

Διερεύνηση Τύπων Θεμελίωσης σε Κτίρια Οπλισμένου Σκυροδέματος: Σύγκριση Κοιτοστρώσεων και Πεδιλοδοκών με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, εδαφικούς τύπους, φορτία & σεισμικές φορτίσεις.

Λαλά Παναγιώτα

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, και Μεταπ. Φοιτητής
ΣΜΑ ΕΑΠ

panagiotalala@hotmail.com, std162799@ac.eap.gr

Παναγιωτάκος Τηλέμαχος

Πολιτικός Μηχανικός Παν.Πατρών, και Μέλος
ΣΕΠ ΣΜΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

tpanagiotakos @dencopc.gr

Περίληψη – Η παρούσα μελέτη έχει ως αντικείμενο τη συγκριτική ανάλυση δύο τύπων επιφανειακής θεμελίωσης, των κοιτοστρώσεων και των πεδιλοδοκών, σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, φορτία, εδαφικές συνθήκες και σεισμικές δράσεις. Βασικός στόχος είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο παράγοντες όπως η γεωμετρία του κτιρίου, η κατανομή των φορτίων και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του εδάφους επηρεάζουν τη συμπεριφορά της θεμελίωσης και της ανωδομής υπό σεισμικές δράσεις. Παράλληλα, επιδιώκεται η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων κάθε τύπου θεμελίωσης και, τελικά, η διατύπωση συμπερασμάτων σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο θεμελίωσης ανάλογα με τον τύπο κτιρίου σε συνδυασμό με τις εκάστοτε παραμέτρους του εδάφους και της σεισμικής διέγερσης.

Λέξεις-Κλειδιά: Θεμελίωση, Κοιτόστρωση, Πεδιλοδοκοί, δείκτης εδάφους k_s , καθιζήσεις, τάσεις

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θεμελίωση έχει ως κύρια λειτουργία την ανάλυση των φορτίων της ανωδομής και τη μεταφορά τους στο έδαφος. Η μέθοδος θεμελίωσης εξαρτάται κυρίως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τα φορτία της κατασκευής - καθώς και την ύπαρξη ή μη υδροφόρου ορίζοντα. Ο σωστός σχεδιασμός της θεμελίωσης έγκειται στην επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας, που εξασφαλίζει τόσο την ασφαλή όσο και την οικονομική διαστασιολόγηση κάθε στοιχείου της και παράλληλα ελαχιστοποιεί τις τάσεις στο έδαφος και τις καθιζήσεις της κατασκευής.

Η συμπεριφορά της θεμελίωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την τιμή του δείκτη εδάφους k_s , σύμφωνα με το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο προσομοίωσης εδάφους-κατασκευής Winkler, αλλά και τα κριτήρια ακαμψίας. Η διάκριση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς επηρεάζει τόσο την κατανομή των τάσεων στο έδαφος όσο και την συνολική συμπεριφορά της θεμελίωσης υπό φόρτιση. Η έννοια της ακαμψίας του πεδίου συνίσταται στο κατά πόσον αυτό είναι δυνατόν να παραμορφωθεί κατά τη διαμήκη έννοια ακολουθώντας τις διαφορικές καθιζήσεις του εδάφους. Στη περίπτωση του άκαμπτου

θεμελίου η κατανομή της εδαφικής πίεσης ακολουθεί γραμμική μορφή, το στοιχείο δεν υφίσταται παραμορφώσεις και οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο έδαφος. Σε αντίθεση με την περίπτωση του εύκαμπτου θεμελίου όπου η κατανομή της εδαφικής πίεσης ακολουθεί το σχήμα της παραμόρφωσης του πεδίου με αποτέλεσμα τη μη γραμμική κατανομή των τάσεων, με τις μεγαλύτερες τάσεις να εμφανίζονται κοντά στα σημεία όπου οι βυθίσεις είναι μεγαλύτερες. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται από το προσομοίωμα κατά Winkler.

Για τον υπολογισμό του k_s έχει προταθεί πλήθος μεθόδων υπολογισμού, όπως αυτές των Vesic (1961), Hetényi (1946) και Meyerhof (1963). Μία από τις πλέον ευρέως αποδεκτές μεθόδους είναι αυτή του Terzaghi (1955), η οποία βασίζεται στην επί τόπου μέτρηση της βασικής τιμής του συντελεστή εδάφους, k_0 , μέσω της χρήσης της πρότυπης τετραγωνικής άκαμπτης πλάκας διαστάσεων $B_0=0,305m$. Σύμφωνα με τον Terzaghi (1955) ο δείκτης εδάφους k_s για την περίπτωση πεδιλοδοκών $L \gg B$ υπολογίζεται ως:

$$\text{για αργιλικά έδαφη: } k_s = \frac{2}{3} \frac{B_0}{B} k_0 \quad (1)$$

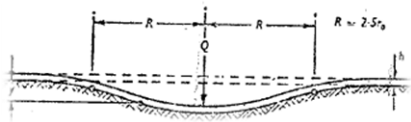
$$\text{για αμμόδη έδαφη: } k_s = \frac{1}{6} k_0 \cdot \left(1 + \frac{B_0}{B}\right)^2 \quad (2)$$

Όσον αφορά την κοιτόστρωση, μία από τις χαρακτηριστικότερες έρευνες είναι αυτή του Westergaard (1926, 1933, 1939) η οποία συνάρτησε την συμπεριφορά των πλακών επί εδάφους με την ακτίνα R , που ισούται με:

$$R = 2.5 \left(\frac{E_b t^3}{12(1-\nu_b^2)k_s} \right)^{1/4} \quad (3)$$

όπου E_b και ν_b το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson σκυροδέματος, t = πάχος πλάκας.

Η φυσική σημασία του εύρους επιρροής έγκειται στο ότι, σε αποστάσεις μεγαλύτερες από R από το σημείο εφαρμογής του συγκεντρωμένου φορτίου, οι πιέσεις επαφής παύουν ουσιαστικά να αναπτύσσονται και η επίδραση του φορτίου καθίσταται πρακτικά αμελητέα. (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Ακτίνα σχετικής ακαμψίας (Terzaghi (1955))

Με βάση τη παραπάνω σχέση έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες υπολογισμού του k_s , (Terzaghi 1955, Καββαδάς 2021), οι οποίες βασίζονται στην κατάταξη της θεμελίωσης σε άκαμπτη ή εύκαμπτη, σε συνάρτηση τόσο με τις γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους όσο και από τις γεωμετρικές διαστάσεις της θεμελίωσης. Ωστόσο, διαπιστώνεται ότι μικρή διαφοροποίηση στις γεωμετρικές διαστάσεις της θεμελίωσης μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική κατηγοριοποίηση και επομένως σε απότομη διαφοροποίηση της τιμής k_s επηρεάζοντας κατ' επέκταση και τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην αξιολόγηση των δύο εκ των συνηθέστερων τύπων θεμελίωσης, κοιτόστρωση και εσχάρα πεδילוδοκών, σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και επικεντρώνεται στη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφοροποιήσεις στην γεωμετρία του κτιρίου, στην κατανομή των φορτίων και στα εδαφικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τόσο τη συμπεριφορά της θεμελίωσης όσο και την ανωδομή υπό σεισμικές φορτίσεις.

Η συμβολή της παρούσας εργασίας συνίσταται στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου αξιολόγησης για τη συγκριτική ανάλυση των δύο τύπων θεμελίωσης, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις καθιζήσεις, τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο έδαφος και το κόστος κατασκευής.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε πρώτο στάδιο περιλαμβάνεται η επιλογή των αντιπροσωπευτικών παραδειγμάτων κτιρίων και η διασταδιολόγηση της ανωδομής μέσω του λογισμικού FESPA της LH Logismiki, προκειμένου να ληφθούν υπόψη όλες οι κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα και των ελληνικών προσαρτημάτων. Ωστόσο, η προσομοίωση της κοιτόστρωσης στο FESPA είναι προσεγγιστική και δεν παρέχει την απαιτούμενη λεπτομερή πληροφορία για τη συμπεριφορά της θεμελίωσης. Συνεπώς, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη ειοπτεία της συμπεριφοράς του συστήματος θεμελίωσης, η ανάλυση της κοιτόστρωσης - αλλά και για συγκριτικούς λόγους και των πεδילוδοκών - πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ETABS μέσω επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.

Επομένως, στο περιβάλλον του λογισμικού ETABS της CSI πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της επίδρασης της θεμελίωσης στη συνολική στατική και δυναμική απόκριση της κατασκευής. Μέσω των υπολογιστικών προσομοιώσεων, εξήχθη το σύνολο των αποτελεσμάτων που αποτέλεσαν αντικείμενο σύγκρισης, όπως οι καθιζήσεις, η κατανομή των τάσεων στις θεμελίώσεις, η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και η ποσότητα του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού, ενώ παράλληλα εκτιμήθηκε η ιδιοπερίοδος της κατασκευής, οι μετακινήσεις των ορόφων και τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην βάση της ανωδομής.

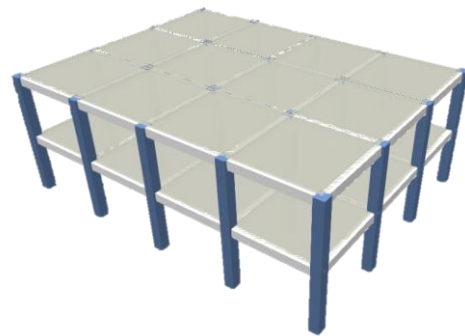
Η επιλογή των κτιρίων βασίζεται σε τέσσερις αντιπροσωπευτικούς τύπους κατασκευών, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία, τη χρήση και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Πιο συγκεκριμένα:

Το Κτίριο Α (Εικόνα 2) αντιπροσωπεύει μία κατασκευή πολλαπλών ορόφων, κατάλληλη για χρήση ως κατοικία ή γραφειακός χώρος. Διαθέτει μικρή επιφάνεια κάτοψης και μικρές τιμές κατακόρυφων φορτίων.



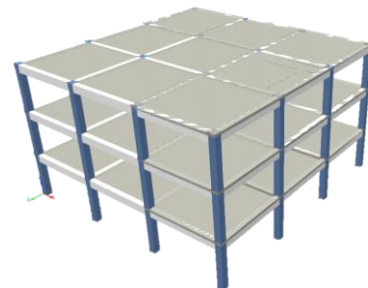
Εικόνα 2. Κτίριο Α

Το Κτίριο Β (Εικόνα 3) αντιπροσωπεύει μία κατασκευή βιομηχανικού τύπου, με μεγάλη κάτοψη, περιορισμένο αριθμό ορόφων και αυξημένα κατακόρυφα φορτία.



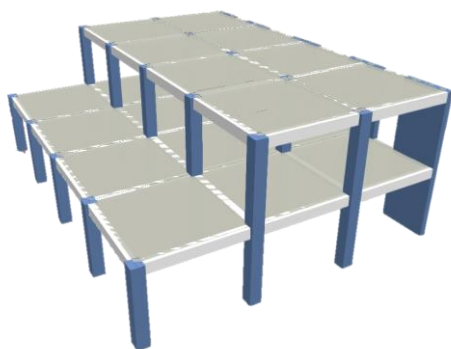
Εικόνα 3. Κτίριο Β

Το Κτίριο Γ (Εικόνα 4) αποτελεί μια τυπική κατοικία χαμηλού ύψους, περιορισμένη επιφάνεια κάτοψης και ομοιόμορφα κατανεμημένα μικρά κατακόρυφα φορτία.



Εικόνα 4. Κτίριο Γ

Το Κτίριο Δ (Εικόνα 5) είναι μία κατασκευή βιομηχανικού τύπου, με μεγάλη κάτοψη και περιορισμένο αριθμό ορόφων. Φέρει μεγάλα κατακόρυφα φορτία με έντονα ασύμμετρη κατανομή, γεγονός που οφείλεται και στη διαμόρφωση τοιχωμάτων, που αναπτύσσονται κυρίως στη μία πλευρά του κτιρίου. Η άνιση κατανομή της δυσκαμψίας, σε συνδυασμό με τη γεωμετρική ασυμμετρία, προσδίδει στο κτίριο έντονη στρεπτική ευαισθησία.



Εικόνα 5. Κτίριο Δ

Στον ΠΙΝΑΚΑΣ παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα φορτία και οι διαστάσεις των θεμελιώσεων του κάθε τύπου κτιρίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Κτίριο	Ύψος Κάτοψη	Φορτία πλάκων	Φορτία δοκών	Υποστυλώματα	Δοκοί	Πλάκες	Κοιτόστρωση	Πεδύλοδοκοί
Α	21m	225m ²	τυπικοί ορόφοι: g=2kN/m ² q=2kN/m ²	50x50cm	30x60cm	20cm	1m	πλάτος κορμού 0.30m
			δόμα: g=5kN/m ² q=2kN/m ²					ύψος 0.90m
Β	12m	768m ²	1ος ορόφος: g=2kN/m ² q=20kN/m ²	90x90cm	50x80cm	30cm	1m	πλάτος κορμού 0.50m
			δόμα: g=10kN/m ² q=2kN/m ²					ύψος 1.00m
Γ	9m	225m ²	1ος ορόφος: g=2kN/m ² q=2kN/m ²	40x40cm	30x50cm	16cm	0.70m	πλάτος κορμού 0.30m
			δόμα: g=5kN/m ² q=2kN/m ²					ύψος 0.90m
Δ	12m	768m ²	1ος ορόφος: g=2kN/m ² q=20kN/m ²	90x90cm	50x80cm	30cm	1m	πλάτος κορμού 0.50m
			δόμα: g=10kN/m ² q=2kN/m ²					ύψος 1.00m

Στην συνέχεια επιλέχθηκαν οι δύο παρακάτω διαφορετικοί τύποι εδαφών, ένα αμμώδες και ένα αργιλώδες έδαφος, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη μηχανική συμπεριφορά, τη φέρουσα ικανότητα και την παραμόρφωση υπό φορτίο.

Εδαφικός Τύπος Β, πυκνή άμμος:

- Ξηρό ειδικό βάρος $\gamma_s=15 \text{ kN/m}^3$
- Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi'=30^\circ$
- Συνοχή $c'=0$
- Μέτρο ελαστικότητας $E_s=50 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu=0.20$
- $S=1.2$
- $k_o=160 \text{ MN/m}^3$

Εδαφικός Τύπος Δ, μαλακή άργιλος:

- Ξηρό ειδικό βάρος $\gamma_s=20 \text{ kN/m}^3$
- Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi'=20^\circ$
- Συνοχή $c'=0.025$
- Μέτρο ελαστικότητας $E_s=5 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu=0.30$
- $S=1.35$
- $k_o=20 \text{ MN/m}^3$

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τα τέσσερα διαφορετικά κτίρια, στους δύο τύπους εδάφους (Β και Δ), λαμβάνοντας υπόψη σεισμική επιτάχυνση ίση με 0,24g.

Ειδικότερα, για τα κτίρια Γ και Δ πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αναλύσεις με σεισμικές επιταχύνσεις 0,16g και 0,36g. Η επέκταση της ανάλυσης στα δύο αυτά κτίρια κρίθηκε σκόπιμη, καθώς το κτίριο Γ, ως απλό οίκημα, και το κτίριο Δ, ως κατασκευή με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, θεωρούνται αντιπροσωπευτικά παραδείγματα της ελληνικής αστικής δόμησης και συνιστούν δύο ακραίες μεταξύ τους περιπτώσεις.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, των αναλύσεων και των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, γίνεται μια διερεύνηση στο κατά πόσο ο δείκτης εδάφους k_s και το πάχος της κοιτόστρωσης μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων μιας κατασκευής.

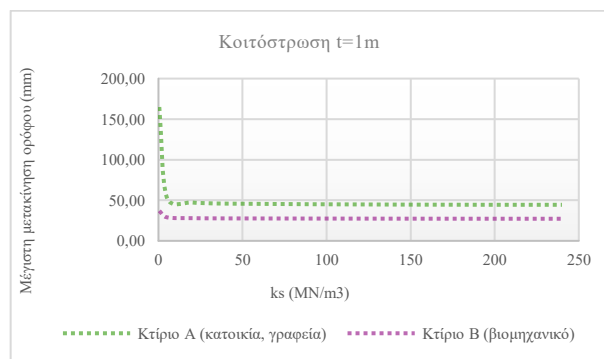
Α. Επιρροή του δείκτη εδάφους k_s & πάχους κοιτόστρωσης

Οι υπολογισμοί του δείκτη εδάφους k_s εμφάνισαν σημαντικές διακυμάνσεις των τιμών του, ανάλογα με τις διαστάσεις του θεμελίου και τα χαρακτηριστικά του εδάφους (Πίνακας II). Ως εκ τούτου, κρίθηκε χρήσιμο να πραγματοποιηθεί μια περαιτέρω διερεύνηση σχετικά με τη μεταβολή του k_s . Για τον λόγο αυτό εκτελέστηκαν πρόσθετες αναλύσεις στα κτίρια Α και Β, λαμβάνοντας ως βασικές παραμέτρους τον δείκτη εδάφους, k_s , και το πάχος της κοιτόστρωσης, t .

ΠΙΝΑΚΑΣ II

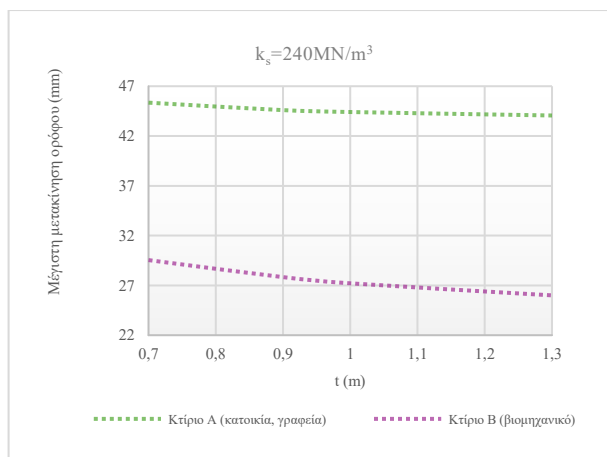
ΚΤΙΡΙΟ	ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΔΕΙΚΤΗ ΕΔΑΦΟΥΣ k_s						
	Α	Β	Γ	Δ	Α	Β	Γ
Κοιτόστρωση							
Έδαφος Β							
k_s MN/m ³	41,74	41,74	45,41	41,74	41,94	37,38	45,41
Έδαφος Δ							
k_s MN/m ³	20	20	20	20	3,39	2,54	4,07

Στο Διάγραμμα 1, το πάχος της κοιτόστρωσης διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με $t=1 \text{ m}$, ενώ ως μεταβλητή παράμετρος εξετάστηκε ο δείκτης εδάφους, k_s . Φαίνεται πως και στα δύο κτίρια υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του k_s όπου πριν και μετά από αυτήν το εξεταζόμενο μέγεθος παρουσιάζει μεγάλη πτωτική πορεία, καταδεικνύοντας έτσι πως από εκείνο το σημείο και μετά η θεμελίωση αποκτά τελείως διαφορετική συμπεριφορά – άκαμπτη ή εύκαμπτη. Συνεπώς, προκύπτει ότι για υψηλές τιμές του δείκτη δυσκαμψίας εδάφους k_s , η δυναμική απόκριση της κατασκευής συγκλίνει προς εκείνη που παρατηρείται στην περίπτωση πλήρους πάκτωσης της βάσης.



Διάγραμμα 1. Επιρροή k_s στην ανωδομή με σταθερό πάχος κοιτόστρωσης

Αντίθετα, στο Διάγραμμα 2, το k_s παρέμεινε σταθερό και διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής του πάχους της κοιτόστρωσης στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Φαίνεται πως το Κτίριο Α είναι πιο ευαίσθητο στις μεταβολές του k_s λόγω της μεγάλης ευκαμψίας (μεγάλου ύψους, με λίγα φορτία). Το Κτίριο Β επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος της κοιτόστρωσης, δεδομένου ότι φέρει περισσότερα φορτία και έχει μεγαλύτερη επιφάνεια θεμελίωσης, συμπεραίνοντας πως το κτίριο με τα περισσότερα φορτία και το χαμηλότερο ύψος έχει μικρότερη ευαισθησία στην ευκαμψία της θεμελίωσης. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση φαίνεται ότι πρακτικά διπλασιασμός του πάχους θεμελίωσης (από 0.70m στο 1.3m) οδηγεί σε μεταβολή των αποτελεσμάτων τάξης το πολύ ίση με 30-35%.



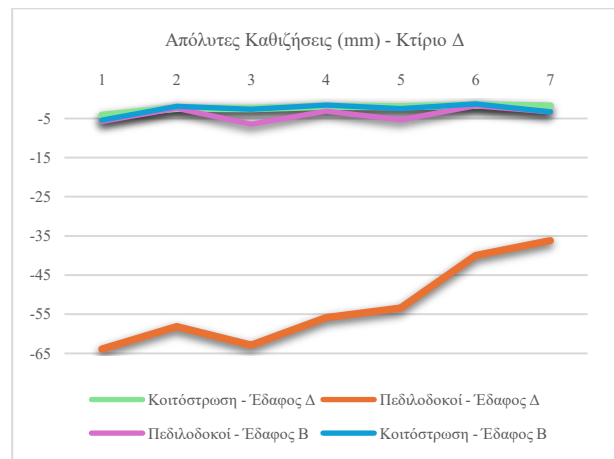
Διάγραμμα 2. Επιρροή πάχους κοιτόστρωσης στην ανωδομή με σταθερό k_s

Από την εξέταση των δύο διαγραμμάτων προκύπτει ότι ο δείκτης εδάφους k_s αποτελεί την πλέον καθοριστική παράμετρο, ειδικά στην περίπτωση των μετακινήσεων του κτιρίου. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει ότι η επιλογή κατάλληλης και αντιπροσωπευτικής τιμής δείκτη εδάφους k_s είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιοπιστία των αναλύσεων όλων των τύπων κτιρίων, καθώς ενδέχεται να επηρεάσει ουσιαστικά τα αποτελέσματα, οδηγώντας ενδεχομένως σε υπερ- ή υποδιαστασιολόγηση του φέροντος οργανισμού.

B. Καθιζήσεις

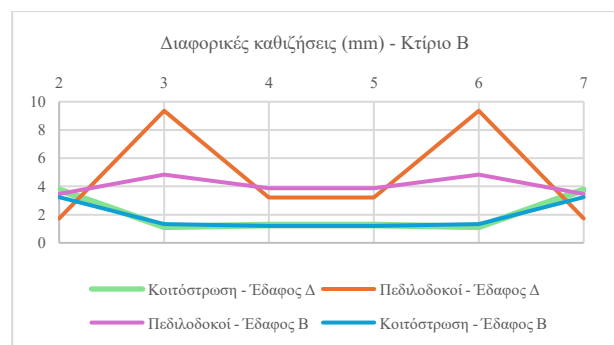
Όσον αφορά τις καθιζήσεις τα αποτελέσματα του λογισμικού δεν λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα όπως στερεοποίηση και ερπυσμό εδάφους για τη περίπτωση αργιλώδους εδάφους. Ως εκ τούτου, οι παρακάτω συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν αποκλειστικά με βάση τις άμεσες καθιζήσεις.

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 3 σε εδάφη καλής ποιότητας (πχ. τύπου Β), η θεμελίωση με πεδילוδοκούς προκαλεί σχεδόν διπλάσιες καθιζήσεις σε σχέση με την κοιτόστρωση, χωρίς ωστόσο να ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια. Αντίθετα, σε εδάφη φτωχότερης ποιότητας (πχ. τύπου Δ), οι διαφορές είναι έντονες: η κοιτόστρωση μειώνει τις απόλυτες και διαφορικές καθιζήσεις κατά πέντε έως έξι φορές σε σχέση με τις πεδילוδοκούς.



Διάγραμμα 3. Κτίριο Δ, Απόλυτες καθιζήσεις

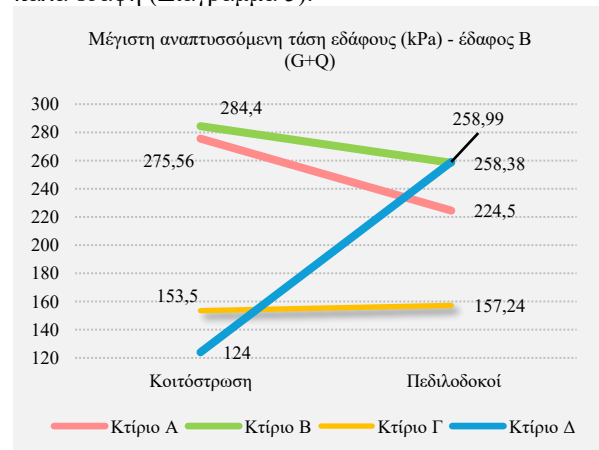
Παρατηρείται επιπροσθέτως πως η θεμελίωση μέσω κοιτόστρωσης, σε σύγκριση με τη θεμελίωση μέσω πεδילוδοκών, οδηγεί σε διαφορετική κατανομή των καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, στην κοιτόστρωση οι μέγιστες τιμές καθιζήσεων εντοπίζονται στα άκρα της θεμελίωσης, ενώ στη θεμελίωση μέσω πεδילוδοκών οι μέγιστες τιμές καθιζήσεων παρατηρούνται πλησίον του κέντρου της κατασκευής (Διάγραμμα 3 και Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4. Σύγκριση διαφορικών καθιζήσεων στο Κτίριο Β για διάφορα εδάφη και θεμελιώσεις

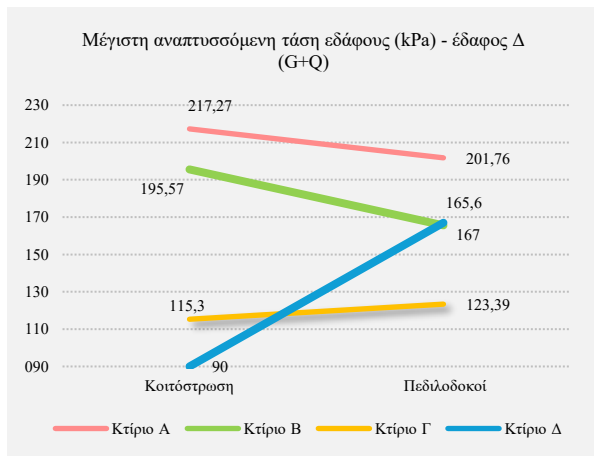
C. Εδαφικές Τάσεις

Σχετικά με τις μέγιστες τάσεις στο έδαφος, οι διαφορές μεταξύ θεμελίωσης με πεδילוδοκούς και κοιτόστρωσης είναι αμελητέες για ομοιόμορφα φορτισμένα κτίρια σε καλά εδάφη (Διάγραμμα 5).

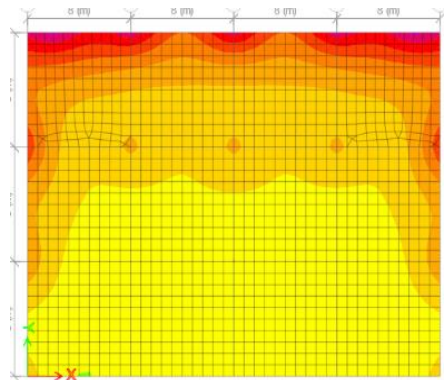


Διάγραμμα 5. Συγκεντρωτικά Διαγράμματα τάσεων εδάφους για έδαφος Β - σεισμική επιτάχυνση 0,24g

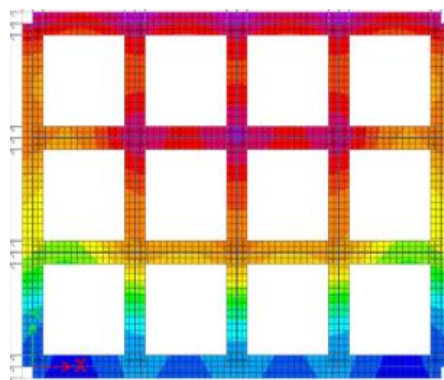
Ωστόσο, σε κτίρια με ανομοιογένεια στη φόρτιση ή/και δυσκαμψία, και σε φτωχότερα εδάφη, η θεμελίωση επηρεάζει σημαντικά την κατανομή τάσεων (Διάγραμμα 6, Εικόνα 6 και Εικόνα 7).



Διάγραμμα 6. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα τάσεων εδάφους για έδαφος Δ – σεισμική επιτάχυνση 0,24g



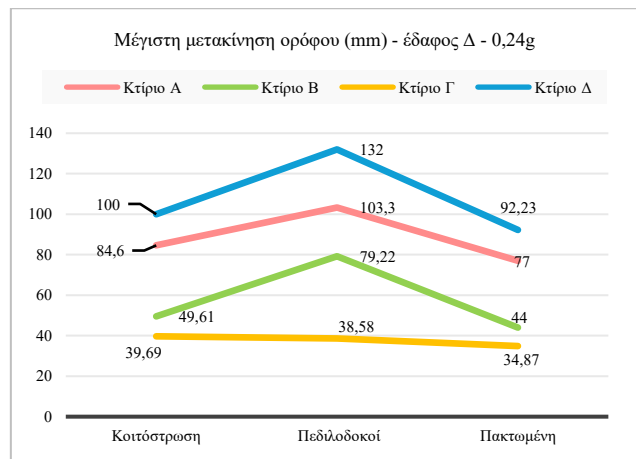
Εικόνα 6. Κτίριο Δ, Αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους (G+Q) για κοιτόστρωση, έδαφος Δ



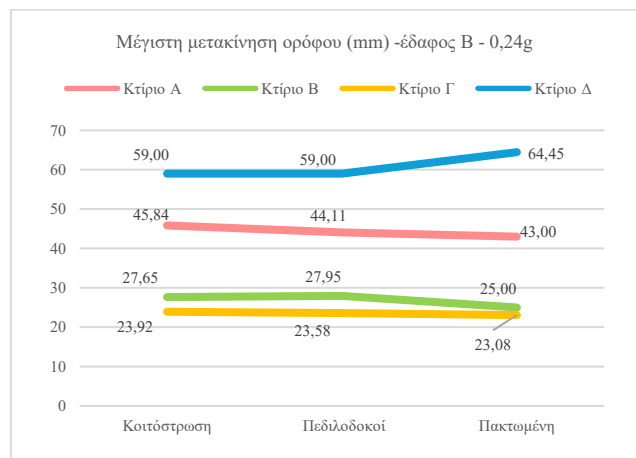
Εικόνα 7. Κτίριο Δ, Αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους (G+Q) για θεμελίωση με πεδילוδοκούς, έδαφος Δ

D. Επιρροή Στην Ανωδομή

Από το Διάγραμμα 9 συμπεραίνεται πως για έδαφος Δ, οι πεδילוδοκοί οδηγούν σε πιο εύκαμπτη συμπεριφορά, με αύξηση των μετακινήσεων. Αντίθετα, για έδαφος Β (Διάγραμμα 8), οι αποκλίσεις στην συμπεριφορά της ανωδομής σε σχέση με την περίπτωση πάκτωσης στη βάση των κτιρίων είναι μικρές, τόσο στη περίπτωση της θεμελίωσης με πεδילוδοκούς, όσο και με κοιτόστρωση.

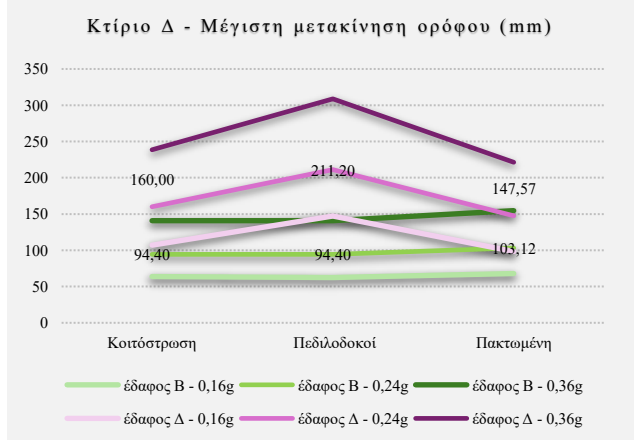


Διάγραμμα 7. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης ορόφου, για έδαφος Δ – σεισμική επιτάχυνση 0,24g



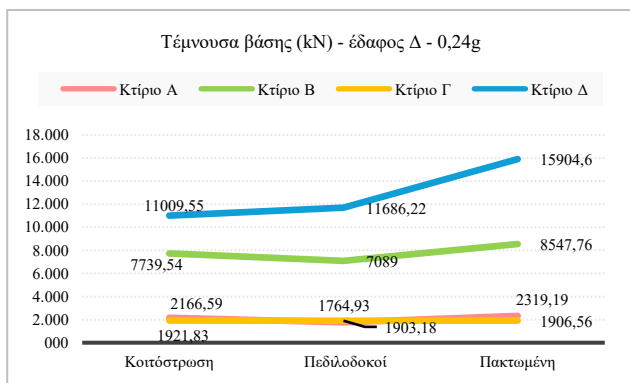
Διάγραμμα 8. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης ορόφου, για έδαφος Β – σεισμική επιτάχυνση 0,24g

Στο Διάγραμμα 9 απεικονίζεται ότι οι μέγιστες μετακινήσεις του ανώτατου ορόφου, για όλους τους τύπους εδαφών και επίπεδα σεισμικής επιτάχυνσης, είναι σημαντικά μεγαλύτερες στη περίπτωση της θεμελίωσης του κτιρίου Δ με εσχάρα πεδילוδοκών. Η διαφορά αυτή καθίσταται ακόμη πιο έντονη με την αύξηση της σεισμικής επιτάχυνσης.



Διάγραμμα 9. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης ορόφου – εδάφη Δ και Δ και σεισμικές επιταχύνσεις 0.16g, 0.24g, 0.36g

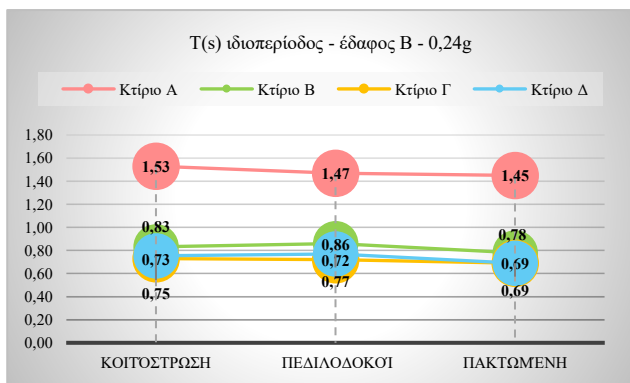
Επιπλέον, για το στρεπτικά εύκαμπτο κτίριο Δ παρατηρήθηκε αύξηση της τέμνουσας βάσης έως και 30% σε συνθήκες πλήρους πάκτωσης (Διάγραμμα 10).



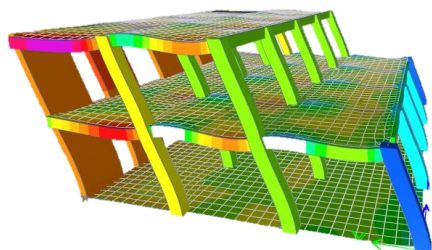
Διάγραμμα 10. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα τέμνουσας βάσης για έδαφος Β – σεισμική επιτάχυνση 0,24g

Ειδικά για τις τιμές της ιδιοπεριόδου προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

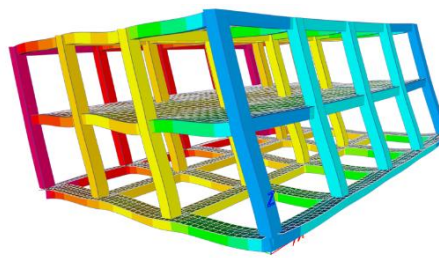
Για το έδαφος Β το κτίριο Α εμφανίζει σημαντικά υψηλότερες τιμές ιδιοπεριόδου σε σχέση με τα άλλα κτίρια, γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι διαθέτει σαφώς μεγαλύτερο ύψος (Διάγραμμα 11). Τα κτίρια Β και Δ παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή ιδιοπεριόδου όταν θεμελιώνονται μέσω πεδιλοδοκών, ενώ αντίθετως, τα κτίρια Α και Γ εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή ιδιοπεριόδου στην περίπτωση θεμελίωσης επί κοιτόστρωσης. Η παρατηρούμενη ομοιότητα στη δυναμική συμπεριφορά των κτιρίων Β και Δ (Εικόνα 8 και Εικόνα 9) είναι αναμενόμενη, καθώς πρόκειται για κτίρια ίδιου ύψους που φέρουν πολύ υψηλά φορτία. Ωστόσο, το κτίριο Δ είναι ελαφρώς πιο δύσκαμπτο εξαιτίας της ύπαρξης τοιχωμάτων σε έναν άξονα. Σε γενικές γραμμές, οι διακυμάνσεις στις τιμές της ιδιοπεριόδου μεταξύ των διαφορετικών τύπων κτιρίων με διαφορετικούς τύπους θεμελίωσης δεν χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα σημαντικές και όλες συγκλίνουν στην περίπτωση πλήρους πάκτωσης, λόγω των σχετικά υψηλών τιμών k_s .



Διάγραμμα 11. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα ιδιοπεριόδου για έδαφος Β – σεισμική επιτάχυνση 0,24g

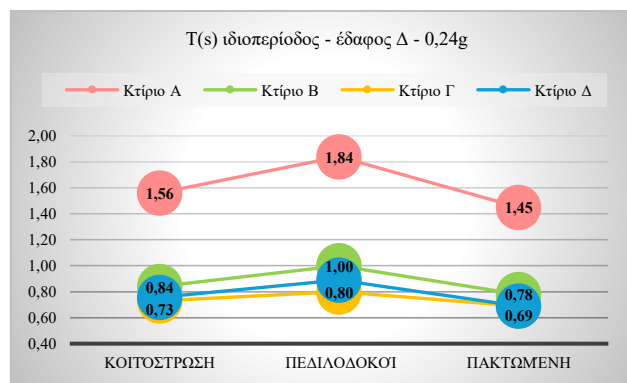


Εικόνα 8. Κτίριο Δ, 1^η ιδιομορφή, έδαφος Β



Εικόνα 9. Κτίριο Β, 1^η ιδιομορφή, έδαφος Β

Για το έδαφος Δ, το κτίριο Α εξακολουθεί να παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές ιδιοπεριόδου (Διάγραμμα 12). Παράλληλα, παρατηρείται συνολική αύξηση των τιμών ιδιοπεριόδου σε όλα τα εξεταζόμενα κτίρια σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που καταγράφηκαν για το έδαφος Β. Επιπροσθέτως, διαπιστώνεται ότι η θεμελίωση μέσω πεδιλοδοκών οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση των ιδιοπεριόδων σε όλα τα κτίρια σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές έδρασης. Ωστόσο, αυτή η μείωση φαίνεται να μην οφείλεται στην ύπαρξη των ίδιων των πεδιλοδοκών, αλλά στο γεγονός ότι για τη δεδομένη γεωμετρία πεδιλοδοκών σε συνδυασμό με το συγκεκριμένο έδαφος προκύπτουν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές k_s .



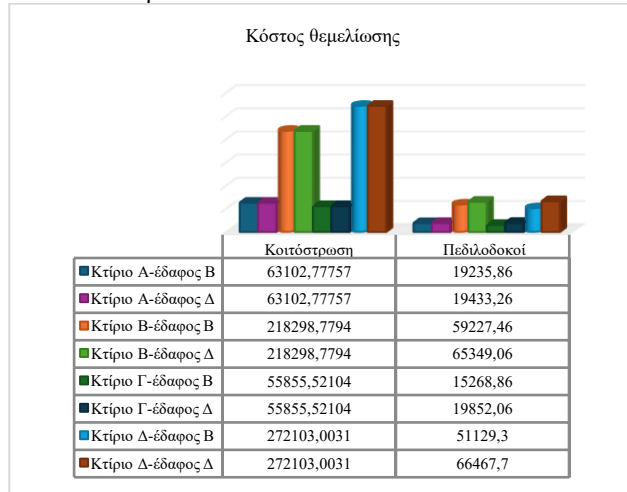
Διάγραμμα 12. Συγκεντρωτικό Διάγραμμα ιδιοπεριόδου για έδαφος Δ – σεισμική επιτάχυνση 0,24g

Ε. Κόστος Κατασκευής

Διαπιστώνεται από το Διάγραμμα 13 ότι το άμεσο κόστος θεμελίωσης μέσω κοιτόστρωσης είναι σημαντικά υψηλότερο συγκριτικά με εκείνο της θεμελίωσης μέσω εσχάρας πεδιλοδοκών σε όλους τους εξεταζόμενους τύπους κτιρίων. Ειδικότερα, στα κτίρια Β και Δ, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη κάτοψη, μικρό ύψος και υψηλά κατακόρυφα φορτία, το κόστος της κοιτόστρωσης προσεγγίζει το τετραπλάσιο του κόστους της εσχάρας πεδιλοδοκών. Αντίστοιχα, στα κτίρια Α και Γ, με μικρότερη κάτοψη και περιορισμένα φορτία, η απόκλιση είναι μικρότερη, με το κόστος της κοιτόστρωσης να υπολογίζεται περίπου τριπλάσιο εκείνου της λύσης με πεδιλοδοκούς. Οι διαφοροποιήσεις στο κόστος της θεμελίωσης, οι οποίες αποδίδονται στη μεταβολή του τύπου εδάφους, εντοπίζονται στην περίπτωση της θεμελίωσης με εσχάρα πεδιλοδοκών. Ωστόσο, το εύρος αυτών των διαφορών είναι περιορισμένο και δύναται να χαρακτηριστεί ως αμελητέο.

Συνεπώς, εκ πρώτης όψεως, η κοιτόστρωση φαίνεται να αποτελεί λιγότερο οικονομικά αποδοτική επιλογή. Πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι στο συνολικό κόστος της θεμελίωσης μέσω πεδιλοδοκών θα πρέπει να

προστεθούν, πέραν των βασικών υλικών (σκυρόδεμα και χάλυβας), και τα έξοδα για την αναγκαία επίχωση, την κατασκευή πλάκας επί εδάφους, τη χρήση ξυλοτύπων, καθώς και το αυξημένο κόστος εργασιών (και χρονικό κόστος) λόγω των πρόσθετων κατασκευαστικών απαιτήσεων σε σύγκριση με την κοιτόστρωση. Επομένως, η συνολική οικονομική αξιολόγηση απαιτεί συνεκτίμηση όλων των παραπάνω.



Διάγραμμα 13. Κόστος θεμελίωσης για όλους τους τύπους κτιρίων και εδαφών για σεισμική επιτάχυνση 0,24g.

F. Συγκριτική Αποτίμηση μέσω του Δείκτη G

Μετά την δημιουργία των διαφόρων σεναρίων και εναλλακτικών που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δημιουργήθηκε και η ανάγκη για την ανάπτυξη μιας μεθόδου η οποία θα μπορούσε να ενσωματώσει τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά, τις καθιζήσεις και τις αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους όσο και τα οικονομικά χαρακτηριστικά που συνοδεύουν μια θεμελίωση. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει έναν δείκτη αξιολόγησης ο οποίος διευκολύνει την άμεση ποσοτική σύγκριση θεμελιώσεων με αντικειμενικό τρόπο καθώς είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε διαφορετικά σενάρια εδαφών και φορτίων.

Βασίζόμενοι στα αποτελέσματα των αναλύσεων μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η ανωδομή δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το έδαφος θεμελίωσης. Συνεπώς, ο δείκτης αποδίδεται από τον εξής τύπο:

$$G = w_1 \cdot \frac{\sigma}{q_u} + w_2 \cdot \frac{\Delta s}{s_{max}} + w_3 \cdot \frac{V_c}{V_{max}} + w_4 \cdot \frac{W_s}{W_{max}} \quad (4)$$

όπου

σ = αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους,

Δs = Διαφορικές καθιζήσεις,

V_c = Όγκος σκυροδέματος θεμελίωσης m^3 / m^2 ,

W_s = Ποσότητα οπλισμού θεμελίωσης kg / m^3

Τα μέγιστα όρια για την κανονικοποίηση καθορίστηκαν με βάση τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές (διαφορική καθίζηση), ή τις συνήθεις τιμές (ποσότητα υλικών) ή την επιτρεπόμενη τάση εδάφους ανά περίπτωση.

- $S_{max}=0,02m$
- $q_u=\sigma_{ed}(G+\psi_2G+1.4E)$ ανά περίπτωση
- $V_{max}=1,50 m^3/m^2$ (τυπική τιμή κτιριακών κατασκευών)
- $W_{max}=100 kg/m^3$ (τυπική τιμή κτιριακών κατασκευών)

Ο συντελεστής βαρύτητας (w), που χρησιμοποιήθηκε, εκφράζει τη σχετική σημασία κάθε παραμέτρου στη συνολική αξιολόγηση της θεμελίωσης. Ωστόσο, σε κάθε κατασκευαστικό έργο, οι απαιτήσεις και οι προτεραιότητες

διαφέρουν. Επομένως, οι συντελεστές βαρύτητας δεν θα μπορούσε να είναι απόλυτοι και αντικειμενικοί, αλλά προσαρμόζονται ανάλογα με:

- Το είδος του έργου
- Τις γεωτεχνικές συνθήκες
- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης

Με βάση τα παραπάνω, και ειδικά για την παρούσα μελέτη προτάθηκαν οι εξής συντελεστές βαρύτητας:

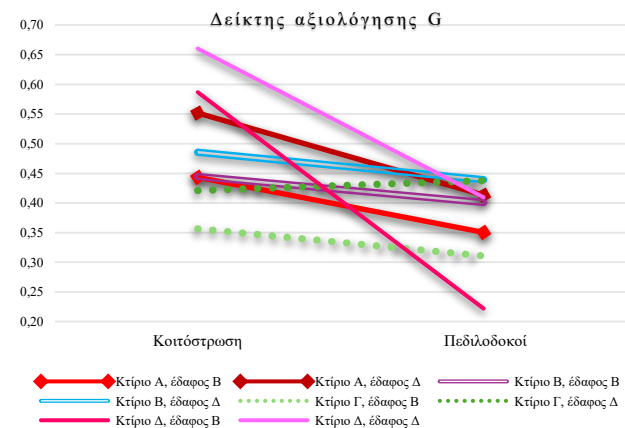
$w_1 = 0.1$ για τις αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους

$w_2 = 0.4$ για τις διαφορικές καθιζήσεις

$w_3 = 0.25$ για τον όγκο σκυροδέματος

$w_4 = 0.25$ για τον χάλυβα οπλισμού

Επομένως, ο τελικός δείκτης G εκφράζει τη συνολική αποδοτικότητα της θεμελίωσης όσον αφορά τις λειτουργικές της ιδιότητες αλλά και το αντίστοιχο κόστος κατασκευής ανά τετραγωνικό μέτρο. Για την αξιολόγηση της κάθε περίπτωσης θεμελίωσης ως προς το συνολικό κόστος αρκεί και μόνο η σύγκριση των τελικών ποσοτήτων χάλυβα και σκυροδέματος.



Διάγραμμα 14. Δείκτης αξιολόγησης G για όλους τους τύπους κτιρίων και εδαφών για σεισμική επιτάχυνση 0,24g.

Συμπεραίνεται από το δείκτη αξιολόγησης (Διάγραμμα 14) ότι η κοιτόστρωση αποτελεί την πιο αποδοτική επιλογή θεμελίωσης σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Συνοπτικά, για κάθε εξεταζόμενο τύπο θεμελίωσης, μπορούν να προκύπτουν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας προτάθηκε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο αξιολόγησης της θεμελίωσης σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενσωματώνοντας τεχνικά και οικονομικά κριτήρια σε έναν ενιαίο δείκτη απόδοσης.

Η μελέτη ανέδειξε τη σημαντική επίδραση της θεμελίωσης στη συμπεριφορά του φέροντος οργανισμού και τεκμηρίωσε τη σημασία της επιλογής της κατάλληλης λύσης με βάση συγκεκριμένες συνθήκες έργου.

Με μία συνοπτική σύγκριση των δύο τύπων θεμελίωσης προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- **Κοιτόστρωση:**
Πλεονεκτήματα: Καλύτερη κατανομή φορτίων, μειωμένες στροφές και διαφορικές καθιζήσεις (ειδικά για κτίρια με συγκεντρωμένα φορτία ή μεγάλο ύψος). Μειονεκτήματα: Υψηλό κόστος, ιδιαίτερα για κτίρια με μεγάλη κάτοψη (π.χ. κτίρια Β και Δ).
- **Πεδιλοδοκοί:**

Πλεονεκτήματα: Οικονομικότερη λύση, ιδανική για κτίρια με ομοιόμορφα και σχετικά μικρά φορτία (π.χ. κτίριο Γ)

Μειονεκτήματα: Μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες στροφές και καθιζήσεις σε κτίρια με ανομοιόμορφα φορτία ή χαμηλής ποιότητας έδαφος και σε σεισμούς με μεγάλες επιταχύνσεις.

Ωστόσο, τα παραπάνω θα μπορούσαν να αναθεωρηθούν ανάλογα τα δεδομένα του κάθε έργου, π.χ. σημαντικότητα κτιρίου, περιορισμένος προϋπολογισμός, περιορισμός στη διάρκεια κατασκευής, τοπικές γεωτεχνικές συνθήκες και σεισμικές απαιτήσεις. Ειδικά σε περιπτώσεις χαμηλής ποιότητας εδάφους, υψηλών σεισμικών επιταχύνσεων και μεγάλων κατακόρυφων φορτίων επιβάλλεται η λύση της θεμελίωσης με κοιτόστρωση.

Συνεπώς, η κοιτόστρωση προκρίνεται ως αποδοτικότερη για περιπτώσεις φτωχών εδαφών ή σημαντικών σεισμικών απαιτήσεων, ενώ οι πεδילוδοκοί προσφέρουν ικανοποιητική λύση σε συμβατικά κτιριακά έργα χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις και οικονομικά περιορισμένες περιπτώσεις.

Η τελική επιλογή θεμελίωσης ωστόσο, απαιτεί τη συνεκτίμηση της ποιότητας εδάφους, της ανωδομής, των σεισμικών απαιτήσεων και του κόστους. Μικρές μεταβολές στη γεωμετρία της θεμελίωσης μπορούν να αλλάξουν την κατηγοριοποίησή της (άκαμπτη ή εύκαμπτη), με αποτέλεσμα απότομες μεταβολές στον δείκτη k_s και συνακόλουθες επιπτώσεις στην απόκριση του κτιρίου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- American Concrete Institute. (1988). *Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-89)*. Detroit, MI: American Concrete Institute.
- Barnes, G. E. (2000). *Soil mechanics: Principles and practice (2nd ed.)*. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan.
- Braja, M. D. (2014). *Principles of foundation engineering (8th ed.)*. Boston, MA: Cengage Learning.
- Burland, J. B., Broms, B. B., & de Mello, V. F. B. (1978). *Behaviour of foundations and structures*. Building Research Establishment, CP 51/78.
- Hetenyi, M. (1946). *Beams on elastic foundation: Theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Janbu, N., Bjerrum, L., & Kjaernsli, B. (1956). *Soil mechanics applied to some engineering problems*. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute (Publication No. 16).
- Meyerhof, G. G. (1963). *Some recent research on the bearing capacity of foundations*. Canadian Geotechnical Journal, 1(1), 16–26.
- Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). *The allowable settlements of buildings*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 3, 5(6), 727–768.
- Steinbrenner, W. (1936). *A rational method for the determination of the vertical normal stresses under foundations*. In Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 2, pp. 142–143). Cambridge.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K. (1955). *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. Geotechnique, 5(4), 41–50.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Vesic, A. S. (1961). *Bearing capacity of deep foundations in sand*. In Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 1, pp. 845–850). Paris.
- Westergaard, H. M. (1926). *Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis*. Public Roads, 7(2), 25–35.
- Westergaard, H. M. (1933). *Analytical tools for judging results of structural tests of concrete pavements*. Public Roads, 14(10), 185–188.
- Westergaard, H. M. (1939). *Stresses in concrete runways of airports*. Proceedings of the Highway Research Board, 19, 197–202.
- Αναγνωστόπουλος, Α., & Παπαδόπουλος, Β. (2002). *Επιφανειακές θεμελιώσεις*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων.
- Αναγνωστόπουλος, Α., Καββαδάς, Μ., & Παπαδόπουλος, Β. (2009). *Σημειώσεις για τον Ευρωκώδικα 7 (EN 1997)*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- ΕΛΟΤ EN 1992-1-1. *Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα – Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια*.
- ΕΛΟΤ EN 1997-1. *Ευρωκώδικας 7: Γεωτεχνικός σχεδιασμός – Μέρος 1: Γενικοί κανόνες*.
- ΕΛΟΤ EN 1997-1:2005 NA. (2005). *Εθνικό Προσάρτημα ΕΛΟΤ EN 1997-1:2005 Ευρωκώδικας 7: Γεωτεχνικός σχεδιασμός – Μέρος 1: Γενικοί κανόνες*.
- Ευρωκώδικας 2. *Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα – Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια*.
- Ευρωκώδικας 7. *Γεωτεχνικός σχεδιασμός – Μέρος 1: Γενικοί κανόνες*.
- Καββαδάς, Μ. (2021). *Διαλέξεις του μαθήματος «Θεμελιώσεις» 6ο εξάμηνο ΠΜ ΕΜΠ – Διάλεξη 7: Πεδילוδοκοί και κοιτοστρώσεις [Σημειώσεις]*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κίρτας, Ε., & Παναγόπουλος, Γ. (2017, Σεπτέμβριος). *Διαλέξεις του Τμήματος ΠΜ&ΜΤΓ ΤΕ – Κατεύθυνση Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ: Θεμελιώσεις και Αντιστηρίξεις*. ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας.
- Κωνσταντινίδης, Α. (2008). *Αντισεισμικά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα (Τόμος Α)*. Αθήνα: Εκδόσεις Απόστολου Κωνσταντινίδη.
- Λεονχάρντ, Φ., & Μέονινγκ, Ε. (1975). *Ολόσωμες κατασκευές: Η τέχνη του οπλισμού (Τόμος 3)*. Αθήνα: Μ. Γκιούρδας.
- ΛΗ Logismiki. (2019, Ιανουάριος). *Ferpla – Πρόγραμμα υπολογισμού επίπεδων φορέων με το πεπερασμένο στοιχείο TRIC (v2.0.1): Εγχειρίδιο χρήσης*.
- Περιοδικό «Κτίριο». (2024, Σεπτέμβριος). *Θεμελίωση με κοιτόστρωση*.
- Τρέζος, Κ. (2021). *Οπλισμένο σκυρόδεμα II – 7ο εξάμηνο ΠΜ ΕΜΠ – Ασκήσεις πεδίων [Σημειώσεις]*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. (2021). *Διαλέξεις του μαθήματος «Θεμελιώσεις» – Διάλεξη 7: Πεδילוδοκοί και Κοιτοστρώσεις*. Ακαδημαϊκό έτος 2020–2021.