

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΤΟΥ '54/'59 ΜΕΣΩ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ (PUSHOVER)

ΑΝΔΡΕΑΣ ΡΑΓΚΟΥΣΗΣ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα της αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος σχεδιασμένα πριν το 1984. Για το σκοπό αυτό διερευνάται η συμπεριφορά σε σεισμικά φορτία ενός πενταώροφου κτιρίου σχεδιασμένο βάσει των κανονισμών του '54/'59. Το κτίριο επιλύεται με τους τωρινούς ισχύοντες κανονισμούς (του EC8 και του ΚΑΝ.ΕΠΕ.) και συγκεκριμένα με τη στατική ανελαστική ανάλυση. Αρχικά, διερευνάται η σεισμική του απόκριση έναντι εμφάνισης μαλακού ορόφου για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Εν συνεχεία, το πενταώροφο υποβάλλεται σε διαδοχικές αναλύσεις pushover για διάφορους στόχους αποτίμησης με σκοπό τη σύγκριση των εξαγόμενων καμπυλών αντίστασης αλλά και των στοχευόμενων μετακινήσεων. Τέλος, αναφέρεται η ενίσχυση δύσκαμπτων στοιχείων ως πιθανός τρόπος ενίσχυσης δίχως περαιτέρω εξέταση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα μεγάλο ποσοστό των δομημάτων της χώρας μας αποτελούν τα υφιστάμενα κτίρια, τα οποία κατασκευάστηκαν μεταξύ της δεκαετίας του 1960 και μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1980. Τα κτίρια αυτά έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί βάσει παλαιότερων Κανονισμών γι' αυτό και παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όσον αφορά όχι μόνο την κατασκευή τους, αλλά και τη συμπεριφορά τους έναντι σεισμικών δράσεων. Ως εκ τούτου η ανάγκη για έλεγχο σε φέρουσα ικανότητα και κατ' επέκταση η ενίσχυση τους είναι μεγάλη.

Η πρώτη εμφάνιση του αντισεισμικού σχεδιασμού στην Ελλάδα το 1959 δεν ήταν αρκετή να προσδώσει στα κτίρια ικανοποιητική αντοχή έναντι σεισμού. Οι χαμηλοί σεισμικοί συντελεστές, έννοιες άγνωστες στους Κανονισμούς εκείνους όπως ανελαστική συμπεριφορά, πλαστιμότητα, ικανοτικός σχεδιασμός, είχαν ως επακόλουθο την ανέγερση κτιρίων με ελλιπέστατο αντισεισμικό σχεδιασμό. Επιπρόσθετα το πρόβλημα γίνεται εντονότερο στις πολυκατοικίες με ανοιχτά ισόγεια τύπου «pilotis», πρόβλημα που χαρακτηρίζει την πλειονότητα των κατασκευών της εποχής. Γίνεται αντιληπτό ότι οι συγκεκριμένες κατασκευές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς διερεύνηση ειδικότερα αν αναλογιστούμε ότι αποτελούν ένα τεράστιο δομικό πλούτο της χώρας μας.

Στην παρούσα εργασία κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση της ύπαρξης τοιχοπληρώσεων ως ένα βασικό μειονέκτημα των κατασκευών αυτών. Κύριος στόχος όμως αυτής είναι να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερα σενάρια αποτίμησης της φέρουσας ικανότητας με χρήση της μη γραμμικής ανάλυσης pushover. Ποίο συγκεκριμένα η παρακολούθηση της διαφοροποίησης της στοχευόμενης μετακίνησης με την αντίστοιχη καμπύλη αντίστασης που προκύπτει για διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας.

Το πρόγραμμα μελέτης που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις είναι το στατικό πρόγραμμα strad της 3dr.

2. ΚΤΙΡΙΟ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το εξεταζόμενο κτίριο σχεδιάστηκε με βάση τον κανονισμό του σκυροδέματος του 54 (Β.Δ. 1954) και τον αντισεισμικό κανονισμό του 59 (Β.Δ. 1959). Το κτίριο επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό εκείνων της δεκαετίας του '60 και '70, πριν την εισαγωγή των διατάξεων περί αντισεισμικότητας στον σχεδιασμό των κατασκευών. Με βάση αυτά

Οι τοιχοπληρώσεις λήφθηκαν με θλιπτική αντοχή λιθοσώματος ίση με $f_b=5\text{MPa}$ και με τσιμεντοκονίαμα τύπου M5 προκύπτοντας θλιπτική αντοχή διαγωνίου ίση με $f_k=1,9\text{MPa}$. Επιπλέον επιλέχθηκε επικάλυψη των μελών του κτιρίου ίση με 20mm και εγκάρσιος οπλισμός δοκών και υποστλωμάτων ίσος με $\Phi 6/20$.

Τα κατακόρυφα φορτία που λήφθηκαν υπόψιν κατά το σχεδιασμό:

- Μόνιμα φορτία
 - βάρος σκυροδέματος: 25.00 kN/m³
 - επικάλυψη δαπέδων: 1.50 kN/m²
 - Δρομική Τοιχοποιία: 5.00 kN/m
 - Διπλή Δρομική Τοιχοποιία: 9.00 kN/m
- Μεταβλητά φορτία
 - Κινητό φορτίο πλακών: 2.00 kN/m²
 - Κινητό φορτίο δώματος: 2.00 kN/m²
 - Κινητό φορτίο δαπέδου ισογείου: 2.00 kN/m²

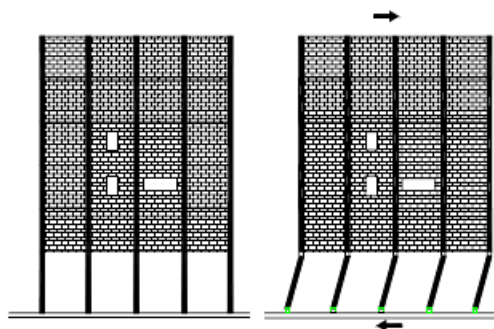
| Υποστλώματα | Ισόγειο - 1 ^{ος} όροφος | 2 ^{ος} όροφος | 3 ^{ος} - 4 ^{ος} όροφος |
|--|----------------------------------|------------------------|--|
| K1,K4,K17,K20 | 4Φ20 | 4Φ20 | 4Φ20 |
| K6,K7,K10,K11,K14,K15 | 4Φ18+4Φ16 | 4Φ18 | 4Φ16 |
| K2,K3,K5,K8,K9,K12, K13,K16,K18,K19 | 4Φ18 | 4Φ16 | 4Φ16 |
| Διαστάσεις | 40x40 | 35x35 | 30x30 |

Πίνακας 1: Διαστάσεις και οπλισμός υποστλωμάτων.

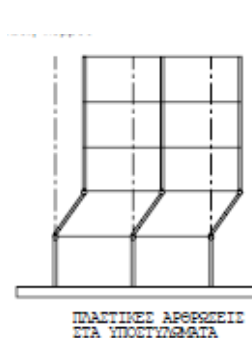
3. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ

Οι τοιχοπληρώσεις αποτελούν στοιχεία με μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία μέσα στο επίπεδό τους και ανάλογα τη διάταξη τους έχουν ευμενή ή δυσμενή επιρροή στη συμπεριφορά της κατασκευής.

Τοιχοπληρώσεις οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος της περιμέτρου γενικά έχουν ευμενή ρόλο στη σεισμική απόκριση του κτιρίου. Η επιρροή αυτή μεταφράζεται σε αύξηση της αντοχής σε οριζόντια φορτία αλλά και σε μείωση της πλευρικής δυσκαμψίας. Στη πραγματικότητα όμως ελάχιστοι πλαισιακοί φορείς χαρακτηρίζονται από συμμετρία και ομοιομορφία τοιχοπληρώσεων. Συνήθως, η διάταξη των τοιχοπληρώσεων, για διάφορους λόγους χαρακτηρίζονται από σημαντική μη συμμετρία που επιφέρει δυσμενή επιρροή στην απόκριση του φορέα.



Σχήμα 2: Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων [4].



Σχήμα 3: Απουσία τοιχοπλήρωσης 1^{ου} [4].

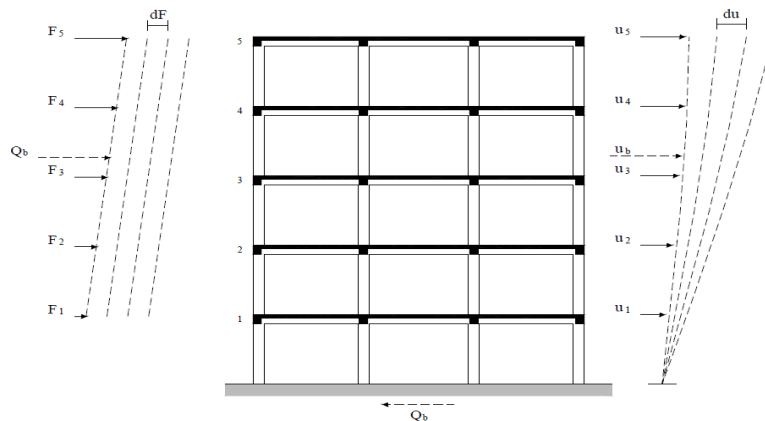
Εξαιρετικά δυσμενής διάταξη είναι εκείνη κατά την οποία εμφανίζεται ανομοιομορφία καθ' ύψος. Τέτοια διάταξη, ενδιάμεσου μη τοιχοπληρωμένου ορόφου σε περίπτωση ισχυρού σεισμού οδηγεί στην ανάπτυξη μηχανισμού μαλακού ορόφου. Ουσιαστικά, οι παραμορφώσεις όλου του κτιρίου εμφανίζονται στο μη τοιχοπληρωμένο όροφο, όπου είναι

και ο πιο εύκαμπτος. Τα υποστυλώματα του ορόφου αυτού εμφανίζουν πλαστικές αρθρώσεις στη κορυφή και στη βάση και μεγάλες μετακινήσεις (σχήμα 2). Επακόλουθο αυτών είναι η εμφάνιση φαινομένων 2ας τάξης τη στιγμή πλέον που τα υποστυλώματα είναι ανάκατα να μεταφέρουν κατακόρυφα φορτία οδηγώντας πολλές φορές το κτίριο σε πρόωρη κατάρρευση [7].

Το παραπάνω πρόβλημα εμφανίζεται όπως αναφέρεται στην εισαγωγή στα περισσότερα κτίρια τα οποία κατασκευάστηκαν προ 1984, άφηναν ανοιχτό το ισόγειο (τύπου pilotis) με αποτέλεσμα την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων και μάλιστα πολλά απ' αυτά εντοπίστηκαν να καταρρέουν σε πρόσφατους σεισμούς. Άρα θεωρείται σκόπιμο μία από τις περιπτώσεις που θα εξεταστούν στη παρούσα εργασία να αναφέρεται σε απουσία τοιχοπλήρωσης στο πρώτο όροφο του εξεταζόμενου κτιρίου (σχήμα 3).

4. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΑΝΑΛΥΣΗ PUSHOVER).

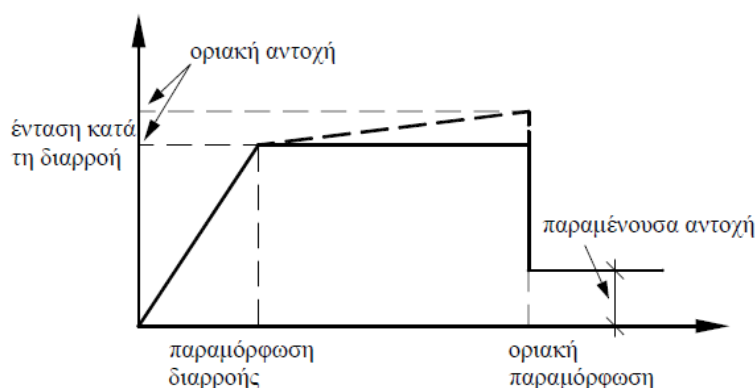
Η στατική ανελαστική ανάλυση, γνωστή και ως ανάλυση pushover, γνωρίζει τα τελευταία χρόνια ευρεία εφαρμογή στην αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κτιρίων, γεγονός που αποδίδεται στο συνδυασμό της ακριβέστερης προσέγγισης της συμπεριφοράς των μελών μέσω των προσομοιωμάτων που έχουν αναπτυχθεί για τις ανελαστικές αναλύσεις, με την απλότητα της έκφρασης της σεισμικής έντασης με μία οριζόντια φόρτιση με κατανομή ανάλογη με τις αδρανειακές δυνάμεις, η οποία αυξάνεται σταδιακά και μέχρι την κρίσιμη μετακίνηση του δομήματος (σχήμα 4). Ίσως ο μοναδικός περιορισμός που τίθεται για την εφαρμογή της μεθόδου αφορά την επιρροή των ανώτερων ιδιόμορφων στη συμπεριφορά της κατασκευής [2].



Σχήμα 4: Σχηματική διάταξη ανάλυση πλευρικής οριακής ώθησης [7].

Κύριος στόχος λοιπόν της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο υπόκειται στη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός και η σύγκρισή τους με τις επιτρεπόμενες τιμές που προσδιορίζονται με βάση τη στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας.

Στη υπερωθητική ανάλυση το προσομοίωμα του κτιρίου συνεκτιμά με άμεσο τρόπο τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά του νόμου έντασης - παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων. Σε κάθε περιοχή που αναμένεται να εμφανισθεί ανελαστική συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη η σχέση έντασης - παραμόρφωσης μέσω πλήρων καμπυλών μονότονης φόρτισης μέχρι την αστοχία, οι οποίες περιλαμβάνουν τη φάση εξασθένησης της αντίστασης του στοιχείου, καθώς και την παραμένουσα αντίστασή του. Οι καμπύλες αυτές έχουν τη μορφή του σχήματος που ακολουθεί, με το ΚΑΝ.ΕΠΕ. να θεωρεί ότι το στοιχείο μετά τη διαρροή δεν έχει κράτυνση (συνεχή γραμμή) [1].



Σχήμα 5: Θεωρητικές καμπύλες εντατικού μεγέθους – παραμόρφωσης [2].

Τα μεγέθη έντασης μπορούν να είναι δυνάμεις ή ροπές και οι σχετικές μετακινήσεις παραμορφώσεις, καμπυλότητες, ή στροφές. Εάν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, τότε κατάλληλα μεγέθη F και δ είναι η ροπή κάμψης, M και η καμπυλότητα, C (ή $1/r$), αντίστοιχα. Εάν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, τότε κατάλληλα μεγέθη F και δ είναι η διατμητική δύναμη, V και η διατμητική παραμόρφωση, γ , αντίστοιχα [3].

Συνοψίζοντας, το προσομοίωμα του κτιρίου υποβάλλεται σε οριζόντια φορτία κατανεμημένα κατά τρόπο ανάλογο προς τις αδρανειακές δυνάμεις του σεισμού, τα οποία αυξάνονται μονότονα μέχρι το βήμα όπου κάποιο δομικό στοιχείο εξαντλεί τη φέρουσα ικανότητά του. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει η καμπύλη αντίστασης του κτιρίου. Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη βάση για όλους τους απαιτούμενους ελέγχους ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας η οποία παρουσιάζεται αναλυτικότερα παρακάτω.

5. ΣΤΟΧΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας μιας κατασκευής αποτελούν συνδυασμούς μιας στάθμης επιτελεστικότητας (δηλαδή του αποδεκτού επιπέδου βλαβών) και ενός επιπέδου της σεισμικής δράσης, που συνήθως καθορίζεται από την ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης στη διάρκεια ζωής της κατασκευής ή την ισοδύναμη περίοδο επανάλληψης. Δηλαδή, κάθε στόχος σεισμικής ικανότητας καθορίζει μία ανεκτή οριακή κατάσταση βλαβών για συγκεκριμένη ισχύ της σεισμικής δόνησης. Αφού καθοριστεί ο επιθυμητός στόχος σεισμικής ικανότητας (από τον ιδιοκτήτη ή τη δημόσια αρχή), μπορεί στη συνέχεια να γίνει η αποτίμηση μιας υφιστάμενης κατασκευής ή ο ανασχεδιασμός της (ενίσχυσή της) ή ο σχεδιασμός μιας νέας κατασκευής. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ προβλέπονται στόχοι επανελέγχου αναφερόμενοι αποκλειστικά και μόνον στον φέροντα οργανισμό. Αντίθετα, δεν προβλέπονται στόχοι για το μη-φέροντα οργανισμό [3].

Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι στόχοι ανασχεδιασμού σύμφωνα με τις στάθμες επιτελεστικότητας και τις περιόδους επανάλληψης του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο συνήθης σχεδιασμός με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (π.χ. ΕΑΚ 2000) αντιστοιχεί σε στόχο σχεδιασμού B1, ενώ σε περιπτώσεις δύο (2) στόχων επανελέγχου, τα δυνατά ζεύγη είναι B1 και A2 ή Γ1 και B2 [1].

| Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών | Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού | | |
|--|---|-------------------|----------------------------------|
| | Άμεση χρήση μετά τον σεισμό | Προστασία ζωής | Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης |
| 1. 10% | A1 | B1 | Γ1 |
| 2. 50% | A2 | B2 | Γ2 |

Πίνακας 2: Στόχοι σεισμικής ικανότητας κατά Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3[1].

Ο καθορισμός του στόχου για τον οποίο θα γίνει ο ανασχεδιασμός εξαρτάται από τον επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη και τη σπουδαιότητα της κατασκευής (π.χ. προσωρινή κατασκευή, συνήθεις κατοικίες, χώροι συγκέντρωσης κοινού, χώροι διαχειρισμού εκτάκτων αναγκών, εγκαταστάσεις υψηλού κινδύνου). Οι ελάχιστοι ανεκτοί στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού του φέροντος οργανισμού υφισταμένων κτιρίων ορίζονται κατά περίπτωση από τη Δημόσια Αρχή προκειμένου λοιπόν να αποφευχθούν στόχοι που δεν είναι αποδεκτοί παρακάτω παρουσιάζεται η πρόταση για σωστή απόφαση της Δημόσιας Αρχής από την επιτροπή υποστήριξης ΚΑΝ.ΕΠΕ (πίνακας 3).

| Κατηγορία Σπουδαιότητας | Στόχοι |
|-------------------------|-------------------|
| I | A1,A2,B1,B2,Γ1,Γ2 |
| II | A1,A2,B1,B2,Γ1 |
| III | A1,A2,B1 |
| IV | A1,A2,B1 |

Πίνακας 3: Αποδεκτοί στόχοι βάση σπουδαιότητας [10].

5.2 ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ

Όλοι οι κανονισμοί ορίζουν, με μικροδιαφορές, τρεις βασικές στάθμες επιτελεστικότητας για το φέροντα οργανισμό ανάλογα με το επίπεδο βλαβών. Σε ορισμένους κανονισμούς υπάρχουν και ενδιάμεσες στάθμες επιτελεστικότητας. Οι στάθμες επιτελεστικότητας σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και ορισμένες με βάση την οριακή γωνία στροφής είναι:

«Άμεση χρήση μετά τον σεισμό» (Α):

είναι μια κατάσταση κατά την οποία αναμένεται ότι καμιά λειτουργία του κτιρίου δεν διακόπτεται κατά τη διάρκεια και μετά τον σεισμό σχεδιασμού, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Είναι ενδεχόμενο να παρουσιασθούν μερικές τριχοειδείς ρωγμές στον φέροντα οργανισμό.

«Προστασία ζωής» (Β):

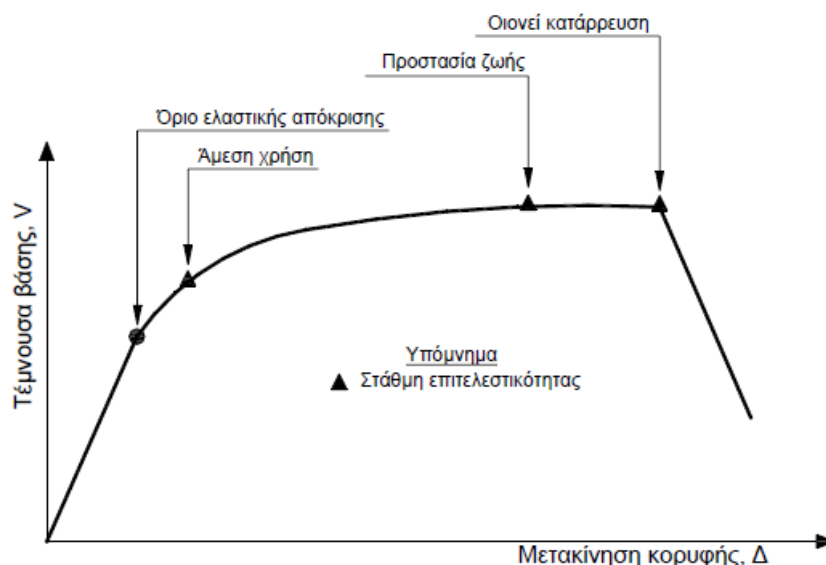
είναι μια κατάσταση κατά την οποία κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, χωρίς όμως να συμβεί θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός ατόμων εξαιτίας των βλαβών αυτών, και χωρίς να συμβούν ουσιώδεις βλάβες στην οικοσκευή ή τα αποθηκευόμενα στο κτίριο υλικά.

«Οιονεί κατάρρευση» (Γ):

είναι μια κατάσταση κατά την οποία κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν εκτεταμένες και σοβαρές ή βαριές (μη-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες στον φέροντα οργανισμό, ο οποίος όμως έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (κατά, και για ένα διάστημα μετά, τον σεισμό), χωρίς πάντως να διαθέτει άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης [1].

Αφού καθοριστούν οι καμπύλες έντασης παραμόρφωσης (F-δ) που περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων της κατασκευής και οι στάθμες επιτελεστικότητας κάθε

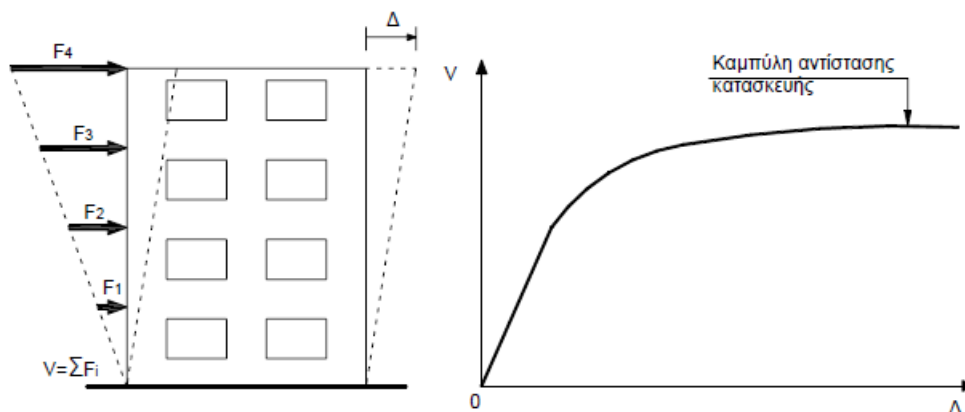
στοιχείου πάνω στην αντίστοιχη καμπύλη, μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη αντίστασης όλης της κατασκευής και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτή τα σημεία που αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας συνολικά για όλη την κατασκευή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Καμπύλη αντίστασης με τις αντίστοιχες στάθμες επιτελεστικότητας [3].

5.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (CAPACITY CURVE)

Ο καθορισμός των διάφορων σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται πάνω στην καμπύλη αντίστασης της κατασκευής, η οποία εκφράζει τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης της κορυφής.



Σχήμα 7: Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής [3].

Η κατασκευή της καμπύλης αντίστασης γίνεται με υπολογισμό της ανελαστικής μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές του οριζόντιου φορτίου, με δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους (σχήμα 7). Τα οριζόντια στατικά φορτία εφαρμόζονται στη στάθμη κάθε διαφράγματος και απαιτείται η εφαρμογή δύο τουλάχιστον διαφορετικών καθ' ύψος κατανομών, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του τρόπου κατανομής των φορτίων λόγω ανελαστικοποίησης ορισμένων περιοχών του φορέα, αλλά και λόγω της επιρροής των ανώτερων ιδιομορφών. Ως κατανομή των φορτίων καθ' ύψος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ομοιόμορφη κατανομή, η τριγωνική κατανομή, η πρώτη ιδιομορφή ή ακόμη και περισσότερο

πολύπλοκοι συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών. Για την κατασκευή αυτής της καμπύλης γίνονται πολλές στατικές επιλύσεις, με σταδιακή αύξηση της τέμνουσας βάσης και υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής σε κάθε βήμα λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη δυσκαμψία των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει.[3]

Για την αποφυγή προβλημάτων και αποκλίσεων κατά τη δημιουργία της καμπύλης απαιτείται η κατασκευή να αποκρίνεται κυρίως κατά την πρώτη ιδιομορφή της σε κάθε διεύθυνση. Αυτό γιατί η κατανομή του οριζόντιου φορτίου καθ' ύψος συνήθως γίνεται με βάση το σχήμα της κύριας ιδιομορφής, οπότε το ποσοστό συμμετοχής της πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Στη περίπτωση αυτή η εφαρμογή της κατανομής σύμφωνα με το σχήμα της ιδιομορφής οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ικανότητα του φορέα. Στο παρόν εξεταζόμενο κτίριο οι δυναμικές αναλύσεις έγιναν με χρήση του ελαστικού φάσματος του ΕΚ 8-1 ($q=1$) όπου προέκυψε η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών ασήμαντη γι' αυτό το λόγο στην επίλυση για να μη ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της φασματικής δόθηκε μια μεγάλη τιμή στο δείκτη σεισμικής συμπεριφοράς ($q=10$). Αν πάλι η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική, η στατική ανελαστική ανάλυση μπορεί πάλι να εφαρμόζεται παράλληλα με μια ελαστική δυναμική, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα.

5.4 ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ

Ο έλεγχος των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών του φορέα γίνεται τη στιγμή που η μετατόπιση κορυφής (μετατόπιση του κόμβου ελέγχου) είναι ίση με μια μετατόπιση δ_{target} . Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. η στοχευόμενη αυτή μετακίνηση υπολογίζεται συνεκτιμώντας κατάλληλα όλους τους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η μετακίνηση ενός ανελαστικά αποκρινόμενου κτιρίου.

Εφόσον δε χρησιμοποιείται ακριβέστερη προσέγγιση, η στοχευόμενη μετακίνηση δ_t επιτρέπεται να υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση (ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ5.6)):

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 (T_e^2 / 4\pi^2) S_{e(T)} \quad (1)$$

όπου $S_{e(T)}$ είναι η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση (από το φάσμα του ΕΚ8-1) που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο της κατασκευής T_e (υπολογιζόμενη με βάση το σημείο καμπής του διαγράμματος τέμνουσας βάσης – μετακίνησης κόμβου ελέγχου) και C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , διορθωτικοί συντελεστές που ορίζονται ως εξής (αναλυτικότερα βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ. §5.7.4.2):

C₀: συσχετίζει τη φασματική μετακίνηση ισοδύναμου ελαστικού φορέα με δυσκαμψία K_e , με την πραγματική μετακίνηση δ_t της κορυφής του ελαστοπλαστικά αποκρινόμενου κτιρίου.

C₁: ο λόγος ($\delta_{inel}/\delta_{el}$) της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης ενός κτιρίου προς την αντίστοιχη ελαστική.

C₂: συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του βρόχου υστέρησης στη μέγιστη μετακίνηση.

C₃: Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων 2ας τάξεως (P-Δ).

Στο εξεταζόμενο κτίριο η στοχευόμενη μετακίνηση για σεισμική δράση με περίοδο επαναφοράς τα 72 χρόνια, κατηγορία σπουδαιότητας II προέκυψε:

$$C_0 = 1.50$$

$$C_1 = 1.00$$

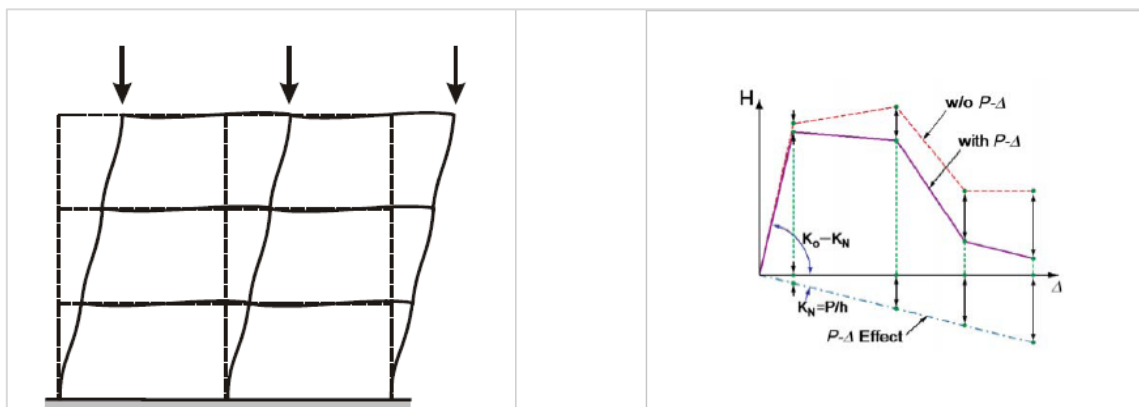
$$C_2 = 1.10$$

$$C_3 = 1.00$$

$$\delta_{Target} = 0.04[m]$$

5.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΕΥΤΕΡΑΣ ΤΑΞΗΣ

Οι επιρροές 2ας τάξης (προβλήματα ευστάθειας λόγω αυξημένων μετακινήσεων ή αλλιώς P- δ effects) εμφανίζονται όταν ο απαραμόρφωτος φορέας θεωρούμενος για μικρές μετακινήσεις πάυει να ταυτίζεται με το παραμορφόμενο. Αυτό έχει ως συνέπεια την εμφάνιση επιπλέον ροπών άρα και αύξηση των μετακινήσεων, επιταχύνοντας την εμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων. Αγνοώντας την επιρροή των φαινομένων αυτών η αντοχή του φορέα πιθανόν να υπερεκτιμηθεί.



Σχήμα 8: Φαινόμενα 2ας τάξης (P-Delta effect) [8].

Στην ανελαστική ανάλυση, οι στατικές επιρροές 2ας τάξης θα συνεκτιμώνται στην ανάλυση ενσωματώνοντας στο προσομοίωμα την μη-γραμμική σχέση έντασης-παραμόρφωσης όλων των στοιχείων που φέρουν αξονικά φορτία για τις διάφορες περιπτώσεις του δείκτη σχετικής μεταθετότητας που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. [1].

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ

Να σημειωθεί ότι για τη στατική ανελαστική ανάλυση το κτίριο φορτίζεται σεισμικά με όλες καθ' ύψος κατανομές, αλλά για την εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε η τριγωνική (+) κατανομή κατά τον άξονα χ . Κατά τον άξονα χ το κτίριο εμφανίζει την μικρότερη δυσκαμψία.

6.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΑΛΑΚΟΥ ΟΡΟΦΟΥ

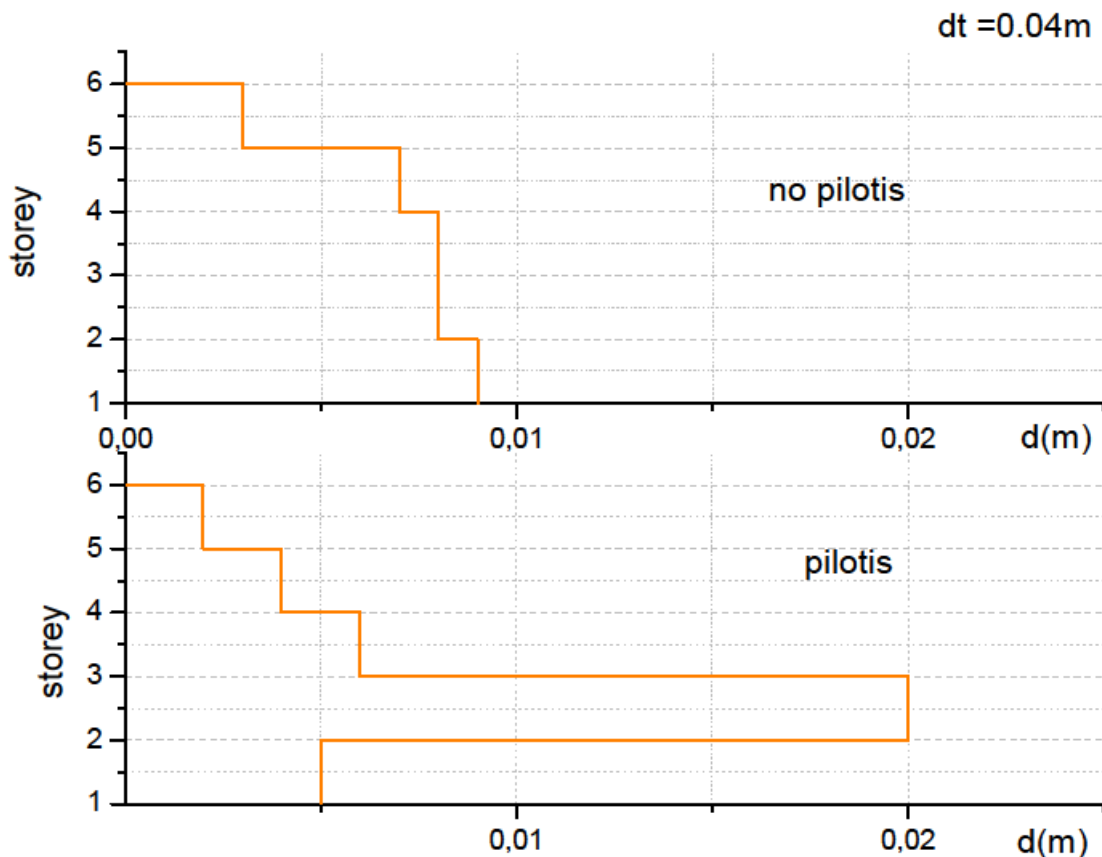
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων συμπεριφοράς πολώροφων κτιρίων τύπου «pilotis» έναντι σεισμικών δράσεων πραγματοποιείται εφαρμογή ανελαστικών μεθόδων ανάλυσης για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στη πρώτη περίπτωση το εξεταζόμενο κτίριο αναλύεται με παρουσία τοιχοπληρώσεων περιμετρικά (προσομοίωση με ελκυστήρες) ενώ στη δεύτερη περίπτωση δεν λαμβάνονται υπόψη οι τοιχοπληρώσεις του 1^{ου} ορόφου.

Έτσι για κάθε περίπτωση εμφανίζονται δύο διαφορετικές καμπύλες τέμνουσας βάσης-μετατόπισης κορυφής. Η στοχευόμενη μετακίνηση και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδια και ίση με τέσσερα εκατοστά. Οι αναλύσεις και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν για στάθμη επιτελεστικότητας B2 (72 χρόνια). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχετικές μετακινήσεις κάθε ορόφου με τις αντίστοιχες γωνιακές παραμορφώσεις που αναλογούν στη συγκεκριμένη στοχευόμενη μετακίνηση (πίνακας 4).

| όροφος | μαλακός όροφος | | τοιχοπλήρωση | |
|--------|----------------|----------|--------------|----------|
| | Maxdθ(ο) | Maxdδ(m) | Maxdθ(ο) | Maxdδ(m) |
| 2 | 0,12 | 0,005 | 0,21 | 0,009 |
| 3 | 0,45 | 0,020 | 0,19 | 0,008 |
| 4 | 0,14 | 0,006 | 0,19 | 0,008 |
| 5 | 0,10 | 0,004 | 0,16 | 0,007 |
| 6 | 0,06 | 0,002 | 0,08 | 0,003 |

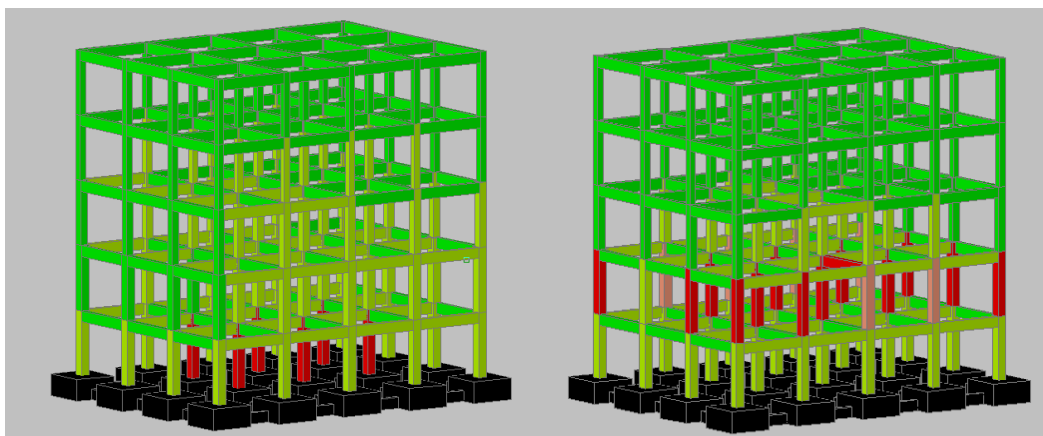
Πίνακας 4: Σχετικές μετακινήσεις κάθε ορόφου.

Ενδεικτικά στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των ορόφων του κτιρίου από τις στατικές ανελαστικές αναλύσεις. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε κτίριο ομοίμορφα τοιχοπληρωμένο καθ' ύψος ενώ η δεύτερη σε κτίριο με pilotis στον 1^ο όροφο.



Σχήμα 9: Σχηματική σύγκριση αποτελεσμάτων.

Στα σχήματα που προηγήθηκαν γίνεται φανερό πόσο επηρεάζει τη συμπεριφορά σε σεισμικό φορτίο η απουσία τοιχοπλήρωσεων στο 1^ο όροφο. Όλες οι μετακινήσεις συγκεντρώνονται στο συγκεκριμένο όροφο. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και από τη γραφική απεικόνιση πλαστικών αρθρώσεων κατά την ανάλυση για τέμνουσα βάση λίγο πριν την κατάρρευση (με έντονη απόχρωση τα μέλη που καταπονούνται περισσότερο) (σχήμα 10).



Σχήμα 10: Προσομοίωμα κτιρίου, ομοιόμορφη τοιχοπλήρωση καθ' ύψος – απουσία τοιχ/σης πρώτου ορόφου.

6.2 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Οι πιθανοί στόχοι αποτίμησης αποτελούν συνδυασμούς αφενός μιας στάθμης επιτελεσματικότητας και αφετέρου μιας σεισμικής δράσης. Ο καθορισμός του στόχου εξαρτάται από τον επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη και τη σπουδαιότητα της κατασκευής. Στο παρόν κεφάλαιο, επιλέχθηκαν πιθανά σενάρια που προκύπτουν σε τυχόν αποτίμηση και ενίσχυση των παλαιότερων κτιρίων με σκοπό την διερεύνηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Ο σπουδαιότερος στόχος προς διερεύνηση είναι ο συνδυασμός αλλαγής κατηγορίας σπουδαιότητας με τους αντίστοιχους ανεκτούς στόχους αποτίμησης. Για λόγους σύγκρισης και πληρότητας πραγματοποιήθηκε ανάλυση απουσία τοιχοπλήρωσεων αλλά και ανάλυση με ενίσχυση μανδύα στα μέλη των δύο πρώτων ορόφων του εξεταζόμενου κτιρίου. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνδυασμοί που επιλέχθηκαν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους.

| | Χαρακτηριστικά | Στάθμη Επιτελεσματικότητας | Πιθανότητα Υπέρβασης | Σπουδαιότητα |
|-----|---------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------|
| 155 | Με τοιχοπλήρωση | Προστασία ζωής | 50% στα 50 χρόνια | Σ2 |
| 152 | Χωρίς τοιχοπλήρωση | « | 10% στα 50 χρόνια | Σ2 |
| 149 | Με τοιχοπλήρωση | « | « | Σ2 |
| 148 | « | « | « | Σ4 |
| 130 | Ενίσχυση με μανδύες | « | « | Σ4 |
| 170 | Με τοιχοπλήρωση | Άμεση χρήση | « | Σ4 |

Πίνακας 5: Συνδυασμοί Αποτίμησης.

Παρατηρήσεις (για ορθή εφαρμογή της στατικής ανελαστικής ανάλυσης):

- Για πιθανότητα υπέρβασης 10% εντός του συμβατικού χρόνου των 50 ετών, λαμβάνεται υπόψη η σεισμική δράση του ΕΚ 8-1, ενώ για πιθανότητα υπέρβασης 50% εντός των 50 ετών, λαμβάνεται υπόψη το 60% της σεισμικής δράσης του ΕΚ 8-1.

- Για επίτευξη αλλαγής κατηγορίας σπουδαιότητας Σ4 η τελική τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού δίδεται από τη σχέση $a_g = \gamma_I \times a_{gr}$, με $\gamma_I = 1,40$ για κατηγορίας σπουδαιότητας Σ4.

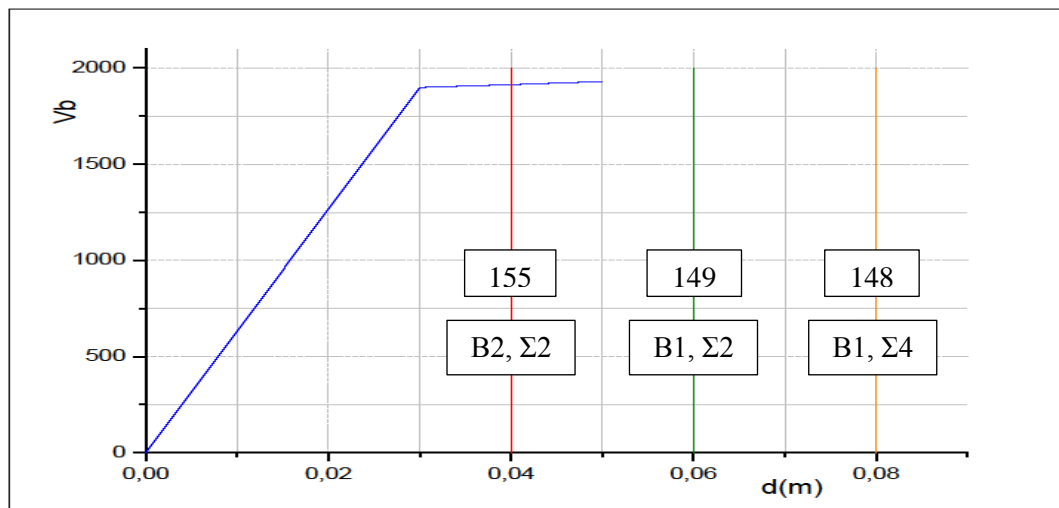
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα από τις αντίστοιχες αναλύσεις pushover για κάθε περίπτωση:

| | C0 | C1 | C2 | C3 | dtarget | Fy | dy | Fu | du |
|-----|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|
| 155 | 1.50 | 1.00 | 1.10 | 1.00 | 0.04 | 1888 | 0.04 | 1907 | 0.05 |
| 152 | 1.50 | 0.93 | 1.10 | 1.00 | 0.06 | 1526 | 0.04 | 1616 | 0.20 |
| 149 | 1.50 | 0.94 | 1.10 | 1.00 | 0.06 | 1860 | 0.04 | 1901 | 0.05 |
| 148 | 1.50 | 0.92 | 1.10 | 1.00 | 0.08 | 1933 | 0.03 | 1976 | 0.05 |
| 130 | 1.50 | 0.98 | 1.10 | 1.00 | 0.08 | 2076 | 0.03 | 2117 | 0.04 |
| 170 | 1.50 | 0.94 | 1.00 | 1.00 | 0.07 | 2471 | 0.04 | 2572 | 0.06 |

Πίνακας 6: Αποτελέσματα αναλύσεων pushover.

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν κάποια πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, συγκρίνοντας την περίπτωση της αποτίμησης του κτιρίου με τοιχοπληρώσεις (149) για στόχο αποτίμησης B1 με το αντίστοιχο χωρίς τοιχοπληρώσεις (152) παρατηρείται η αναμενόμενη διαφορά της καμπύλης αντίστασης των δύο περιπτώσεων.

Επίσης στη τελευταία περίπτωση με στόχο αποτίμησης A1 (170) ο συντελεστής C2 ευθύνεται για τη μείωση της στοχευόμενης μετακίνησης, παρ' όλα αυτά η περίπτωση αυτή είναι δυσμενέστερη όλων (στόχος επιτελεστικότητας δυσμενέστερος). Η τιμή του συντελεστή C2 είναι μεγαλύτερη της μονάδας όταν η επιρροή της υστερητικής συμπεριφοράς είναι μεγαλύτερη για υψηλότερα επίπεδα μετελαστικής συμπεριφοράς του φορέα. Από την άλλη η αύξηση των τιμών που παρατηρείται στη καμπύλη αντίστασης δικαιολογείται στο ότι η τιμή αντίστασης υπολογίζεται από τις μέσες τιμές των υλικών. Αντίθετα με τις υπόλοιπες στάθμες επιτελεστικότητας όπου για τα πρωτεύοντα στοιχεία η τιμή του συντελεστή (γ_{Rd}) πρέπει να είναι τέτοια ώστε η τιμή της αντίστασης (R_d) να αντιστοιχεί σε μέση τιμή μείον μια τυπική απόκλιση.



Σχήμα 11: Καμπύλη αντίστασης – Στοχευόμενες Μετακινήσεις.

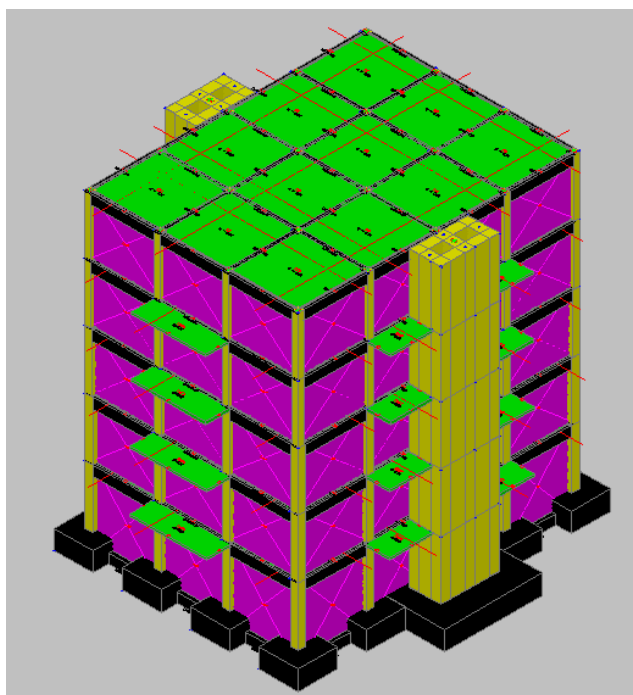
Ένα βασικό ερώτημα που παρουσιάζεται είναι πώς μεταβάλλεται η στοχευόμενη μετακίνηση για τους διάφορους συνδυασμούς αποτίμησης στο υφιστάμενο κτίριο χωρίς μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Στο σχήμα 11 παρουσιάζονται οι στοχευόμενες

μετακινήσεις με την αντίστοιχη καμπύλη αντίστασης. Η πρώτη περίπτωση (155) αφορά σε στόχο απαιτήσης B2, η δεύτερη (149) και τρίτη (148) στόχο B1 με τη διαφορά ότι η τρίτη περιλαμβάνει αλλαγή κατηγορίας σπουδαιότητας από Σ2 σε Σ4.

Τέλος, ελέγχοντας την καμπύλη αντίστασης που προέκυψε από την ενίσχυση με μανδύες παρατηρείται μικρή αύξηση αντίστασης της κατασκευής. Το αποτέλεσμα αυτό με συνδυασμό με το προηγούμενο σχήμα που αποτυπώνει τις στοχευόμενες μετακινήσεις υποδηλώνει την δυσκολία επίτευξης του στόχου για το εξεταζόμενο κτίριο με στόχο αποτίμησης A1 και κατηγορία σπουδαιότητας Σ4. Ένας τρόπος ενίσχυσης για περιπτώσεις πολυώροφων κτιρίων κατορθώνοντας σημαντική αύξηση δυσκαμψίας της κατασκευής αλλά και μείωση των μετακινήσεων παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ένας αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης κτιρίων έναντι σεισμού είναι η προσθήκη τοιχωμάτων ή πυρήνων. Το πλεονέκτημα είναι ότι αποφεύγεται πλήρως το ενδεχόμενο κατάρρευσης, εφ' όσον το οριζόντιο φορτίο αναλαμβάνεται από τα νέα ισχυρά στοιχεία, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι μετακινήσεις του κτιρίου και οι ζημιές των φερόντων και μη φερόντων στοιχείων του. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι δε χρειάζεται να ενισχυθούν τα υπάρχοντα στοιχεία διότι μειώνεται στο ελάχιστο η καταπόνηση τους σε σεισμό [9].



Σχήμα 12: Ενίσχυση με προσθήκη πυρήνων.

Βέβαια υπάρχουν κατασκευαστικά θέματα που πρέπει να προσεχθούν:

- Το ρυμοτομικό σχέδιο του οικοπέδου καθώς και η διάταξη του κτιρίου να δίνει τη δυνατότητα κατασκευής αυτών χωρίς να μειώνει τη καλαισθησία και λειτουργικότητα του δομήματος.
- Η σύνδεση των στοιχείων με το υφιστάμενο κτίριο να διασφαλίζει την διαφραγματική λειτουργία των πλακών όμως μεγάλης σημασίας είναι και η σύνδεση του στοιχείου με το θεμέλιο ώστε να εξασφαλίζεται τη πλήρη άκτωση δηλαδή η μη στροφή.

Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται η ενίσχυση με προσθήκη πυρήνων εκατέρωθεν της μεγάλης διάστασης του εξεταζόμενου κτιρίου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διεξαγωγή στατικών ανελαστικών αναλύσεων του εξεταζόμενου υφιστάμενου κτιρίου, έδωσε τη δυνατότητα για μια εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες παρατηρήσεις και συμπεράσματα που αφορούν τη σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου.

- Μια προσεισμική επέμβαση ενίσχυσης σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος τύπου pilotis κρίνεται επιβεβλημένη. Η εμφάνιση μαλακού ορόφου λόγω της έντονης σχετικής μετακίνησης άρα και τη μείωση αντοχής σε οριζόντια σεισμικά φορτία μπορεί να προκαλέσει ξαφνική – ψαθυρή αστοχία βάζοντας σε άμεσο κίνδυνο τις ζωές των ενοίκων.
- Από τα αποτελέσματα των συγκρίσεων που προέκυψαν μέσω αναλύσεων pushover για το εξεταζόμενο κτίριο προέκυψε ότι ενδεχομένως πολύωροφα κτίρια αντίστοιχης εποχής χρειάζονται έντονη και αποτελεσματική δομική επέμβαση ειδικότερα για επίτευξη υψηλών στόχων επιτελεστικότητας. Στη περίπτωση αποτίμησης και ενίσχυσης με άμεση χρήση μετά το σεισμό όπου ο στόχος επιτελεστικότητας πρέπει να βρίσκεται στο ανερχόμενο τμήμα της καμπύλης φαντάζει εξαιρετικά δύσκολο. Για να συμβεί αυτό πρέπει η πλευρική αντίσταση του κτιρίου να αυξηθεί σημαντικά και η ενίσχυση με δύσκαμπτα στοιχεία αποσκοπεί σε αυτό. Ένας άλλος τρόπος ίσως να ήταν η μείωση της στοχευόμενης μετακίνησης που επιτυγχάνεται με αύξηση της απόσβεσης της κατασκευής.
- Η μεταβολή της στοχευόμενης μετακίνησης σε αλλαγή κατηγορίας σπουδαιότητας από Σ2 σε Σ4 στο εξεταζόμενο κτίριο είναι περίπου ίση με τη περίπτωση αλλαγής του στόχου επιτελεστικότητας.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης ανεπάρκειας των παραπάνω αναλύσεων για τα περισσότερα μέλη του φορέα, ειδικότερα των δύο πρώτων ορόφων, προέκυψε $\lambda > 2.5$ επιβεβαιώνοντας την τρωτότητα του κτιρίου. Συγκρίνοντας τις τιμές της κάθε ανάλυσης δεν θεωρήθηκε σκόπιμο για περαιτέρω έλεγχο αυτών.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ΚΑΝ.ΕΠΕ.

[2] Δ. Μπάρος, “Επιλογή Στρατηγικής Ενίσχυσης σε Υφιστάμενες Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Χρήση Ανελαστικών Αναλύσεων”, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Πάτρα 2006

[3] Γ.Ψυχάρης, “Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007

[4] Ερευνητικό Έργο, “Μέθοδοι Εκτίμησης της Αντοχής σε Σεισμική Δράση Υφιστάμενων Κτιρίων και Γεφυρών από Ο/Σ – Βελτίωση Σεισμικής Συμπεριφοράς μέσω Τεχνικών Επεμβάσεων”, Βόλος 2002

[5] Ε.Κ.8

[6] Εφημερίς της κυβερνήσεως του Βασιλείου της Ελλάδας, Τεύχος Πρώτο, Αριθμός φύλλου 36, “1^{ος} Αντισεισμικός Κανονισμός”, Αθήνα 1959

[7] Θ. Αντωνόπουλου, “Σεισμική Συμπεριφορά Παλαιών Κτιρίων με pilotis και Πρακτικές Προτάσεις Βελτίωσης της”, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πάτρα 2008 http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/947/1/master_Antonopoulos.pdf

[8] <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect> (λήψη διαγράμματος)

[9] Α. Κανελλόπουλος, “Ενίσχυση Κτιρίων Έναντι Σεισμού με Προσθήκη Τοιχωμάτων, Πυρήνων ή Μεταλλικών Στοιχείων”, Διεθνές Επιστημονικό Διήμερο, Κων/πολη 2001

[10] Κ. Στυλιανίδης, “Βασικές Αρχές του ΚΑΝ.ΕΠΕ. – Στάθμες Επιτελεστικότητας”, Παρουσίαση, Αθήνα 2013