

## **Το πρόβλημα της οικονομικότητας των δομικών στοιχείων και συστημάτων κατά την διαστασιολόγηση των φερόντων οργανισμών πολυώροφων οικοδομών**

**Θεόδωρος Χρυσανίδης**

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., MSc DIC, theodoros\_gr@yahoo.com*

**Βασίλειος Πανοσκάλλτης**

*Καθηγητής Α.Π.Θ., vranoska@civil.duth.gr*

**Κωνσταντίνος Ψάρρας**

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., MSc, ko\_psar@yahoo.gr*

**Ιωάννης Τέγος**

*Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ., itegos@civil.auth.gr*

### **1. Εισαγωγή**

Η διαστασιολόγηση των φερόντων συστημάτων των κατασκευών διέπεται από ένα μεγάλο φάσμα κριτηρίων συμμόρφωσης, τα οποία σχετίζονται με την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα, την οικονομία, την αισθητική, την ανθεκτικότητα, την κατασκευαστική ευκολία, τις ανάγκες συντήρησης, κλπ.. Ειδικότερα, όσον αφορά τους φέροντες οργανισμούς αντισεισμικών οικοδομών το θέμα της οικονομίας επηρεάζεται κυρίως από τη βασική ιδέα του σχεδιασμού τους, δηλαδή την επιλογή του καλύτερου φέροντος οργανισμού για τα κατά περίπτωση δεδομένα. Από τα μέλη για τα οποία η ομάδα δράσεων με τον σεισμό αποβαίνει κρίσιμη ως προς την διαστασιολόγησή τους, όπως π.χ. τα τοιχώματα, οι στύλοι, οι δοκοί και η θεμελίωση, η οικονομικότητα αποτελεί ένα ενδιαφέρον πρόβλημα που αφορά τους μελετητές και το οποίο μέχρι σήμερα δεν έχει εξεταστεί συστηματικά. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται αναλυτικώς διάφορες περιπτώσεις διατομών δομικών στοιχείων και θεμελίωσεων. Το βασικότερο συμπέρασμα της εργασίας αποτελεί ότι η οικονομικότητα των επιλογών συνδέεται στενά με την παράμετρο του μηχανικού ποσοστού οπλισμού των δομικών στοιχείων. Ωστόσο τα εξεταζόμενα στοιχεία δεν παρουσιάζουν όλα τον ίδιο βαθμό δεκτικότητας αναφορικάς με την επιδίωξη της οικονομικότητας και κατά περίπτωση είναι δυνατόν, άλλα κριτήρια, όπως της αισθητικής, της λειτουργικότητας, ή της ασφαλείας, να υπερισχύουν του κριτηρίου της οικονομίας.

### **2. Παράγοντες σχεδιασμού φερόντων οργανισμών οικοδομών**

Ο σχεδιασμός των φερόντων οργανισμών οικοδομών διέπεται, κυρίως, από την προέχουσα λειτουργία τους που είναι η ικανότητά τους να φέρουν τα φορτία, κατακόρυφα και οριζόντια (βαρύτητας, σεισμός). Η επιλογή του βέλτιστου συστήματος επηρεάζεται από τον προηγούμενο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και από τις μεθόδους κατασκευής που θα εφαρμοστούν. Ωστόσο, η θεώρηση της σεισμικής συμπεριφοράς του έργου αποδεικνύεται, ενίοτε, πολύ συχνά καθοριστική για το σύνολο του φέροντος οργανισμού και κρίσιμη για κάποια από τα εντόνως καταπονούμενα από τον σεισμό μέλη του.

Είναι γνωστόν ότι οι μελέτες των οικοδομών, όπως και όλων των κατασκευών πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις αναφορικά με την χρήση τους, αλλά και κατασκευαστικές σχετικές με τον τρόπο, που θα κατασκευαστούν. Πέρα δε από αυτές, οι βασικοί παράγοντες του σχεδιασμού τους είναι: (α) Η ασφάλεια, (β) η λειτουργικότητα, (γ) η οικονομία (κατασκευής και συντήρησης) και (δ) η αισθητική.

Τα κριτήρια, που αναφέρονται στην ασφάλεια και τη λειτουργικότητα, καθορίζονται από τους κανονισμούς, οι οποίοι εκφράζουν τις σύγχρονες απόψεις σχετικά με τον σχεδιασμό των φερόντων οργανισμών οικοδομών. Η δομική ασφάλεια και η λειτουργικότητα αποτελούν αντικείμενο της δουλειάς του Πολιτικού Μηχανικού, ο οποίος εργάζεται εφαρμόζοντας σωστά αρχές, που είναι γενικώς καθιερωμένες και αποδεκτές.

Το κόστος μιας συγκεκριμένης οικοδομής μπορεί να προσδιορισθεί με βάση την εμπειρία και σύμφωνα με τις μελέτες αντίστοιχων περιπτώσεων. Οπωσδήποτε το κόστος εξαρτάται από τη βασική ιδέα της μελέτης, δηλαδή το φέρον σύστημα που έχει επιλεγεί. Η βασική ιδέα του σχεδιασμού περιλαμβάνει όχι μόνον τη γενική ιδέα της συνολικής κατασκευής, αλλά επίσης την ιδέα για τα δομικά μέλη και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Υπ' αυτήν την έννοια η βασική ιδέα σχεδιασμού αποτελεί το πιο σημαντικό, το πιο ενδιαφέρον, αλλά και το πιο δημιουργικό μέρος της δουλειάς του Πολιτικού Μηχανικού. Μια εύστοχη βασική ιδέα ελαχιστοποιεί τις δυσκολίες τόσο στην εκπόνηση της μελέτης όσο και στην κατασκευή. Δεδομένου μάλιστα ότι σήμερα είναι δυνατόν να υπολογιστεί και να κατασκευαστεί οτιδήποτε, δεν είναι λίγοι εκείνοι που καταλήγουν στην λανθασμένη άποψη, ότι το πλήθος των προβλημάτων, που εξετάζονται, εξασφαλίζουν την αρτιότητα του σχεδιασμού. Πλην της βασικής ιδέας, όμως, υπάρχουν και οι λεπτομέρειες, οι οποίες θεωρούμενες μεμονωμένες, η κάθε μια συγκρινόμενη με το συνολικό αποτέλεσμα δίνει την εντύπωση του επουσιώδους.

Ωστόσο, το αποτέλεσμα της ορθής αντιμετώπισης ενός μεγάλου μέρους του φάσματος των λεπτομερειών κατά τον Μιχαήλ Άγγελο, δεν αποτελεί λεπτομέρεια αλλά άγει προς την τελειότητα. Μεταξύ των λεπτομερειών εντάσσονται και εκείνη της επιλογής των διατομών με βάση το κριτήριο οικονομικότητας, όταν αυτό είναι συμβατό με τους υπόλοιπους παράγοντες σχεδιασμού και, κυρίως, την ασφάλεια.

Δεν πρέπει πάντως να παραβλέπεται, ότι η τοπική οικονομικότητα δεν εξυπηρετεί πάντοτε και τη συνολική οικονομικότητα της κατασκευής εξαιτίας της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων υπό τη σεισμική φόρτιση. Π.χ. τυχόν χάριν της τοπικής οικονομίας αύξηση των διαστάσεων της διατομής ενός τοιχώματος ανακουφίζει εν γένει τα υπόλοιπα μέλη του συστήματος, ωστόσο διά της μείωσης της ιδιοπεριόδου του συστήματος που προκαλεί, παρουσιάζει δυσμενή αντίκτυπο στις σεισμικές δράσεις, τις οποίες αυξάνει, ενώ παράλληλα επιδεινώνει, ενδεχομένως, τις στρεπτικές ροπές του σεισμού και ίσως την κανονικότητα του συστήματος.

### 3. Κορμοί στύλων κυκλικής διατομής

Ειδικότερα καθόσον αφορά την οικονομικότητα, είναι χρήσιμο να παρακολουθήσουμε σε ένα παράδειγμα την επιρροή της ακτίνας  $r$  της διατομής επί της δαπάνης ενός μέτρου ύψους του βάρου.

Δίνονται: Σκυρόδεμα C30/37 και Χάλυβας S500

Τιμές μονάδος: Σκυρόδεμα 100€/m<sup>3</sup> και Χάλυβας 0,73€/kgf

Η συνολική δαπάνη ανά μέτρο ύψους είναι:

$$K=100 \cdot \pi \cdot r^2 + 7,85 \cdot 0,73 \cdot 10^2 \cdot A_{st} \cdot 10^3$$

όπου:

$r$ : η ακτίνα

$A_{st}$ : η ολική διατομή των διαμήκων ράβδων της συμμετρικώς οπλισμένης διατομής

Η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$K = 100 \cdot \pi \cdot r^2 + 7,85 \cdot 0,73 \cdot 10^{-1} \cdot \pi \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \omega \cdot r^2 \cdot 10^4$$

και τελικώς:

$$K = \left( 100 + 5730 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \omega \right) \cdot \pi \cdot r^2$$

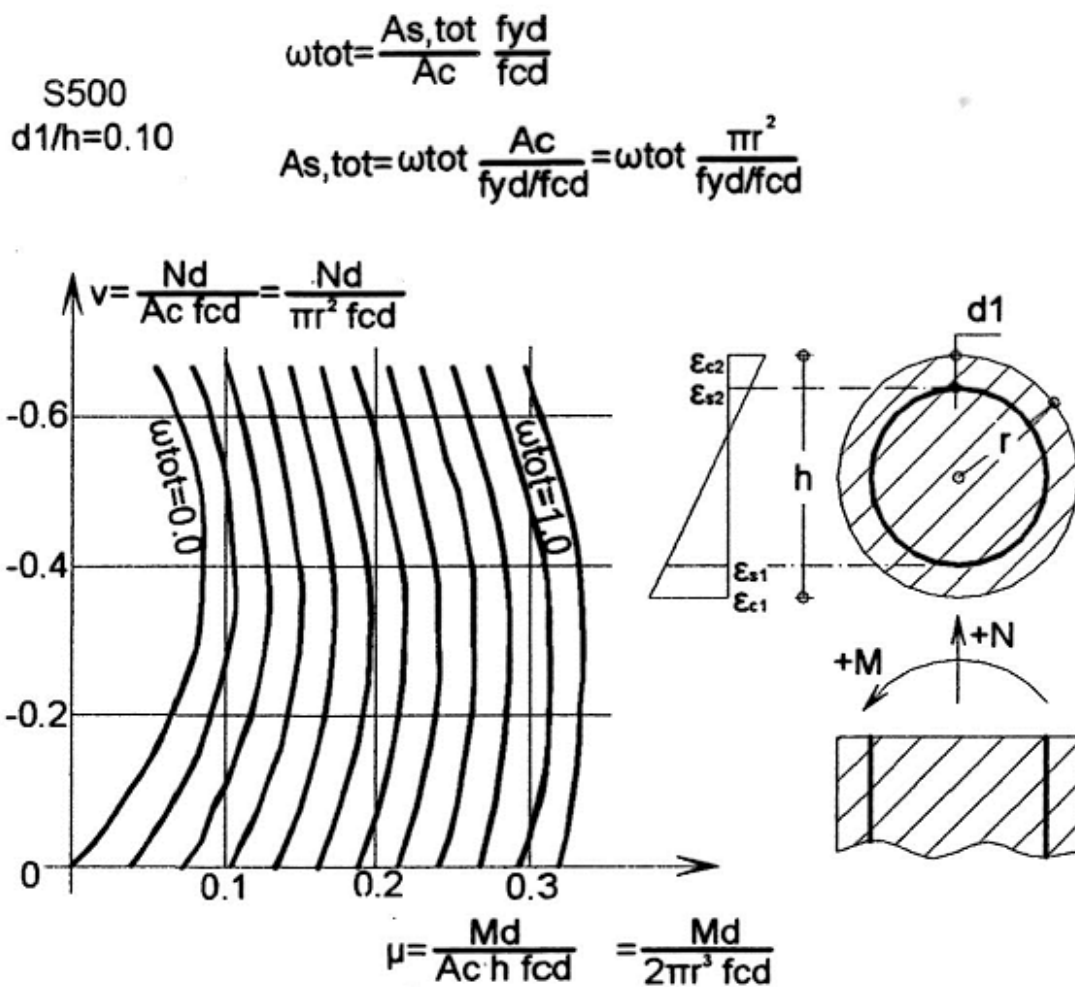
όπου:

$f_{cd}$ : η υπολογιστική αντοχή σκυροδέματος

$f_{yd}$ : η υπολογιστική αντοχή χάλυβα

$\omega$ : το μηχανικό ποσοστό οπλισμού της κυκλικής διατομής

Κάθε επιλογή τιμής για το  $r$  καθορίζει και την τιμή του « $\omega$ » καθώς τα δυο μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους μέσω των ανηγμένων υπολογιστικών μεγεθών ορθής εντάσεως (Σχήμα 1).



Σχ. 1 Καμπύλες αλληλεπίδρασης ροπής – αξονικού φορτίου (Κυκλικά υποστυλώματα)

Ο Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000) δίνει ως όρια για τις τιμές ποσοστού οπλισμού  $\rho_i$  τις τιμές 0,01 και 0,04:

$$0,01 \leq \rho_i \leq 0,04$$

Οπότε για το σκυρόδεμα C30/37 με  $f_{yd}/f_{cd}=21,75$  προκύπτουν τα όρια του  $\omega$ :

$$0,22 \leq \omega \leq 0,87$$

Μία προσομοίωση των καμπυλών της χρήσιμης περιοχής του διαγράμματος του Σχήματος 1 με παραβολές δευτέρου βαθμού απέφερε την παρακάτω αναλυτική έκφραση:

$$\mu = 0,09 + 0,22 \cdot \omega - \left[ 0,16 + 0,54 \cdot (1 - \omega)^2 \right] \cdot \nu - 0,33 \cdot \nu^2$$

όπου:

$$\mu = \frac{M_d}{2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot f_{cd}}$$

$$\nu = \frac{N_d}{\pi \cdot r^2 \cdot f_{cd}}$$

Μια έκφραση της συνάρτησης  $r=r(\omega)$  μπορεί να θεωρηθεί η εξής:

$$r^3 = \frac{M_d}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot f_{cd}}$$

Η οποία για οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή του « $\omega$ » μπορεί να δώσει διά δοκιμών την ακτίνα  $r$  της διατομής.

Ωστόσο η παραπάνω σχέση για τις συνήθεις τιμές  $0,20 < \nu < 0,56$  μπορεί για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης να απλοποιηθεί:

$$\mu = 0,09 + 0,22 \cdot \omega$$

Σημειωτέον ότι η ανωτέρω απλοποίηση ευρίσκεται προς την πλευρά της ασφαλείας ως προς το ζητούμενο να αποδειχθεί. Καθόσον τα αποτελέσματά της σχετίζονται με τις περιοχές των κορυφών των «παραβολών». Στις περιοχές τις εκτός του τεθέντος διαστήματος για τα « $\nu$ » ισχύουν για τα « $\mu$ » μικρότερες τιμές από αυτές που προκύπτουν για την ίδια τιμή του « $\omega$ » από την προσεγγιστική σχέση και συνεπώς μικρότερο κόστος.

Αντικαθιστώντας στην έκφραση του κόστους  $K$  την τιμή του « $\omega$ » με:

$$\omega = 4,55 \cdot \mu - 0,41$$

προκύπτει ότι:

$$K = 1200 \cdot \mu - 8 \cdot \pi \cdot r^2$$

Και επειδή  $\mu > 0,10$ :

$$K \approx 1200 \cdot \mu \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{600 \cdot M_d}{r \cdot f_{cd}}$$

Από την τελευταία συμπεραίνεται ότι το κόστος είναι αντιστρόφως ανάλογο της ακτίνας της διατομής ή ότι το ελάχιστο κόστος προκύπτει για την ελάχιστη τιμή του μηχανικού ποσοστού οπλισμού.

### Παράδειγμα

Για δεδομένα  $M_d=20.000$  kNm,  $N_d=12.000$  kN και C30/37 και  $\omega=0,22$  προκύπτει με δοκιμές  $r=1,085$  m και  $K=584$  €/m. Ενώ για  $r=0,90$  m προκύπτουν  $\nu=0,19$ ,  $\mu=0,16$ ,  $\omega=0,35$  και  $K=604$ €/m και για  $r=0,80$  m προκύπτουν  $\nu=0,30$ ,  $\mu=0,31$ ,  $\omega=1,00$  και  $K=730$ €/m

#### 4. Κορμοί στύλων ορθογωνικής διατομής

Η σχέση του κόστους στην εν λόγω περίπτωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$K = \left( 100 + 5730 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \omega \right) \cdot b \cdot h$$

όπου  $b$  και  $h$  είναι οι διαστάσεις της διατομής.

Στο Σχήμα 2 δίνεται γνωστό διάγραμμα της βιβλιογραφίας. Με προσομοίωση των καμπυλών με παραβολές δευτέρου βαθμού προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\mu = 0,10 + 0,40 \cdot \omega - 0,72 \cdot 0,38 - v^2 \quad \text{και} \quad \omega = 2,50 \cdot \mu - 0,25 + 1,80 \cdot 0,38 - v^2$$

Αντικαθιστώντας το  $\omega$  στην εξίσωση που δίνει το  $K$  προκύπτει ότι:

$$K = 100 \cdot b \cdot h + 0,033 \cdot \frac{M_d}{h} - 0,018 \cdot N_d$$

Το κόστος ελαχιστοποιείται για:

$$\frac{dK}{dh} = 100 \cdot b - 0,033 \cdot \frac{M_d}{h^2}$$

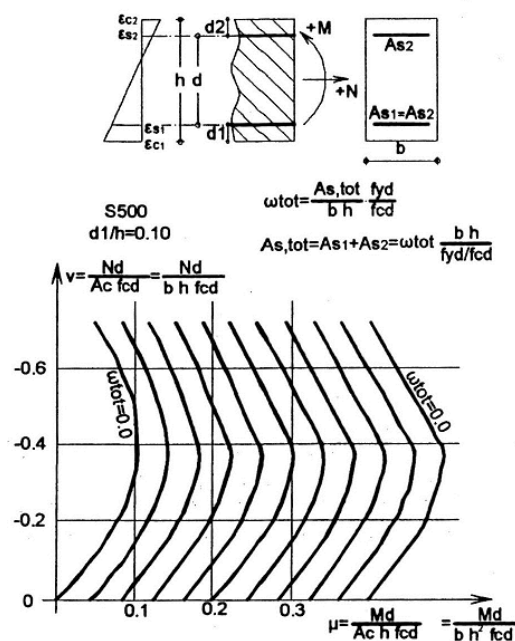
Έτσι το οικονομικό ύψος  $h$  προκύπτει ότι είναι ίσο με:

$$h = 0,018 \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}}$$

Αυτή η τιμή για το σκυρόδεμα C30/37 αντιστοιχεί σε ανηγμένη ροπή:

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = 0,154$$

η οποία αντιστοιχεί, σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχ. 2 και για συνήθεις τιμές του « $v$ », σε τιμές του  $\omega$  που είναι μικρότερες από τις ελάχιστες.



Σχ. 2 Καμπύλες αλληλεπίδρασης ροπής – αξονικού φορτίου (Ορθογωνικά υποστρώματα)

## 5. Πλάκες και δοκοί

Η γενική σχέση του κόστους γράφεται:

$$\kappa = \left( 100 + 5730 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \omega \right) \cdot h \quad \text{σε } \text{€/m}^2$$

Επειδή:

$$\frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \omega = \rho = \frac{m_d}{0,8 \cdot h \cdot f_{yd} \cdot 0,9 \cdot h} = \frac{m_d}{0,72 \cdot h^2 \cdot f_{yd}}$$

προκύπτει:

$$\kappa = 100 \cdot h + 5730 \cdot \frac{m_d}{0,72 \cdot f_{yd} \cdot h}$$

Η ελαχιστοποίηση προκύπτει για:

$$\frac{d\kappa}{dh} = 100 - 5730 \cdot \frac{m_d}{0,72 \cdot f_{yd} \cdot h^2} = 0$$

Το οικονομικό ύψος  $h$  είναι:

$$h = 0,0135 \cdot \sqrt{m_d}$$

Τιμή που για ποιότητα σκυροδέματος C30/37 αντιστοιχεί σε ανηγμένη ροπή:

$$\mu = \frac{1}{0,81 \cdot 0,0135^2 \cdot f_{cd}} = 0,34 > \mu_{\min} = 0,315 \quad \text{για } S500$$

Επομένως το πάχος της πλάκας θα πρέπει να αυξηθεί σε:

$$h = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_d}{f_{cd}}}$$

Το κριτήριο οικονομικότητας που αποδίδεται στην προκειμένη περίπτωση από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι δεν είναι κρίσιμο, καθόσον το κριτήριο αποδεκτών παραμορφώσεων ισχύει για πλάκες και δοκούς ανωδομών, ενώ το κριτήριο ασφαλείας υπερισχύει ως εκφράζον την απαίτηση έναντι διατρήσεως στις πλάκες είτε μεμονωμένων πεδύλων, είτε γενικών κοιτοστρώσεων.

## 6. Θεμελιώσεις

### 6.1. Γενικά

Η πλέον ποιοτική περίπτωση θεμελίωσης των πολυώροφων κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι η θεμελίωση με πλάκα γενικής κοιτόστρωσης. Ο λόγος για τον οποίον προτιμάται αυτός ο τύπος θεμελίωσης, και παρά την αυξημένη κατανάλωση υλικών, είναι η ταχύτητα της κατασκευής και κατά συνέπεια η μείωση του κόστους μέσω της μείωσης του κόστους των εργατικών, καθώς και το μη απαραίτητο της κατασκευής πλάκας δαπέδου υπογείου. Σε εδάφη μάλιστα χαμηλής ποιότητας, η λύση αυτή αποτελεί μονόδρομο, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις αυξημένες τιμές των φορτίων που δέχεται η θεμελίωση σε πολυώροφα κτήρια. Οι υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται στην πλάκα γενικής κοιτόστρωσης στην περίπτωση των αραιών υποστυλωμάτων οδηγούν σε αύξηση του πάχους, και κατά συνέπεια του κόστους. Μολονότι μία πλάκα μειωμένου πάχους οδηγεί σε μεγάλα ποσοστά οπλισμού, η λύση αυτή οδηγεί σε μειωμένο κόστος (Gavaise et al., 2005). Ένας τρόπος μείωσης του πάχους της πλάκας στην περίπτωση των πολύ αραιών υποστυλωμάτων είναι η εφαρμογή προέντασης. Στην παρούσα εξετάζεται η λύση τόσο του οπλισμένου όσο και του προεντεταμένου σκυροδέματος σε

πλάκες γενικών κοιτοστρώσεων. Η μείωση του πάχους οδηγεί σε κατασκευή αντιστρόφων μυκήτων στη θεμελίωση, στις θέσεις των φορτίων των στύλων, προς αποφυγή του κινδύνου διατρήσεως. Σημειώνεται ότι η παρουσία των αντίστροφων μυκήτων προσφέρει λειτουργικά πλεονεκτήματα, ενώ ο οπλισμός διατρήσεως στις εν λόγω θέσεις λειτουργεί και ως οπλισμός αναρτήσεως.

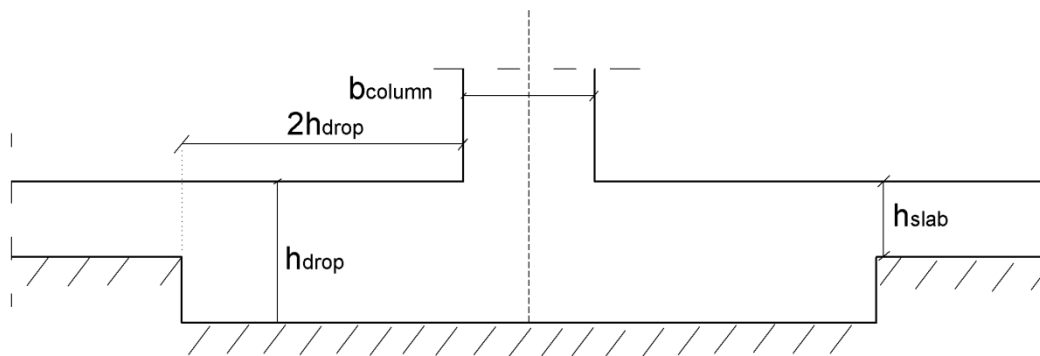
Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των θεμελιώσεων, εξετάστηκαν διάφορες παραλλαγές ενός δεκαώροφου χωρικού συστήματος. Κύριες παράμετροι της έρευνας αποτέλεσαν η ύπαρξη του υπογείου, η ύπαρξη περιμετρικού προβόλου στη θεμελίωση πλάτους 1.0 m στην πλάκα γενικής κοιτόστρωσης και το πάχος της πλάκας και των αντίστροφων μυκήτων. Βασική παράμετρος υπήρξε το μέγεθος των ανοιγμάτων, ήτοι της πυκνότητας του κανάβου των στύλων.

## 6.2. Περιγραφή κατασκευής

Η προς εξέταση κατασκευή είναι τετραγωνικής κάτοψης με πλευρά μήκους 20.0 m. Αποτελείται από ισόγειο ύψους 4.5 m και εννέα ορόφους ύψους 3.0 m έκαστος. Το κτήριο δεν διαθέτει δοκούς στην ανωδομή, και οι πλάκες της είναι μυκητοειδείς.

Για τη διαμόρφωση του πλάτους των αντιστρόφων μυκήτων, επιλέγεται αυτό να εκτείνεται σε απόσταση  $2h$  από την παρειά του υποστυλώματος, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος διατρήσεως.

Εξετάστηκαν σε 8 παραλλαγές εκάστη περιπτώσεις κανάβων υποστυλωμάτων 5,0x5,0 (Α), 10,0x5,0, 10,0x10,0 (Β) και 20,0x20,0 (Γ) (Πίνακας 1).

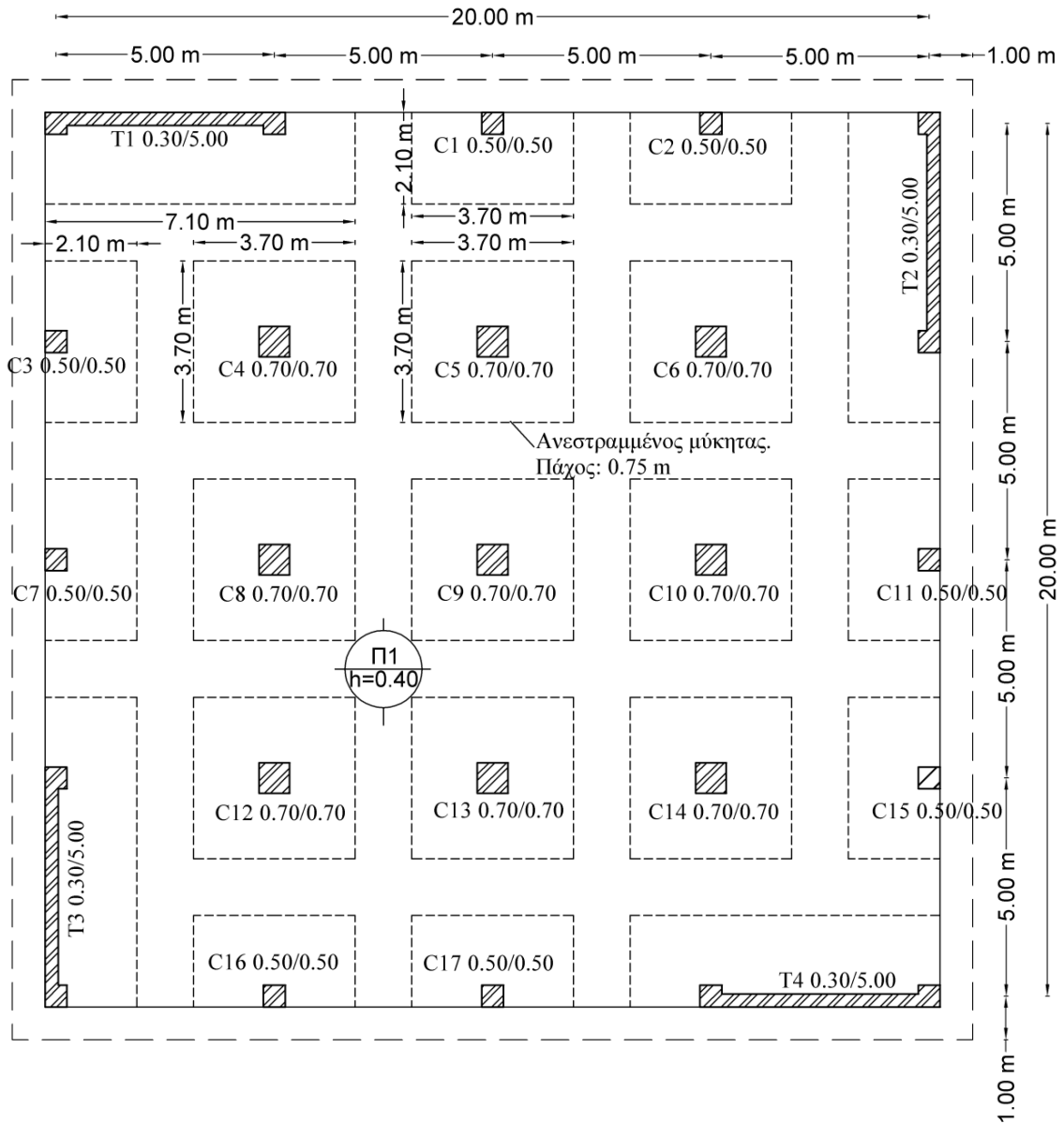


Σχ. 3 Διαστάσεις αντίστροφου μύκητα στη θεμελίωση πλάκας γενικής κοιτόστρωσης. Πάχη πλακών/μυκήτων: 0,40/0,35 (Α), 0,40/0,60 (Β) και 0,50/1,00 (Γ).

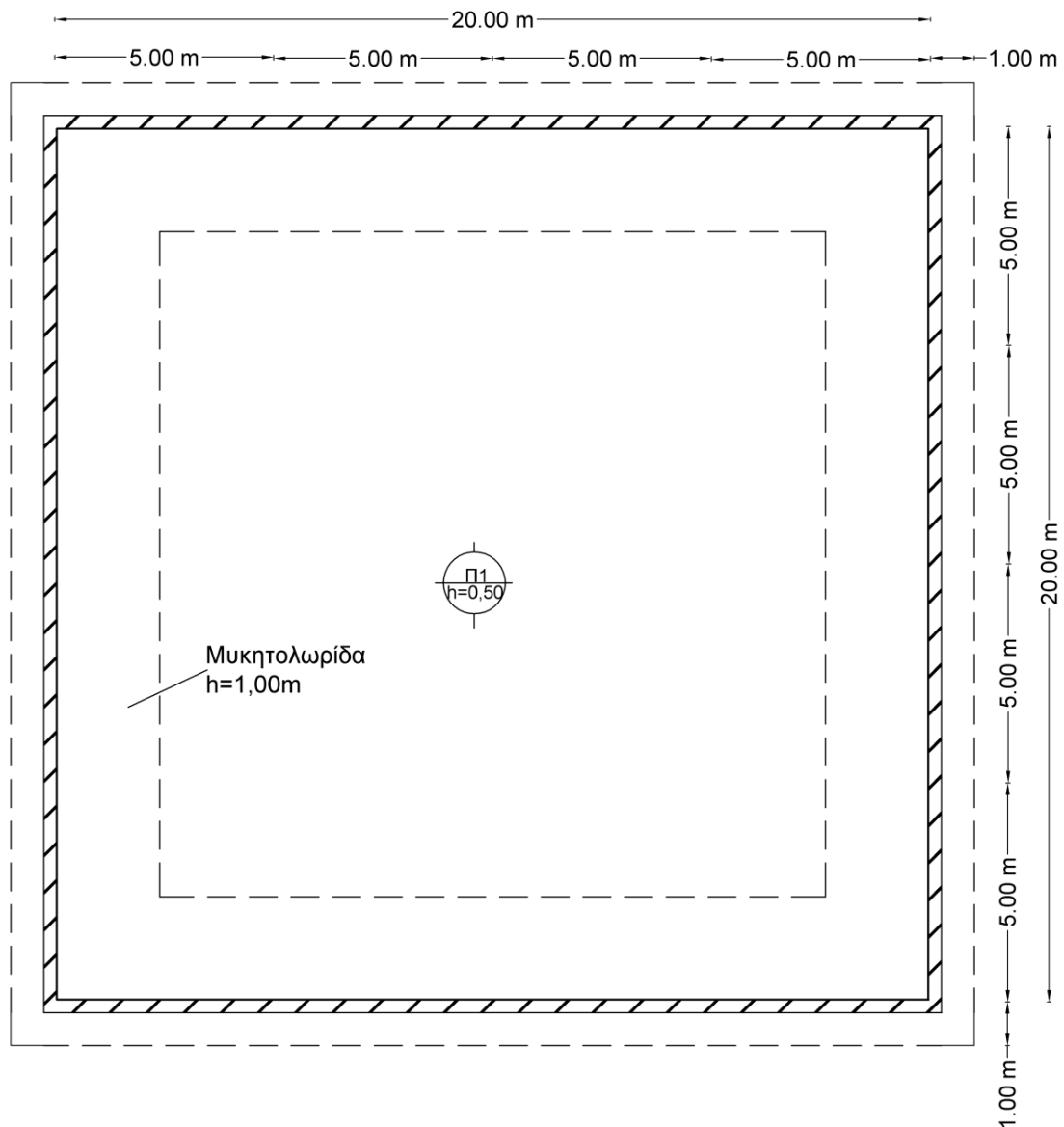
Πίνακας 1 Περιπτώσεις γενικών κοιτοστρώσεων που εξετάστηκαν

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ	$h_{\text{πλάκας}}$ (m)	$h_{\text{πλάκας+μύκητα}}$ (m)	Υπόγειο	Πρόβολος
A1	4	0,40	0,75	ΝΑΙ	ΝΑΙ
A2	4	0,40	0,75	ΟΧΙ	ΝΑΙ
A3	4	0,20	0,75	ΝΑΙ	ΝΑΙ
A4	4	0,20	0,75	ΟΧΙ	ΝΑΙ
A5	4	0,40	0,75	ΝΑΙ	ΟΧΙ
A6	4	0,40	0,75	ΟΧΙ	ΟΧΙ
A7	4	0,20	0,75	ΝΑΙ	ΟΧΙ
A8	4	0,20	0,75	ΟΧΙ	ΟΧΙ
B1	2	0,40	1,00	ΝΑΙ	ΝΑΙ
B2	2	0,40	1,00	ΟΧΙ	ΝΑΙ
B3	2	0,20	1,00	ΝΑΙ	ΝΑΙ
B4	2	0,20	1,00	ΟΧΙ	ΝΑΙ
B5	2	0,40	1,00	ΝΑΙ	ΟΧΙ
B6	2	0,40	1,00	ΟΧΙ	ΟΧΙ
B7	2	0,20	1,00	ΝΑΙ	ΟΧΙ
B8	2	0,20	1,00	ΟΧΙ	ΟΧΙ
Γ1	1	0,50	1,00	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Γ2	1	0,50	1,00	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Γ3	1	0,20	1,00	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Γ4	1	0,20	1,00	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Γ5	1	0,50	1,00	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Γ6	1	0,50	1,00	ΟΧΙ	ΟΧΙ
Γ7	1	0,20	1,00	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Γ8	1	0,20	1,00	ΟΧΙ	ΟΧΙ





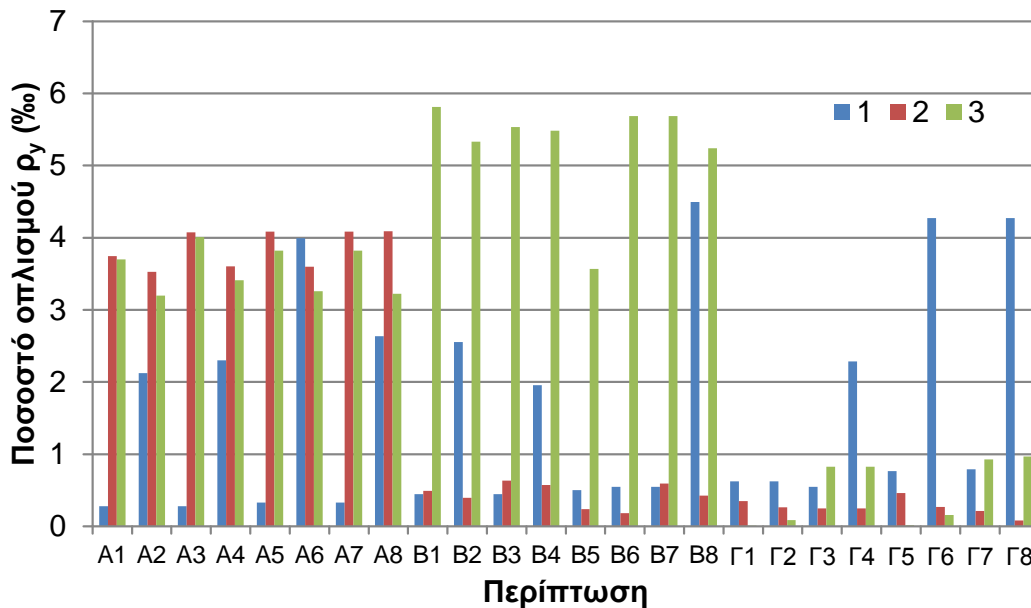
Σχ. 4 Περίπτωση Α2



Σχ. 5 Περίπτωση Γ1

### 6.3. Αποτελέσματα

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6, η μεγαλύτερη απαίτηση για οπλισμό προκύπτει για την κεντρική περιοχή της κάτοψης, στην ομάδα Β, έχοντας απαιτούμενο οπλισμό αυξημένο κατά 160%. Τα ποσοστά οπλισμού όμως παραμένουν, ακόμη και για αυτές τις θέσεις στην ομάδα Β σε λογικά επίπεδα. Καθώς το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού σε θέσεις κρίσιμες για τη διάτρηση θα πρέπει να είναι ίσο με 5%, στην θέση 3 τα ποσοστά οπλισμού φτάνουν τη μέγιστη τιμή από όλες τις περιπτώσεις και είναι της τάξεως του 7%.

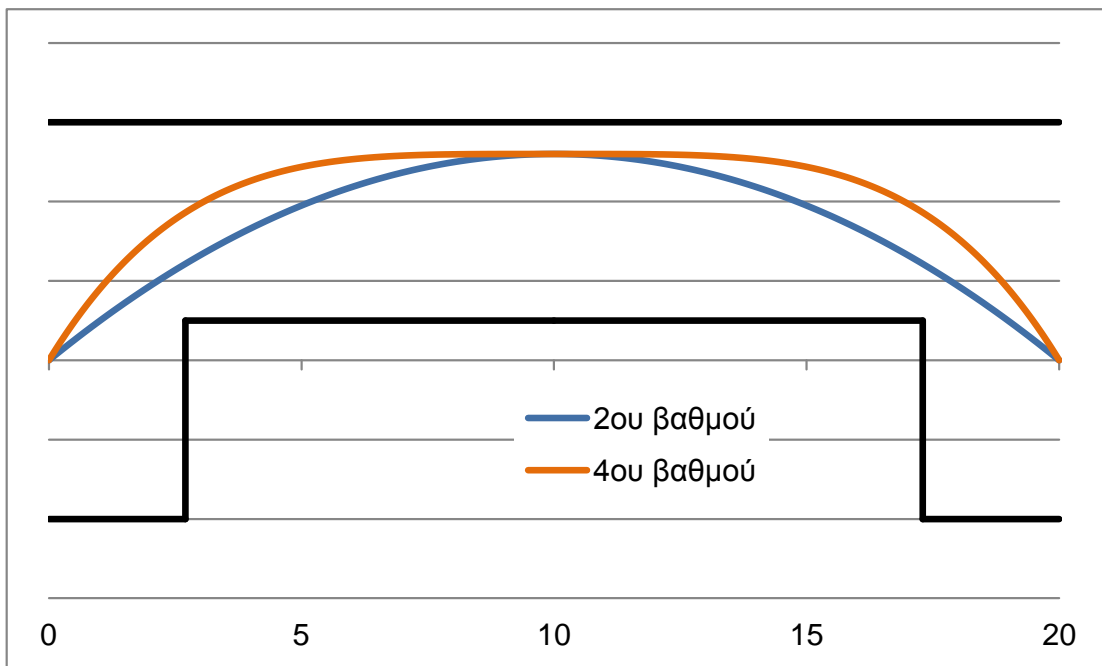


Σχ. 6 Απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού στην πλάκα γενικής κοιτόστρωσης σε χαρακτηριστικά σημεία αυτής για την διεύθυνση y-y

#### 6.4. Εφαρμογή προέντασης στη θεμελίωση

Στην περίπτωση Γ6, όπου το άνοιγμα της πλάκας θεμελίωσης είναι της τάξεως των 20 m, η κεντρική περιοχή του ανοίγματος παραμένει ανενεργή, και αυτό φαίνεται από την καταπόνηση που έχει η πλάκα σε αυτή την ομάδα των εξετασθέντων περιπτώσεων σε κάμψη. Καθώς οι ακριανές περιοχές επιβαρύνονται και μάλιστα με διαφορά σε σχέση με τις κεντρικές, ο τρόπος με τον οποίο αυτές μπορούν να ενεργοποιηθούν είναι η εφαρμογή προέντασης. Έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες περιπτώσεις ότι η προένταση μπορεί να αποτελέσει έναν τρόπο μεταφοράς έντασης από μία περιοχή ενός δομικού στοιχείου σε μία άλλη.

Αναφορικά με τη γεωμετρία της καλωδίωσης σε προεντεταμένες πλάκες γενικών κοιτοστρώσεων η πιο ρεαλιστική προσέγγιση επιτυγχάνεται μέσω καλωδίωσης 4<sup>ου</sup> βαθμού. Στην παρούσα εξετάστηκαν γεωμετρία 2<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> βαθμού (Σχήμα 7). Έπειτα από προμελέτη προέκυψε ότι τοποθετούνται τένοντες με 7 συρματόσχοινα έκαστος εντός κυκλικών σωλήνων, σε αποστάσεις ανά 25 cm στις ζώνες των στηρίξεων και ανά 50 cm στις ζώνες των ανοιγμάτων. Από τον έλεγχο των αναπτυσσομένων τάσεων στην πλάκα θεμελίωσης, και για τις δύο διευθύνσεις της πλάκας, για το άνω και κάτω πέλμα αυτής σε χαρακτηριστικές θέσεις, προέκυψε ότι οι κρίσιμες εφελκυστικές τάσεις είναι δυνατόν να περιοριστούν σημαντικά μετά από την τάνυση των τενόντων. Ως στόχος τέθηκε ο περιορισμός των τάσεων κάτω από το όριο της εφελκυστικής τάσης του σκυροδέματος, η οποία είναι ίση με 2 MPa. Ακόμη και αν αυτό δεν επιτυγχάνεται σε κάποιες θέσεις, οι τάσεις μειώνονται σημαντικά και έτσι επιτυγχάνεται μία ευνοϊκότερη κατάσταση όσον αφορά τη λειτουργικότητα.

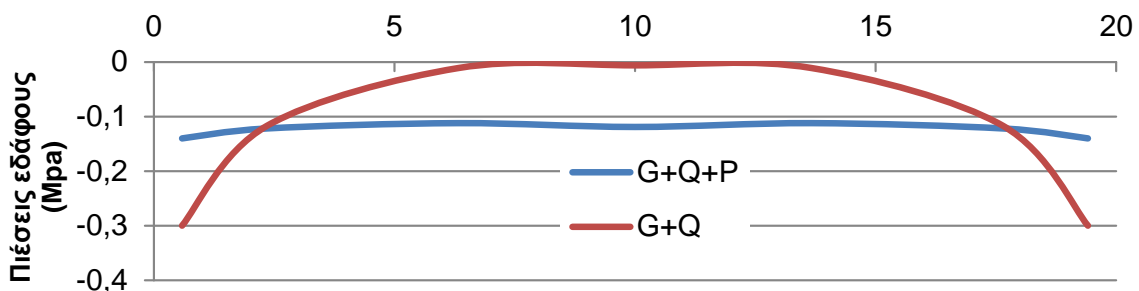


Σχ. 7 Γεωμετρίες καλωδίωσης οι οποίες εξετάστηκαν

### 6.5. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Από τα διαγράμματα των αναπτυσσόμενων τάσεων στη θεμελίωση φαίνεται ότι στις στηρίξεις με τη γεωμετρία 4<sup>ου</sup> βαθμού επιτυγχάνεται μείωση των εφελκυστικών τάσεων, σε πολλές περιπτώσεις κάτω και από την οριακή τιμή της αντοχής. Στις θέσεις των ανοιγμάτων, η γεωμετρία 2<sup>ου</sup> βαθμού στην καλωδίωση μπορεί να προκαλέσει συγκέντρωση αντιφορτίου στο κέντρο του ανοίγματος τέτοιο, ώστε να σημειωθεί υπέρβαση των οριακών εφελκυστικών τάσεων (Στο κάτω πέλμα της πλάκας στις θέσεις 3 και 6 κατά τη διεύθυνση x-x).

Στην παρούσα εργασία έγινε έλεγχος των εδαφικών πιέσεων που δέχεται η πλάκα θεμελίωσης πριν και μετά την εφαρμογή της προέντασης, για φορτίο λειτουργίας (Σχήμα 8). Με την εφαρμογή της προέντασης ενεργοποιείται η κεντρική (αρχικά ανενεργή) περιοχή της κάτοψης, ενώ ανακουφίζονται σημαντικά οι περιοχές των στηρίξεων. Η ομοιομορφοποίηση των τάσεων επιτυγχάνεται σε αυτό το βαθμό χάρη στην ευκαμψία την οποία παρουσιάζει η πλάκα θεμελίωσης.



Σχ. 8 Πιέσεις του εδάφους πριν και μετά την εφαρμογή της προέντασης

## 6.6. Συμπέρασμα

Η μείωση των τάσεων στην πλάκα οδηγεί σε μείωση του πάχους της πλάκας, το οποίο με την σειρά του οδηγεί σε μείωση του κόστους της κατασκευής, καθώς, βάσει των ισχυουσών τιμών χάλυβα ανά κιλό και του σκυροδέματος ανά κυβικό ισχύει ότι, όσον λεπτότερα είναι τα στοιχεία, μολονότι προκύπτουν πολλοί οπλισμοί, αυτά είναι οικονομικότερα εκείνων, που έχουν μεγάλο πάχος και λιγότερους οπλισμούς.

## 7. Υπόγεια

### 7.1. Γενικά

Στην παρούσα εξετάζεται ένα πολυώροφο κτήριο χωρίς δοκούς το οποίο διαθέτει ή όχι υπόγειες στάθμες, προκειμένου να εξεταστεί η συμβολή ή όχι της ύπαρξης υπογείου στην οικονομικότητα ενός κτηρίου.

### 7.2. Χαρακτηριστικά της κατασκευής

Το κτήριο το οποίο εξετάστηκε αποτελείται από ισόγειο, οκτώ ορόφους και τρεις περιπτώσεις θεμελίωσης. Το ύψος του τυπικού ορόφου είναι 3.0 m ενώ το ύψος του ισογείου είναι 6,0 m. Η επιφάνεια της κάτοψης είναι ίση με 460,0 m<sup>2</sup>. Η κατασκευή δε διαθέτει δοκούς στην ανωδομή, και έτσι γίνεται εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει αυτό το είδος των κατασκευών. Η απουσία των δοκών επιβάλλει την προσθήκη τοιχωμάτων στο σύστημα ώστε να αντιμετωπισθούν τα σεισμικά φορτία που αναπτύσσονται. Στην περίμετρο των πλακών της ανωδομής τοποθετείται δοκός διαστάσεων 0,25x0,70 m, η οποία συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των σεισμικών μετακινήσεων. Το πάχος της πλάκας υπολογίζεται με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 και είναι ίσο με 0,24 m, η ποιότητα σκυροδέματος είναι C25/30 ενώ η ποιότητα του χάλυβα είναι B500C.

### 7.3. Παραλλαγές του κτηρίου που εξετάστηκαν

#### 7.3.1. Κτήριο χωρίς υπόγειο

Η πρώτη παραλλαγή της κατασκευής η οποία εξετάστηκε δεν διαθέτει υπόγειο και το πάχος της πλάκας θεμελίωσης είναι ίσο με 1,20 m. Ο έλεγχος σε κάμψη έγινε τόσο για το συνδυασμό 1.35G+1.50Q όσο και για το σεισμικό συνδυασμό. Επιλέχθηκε να τοποθετηθεί πλέγμα καμπτικών οπλισμών Φ20/200 και στις δύο διευθύνσεις, στο άνω και κάτω πέλμα της πλάκας. Πρόσθετοι οπλισμοί τοποθετούνται στις θέσεις των στηρίξεων, όπου ο οπλισμός του πλέγματος δεν επαρκεί. Γίνεται επίσης έλεγχος σε διάτρηση, και τοποθετείται οπλισμός διατρήσεως στις θέσεις των στηρίξεων στις οποίες υπάρχει απαίτηση.

#### 7.3.2. Κτήριο με ένα υπόγειο

Η κύρια διαφορά της εν λόγω λύσης με την αρχική είναι η προσθήκη υπογείου στο κτήριο. Το πάχος του περιμετρικού τοιχώματος είναι ίσο με 0.30 m, και το πάχος που επιλέγεται για την πλάκα γενικής κοιτόστρωσης είναι 0,60 m. Η προσθήκη του υπογείου επιτρέπει τη μείωση αυτή. Ο οπλισμός κάμψεως ο οποίος τοποθετείται σε μορφή πλέγματος σε όλη την πλάκα είναι Φ14/200 με πρόσθετο οπλισμό όπου απαιτείται. Ο λόγος που επιλέγεται πυκνή διάταξη οπλισμού, ακόμη και αν δεν απαιτείται, είναι ότι η πυκνή αυτή διάταξη ευνοεί τη λειτουργικότητα. Συγκεκριμένα, προσφέρει μία μείωση στο εύρος της ρωγμής, κάτι το οποίο είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν ο υπόγειος ορίζοντας είναι σε υψηλή στάθμη. Έγινε επίσης έλεγχος σε διάτρηση, και, λόγω του σχετικά μειωμένου πάχους,

ενδείκνυται η τοποθέτηση οπλισμού σε απόσταση μέχρι 2,0d από την παρειά των κατακόρυφων στοιχείων για λόγους ασφαλείας.

### 7.3.3. Κτήριο με δύο υπόγεια

Η τρίτη περίπτωση προς διερεύνηση περιλαμβάνει την ύπαρξη δύο υπογείων, κάθε ένα από τα οποία έχει ύψος 3.0 m. Το πάχος της πλάκας θεμελίωσης είναι 0,60 m, ενώ τοποθετήθηκε ο ίδιος οπλισμός κάμψης σε μορφή πλέγματος, με την περίπτωση ύπαρξης ενός υπογείου. Οι απαιτήσεις σε οπλισμό διατήσεως είναι παρόμοιες με την περίπτωση ύπαρξης ενός υπογείου.

## 7.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών παραλλαγών

### 7.4.1. Καμπτικές ροπές στην πλάκα θεμελίωσης

Παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των ροπών στην πλάκα θεμελίωσης λόγω της σεισμικής φόρτισης (συνδυασμός  $G+0.3Q\pm E$ ), για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Κατά μήκος της περιμέτρου της κάτοψης, για τις περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει υπόγειο οι ροπές που αναπτύσσονται είναι κατά βάση μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπάρχει υπόγειο. Στη θέση του εσωτερικού υποστυλώματος οι ροπές δεν διαφέρουν παραπάνω από 23% μεταξύ των παραλλαγών που εξετάστηκαν. Από την άλλη μεριά παρατηρείται δραστηκή μείωση των ροπών με την ύπαρξη υπογείου στις θέσεις των τοιχωμάτων. Καθώς αυτά αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία ανάληψης της σεισμικής τέμνουσας η συμπεριφορά τους καθορίζει και την ένταση που μεταφέρεται στην θέση της θεμελίωσης στις αντίστοιχες θέσεις. Η μείωση αυτή επομένως επιτρέπει τη μείωση του πάχους της πλάκας σε τέτοιο βαθμό, ώστε τα ποσοστά οπλισμού τα οποία αναπτύσσονται κάθε φορά να είναι αποδεκτά, ακόμη και αν είναι αυξημένα. Ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται κάθε φορά, η λύση αυτή μπορεί να αποδειχθεί οικονομικότερη από μία λύση αυξημένου πάχους πλάκας.

### 7.4.2. Καμπτικές ροπές στις βάσεις των τοιχωμάτων

Η πλάκα οροφής υπογείου μπορεί να λειτουργήσει ως υπομόχλιο, μειώνοντας σημαντικά τις ροπές στη βάση των τοιχωμάτων. Αυτή η λειτουργία εξετάζεται στην παρούσα μέσω της σημείωσης των αποτελεσμάτων των ροπών στη βάση των τοιχωμάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 95% της ροπής της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης.

## 7.5. Εξοικονόμηση όγκου σκυροδέματος

Σε τυπικά οικοδομικά έργα, το κριτήριο το οποίο συνήθως χαρακτηρίζει το κόστος της κατασκευής είναι ο όγκος του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση μείωσης του πάχους της πλάκας γενικής κοιτόστρωσης στο μισό του πάχους που θα είχε εάν αυτή δεν υπήρχε υπόγειο, ο όγκος του σκυροδέματος κάτω από τη στάθμη του εδάφους μπορεί να μειωθεί σημαντικά, μειώνοντας το συνολικό κόστος της κατασκευής. Αυτή η μείωση του όγκου παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Όγκος σκυροδέματος που χρειάζεται για κάθε λύση, και μετρείται κάτω από τη στάθμη του εδάφους

Στάθμες υπογείων	Όγκος σκυροδέματος (m <sup>3</sup> )
0	552
1	431
2	585

Η κατασκευή ενός υπογείου αποδεικνύεται πιο οικονομική λύση σε σχέση με τη λύση χωρίς υπόγειο. Η τρίτη λύση απαιτεί 30 m<sup>2</sup> παραπάνω σκυρόδεμα σε σχέση με τη συμβατική λύση. Μολονότι παρουσιάζεται μία μικρή αύξηση ποσότητας υλικού, τα πλεονεκτήματα από την προσθήκη ενός ακόμη υπογείου είναι σημαντικά καθώς αυξάνεται η λειτουργικότητα του κτηρίου. Τέτοιου είδους χώροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χώροι στάθμευσης, αποθήκες, ή χώροι πολυκαταστημάτων.

### 7.6. Συμπεράσματα

1. Η παρουσία του υπογείου συνεπάγεται τη μείωση των καμπτικών ροπών λόγω σεισμικής φόρτισης στη βάση των τοιχωμάτων που ευρίσκονται στο εσωτερικό της κατόψεως.
2. Η μείωση των εντατικών μεγεθών στη βάση των τοιχωμάτων οδηγεί σε χαμηλότερες καμπτικές ροπές στην πλάκα γενικής κοιτόστρωσης, επιτρέποντας τη μείωση του πάχους αυτής, γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση του κόστους κατασκευής.

### Βιβλιογραφία

- Abhishek Bhargava, Panagiotis Ch. Anastasopoulos, Samuel Labi, Kumares C. Sinha, and Fred L. Mannering (2010), Three-Stage Least-Squares Analysis of Time and Cost Overruns in Construction Contracts, *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(11), November 1, 2010. ©ASCE, ISSN 0733-9364/2010/11 pg. 1207–1218.
- European Committee for Standardization, "EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings", Brussels, Belgium, 2004.
- European Committee for Standardization, "EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", Brussels, Belgium, 2004.
- Federal Emergency Management Agency (1992). A benefit-cost model for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 227). VSP Associates, Sacramento, CA.
- Gavaise E., Papaefthimiou K., Tzaveas T., Stylianidis K., Tegos J., "The problem of minimum cost for structural members of earthquake resistant bridges", *International Symposium: Earthquake Resistant Engineering Structures (ERES)*, 2005, Skiathos, Greece.
- Ministry of Environment, Planning and Public Works, "Greek Code for the Design and Construction of Concrete Works", Athens, Greece, 2000. (In Greek).
- Ministry of Environment, Planning and Public Works, "Greek Seismic Code", Athens, Greece, 2000. (In Greek).
- Psarras K., Constantinou A., Philippou T., Tegos I., "Research on the design optimization of foundation slabs in seismic multistory buildings", 2013 *International Van Earthquake Symposium*, Van, Turkey. Paper No. 94.
- Shreenaath. A, Arunmozhi. S, Sivagamasundari. R (2014), Analysis of factors influencing construction cost overruns in large construction projects of Tamilnadu, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* ISSN: 2321-0869, 2(11), November 2014, pg 42–47
- Tegos I., Stylianidis K., Mitoulis S., Gavaise E., Tsitotas M., "Earthquake resistance and cost-effectiveness of multi-span bridges", *IABSE Symposium Report*, Weimar, Germany, 2007, pp 9-16(8).