

Υπολογιστική διερεύνηση της επιρροής του δείκτη συμπεριφοράς (q factor) στις απαιτήσεις χάλυβα σε πολυώροφα πλαίσιακά κτίρια Ο/Σ σύμφωνα με τον EC8

Γιώργος Βακανάς

Msc Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Frederick, Κύπρος

Μίλτων Δημοσθένους

Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Ερευνητής του ΙΤΣΑΚ, Επισκέπτης Καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Frederick, Κύπρος, eng.dm@frederick.ac.cy

Εισαγωγή

Σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, για το σχεδιασμό νέων κτιριακών έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ), προβλέπονται οι παρακάτω συνδυασμοί φόρτισης:

$$1.35\Sigma G_i + 1.5\Sigma Q_i$$

$$\Sigma G_i + \Sigma \Psi_i Q_i \pm EQ_x \pm 0.3EQ_y$$

$$\Sigma G_i + \Sigma \Psi_i Q_i \pm 0.3EQ_x \pm EQ_y$$

Είναι προφανές ότι η διαστασιολόγηση ενός εκάστου των δομικών στοιχείων της κατασκευής (απαιτούμενες διαστάσεις και οπλισμοί) γίνεται υπό την πλέον δυσμενέστερη εντατική κατάσταση η οποία για διαφορετικά δομικά στοιχεία μπορεί να προκύπτει από διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτισης.

Ωστόσο, αξιοσημείωτη επισήμανση είναι ότι στους συνδυασμούς με συνεκτίμηση των σεισμικών φορτίων (αντισεισμικός σχεδιασμός) τα κατακόρυφα εξωτερικά φορτία ($G+\Psi Q$) είναι πολύ μικρότερα από αυτά τα οποία λαμβάνονται υπόψη χωρίς τη συνεκτίμηση των σεισμικών φορτίων ($1.35G+1.5Q$). Κατά συνέπεια, σ' αυτή την περίπτωση (αντισεισμικός σχεδιασμός) η συνεισφορά των κατακόρυφων φορτίων ($G+\Psi Q$) στα τελικά παραγόμενα εντατικά μεγέθη (M, V, N) των δομικών στοιχείων είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με αυτή που προκύπτει από το συνδυασμό μόνο των μόνιμων και κινητών φορτίων ($1.35G+1.5Q$). Αναμένεται όμως ότι κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό, η δράση των σεισμικών φορτίων θα επιφέρει σημαντική επαύξηση έντασης στην κατασκευή η οποία θα υπερβεί την οποιαδήποτε μείωση λόγω μικρότερων τιμών στα κατακόρυφα φορτία. Τούτο όμως μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν τα σεισμικά φορτία είναι αρκούντως μεγάλα.

Ως γνωστό, σύμφωνα με τον EC8, ο δείκτης (συντελεστής) συμπεριφοράς της κατασκευής (q factor) έχει σημαντική συνεισφορά στην τελική διαμόρφωση των τιμών των σεισμικών φορτίων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης συμπεριφοράς τόσο μικρότερη είναι η τιμή των σεισμικών φορτίων. Ειδικά για κτίρια με πλαίσιακό σύστημα από Ο/Σ ο δείκτης αυτός μπορεί να λάβει τιμές από 1.5 μέχρι 5.85 ($1.5 < q < 5.85$). Αυτόματα τίθεται το ερώτημα κατά πόσον και εάν όλες οι τιμές του δείκτη συμπεριφοράς (q) που προβλέπονται στον EC8 μπορούν να οδηγήσουν σε τέτοια σεισμικά φορτία ώστε από τον συνδυασμό κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό να

προκύπτουν πρόσθετες απαιτήσεις χάλυβα για όλα τα δομικά στοιχεία προσδίδοντας σε αυτά μεγαλύτερη ικανότητα αντοχής και πλαστιμότητας ως προϋπόθεση για την ανάπτυξη ικανοποιητικής συμπεριφοράς έναντι μεγάλων παραμορφώσεων που επισυμβαίνουν σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης.

Αντικείμενο και στόχος της παρούσα εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκπόνηση της στατικής και αντισεισμικής μελέτης οκτώ πλαισιακών κτιρίων (μονώροφο, δώροφο, κ.λ.π. μέχρι οκταώροφο) από Ο/Σ και για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης που προβλέπονται από τους Ευρωκώδικες. Κάθε ένα από αυτά τα κτίρια εξετάζεται για επτά διαφορετικές τιμές του δείκτη συμπεριφοράς ($q=1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6$), παρά το γεγονός ότι στον EC8.1 κεφ. 5 προβλέπονται συγκεκριμένες τιμές αυτού του δείκτη ανάλογα με το προεπιλεγόμενο επίπεδο πλαστιμότητας που επιθυμούμε να διαθέτει η κατασκευή (Ductility Class Medium (DCM) ή Ductility Class High (DCH)). Επίσης, στον EC8.1 προβλέπεται κατώτερη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $q=1.5$. Πάρα ταύτα, στην παρούσα εργασία τα εν λόγω κτίρια εξετάστηκαν και για τιμή $q=1.0$. Έτσι λοιπόν, τελικώς εξετάστηκαν 56 διαφορετικές περιπτώσεις πλαισιακών κτιρίων (8 κτίρια X 7 δείκτες συμπεριφοράς) παρέχοντας μια πληθώρα αποτελεσμάτων ώστε μέσα από την αξιολόγησή τους να μπορούν να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει την επιρροή του δείκτη συμπεριφοράς (q) στις απαιτήσεις χάλυβα στις δοκούς και τα υποστυλώματα των πιο πάνω υπό εξέταση πλαισιακών κτιρίων. Όμως, λόγω περιορισμένου χώρου, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνον ορισμένων δομικών στοιχείων του ισογείου κάποιων από τα κτίρια που εξετάστηκαν, όπου αναμένονται οι πλέον σημαντικές επιβαρύνσεις από τα σεισμικά φορτία και κατ' επέκταση και οι οποιεσδήποτε πιθανές επαυξημένες απαιτήσεις σε χάλυβα λόγω σεισμικών φορτίων.

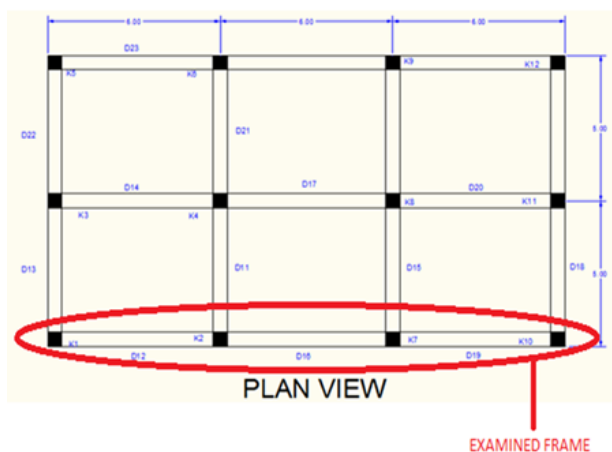
Μεθοδολογία και στάδια υλοποίησης της παρούσας εργασίας

Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

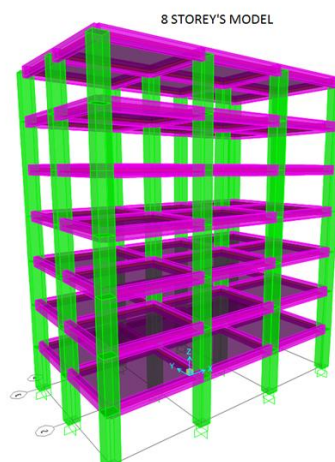
- Σχεδιασμός των υπό εξέταση πλαισιακών κτιρίων με συμμετρία σε δύο κάθετες διευθύνσεις και με κανονικότητα οριζοντίως και καθ' ύψος ώστε να μην υπεισέρχονται στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας πρόσθετοι αστάθμητοι παράγοντες. Ο σχεδιασμός τους βασίζεται στις πρόνοιες των Ευρωκωδίκων (EC1, EC2 και EC8).
- Προσομοίωση όλων των κτιρίων με το πρόγραμμα SAP2000 και εισαγωγή των κατακόρυφων φορτίων σύμφωνα με τις πρόνοιες των Ευρωκωδίκων (EC1 & EC2)
- Διαμόρφωση επτά φασμάτων σχεδιασμού για αντίστοιχο αριθμό δεικτών συμπεριφοράς (q factor) ($q = 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6$)
- Στατική και αντισεισμική επίλυση όλων των κτιρίων για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης που προβλέπονται από τους Ευρωκώδικες.
- Λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων για απαιτήσεις διαμήκη και εγκάρσιου χάλυβα σε δομικά στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα SAP2000.
- Έλεγχος της αξιοπιστίας αυτών των αποτελεσμάτων μέσα από επιλύσεις μεμονωμένων δομικών στοιχείων με το χέρι.
- Αξιολόγηση των παραπάνω αποτελεσμάτων και διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

Περιγραφή των κτιρίων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία

Αρχικά έγινε ο σχεδιασμός της κάτοψης ενός συμμετρικού τυπικού ορόφου με τρία ανοίγματα στη μία διεύθυνση (X-X) και δύο στην άλλη διεύθυνση (Y-Y) (Σχ. 1) και με συμμετρία σε δύο κάθετες διευθύνσεις. Τα ανοίγματα στη διεύθυνση X-X ήταν 6.0m και στη διεύθυνση Y-Y 5.0m ενώ το υψος το ύψος κάθε ορόφου ήταν 3.0m. Στη συνέχεια διαμορφώθηκαν 8 κτίρια με πλαισιακό σύστημα (μονώροφο, δώροφο, κ.λ.π. μέχρι οκταώροφο) με οριζόντια και καθ' ύψος κανονικότητα (Σχ. 2 και Σχ. 3). Σε πρώτο στάδιο δόθηκαν οι ελάχιστες διαστάσεις στα δομικά στοιχεία όπως αυτές ορίζονται επίσης από τους Ευρωκώδικες. Ακολούθως τα κτίρια αυτά επιλύθηκαν ως χωρικά πλαίσια (Σχ. 2) με τη βοήθεια του προγράμματος SAP2000 και για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης που προβλέπονται από τους Ευρωκώδικες. Λόγω περιορισμένου χώρου, στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση αποτελεσμάτων για δύο υποστυλώματα και δύο δοκούς ενός από τα εξωτερικά πλαίσια της διεύθυνσης X-X (Σχ. 1 και Σχ. 4). Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στο τριώροφο και οκταώροφο κτίριο.



Σχ. 1 Κάτοψη τυπικού ορόφου των κτιρίων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία



Σχ. 2 Χωρικό πλαίσιο 7όροφου κτιρίου Ο/Σ με πλαισιακό σύστημα



Σχ. 3 Επίπεδα πλαίσια στη διεύθυνση X-X των χωρικών πλαισίων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία



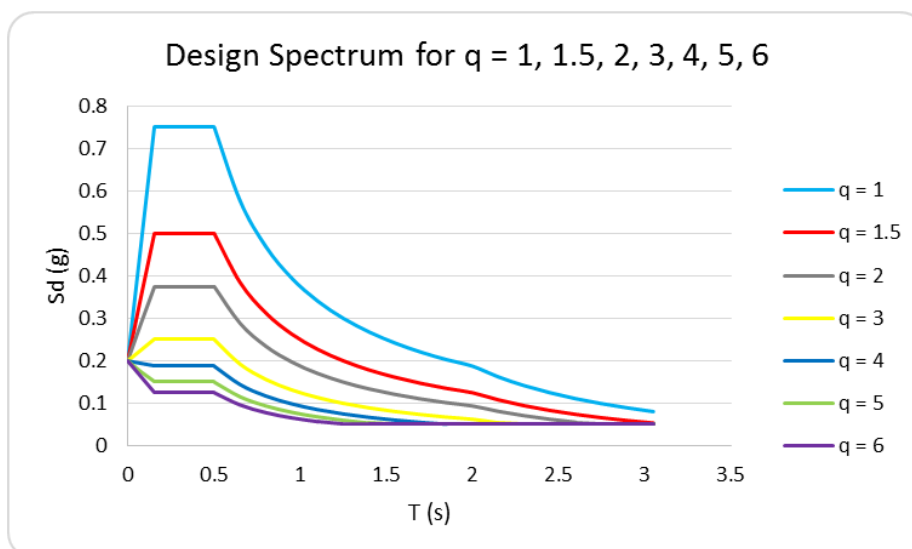
Σχ. 4 Ενδεικτική σήμανση των δομικών στοιχείων για τα οποία παρέχονται αποτελέσματα στην παρούσα εργασία

Χαρακτηριστικά του σεισμού σχεδιασμού και φάσματα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Για τη διαμόρφωση των φασμάτων σχεδιασμού, βάση των οποίων γίνεται ο υπολογισμός των σεισμικών φορτίων, λήφθηκε συντελεστής σπουδαιότητας $\gamma=1.0$, κατηγορία εδάφους Β και μέγιστη επιτάχυνση βράχου $0.25g$ που αντιστοιχεί στη ζώνη ΙΙΙ σύμφωνα με το εθνικό προσάρτημα της Κύπρου στον EC8 (Σχ. 5). Διαμορφώθηκαν συνολικά επτά φάσματα σχεδιασμού για επτά τιμές του δείκτη συμπεριφοράς ($q=1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6$) που κατά συνέπεια σημαίνει επτά διαφορετικές τιμές σεισμικής φόρτισης (Σχ. 6). Έτσι λοιπόν έγιναν συνολικά 56 επιλύσεις (8 κτίρια X 7 διαφορετικές τιμές σεισμικής φόρτισης), κάτι το οποίο επιτρέπει σε πρώτο στάδιο και για τα κτίρια που εξετάστηκαν την διατύπωση ασφαλών συμπερασμάτων.



Σχ. 5 Χάρτης της Κύπρου με τις σεισμικές ζώνες



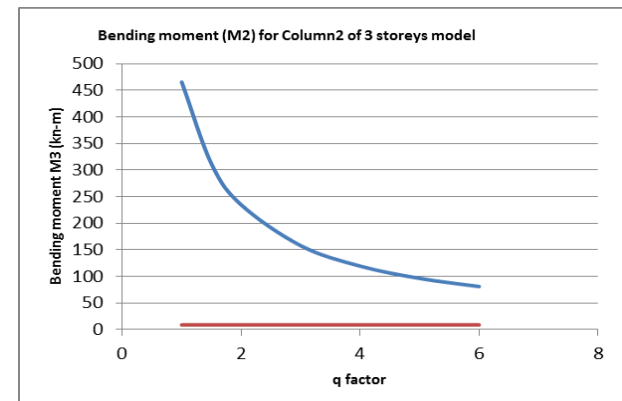
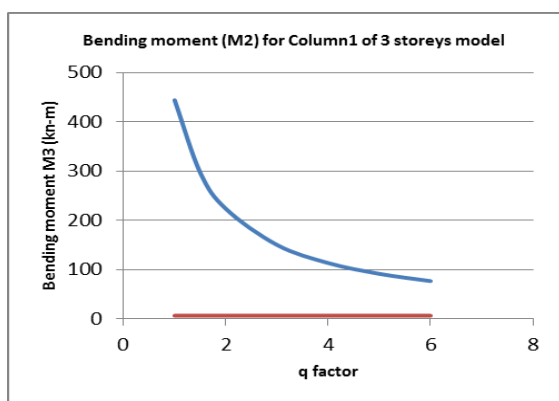
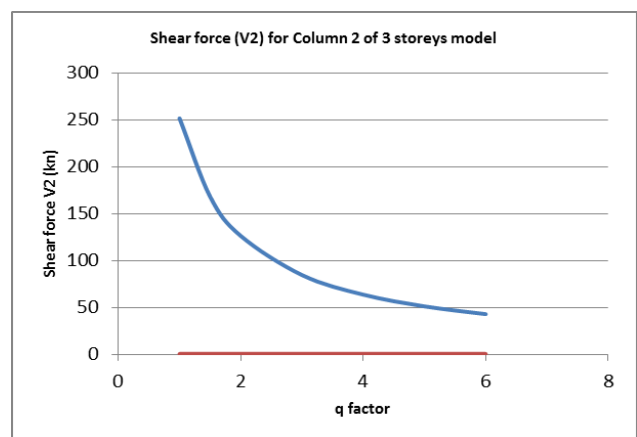
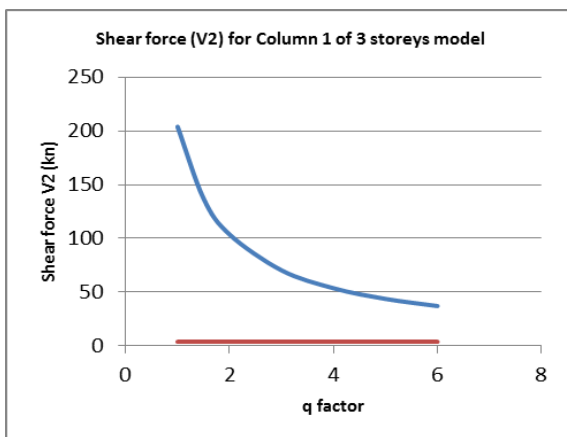
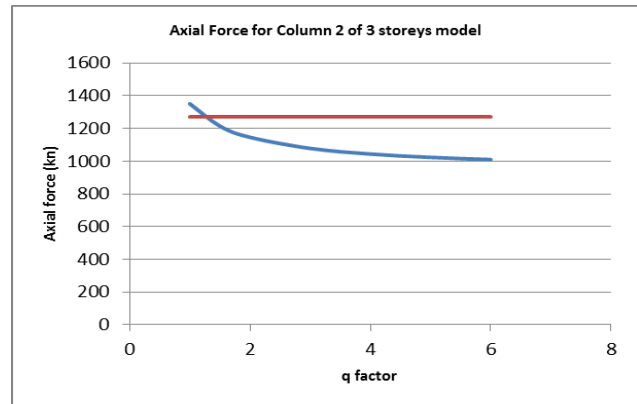
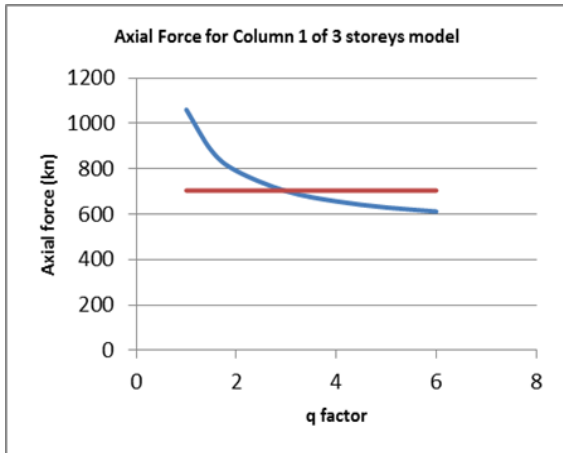
Σχ. 6 Φάσματα σχεδιασμού για επτά διαφορετικές τιμές του δείκτη συμπεριφοράς (q)

Αποτελέσματα εντατικών μεγεθών από τη στατική και αντισεισμική μελέτη

Στα σχήματα 7 και 8 φαίνονται οι μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών του αξονικού φορτίου [N], της τέμνουσας [V] και της καμπτικής ροπής [M] συναρτήσει του δείκτη συμπεριφοράς (q) για τα υποστυλώματα 1 και 2 αντίστοιχα, που βρίσκονται στη βάση του ισογείου του εξωτερικού πλαισίου στη διεύθυνση X-X του **τριώροφου** κτιρίου. Το υποστύλωμα 1 είναι ένα εκ των το ακραίων υποστυλωμάτων του πλαισίου ενώ το υποστύλωμα 2 ένα εκ των δύο εσωτερικών υποστυλωμάτων. Στα σχήματα αυτά με κόκκινη οριζόντια γραμμή προσδιορίζονται οι τιμές των εντατικών μεγεθών από τη δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) τα οποία προφανώς είναι σταθερά και ανεξάρτητα από τις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς (q). Στα ίδια σχήματα με μπλε καμπύλη γραμμή προσδιορίζονται οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών που έχουν προκύψει από όλους τους συνδυασμούς κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων ($G+0.3Q+E$). Παρατηρούμε ότι από τους συνδυασμούς με συνεκτίμηση της σεισμικής φόρτισης, όλα τα εντατικά μεγέθη μειώνονται όσο αυξάνει η τιμή του δείκτη συμπεριφοράς (q) που όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, αυτή η αύξηση συνεπάγεται αυτόματα και μείωση των σεισμικών φορτίων, κατά πως προβλέπεται από τον EC8. Αξιοσημείωτη παρατήρηση από αυτά τα διαγράμματα είναι ότι, τα εντατικά μεγέθη της καμπτικής ροπής και της τέμνουσας (M , V), και για τα δύο υποστυλώματα (1 και 2), υπερέχουν από αυτά που προκύπτουν από τη δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G + 1.5Q$). Εξάιρεση αποτελεί το αξονικό φορτίο [N] τόσο για το ακραίο (1) όσο και το εσωτερικό υποστύλωμα (2). Από το σύνολο των κτιρίων που εξετάστηκαν (μονώροφο μέχρι οκτώροφο) παρατηρείται ότι το μέγεθος του αξονικού φορτίου [N] από το συνδυασμό κατακόρυφου και σεισμικού φορτίου ($G+0.3Q$), ενίοτε είναι μεγαλύτερο και ενίοτε μικρότερο από το αντίστοιχο μέγεθος που προκύπτει από τη δράση του συνδυασμού μόνον των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$). Καθοριστικό παράγοντα σ' αυτή τη διαφοροποίηση έχει το μέγεθος των σεισμικών φορτίων τα οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς (q) καθώς και ο αριθμός των ορόφων. Έτσι λοιπόν, κατά κανόνα, όσο μικρότερος είναι αυτός ο συντελεστής (q), δηλ. μεγαλύτερες σεισμικές δυνάμεις, τα αξονικά φορτία που προκύπτουν από το συνδυασμό κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων υπερέχουν έναντι αυτών που προκύπτουν μόνο από τη δράση των κατακόρυφων φορτίων. Η διαφοροποίηση αυτή επηρεάζεται και από τον αριθμό των ορόφων. Ενώ για μονώροφο κτίριο το αξονικό φορτίο [N] των υποστυλωμάτων από συνδυασμό κατακόρυφου και σεισμικού φορτίου είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο που προκύπτει μόνο από κατακόρυφα φορτία και για όλες τις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς, παρατηρείται ακριβώς το αντίθετο για το οκτώροφο κτίριο (βλέπε επίσης σχήμα 9). Για κτίρια με ενδιάμεσους ορόφους παρατηρείται κάποια ενδιάμεση κατάσταση. Ενδεικτικά αναφέρουμε το τριώροφο κτίριο όπου τα δύο υπό εξέταση υποστυλώματα παρουσιάζουν και σχετικ'λη διαφοροποίηση σε σχέση με το δείκτη συμπεριφοράς (σχ. 7 & 8).

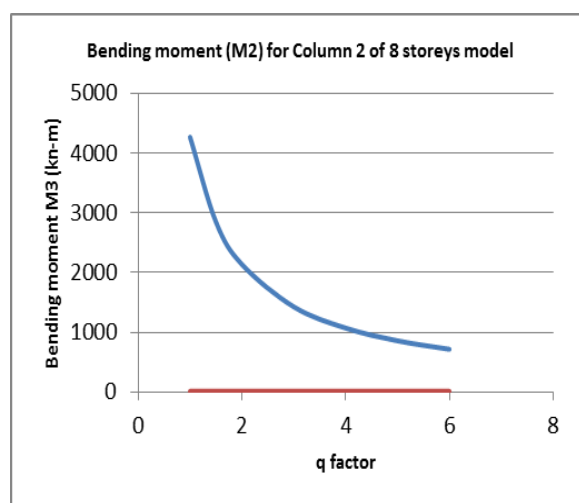
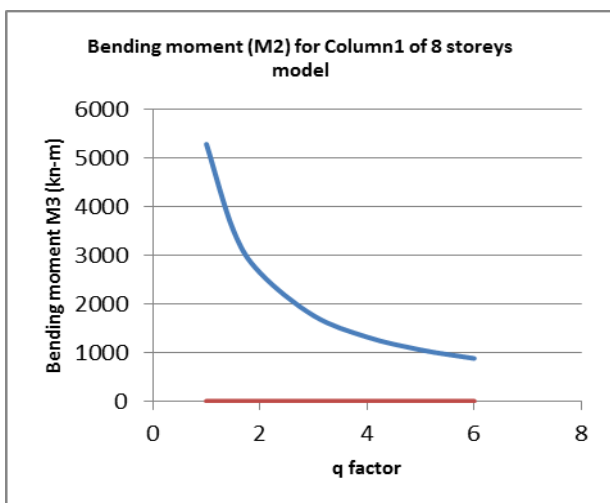
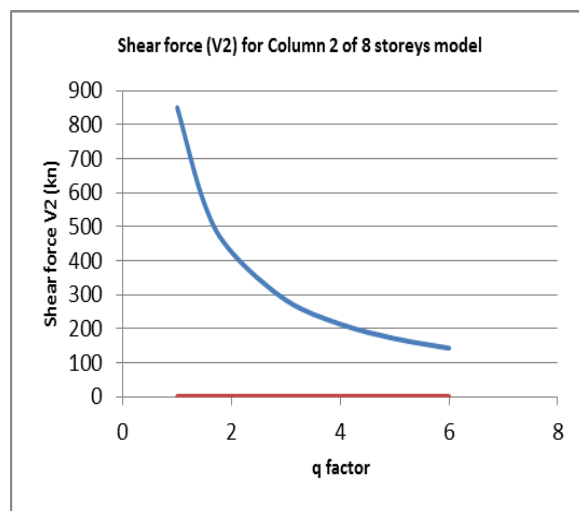
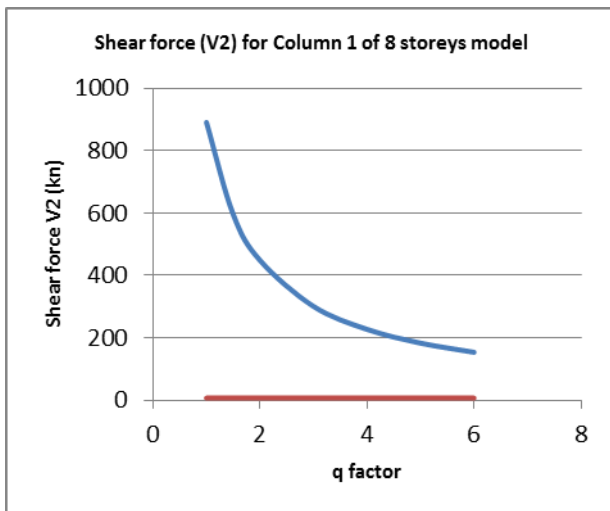
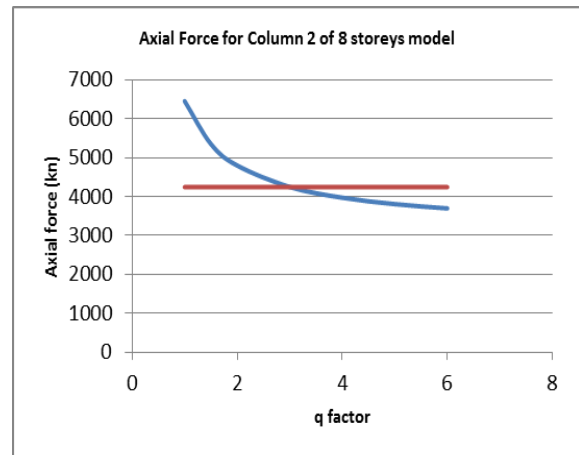
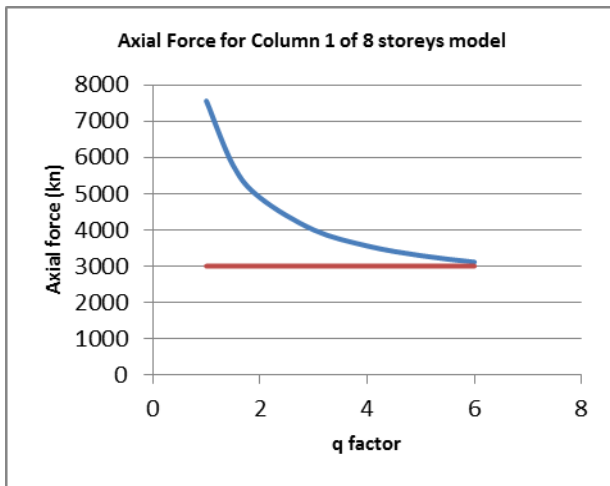
Στα σχήματα 9 και 10 φαίνονται οι μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών του αξονικού φορτίου [N], της τέμνουσας [V] και της καμπτικής ροπής [M] συναρτήσει του δείκτη συμπεριφοράς (q) για τα υποστυλώματα 1 και 2 αντίστοιχα στη βάση του ισογείου του εξωτερικού πλαισίου στη διεύθυνση X-X του **οκτώροφου** κτιρίου. Το υποστύλωμα 1 είναι το ακραίο υποστύλωμα του πλαισίου ενώ το υποστύλωμα 2 το εσωτερικό. Στα σχήματα αυτά με κόκκινη οριζόντια γραμμή προσδιορίζονται οι τιμές των εντατικών μεγεθών υπό τη δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) οι οποίες προφανώς είναι σταθερές και ανεξάρτητες από τις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς (q). Στα ίδια σχήματα με μπλε καμπύλη γραμμή προσδιορίζονται οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών που έχουν προκύψει από όλους τους συνδυασμούς κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων ($G+0.3Q+E$). Παρατηρούμε ότι από τους συνδυασμούς με συνεκτίμηση της σεισμικής φόρτισης, όλα

τα εντατικά μεγέθη μειώνονται όσο αυξάνει η τιμή του δείκτη συμπεριφοράς (q) που όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, αυτή η αύξηση συνεπάγεται αυτόματα και μείωση των σεισμικών φορτίων, κατά πως προβλέπεται από τον EC8. Τα μεγέθη της καμπτικής ροπής $[M]$ και της τέμνουσας υπερέρχουν σε περίπτωση συνεκτίμησης του σεισμικού φορτίου ενώ για το αξονικό φορτίο $[N]$ ισχύουν ανάλογες παρατηρήσεις όπως αυτές που αναφέρθηκαν πιο πάνω για το τριώροφο κτίριο.



Σχ. 7. Εντατικά μεγέθη υποστυλώματος 1 του τριώροφου πλαισίου (ακραίο υποστύλωμα εξωτερικού πλαισίου - γωνιακό)

Σχ. 8. Εντατικά μεγέθη υποστυλώματος 2 του τριώροφου πλαισίου (εσωτερικό υποστύλωμα εξωτερικού πλαισίου)

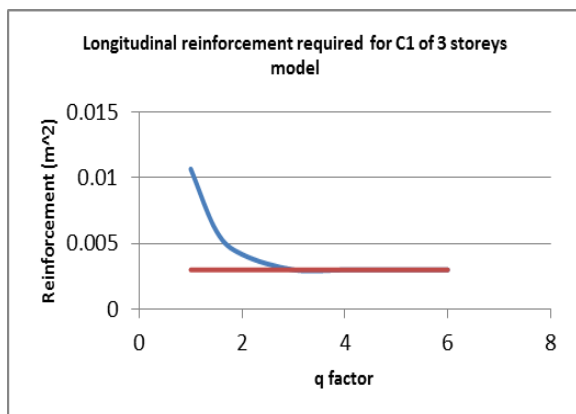


Σχ. 9. Εντατικά μεγέθη υποστυλώματος 1 του οκτάωροφου πλαισίου (ακραίο υποστύλωμα εξωτερικού πλαισίου - γωνιακό)

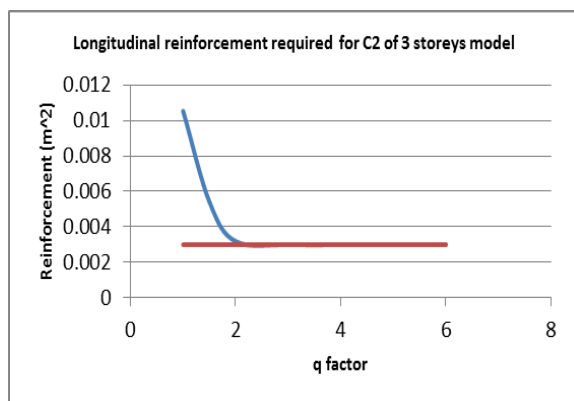
Σχ. 10. Εντατικά μεγέθη υποστυλώματος 2 του οκτάωροφου πλαισίου (εσωτερικό υποστύλωμα εξωτερικού πλαισίου)

Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για τα υποστυλώματα

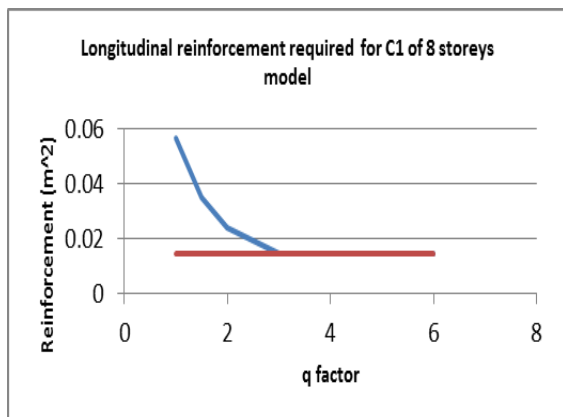
Στα σχήματα 11 και 12 φαίνονται οι απαιτήσεις σε διαμήκη οπλισμό για τα υποστυλώματα 1 και 2 του εξωτερικού πλαισίου στη διεύθυνση X-X του τριώροφου κτιρίου. Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται επίσης στα σχήματα 13 και 14 για το οκταώροφο κτίριο. Στα σχήματα αυτά με κόκκινη γραμμή δίνονται οι απαιτήσεις οπλισμού για δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) και με την μπλε γραμμή οι απαιτήσεις για το συνδυασμό κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων ($G+0.3Q+E$). Για την περίπτωση δράσης μόνο των κατακόρυφων φορτίων οι απαιτήσεις σε χάλυβα είναι ανεξάρτητες από το δείκτη πλαστιμότητας και ισοδυναμούν με τον ελάχιστο οπλισμό που προβλέπουν οι κανονισμοί, ο οποίος ισοδυναμεί με το 1% της επιφάνειας (A) του υποστυλώματος. Στην περίπτωση συνδυασμού κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων βρέθηκε ότι για δείκτη συμπεριφοράς μεγαλύτερο από 3 ($q > 3$) τίθεται επίσης ο ελάχιστος οπλισμός ενώ για τιμές μικρότερες από 3, ο απαιτούμενος οπλισμός αυξάνει όσο μειώνεται ο δείκτης συμπεριφοράς (αύξηση σεισμικών φορτίων). Σε καμία περίπτωση όμως δεν ξεπερνά το 4% της επιφάνειας του υποστυλώματος που είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος οπλισμός. Δεδομένου ότι ο διαμήκης οπλισμός εξαρτάται από το αξονικό φορτίο και τη ροπή του υποστυλώματος, τα διαγράμματα απαίτησης οπλισμού συναρτήσεως του δείκτη συμπεριφοράς μπορούν να θεωρηθούν και αναμενόμενα δεδομένου ότι τα αντίστοιχα διαγράμματα και των δύο εντατικών μεγεθών [N & M] παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα.



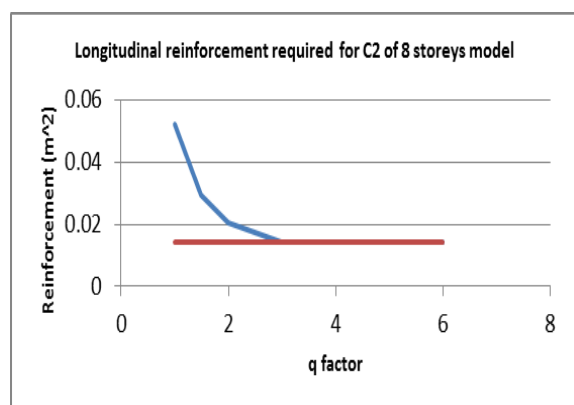
Σχ. 11 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για το υποστυλώμα 1 του τριώροφου κτιρίου



Σχ. 12 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για το υποστυλώμα 2 του τριώροφου κτιρίου



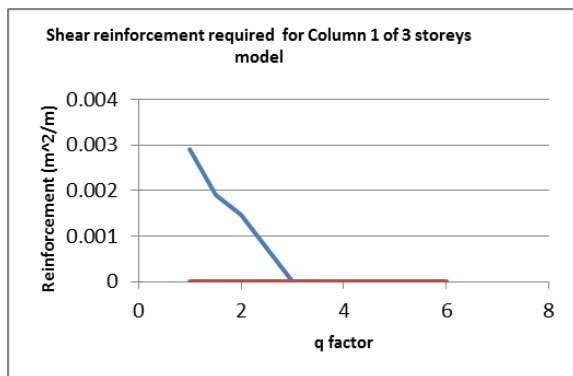
Σχ. 13 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για το υποστυλώμα 1 του οκταώροφου κτιρίου



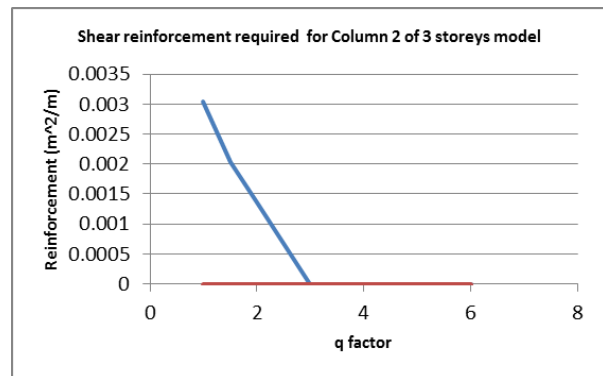
Σχ. 14 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για το υποστυλώμα 2 του οκταώροφου κτιρίου

Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων) για τα υποστυλώματα

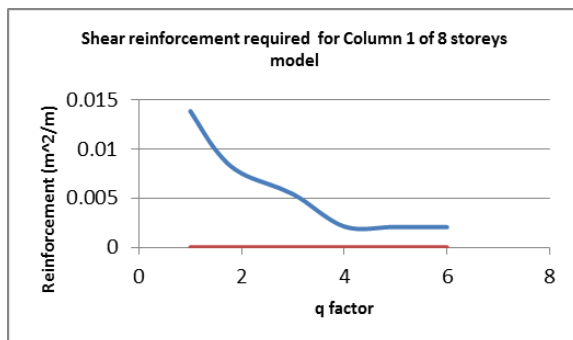
Στα σχήματα 15 και 16 φαίνονται οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό (συνδετήρες) για τα υποστυλώματα 1 και 2 του εξωτερικού πλαισίου στη διεύθυνση X-X του τριώροφου κτιρίου. Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται επίσης στα σχήματα 17 και 18 για το οκταώροφο κτίριο. Στα σχήματα αυτά με κόκκινη γραμμή δίνονται οι απαιτήσεις οπλισμού για δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) και με την μπλε γραμμή οι απαιτήσεις για το συνδυασμό κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων ($G+0.3Q+E$). Ως γνωστό οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό προκύπτουν κυρίως για λόγους περίσφιγξης του σκυροδέματος και για αποφυγή του πρόωρου λυγισμού. Και οι δύο αυτοί παράγοντες εξαρτώνται από το αξονικό φορτίο [N] και την καμπτική ροπή [M] του υποστυλώματος και ως εκ τούτου οι εικόνες των παρακάτω σχημάτων ομοιάζουν με τις αντίστοιχες εικόνων αυτών των εντατικών μεγεθών. Παρτηρούμε λοιπόν ότι όσο αυξάνει ο δείκτης συμπεριφοράς (q) μειώνονται οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό, λόγω μείωσης των εντατικών μεγεθών υπαιτιότητα της μείωσης των σεισμικών φορτίων. Για μεν το τριώροφο ο εγκάρσιο οπλισμός αυξάνει για τιμές $q < 3$ ενώ για μεγαλύτερες τιμές είναι ίδιος με αυτό που απαιτείται από τη δράση μόνον των κατακόρυφων φορτίων. Αντίθετα, για το οκταώροφο κτίριο οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό από το συνδυασμό κατακόρυφου και σεισμικού φορτίου είναι πάντοτε μεγαλύτερος από αυτό που προκύπτει μόνο από τη δράση των κατακόρυφων φορτίων. Ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μείωση της απαιτήσης του εγκάρσιου οπλισμού όσο αυξάνει ο δείκτης συμπεριφοράς (q). Ενδιάμεσες εικόνες παρατηρούνται και για τα κτίρια με ενδιάμεσο αριθμό ορόφων.



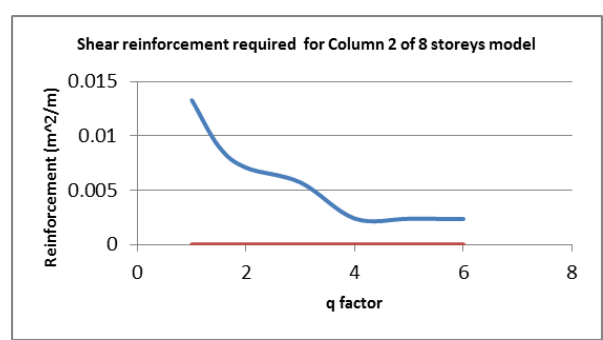
Σχ. 15 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για το υποστυλώμα 1 του τριώροφου κτιρίου



Σχ. 16 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για το υποστυλώμα 2 του τριώροφου κτιρίου



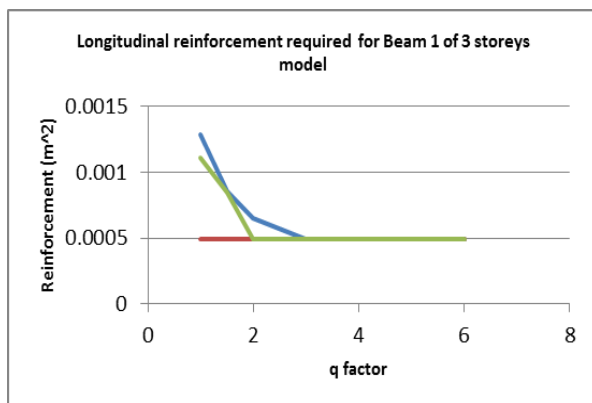
Σχ. 17 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για το υποστυλώμα 1 του οκταώροφου κτιρίου



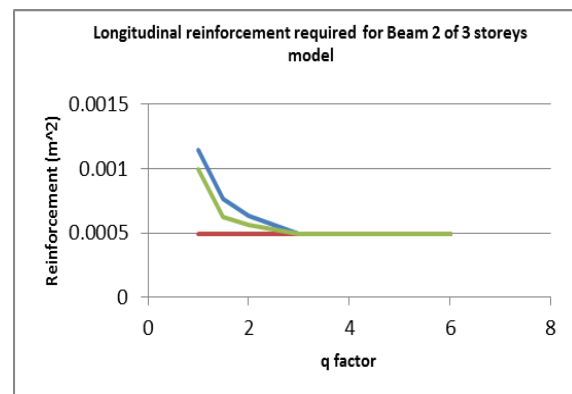
Σχ. 18 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για το υποστυλώμα 2 του οκταώροφου κτιρίου

Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για τις δοκούς

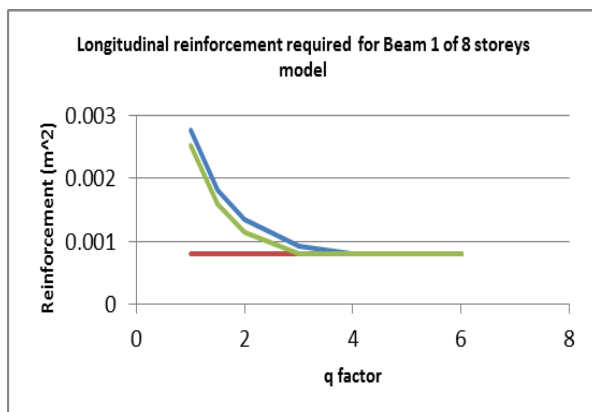
Στα σχήματα 19 και 20 φαίνονται οι απαιτήσεις σε διαμήκη οπλισμό για τις δοκούς 1 και 2 του εξωτερικού πλαισίου στη διεύθυνση X-X του τριώροφου κτιρίου. Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται επίσης στα σχήματα 21 και 22 για το οκταώροφο κτίριο. Στα σχήματα αυτά με κόκκινη γραμμή δίνονται οι απαιτήσεις οπλισμού για δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) και με την μπλε και πράσινη γραμμή οι απαιτήσεις σε διαμήκη οπλισμό στην άνω και κάτω παρειά αντίστοιχα, για συνδυασμό φόρτισης κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων ($G+0.3Q+E$). Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε παρόμοιες εικόνες με τις απαιτήσεις σε διαμήκη οπλισμό στα υποστυλώματα. Για μεν το τριώροφο κτίριο οι απαιτήσεις αυτές αυξάνουν για τιμές μικρότερες από $q=3$ ενώ για μεγαλύτερες τιμές του δείκτη συμπεριφοράς οι απαιτήσεις αυτές ταυτίζονται για κάθε περίπτωση φόρτισης. Αντίστοιχα, για το οκταώροφο κτίριο οι απαιτήσεις αυτές αυξάνουν για $q < 4$ ενώ είναι ίδιες για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης για μεγαλύτερες τιμές δείκτη συμπεριφοράς. Επιπλέον εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι από τη στατική και αντισεισμική μελέτη του οκταώροφου κτιρίου προέκυψε απαίτηση επαύξησης της διατομής αυτών των δοκών, συγκριτικά με τα κτίρια με μικρότερο αριθμό ορόφων, γι' αυτό και ο συνολικά απαιτούμενος οπλισμός στις δοκούς του οκατώροφου κτιρίου προκύπτει μεγαλύτερος από αυτών του τριώροφου, όπως φαίνεται και από τα παρακάτω σχήματα.



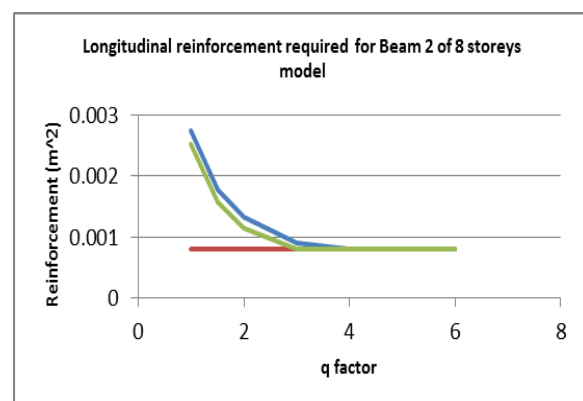
Σχ. 19 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για τη δοκό 1 του τριώροφου κτιρίου



Σχ. 20 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για τη δοκό 2 του τριώροφου κτιρίου



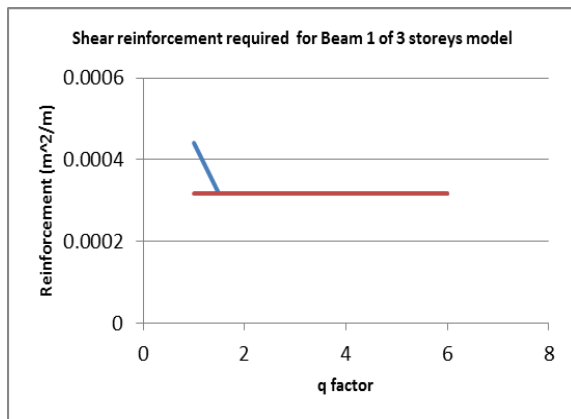
Σχ. 21 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για τη δοκό 1 του οκταώροφου κτιρίου



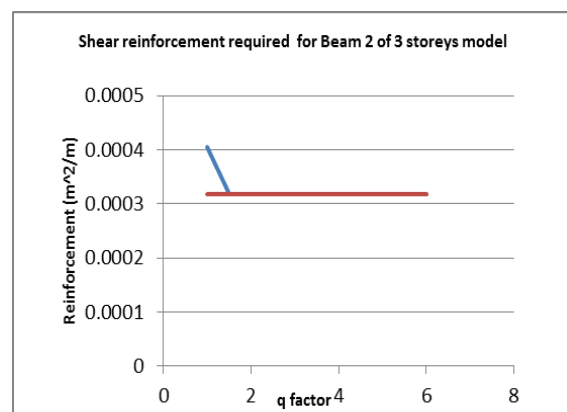
Σχ. 22 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού για τη δοκό 2 του οκταώροφου κτιρίου

Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων) για τις δοκούς

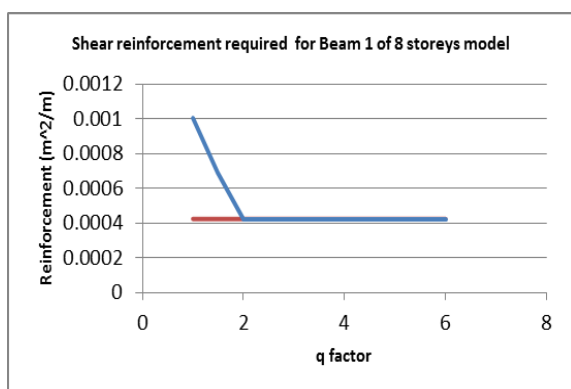
Στα σχήματα 23 και 24 φαίνονται οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό (συνδετήρες) για τις δοκούς 1 και 2 του εξωτερικού πλαισίου στη διεύθυνση X-X του τριώροφου κτιρίου. Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται επίσης στα σχήματα 25 και 26 για το οκταώροφο κτίριο. Στα σχήματα αυτά με κόκκινη γραμμή δίνονται οι απαιτήσεις οπλισμού για δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) και με την μπλε γραμμή οι απαιτήσεις για το συνδυασμό κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων ($G+0.3Q+E$). Ως γνωστό οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό στις δοκούς προκύπτουν κυρίως για επαύξηση της διατμητικής αντοχής της δοκού έναντι βεβαίως της διατμητικής έντασης [V]. Αυτή (διατμητική ένταση) προκύπτει κυρίως από τα κατακόρυφα φορτία αλλά και εν μέρει από τα σεισμικά φορτία και συνδέεται άμεσα από τις αναπτυσσόμενες ροπές κυρίως στα άκρα της δοκού. Από τα πιο κάτω σχήματα παρατηρούμε ότι οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό καθορίζονται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις από τη δράση μόνον των κατακόρυφων φορτίων. Εξαίρεση αποτελούν οι δοκοί του τριώροφου κτιρίου για $q=1.0$ του οκταώροφου κτιρίου για $q < 2.0$. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ουσιαστικά απαίτηση συνδετήρων για πολύ μεγάλα μεγέθη σεισμική φόρτισης ενώ πρακτικά και για συνήθεις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς (q) δεν προκύπτουν πρόσθετες απαιτήσεις σε συνδετήρες πέραν αυτών που προσδιορίζονται από τη δράση μόνον των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$).



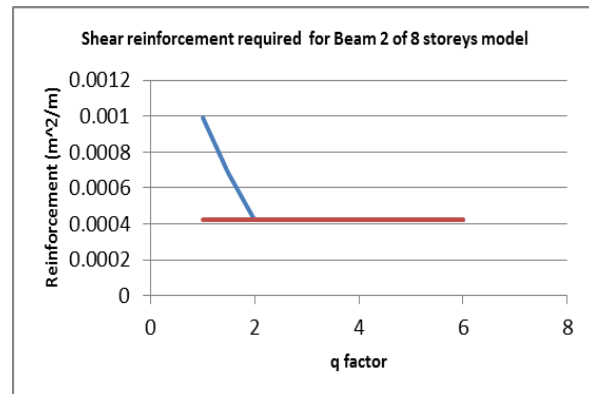
Σχ. 23 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για τη δοκό 1 του τριώροφου κτιρίου



Σχ. 24 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για τη δοκό 2 του τριώροφου κτιρίου



Σχ. 25 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για τη δοκό 1 του οκταώροφου κτιρίου



Σχ. 26 Απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού για τη δοκό 2 του οκταώροφου κτιρίου

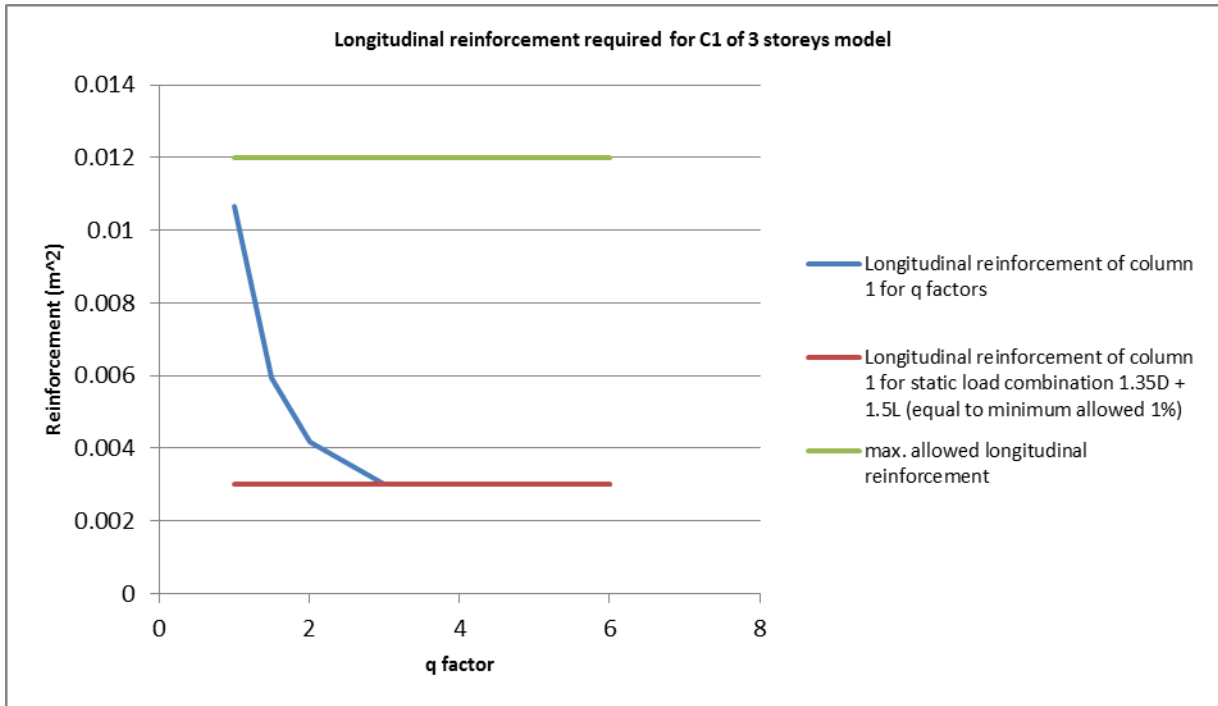
Έλεγχος και αξιολόγηση υπολογιστικών αποτελεσμάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα υπολογιστικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έχουν προκύψει από τη χρήση του προγράμματος SAP2000. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας έγιναν επιλεκτικοί έλεγχοι σε αποτελέσματα απαίτησης διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών σε υποστυλώματα και δοκούς με βάση τα εντατικά μεγέθη $[N, V \text{ \& } M]$ που έχουν προκύψει από το εν λόγω λογισμικό καθώς και τις σχετικές διατάξεις των EC2 και EC8. Οι έλεγχοι αυτοί έγιναν με το χέρι, ωστόσο όμως δεν παρουσιάζονται εδώ λόγω έλλειψης χώρου. Από τους ελέγχους αυτούς διαπιστώθηκε πολύ ικανοποιητική σύγκλιση και επιβεβαίωση της ορθότητας των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από το εν λόγω λογισμικό και παρουσιάστηκαν (υπολογιστικά αποτελέσματα) στις προηγούμενες παραγράφους υπό μορφή διαγραμμάτων.

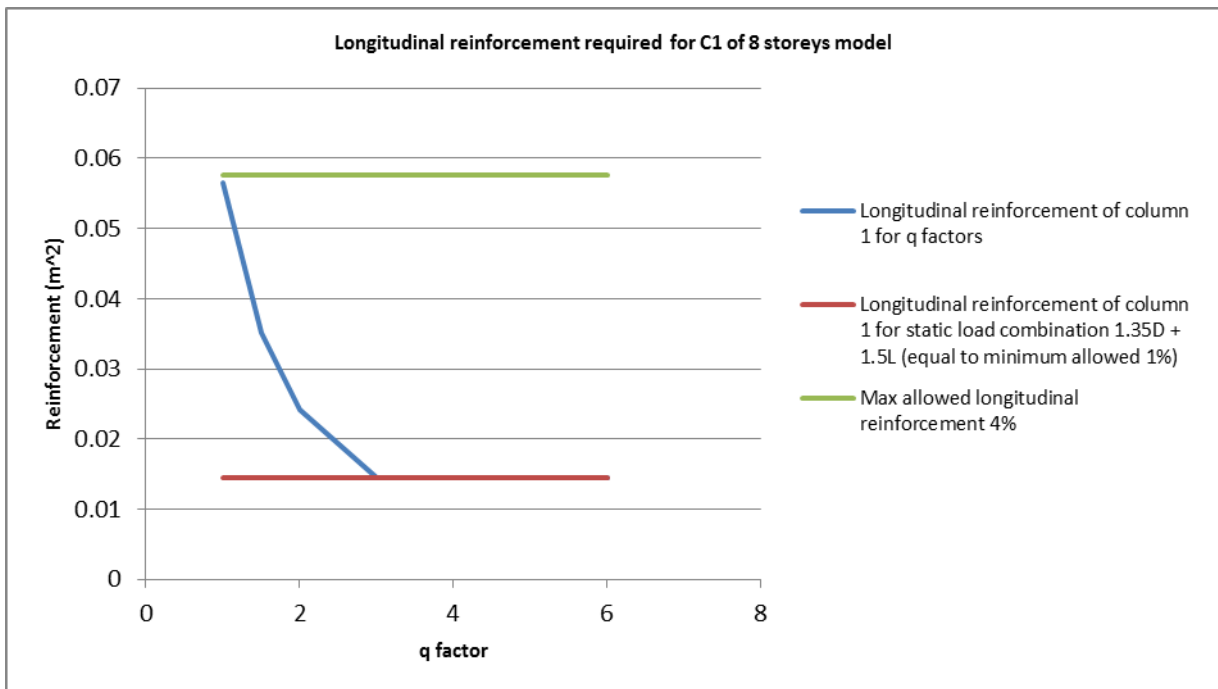
Εξ' αυτών παραθέτουμε συγκεντρωτικό πίνακα με τις διαστάσεις των υποστυλωμάτων στο ισόγειο κάθε κτιρίου που εξετάστηκε καθώς και τις μέγιστες και ελάχιστες απαιτήσεις σε διαμήκη οπλισμό (1% και 4% της διατομής του υποστυλώματος αντίστοιχα), όπως αυτές καθορίζονται στον EC8 (Πίνακας 1). Επίσης, στα σχήματα 27 και 28 φαίνονται τα αποτελέσματα απαίτησης διαμήκων οπλισμών για το υποστυλώμα 1 του τριώροφου και του οκταώροφου κτιρίου αντίστοιχα, συγκριτικά με τον ελάχιστο και μέγιστο επιτρεπόμενο οπλισμό σύμφωνα με τις διατάξεις του EC8. Παρατηρούμε ότι ο απαιτούμενος οπλισμός από τη δράση μόνο των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G + 1.5Q$) ισοδυναμεί με τον ελάχιστο επιτρεπόμενο οπλισμό (1%) και ότι σε καμία περίπτωση τα υπολογιστικά αποτελέσματα δεν υπερβαίνουν το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό (4%).

Πίνακας 1. Διαστάσεις υποστυλωμάτων και ελάχιστος απαιτούμενος και μέγιστος επιτρεπόμενος οπλισμός

	Διαστάσεις Κολώνας 1 (b*d)	Διαστάσεις Κολώνας 2 (b*d)	Ελάχιστος απαιτούμενος οπλισμός 1 % A (A=b*d)	Μέγιστος επιτρεπόμενος οπλισμός 4 % A (A=b*d)
1όροφο	60 x 50 cm	60 x 50 cm	0.003m ²	0.012m ²
2όροφο	60 x 50 cm	60 x 50 cm	0.003m ²	0.012m ²
3όροφο	60 x 50 cm	60 x 50 cm	0.003m ²	0.012m ²
4όροφο	70 x 60 cm	70 x 60 cm	0.003m ²	0.0168m ²
5όροφο	80 x 70 cm	80 x 70 cm	0.0056m ²	0.0224m ²
6όροφο	90 x 90 cm	90 x 90 cm	0.0081m ²	0.0324m ²
7όροφο	100 x 100 cm	100 x 100 cm	0.01m ²	0.04m ²
8όροφο	120 x 120 cm	120 x 120 cm	0.0144m ²	0.0576m ²



Σχ. 27 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού του υποστυλώματος 1 του τριώροφου κτιρίου συναρτήσει του συντελεστή συμπεριφοράς (q) και σύγκριση με τον ελάχιστο και μέγιστο επιτρεπόμενο οπλισμό



Σχ. 27 Απαιτήσεις διαμήκους οπλισμού του υποστυλώματος 1 του οκταώροφου κτιρίου συναρτήσει του συντελεστή συμπεριφοράς (q) και σύγκριση με τον ελάχιστο και μέγιστο επιτρεπόμενο οπλισμό

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε εκπόνηση της στατικής και αντισεισμικής μελέτης οκτώ πλαισιακών κτιρίων (μονώροφο, δώροφο, κ.λ.π. μέχρι οκταώροφο) από Ο/Σ και για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης που προβλέπονται από τους Ευρωκώδικες. Κάθε ένα από αυτά τα κτίρια εξετάστηκε για επτά διαφορετικές τιμές του δείκτη συμπεριφοράς ($q=1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6$), παρά το γεγονός ότι στον EC8.1 κεφ. 5 προβλέπονται συγκεκριμένες τιμές αυτού του δείκτη ανάλογα με το προεπιλεγόμενο επίπεδο πλαστιμότητας που επιθυμούμε να διαθέτει η κατασκευή (Ductility Class Medium (DCM) ή Ductility Class High (DCH)). Επίσης, στον EC8.1 προβλέπεται κατώτερη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $q=1.5$. Πάρα ταύτα, στην παρούσα εργασία τα εν λόγω κτίρια εξετάστηκαν και για τιμή $q=1.0$. Έτσι λοιπόν, τελικώς εξετάστηκαν 56 διαφορετικές περιπτώσεις πλαισιακών κτιρίων (8 κτίρια X 7 δείκτες συμπεριφοράς) παρέχοντας μια πληθώρα αποτελεσμάτων ώστε μέσα από την αξιολόγησή τους να μπορούν να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα. Όλες οι υπολογιστικές διερευνήσεις έγιναν με το πρόγραμμα SAP2000 ενώ σ' αυτή την εργασία, λόγω περιορισμένου χώρου, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα απαιτήσεων σε διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό μόνο για δύο υποστυλώματα και δύο δοκούς στο επίπεδο του ισογείου, όπου αναμένεται και η εκδήλωση των δυσμενέστερων καταστάσεων από άποψη σεισμικής καταπόνησης.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας μπορούν να διατυπωθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η χρήση μεγάλων τιμών του δείκτη συμπεριφοράς (q) επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το επίπεδο των σεισμικών φορτίσεων που λαμβάνονται υπόψη κατά την αντισεισμική μελέτη με αποτέλεσμα να οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα σεισμικών φορτίων.
2. Η μείωση των τιμών των κατακόρυφων φορτίων που λαμβάνονται υπόψη κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό ($G+0.3Q$) σε συνδυασμό με τα σχετικά χαμηλά επίπεδα σεισμικών φορτίων που προκύπτουν για μεγάλες τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς (q), έδειξε ότι δεν δημιουργούνται μεγάλα εντατικά μεγέθη τα οποία να επιβάλλουν πρόσθετες απαιτήσεις σε οπλισμούς έναντι αυτών που απαιτούνται από το συνδυασμό της δράσης μόνον των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G + 1.5Q$).

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να τεκμηριωθούν λεπτομερώς με βάση τις παρακάτω επισημάνσεις οι οποίες προκύπτουν από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας:

- Για τα κτίρια μέχρι και τρεις ορόφους δεν απαιτήθηκε επαύξηση στις διαστάσεις των δομικών στοιχείων σε αντίθεση για τα κτίρια με περισσότερους ορόφους.
- Ο απαιτούμενος διαμήκης οπλισμός για τα υποστυλώματα από τη δράση μόνον των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$) βρέθηκε να είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος (1% της επιφάνειας της διατομής του υποστυλώματος).
- Σχεδόν σε όλα τα κτίρια, για τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς μεγαλύτερου από 3 ($q>3$) (δηλ. για χαμηλά επίπεδα σεισμικής φόρτισης) δεν δημιουργούνται πρόσθετες απαιτήσεις σε διαμήκεις οπλισμούς στα υποστυλώματα, πέραν αυτών που προκύπτουν από το συνδυασμό με την δράση μόνον των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$).
- Για χαμηλότερα επίπεδα δείκτη συμπεριφοράς ($q<3$), επαυξάνονται οι απαιτήσεις σε διαμήκεις οπλισμούς, λόγω επαυξημένων σεισμικών φορτίων.

- Οι απαιτήσεις σε εγκάρσιους οπλισμούς (συνδετήρες) βρέθηκε ότι για τα χαμηλά κτίρια (κάτω από 3 ορόφους) με δείκτη συμπεριφοράς μεγαλύτερο από 3 ($q > 3$) δεν απαιτούνται πρόσθετες απαιτήσεις από αυτές που προκύπτουν από τη δράση μόνον των κατακόρυφων φορτίων. Αντίθετα, για χαμηλότερες τιμές του δείκτη συμπεριφοράς (επαύξηση σεισμικών φορτίων) βρέθηκε ότι απαιτούνται επαυξημένα ποσοστά σε εγκάρσιο οπλισμό (συνδετήρες).
- Στα πολυώροφα κτίρια (άνω των 3 ορόφων) βρέθηκε ότι οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό καθορίζονταν από το συνδυασμό κατακόρυφων και σεισμικών φορτίσεων ($G+0.3Q+E$). Ωστόσο οι απαιτήσεις αυτές μειώνονταν όσο αύξανε ο η τιμή του δείκτη συμπεριφοράς δηλ. μειώνονταν οι τιμές των σεισμικών δυνάμεων.
- Αναφορικά με τις δοκούς βρέθηκε ότι και αυτές υπόκεινται στα ίδια συμπεράσματα με τα υποστυλώματα όσον αφορά το διαμήκη οπλισμό, ενώ οι απαιτήσεις σε εγκάρσιο οπλισμό (συνδετήρες) καθορίζονταν σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το συνδυασμό της δράσης μόνον των κατακόρυφων φορτίων ($1.35G+1.5Q$).

Τα πιο πάνω συμπεράσματα είναι ενδεικτικά και ισχύουν μόνον για την περίπτωση των πλαισιακών συστημάτων που εξετάστηκαν σ' αυτή την εργασία. Ωστόσο, δημιούργησαν αρκετούς προβληματισμούς αναφορικά με τα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν από μια αντισεισμική μελέτη με βάση του Ευρωκώδικες και κατά πόσο τα αποτελέσματα αυτά καλύπτουν τους επιδιωκόμενους στόχους που τίθενται ευθύς εξ' αρχής κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων από Ο/Σ. Για τους λόγους αυτούς η παρούσα έρευνα έχει επεκταθεί και βρίσκεται σε εξέλιξη, φιλοδοξώντας να καλύψει τους παρακάτω στόχους:

1. Επέκταση του αντικειμένου της παρούσας έρευνας και σε άλλους τύπους δομικών συστημάτων (σύστημα τοιχωμάτων, μεικτό σύστημα).
2. Έλεγχος επιτελεστικότητας (performance) κτιρίων από Ο/Σ που έχουν σχεδιαστεί με βάση τους Ευρωκώδικες ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον αυτά (κτίρια) ικανοποιούν τους επιδιωκόμενους στόχους οι οποίοι τίθενται ευθύς εξ' αρχής κατά το στάδιο του αντισεισμικού σχεδιασμού.
3. Για τη γενίκευση των συμπερασμάτων αυτής της προσπάθειας επιδιώκεται η κάλυψη όλων των πιθανών συνδυασμών σεισμικών φορτίων (όλες τις κατηγορίες εδάφους, όλες τις σεισμικές ζώνες της Κύπρου και όλους τους συντελεστές σπουδαιότητας ($\gamma=1.0$, $\gamma=1.2$, $\gamma=1.4$)). Αναφορικά με τις μέγιστες επιταχύνσεις σχεδιασμού αυτές έχουν επεκταθεί πολύ πιο πέρα από αυτές που ισχύουν στον κυπριακό χώρο φτάνοντας μέχρι και το $0.4g$ ώστε να καλύψουν και άλλες περιοχές του ευρωπαϊκού χώρου.