrt{K_0 / K_e}$  (4). Οι τιμές για τους συντελεστές  $C_0$  έως  $C_3$  ανάλογα με τη στάθμη που σχεδιάζουμε δίνονται στο ΚΑΝ.ΕΠΕ (παρ 5.7.4.2). Ακολουθεί ο πίνακας και οι καμπύλες αντίστασης για κάθε πλαίσιο (για την ονομασία των πλαισίων βλέπε Παρ 3).

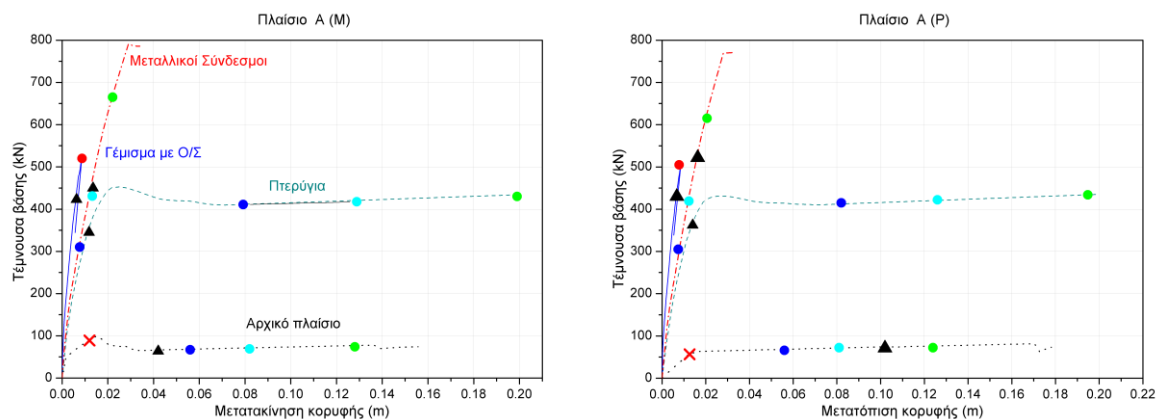
Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης βασίζεται στη μέθοδο των συντελεστών (ΚΑΝ.ΕΠΕ Σ5.8) και η μέθοδος αυτή βασίζεται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα [9]. Κατασκευάζουμε το διγραμμικό διάγραμμα για την καμπύλη ικανότητας: κατασκευάζεται ο μετελαστικός κλάδος οριζόντιας δυσκαμψίας  $aK_e$  (Σχήμα:18) κατά την κρίση του μηχανικού, και θεωρώντας ότι η αντίστοιχη ευθεία διέρχεται από το σημείο που η καμπύλη ικανότητας έχει γίνει περίπου οριζόντια. Στη συνέχεια ορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία  $K_e$  από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο πάνω στη καμπύλη ικανότητας

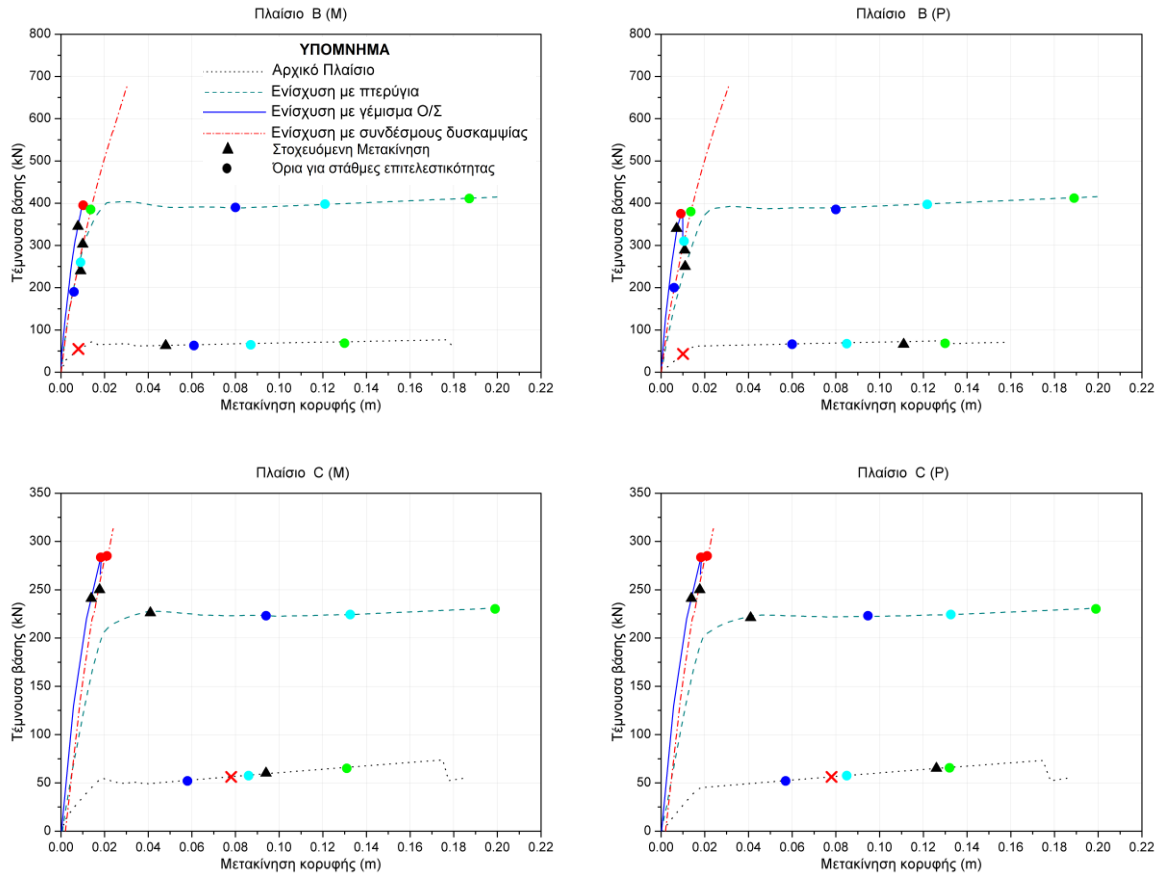
Στη συνέχεια ορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία  $K_e$  από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο πάνω στη καμπύλη ικανότητας

Πλαίσια	Θεμελ. Ιδιοπ. Τί (sec)	$(K_y/K_x)^{0.5}$	Ενεργ. Θεμ. Ιδιοπ.	Συντελεστές				Ελαστ. Φασμ. Επιτ. $\Phi_e$	Στοχ. Μετακ. $\delta t$ (m) (▲)	Μετατόπιση για κάθε στάθμη (m)					
				Te (sec)	C0	C1	C2			C3	Διατμ. Αστοχία Δοκού (X)	Άμεση Χρήση. (●)	Ασφάλ. Ζωής. (◐)	Αποφ. Οιον.Κ ατ. (●)	
A1	A(M)	0.297	1.08	0.320	1.3	1.85	1.1	1.0	5.886	0.042	0.012	0.056	0.082	0.128	
	A(P)	0.743	1.04	0.772	1.3	1.0	1.1	1.0	4.753	0.102	0.012	0.056	0.081	0.0124	
A2	A(M)	0.184	1.37	0.252	1.3	1.0	1.1	1.0	5.8860	0.0135	-- (1)	0.0077	0.0132	0.0221	
	A(P)	0.199	1.39	0.276	1.3	1.0	1.1	1.0	5.8860	0.0163		0.0074	0.0123	0.0206	
A3	A(M)	0.141	1.22	0.172	1.3	1.0	1.1	1.0	5.8860	0.0063		0.0087 <sup>(2)</sup>			
	A(P)	0.143	1.22	0.174	1.3	1.0	1.1	1.0	5.8860	0.0067		0.0078 <sup>(2)</sup>			
A4	A(M)	0.210	1.12	0.235	1.3	1.0	1.1	1.0	5.8860	0.0118		0.080	0.128	0.199	
	A(P)	0.227	1.13	0.256	1.3	1.0	1.1	1.0	5.886	0.014		0.082	0.126	0.196	
B1	B(M)	0.334	1.12	0.374	1.3	1.6	1.1	1.0	5.886	0.048		0.008	0.061	0.086	0.13
	B(P)	0.745	1.08	0.804	1.3	1.0	1.1	1.0	5.886	0.111		0.010	0.060	0.085	0.013
B2	B(M)	0.187	1.20	0.224	1.3	1.0	1.1	1.0	5.886	0.0106		-- (1)	0.006	0.009	0.0136
	B(P)	0.193	1.19	0.230	1.3	1.0	1.1	1.0	5.886	0.0113			0.006	0.010	0.0136
B3	B(M)	0.154	1.19	0.183	1.3	1.1	1.1	1.0	5.886	0.0078	0.0102 <sup>(2)</sup>				
	B(P)	0.158	1.18	0.186	1.3	1.1	1.1	1.0	5.886	0.0081	0.0088 <sup>(2)</sup>				
B4	B(M)	0.181	1.11	0.201	1.3	1.0	1.1	1.0	5.886	0.0086	0.080		0.121	0.187	
	B(P)	0.218	1.08	0.235	1.3	1.0	1.1	1.0	5.886	0.011	0.080		0.121	0.189	
C1	C(M)	0.533	1.18	0.632	1.3	1.1	1.1	1.0	5.886	0.094	0.078		0.058	0.086	0.131
	C(P)	0.861	1.07	0.921	1.3	1.0	1.1	1.0	4.102	0.126	0.075		0.057	0.085	0.132
C2	C(M)	0.241	1.08	0.260	1.3	1.23	1.1	1.0	5.886	0.0177	-- (1)		0.021 <sup>(2)</sup>		
	C(P)														
C3	C(M)	0.237	1.08	0.255	1.3	1.0	1.1	1.0	5.8860	0.0139		0.0184 <sup>(2)</sup>			
	C(P)														
C4	C(M)	0.334	1.12	0.374	1.3	1.39	1.1	1.0	5.886	0.041		0.0947	0.0132	0.199	
	C(P)	0.345	1.12	0.386	1.3	1.32	1.1	1.0	5.886	0.042		0.0948	0.0128	0.199	

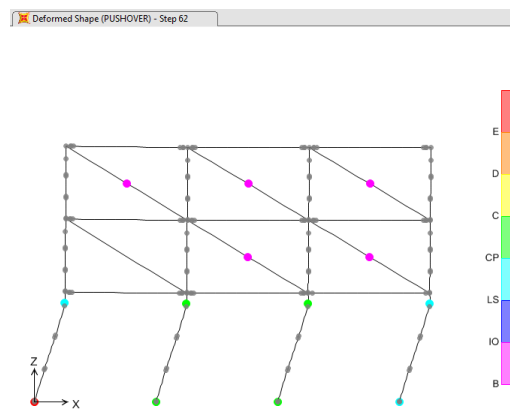
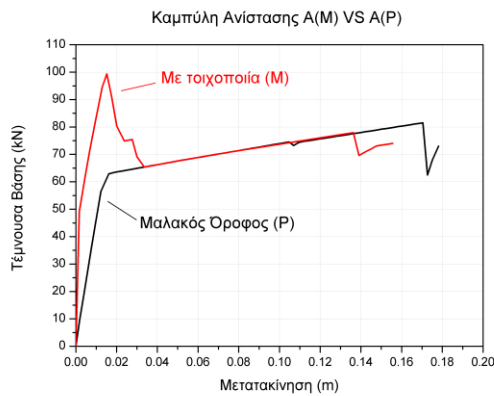
Πίνακας 1: Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης και όρια για της στάθμες επιτελεστικότητας

- (1) Δεν εμφανίζεται διατμητική αστοχία λόγω ενίσχυσης με μανδύες από FRP
- (2) Ψαθυρή αστοχία υποστυλώματος από εφελκυσμό

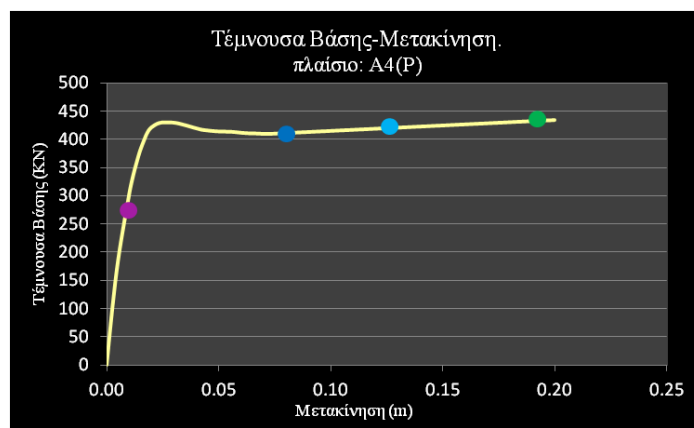
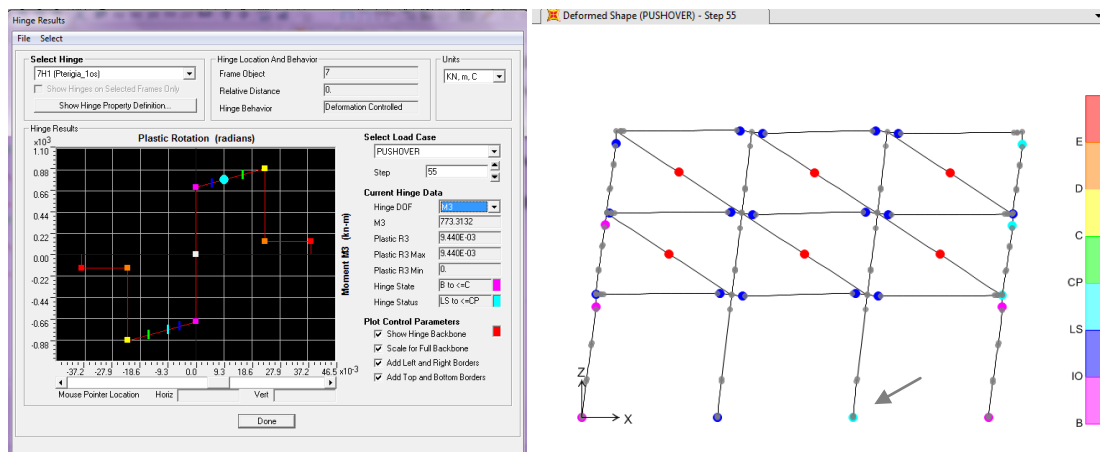




Σχήμα 19: Καμπύλες αντίστασης Τέμνουσας βάσης – Μετακίνησης κορυφής των πλαισίων (A, B, C) από ανελαστική στατική ανάλυση



Σχήμα 20: Διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης κορυφής πλαισίων A1(M), A1(P) και κατανομή πλαστικών αρθρώσεων στο πλαίσιο A1(P) στην αστοχία (με τοποθέτηση FRP στις δοκούς).



Σχήμα 21: Απεικόνιση απόκρισης πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με το δοθέν νόμο  $M-\theta$  κατά την ανάλυση Pushover στο πλαίσιο A4(P), (βάση μεσαίου-δεξιού υποστυλώματος ισογείου) και διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνηση κορυφής (kN-m) του πλαισίου.

## 6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Τα αρχικά πλαίσια αστοχούν για μικρή τιμή τέμνουσας βάσης, εξαιτίας διατμητικής ανεπάρκειας, η οποία εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στις δοκούς. Ενισχύουμε έναντι αυτής της (ψαθυρής) μορφής αστοχία τοποθετώντας μανδύες από σύνθετα υλικά. Χωρίς να κάνουμε καμία άλλη επέμβαση, οι φορείς εμφανίζουν γενικά επάρκεια για τη στάθμη επιτελεσματικότητας «Προστασία Ζωής». Ένας οικονομικός τρόπος ενίσχυσης θα ήταν αυτός, στόχος όμως της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των διαφόρων μεθόδων ενίσχυσης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για λόγους πληρότητας, σημειώνεται ότι οι μανδύες από σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι (3-πλεύρα) υφάσματα μορφής U από ίνες άνθρακα, πλάτους 60cm, πάχους 0.12mm και μέτρου ελαστικότητας  $E=225\text{GPa}$ . Η εφελκυστική τους αντοχή είναι:  $f_{fd}=3500\text{MPa}$  και η ενεργή αντοχή σχεδιασμού:  $f_{fde}=0.8 \times 3500=2800\text{MPa}$ . Περισσότερες κατασκευαστικές λεπτομέρειες καθώς και οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού, υπάρχουν στη βιβλιογραφία [6].
- Η ενίσχυση με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, προσδίδει στα πλαίσια πολύ μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία. Πλαστικές αρθρώσεις δεν δημιουργούνται πλέον μόνο στη στάθμη του ισογείου, αλλά σε όλους τους κόμβους του φορέα. Τελικά η αστοχία προέρχεται από λυγισμό του θλιβόμενου μεταλλικού συνδέσμου στα πλαίσια A2(M,P) και B2(M,P), ενώ στις περιπτώσεις των πλαισίων C2(M,P) η αστοχία προέρχεται από εφελκυσμό του υποστυλώματος που συνδέεται στη κεφαλή του με τη θλιβόμενη διαγώνιο (ψαθυρή μορφή αστοχίας).

- Η ενίσχυση με γέμισμα φατνωμάτων με Ο/Σ επίσης προσδίδει στο πλαίσιο μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία, αλλά μετατρέπει την αστοχία του σε απότομη και ψαθυρή (πολύ μικρή πλαστιμότητα). Οι πλαστικές αρθρώσεις μεταφέρονται από το ισόγειο στους πιο πάνω ορόφους στα αρχικά στάδια της ανάλυσης Pushover. Τελικά σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία προήλθε από εφελκυσμό των υποστυλωμάτων ισογείου που συνδέονται με το τοίχιο σκυροδέματος (περίπτωση όμοια με την αστοχία του πλαισίου C2(M,P)). Μικρότερα και λιγότερο ισχυρά γεμίσματα καθώς και η απουσία επαφής γεμίματος-υποστυλώματος θα οδηγούσαν σε πιο πλάστιμη συμπεριφορά.
- Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής των υποστυλωμάτων, ελήφθησαν υπόψη οι διαμήκης οπλισμοί (4Φ14) αγνοώντας την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Στη περίπτωση του γεμίματος από Ο/Σ, λόγω το ότι υποστύλωμα και τοίχιο είναι σε επαφή, λήφθηκε υπόψη η επιρροή της συνοχής. Για τη διεπιφάνεια (παλαιού-νέου σκυροδέματος), δεν προηγήθηκαν ειδικά μέτρα σύνδεσης (πχ. εκτράχυνση ή βλήτρα) με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν λεία. Σε αυτή τη περίπτωση η διατμητική αντίσταση ( $\tau_{\text{cud}}$ ), ισούται με το 25% της εφελκυστικής αντοχής του ασθενέστερου σκυροδέματος ( $f_{\text{ctd}}$ ) [2],  $\tau_{\text{cud}}=0.25f_{\text{ctd}}=0.25(0.7f_{\text{ctm}}/1.50)$ .
- Η ενίσχυση με πλευρικά τοιχία σε συνέχεια υποστυλωμάτων– πτερύγια, προσδίδει στα πλαίσια ικανοποιητική αντοχή και δυσκαμψία, και μεγάλη πλαστιμότητα. Οι πλαστικές αρθρώσεις αρχίζουν από τις δοκούς που συνδέονται με τα πτερύγια (αυτό οφείλεται στην πολύ μεγάλη δυσκαμψία του νέου υποστυλώματος σε σχέση με τις υπάρχουσες δοκούς) και τελικά κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλους τους κόμβους του πλαισίου. Το μήκος του κάθε πτερυγίου επιλέχθηκε να είναι σχετικά μικρό ώστε αφενός να προσφέρει ικανοποιητική ενίσχυση στο πλαίσιο, αφετέρου δε να μην μεταβληθεί σημαντικά ο νόμος (M-θ) της δοκού λόγω μείωση του μήκους της καθώς και απουσία του άνω κεκαμμένου οπλισμού στη στήριξη.
- Συγκρίνοντας τα αρχικά πλαίσια βρίσκουμε ότι η ύπαρξη τοιχοποιίας στο ισόγειο (M) αυξάνει την αντοχή του πλαισίου 10 – 55% σε σχέση με την περίπτωση της Pilotis (P). Το 55% προκύπτει από τα πλαίσια A, όπου και τα τρία φατνώματα ισογείου έχουν τοιχοπληρώσεις (Σχήμα: 20, παρατηρείται τοπικό μέγιστο), ενώ το 10% από τα πλαίσια C, όπου μόνο το ένα από τα δύο φατνώματα είναι καλυμμένο. Τα πλαίσια B αποτελούν μία ενδιάμεση περίπτωση. Μετά από την αστοχία της τοιχοποιίας, οι καμπύλες αντίστασης ταυτίζονται.
- Στα ενισχυμένα πλαίσια, οι διαφορές μεταξύ πλαισίων (M) και (P) είναι ελάχιστες. Αυτό οφείλεται στο ότι η συνεισφορά των τοίχων του ισογείου στην απόκριση σε σχέση με την εκάστοτε ενίσχυση είναι πρακτικά μηδενική, καθώς και στο ότι αστοχούν πρόωρα συγκριτικά με την υπόλοιπη κατασκευή.
- Μετά τις ενισχύσεις, οι πλαστικές αρθρώσεις δεν εμφανίζονται μόνο στο ισόγειο των πλαισίων, αλλά κατανέμονται σε όλους τους κόμβους. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ενισχυμένες με αυτές τις μεθόδους κατασκευές έχουν πιο ομοιόμορφη καθ' ύψος συμπεριφορά. Αντίθετα, η κατά μήκος κατανομή πλαστικών αρθρώσεων επηρεάζεται αρνητικά αφού παρατηρείται πύκνωση των πλαστικών αρθρώσεων κοντά στα φατνώματα που ενισχύονται (καταπόνηση των κόμβων λόγω των συγκεντρωμένων δυνάμεων, τις οποίες δεν είναι σχεδιασμένα τα μέλη να αντέχουν).

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει συνοπτικά τη μεταβολή (σε όρους  $\Delta_{\text{ενισχυμ}}/\Delta_{\text{αρχικό}}$ ) της αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητας των ενισχυμένων πλαισίων, για τις διάφορες μεθόδους ενίσχυσης, σε σχέση με το αρχικό πλαίσιο.

	Πλαίσιο	Μεταλλικοί Σύνδεσμοι	Γέμισμα Ο/Σ	Πτερύγια
Αντοχή	A	9.7	6.7	6.6
	B	6.7	5.7	7.2
	C	4.4	2.2	4.1
	M.O.	6.9	4.9	6.0
Δυσκαμψία	A	6.3	10.9	1.8
	B	2.9	11.6	2.5
	C	2.1	4.9	2.5
	M.O.	3.8	9.1	2.3
Πλαστιμότητα <sup>(3)</sup>	A	1.12	0.30	1.7
	B	0.85	0.27	1.2
	C	0.36	0.25	1.4
	M.O.	0.77	0.27	1.4

Πίνακας 2: Σύγκριση ενισχυμένων πλαισίων με αρχικά

<sup>(3)</sup> Η πλαστιμότητα ως:  $\mu_{\text{ενισχ}}/\mu_{\text{αρχ}}$ , όπου  $\mu = \delta_u/\delta_y$ .

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η προσθήκη πλευρικών πτερυγίων ενδείκνυται για μεγάλη αύξηση της πλαστιμότητας του φορέα και ικανοποιητική αύξηση της αντοχής και δυσκαμψίας (εάν το συνολικό μήκος του ενισχυμένου υποστυλώματος δεν είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το αρχικό, όπως στη παρούσα εργασία). Εάν απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας, τότε το μήκος του ενισχυμένου υποστυλώματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο με επίπτωση όμως στην πλαστιμότητα, λόγω μείωσης του μήκους των δοκών, οι οποίες επιβαρύνονται με δυσμενείς συνέπειες για το φορέα (μεγάλη τέμνουσα).
- Αν και το γέμισμα φατνωμάτων με σκυρόδεμα είναι αποτελεσματική μέθοδος για μεγάλη αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής του φορέα, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιρροή του γεμίματος στα μέλη της υφιστάμενης κατασκευής για τυχόν ψαθυρές αστοχίες (αστοχία από εφελκυσμό του υποστυλώματος που συνδέεται με τη κορυφή του θλιπτήρα). Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, συνιστάται η δημιουργία κενού μεταξύ υφιστάμενου υποστυλώματος-γεμίματος, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πλαστιμότητας του φορέα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι, ότι πολλές φορές δεν είναι εύκολη η εφαρμογή της και στις δύο διευθύνσεις του κτιρίου αρχιτεκτονικοί λόγοι, χρήσης (πχ. ανοίγματα) κ.α.
- Η χρήση μεταλλικών συνδέσμων δυσκαμψίας αυξάνει αποτελεσματικά την αντοχή, τη δυσκαμψία του φορέα και την ικανότητα παραλαβής πλευρικών φορτίων. Πρέπει να επιδειχθεί ιδιαίτερη μέριμνα στον υφιστάμενο φορέα (κυρίως στη περίπτωση των ενισχυμένων φατνωμάτων), καθώς καταπονείται από επιπλέον εντάσεις που αρχικώς δεν είχε σχεδιαστεί να παραλάβει. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο τρόπος αστοχίας, θα πρέπει τα υφιστάμενα στοιχεία να διαθέτουν επαρκή υπεραντοχή. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης είναι να ενισχυθούν δύο φατνώματα ανά πλαίσιο για καλύτερη ανακατανομή των εντάσεων. Οι συνδέσεις των μεταλλικών με τα υφιστάμενα στοιχεία, θα πρέπει να είναι ισχυρές για την αποφυγή ψαθυρής αστοχίας. Για



μεγαλύτερη αύξηση της πλαστιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύνδεσμοι μορφής ( V ή Λ). Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μικρή όχληση που προκαλεί στη λειτουργία της υπό ενίσχυση κατασκευής. Το μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου εμφανίζεται και σε αυτόν το τύπο ενίσχυσης.

Γενικά, συνιστάται ιδιαίτερη προσοχή στην αποτίμηση της αντοχής, την ανάλυση και την ενίσχυση (όπου χρειάζεται) των υφιστάμενων μελών, αφού συνήθως αυτά είναι τα καθοριστικά για την αστοχία της κατασκευής. Για τον ίδιο λόγο, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη μέριμνα στην επιλογή του είδους και του μεγέθους της ενίσχυσης των πλαισίων. Παράλειψη αυτών των δύο είναι βέβαιο πως θα οδηγήσει σε αντιοικονομικές και μη λειτουργικές λύσεις. Τέλος θα πρέπει να γίνεται και έλεγχος στη θεμελίωση, εάν είναι ικανή να παραλάβει τα νέα φορτία της ανοδομής (κυρίως σεισμικά).

## 8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

	C1
<b>Στάθμη</b>	<b>1η</b>
Διεύθυνση	
h(m)	0,25
b(m)	0,25
d1 (m)	0,040
d (m)	0,21
c (m)	0,025
Φw	0,008
δ1	0,19047
α	7,272
N(G+0.3Q)	94,24
v=N/b*d*fc	0,0942
N/b*d*fy	0,004487
N/(1.8*α*b*d*fc)	0,008570
As	0,0003079
As'	0,0003079
Asv	0,0000000
Asw/s (ένα σκέλος)	0,0002010
ρ1	0,0058642
ρ2	0,0058642
ρv	0,0000000
A	0,0162160
B	0,0114688
ξy	0,3071860

A'	0,0031583
B'	0,0069812
ξ'y	0,2965178
φy	0,0137466
φ'y	0,0237037
ξy=ξ από min(φy;φ'y)	0,3071860
<b>My (kNm)</b>	<b>32,58</b>
Ls=M/V (m)	2,25
My / Ls (kN)	14,48
Ac (m2)	0,0525
z=d-d' (m)	0,170
x=d*ξy (m)	0,0645
μΔpl	5,0
ρtot	0,011728
ρw	0,001607
Vw=ρw*bw*z*fyw (MN)	0,01503
VR1 (kN)	22,54
av (=0 αν VR1>My/Ls)	0,0
θy	0,0138678
db ή ΦL	0,0140000
θumpl	0,0498364
ω=(As/b*d)/(fy/fc)	0,1466048

ω'=(A's/b*d)/(fy/fc)	0,1466048
αs=M/V*h	9,0
bo	0,192
ho	0,192
Ao=bo*ho (m2)	0,03686
s	0,25
as	0,1217
an	0,333
a=an*as	0,04059
ρs	0,0016077
θum	0,0637042
θπ.ζωης	
1,5*θum	0,0955563
θ αστοχιας	0,0816885
θ life safety	0,0215478
θcollapse	0,0353912

Σχήμα 22: Υπολογισμός νόμου ροπής – στροφής χορδής (M-θ) για υποστύλωμα με χρήση του προγράμματος Microsoft Excel

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κανονισμός επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ τελικό σχέδιο κειμένου -3
- [2] Δρίτσος Η.Στέφανος. 'Επισκευές-Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος' Πάτρα 2011
- [3] Χρονόπουλος Μ.Π. ΕΟΣ/ΕΜΠ "Φοιτητικό συνέδριο επισκευών ενισχύσεων", Πάτρα Φεβρουάριος 2009,2010,2011
- [4] Φαρδής Ν.Μιχαήλ 'Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος, μέρος Ι,ΙΙ', Πάτρα 2010.
- [5] Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000.

- [6] Τριανταφύλλου Χ.Αθανάσιος, Ενισχύσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή), Πάτρα 2003.
- [7] Νικολοπούλου Βασιλική, Τσουμανίκα Γεωργία ‘Ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας.’ 17<sup>ο</sup> Φοιτητικό συνέδριο, Πάτρα Φεβρουάριος 2011.
- [8] Ανδρουλιδάκη Κωνσταντίνα ‘Αναβάθμιση πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος με προσθήκη τοιχωμάτων’ Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, Σεπτέμβριος, 2009
- [9] Ψυχάρης Ν. Γιάννης ‘Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας’, Σημειώσεις μαθήματος Αντισεισμική Τεχνολογία 2, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
- [10] Ευρωκώδικας 3
- [11] SAP2000 MANUAL.