

**Αντιμετώπιση Προβλημάτων Προσομοίωσης
Θεμελιώσεων σε Ενδόσιμο Έδαφος με το πρόγραμμα
στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του ΤΟΛ[®]**
Confronting elastic foundation modelling problems using the
TOL[®]/RAF structural analysis program

Κ. ΜΟΡΦΙΔΗΣ¹, Ε.Ν. ΜΠΑΜΠΟΥΚΑΣ², Ι. Ε. ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης δομικών στοιχείων θεμελίωσης από το πρόγραμμα στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του Τεχνικού Οίκου Λογισμικού - ΤΟΛ[®]. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται όλες οι παραδοχές με βάση τις οποίες το ΡΑΦ μορφώνει αυτόματα προσομοιώματα για βασικά στοιχεία θεμελίωσης όπως μεμονωμένα πέλδια που φέρουν ένα ή περισσότερα κατακόρυφα στοιχεία, πεδילוδοκοί και περιμετρικά τοιχώματα υπογείου εδραζόμενα σε ελαστικό έδαφος. Για τη μόρφωση των προσομοιωμάτων αυτών γίνεται χρήση ενός γενικευμένου ακριβούς πεπερασμένου στοιχείου δοκού με συνεχή ελαστική έδραση επί υποβάθρου τύπου Winkler. Ειδική αναφορά γίνεται επίσης και στη δυνατότητα του προγράμματος που αφορά στον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στη διεπιφάνεια εδάφους και στοιχείων θεμελίωσης. Τέλος, η όλη διαδικασία προσομοίωσης των δομικών στοιχείων θεμελίωσης αξιολογείται με τη βοήθεια ενός αριθμητικού παραδείγματος.

ABSTRACT: The paper describes the modelling technique for building foundation components resting on flexible (elastic) ground as it is implemented in the RAF structural analysis computer program, developed by the engineering software house TOL. The procedure uses a generalized beam finite element on continuous Winkler support and includes all possible modelling capabilities offered by linear elements on elastic foundation. Special attention is given to the soil stress distribution calculations at the foundation-soil contact area. One typical foundation example testifies the accuracy and reliability of the implemented modelling technique.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θεμελίωση αποτελεί ένα τμήμα του συνολικού κτιριακού φορέα που δημιουργεί ιδιαίτερες δυσκολίες και εισάγει μεγάλες αβεβαιότητες κατά τη μόρφωση του υπολογιστικού προσομοιώματος της κατασκευής. Οι αβεβαιότητες πηγάζουν κατά κύριο λόγο από την ανάγκη ρεαλιστικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης του ενδόσιμου εδάφους με το κτίριο, ενώ δυσκολίες προκύπτουν από τις σχετικά μεγάλες διαστάσεις ορισμένων δομικών στοιχείων της θεμελίωσης (π.χ. υψίκορμες πεδילוδοκοί, περιμετρικά τοιχώματα υπογείου

¹ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επιστημονικός σύμβουλος ΤΟΛ[®] Ε.Ε., email: morfidis@tol.com.gr

² Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός - ΤΟΛ[®] Ε.Ε., email: emmbab@tol.com.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: avram@civil.auth.gr

κ.ά.), η προσομοίωση των οποίων με ραβδωτά (γραμμικά) πεπερασμένα στοιχεία, έναντι της ορθότερης προσομοίωσης με επιφανειακά, δημιουργεί την ανάγκη εφαρμογής ειδικών τεχνικών προσομοίωσης. Η ραβδαία όμως και συνεχώς αυξανόμενη ισχύς των υπολογιστών δίνει πλέον τη δυνατότητα μόρφωσης και επίλυσης ακριβέστερων υπολογιστικών προσομοιωμάτων. Έτσι, η παραδοσιακά ευρέως εφαρμοζόμενη πρακτική της αντιμετώπισης του προβλήματος με υπεραπλουστευμένη προσομοίωση του ενδόσιμου εδάφους, κατά την οποία η ανωδομή επιλύεται ξεχωριστά θεωρούμενη ως πακτωμένη στη βάση της και εν συνεχεία οι αντιδράσεις πάκτωσης εφαρμόζονται ως φορτία σε ανεξάρτητο προσομοίωμα του φορέα θεμελίωσης, μπορεί να θεωρηθεί πλέον ξεπερασμένη.

Στα πλαίσια των συνήθων πρακτικών εφαρμογών και εντός των πλαισίων που καθορίζουν οι κανονισμοί δίνεται η δυνατότητα θεώρησης γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς για το έδαφος. Ακόμα όμως και με αυτήν την σημαντικά απλοποιητική παραδοχή, η προσομοίωση ενός φορέα θεμελίωσης μπορεί να γίνει με διάφορες εναλλακτικές μεθόδους. Επί παραδείγματι, η συμπεριφορά του εδάφους ως ελαστικού υποβάθρου παραλαβής των φορτίων του κτιρίου μπορεί να γίνει είτε με την πλέον ακριβή μέθοδο προσομοίωσης κάνοντας χρήση επιφανειακών ή και χωρικών πεπερασμένων στοιχείων είτε με χρήση προσεγγιστικών μηχανικών προσομοιωμάτων (βλ. π.χ. Selvadurai A. (1979), Μορφίδης Κ. (2003)). Η χρήση όμως επιφανειακών ή χωρικών πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του εδάφους κρίνεται στην περίπτωση των συνήθων κατασκευών υπερβολική και πολύ απαιτητική σε γνώσεις και εμπειρία. Έτσι, η επικρατούσα πρακτική προσομοίωσης του εδάφους χρησιμοποιεί προσεγγιστικά μηχανικά προσομοιώματα, με κυριαρχό το απλούστερο εξ αυτών προσομοίωμα του Winkler (1867). Το προσομοίωμα Winkler είναι ένα εδαφικό προσομοίωμα δοκιμασμένο με επιτυχία σε πλήθος εφαρμογών εδώ και πολλές δεκαετίες. Η εφαρμογή του κρίνεται ως επαρκώς ακριβής και επομένως αποδεκτή στην πράξη.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα προσομοιώματα που παράγονται αυτόματα και χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του Τεχνικού Οίκου Λογισμικού - ΤΟΛ[®], για την προσομοίωση βασικών δομικών στοιχείων θεμελίωσης, όπως μεμονωμένα πέλδια που φέρουν ένα ή περισσότερα κατακόρυφα στοιχεία, σχάρες πεδילוδοκών και περιμετρικά τοιχώματα υπογείου. Στα πλαίσια των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι σύγχρονοι υπολογιστές, το πρόγραμμα ΡΑΦ αντιμετωπίζει το πρόβλημα της προσομοίωσης των δομικών αυτών στοιχείων με τη βοήθεια λεπτομερών προσομοιωμάτων ραβδωτών (γραμμικών) πεπερασμένων στοιχείων με συνεχή ελαστική έδραση επί υποβάθρου τύπου Winkler. Τα προσομοιώματα αυτά εξαντλούν τις δυνατότητες προσομοίωσης που προσφέρει η συγκεκριμένη κατηγορία στοιχείων όσον αφορά στην ενδόσιμη έδρασή τους. Επιπλέον, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το σκεπτικό βάσει του οποίου έχει επιλεγεί το κάθε προσομοίωμα, οι βασικές παραδοχές επί των οποίων στηρίζεται αυτό, και η περιγραφή των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών του. Βέβαια θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι η αυτόματη μόρφωση των προσομοιωμάτων από το ΡΑΦ δεν είναι δεσμευτική για το χρήστη. Είναι απλώς μια προσσέγγιση του προβλήματος από το πρόγραμμα, ενώ παράλληλα υπάρχουν όλα τα απαραίτητα «εργαλεία» προκειμένου να τροποποιήσει ο κάθε χρήστης όποιες από τις παραμέτρους των προσομοιωμάτων επιθυμεί. Τέλος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, γίνεται αναφορά και στη δυνατότητα υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων στη διεπιφάνεια εδάφους/στοιχείων θεμελίωσης.

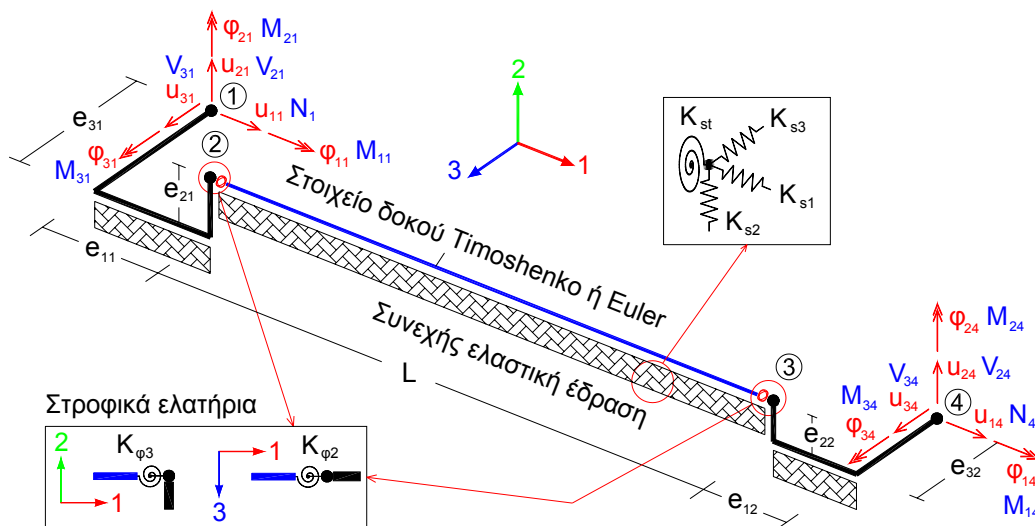
ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

Γενικές αρχές

Τα προσομοιώματα των δομικών στοιχείων της θεμελίωσης παράγονται αυτόματα από το ΡΑΦ μόλις ο χρήστης εισάγει μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος κάποιο στοιχείο, το οποίο είναι χαρακτηρισμένο στη βάση δεδομένων ως στοιχείο θεμελίωσης. Τα διαθέσιμα στοιχεία είναι: Πέδιλα, Συνδετήριες δοκοί, Πεδιλοδοκοί, Τοιχώματα υπογείου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αυτόματη δημιουργία του προσομοιώματος μιας θεμελίωσης δεν είναι δεσμευτική σε όλες τις λεπτομέρειες της. Έτσι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει σε οποιοδήποτε σημείο διαφωνεί με τις προεπιλογές του προγράμματος και να ορίσει τις δικές του παραμέτρους. Παρακάτω θα δοθούν οι λεπτομέρειες των προσομοιωμάτων τα οποία παράγονται αυτόματα από το ΡΑΦ και θα αιτιολογηθεί όποια από τις αυτόματες επιλογές χρήζει περαιτέρω τεκμηρίωσης.

Κεντρικό ρόλο στη σύνθεση των προσομοιωμάτων των θεμελιώσεων που υιοθετούνται από το ΡΑΦ κατέχει το ενσωματωμένο γενικευμένο πεπερασμένο στοιχείο δοκού/στύλου. Πρόκειται για ένα στοιχείο που διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 1):

- Απολύτως στερεούς βραχίονες στις διευθύνσεις των τριών τοπικών αξόνων του,
 - Συνεχή ελαστική, μεταφορική και στρεπτική, έδραση με βάση τις ακριβείς λύσεις των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά των ελαστικώς εδραζόμενων δοκών επί υποβάθρου τύπου Winkler (βλ. π.χ. Hetenyi (1946)), τόσο στο εσωτερικό-εύκαμπτο τμήμα του όσο και στους απολύτως στερεούς βραχίονες,
 - Επιλεκτική θεώρηση των διατμητικών παραμορφώσεων του ευκάμπτου τμήματος (Timoshenko/Euler),
 - Στροφικά ελατήρια στα σημεία σύνδεσης εύκαμπτου τμήματος-στερεών βραχιόνων.
- (Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το πεπερασμένο αυτό στοιχείο βλ. Αβραμίδης Ι.Ε., Μορφίδης Κ. (2000), Morfidis K., Avramidis I.E. (2002)).

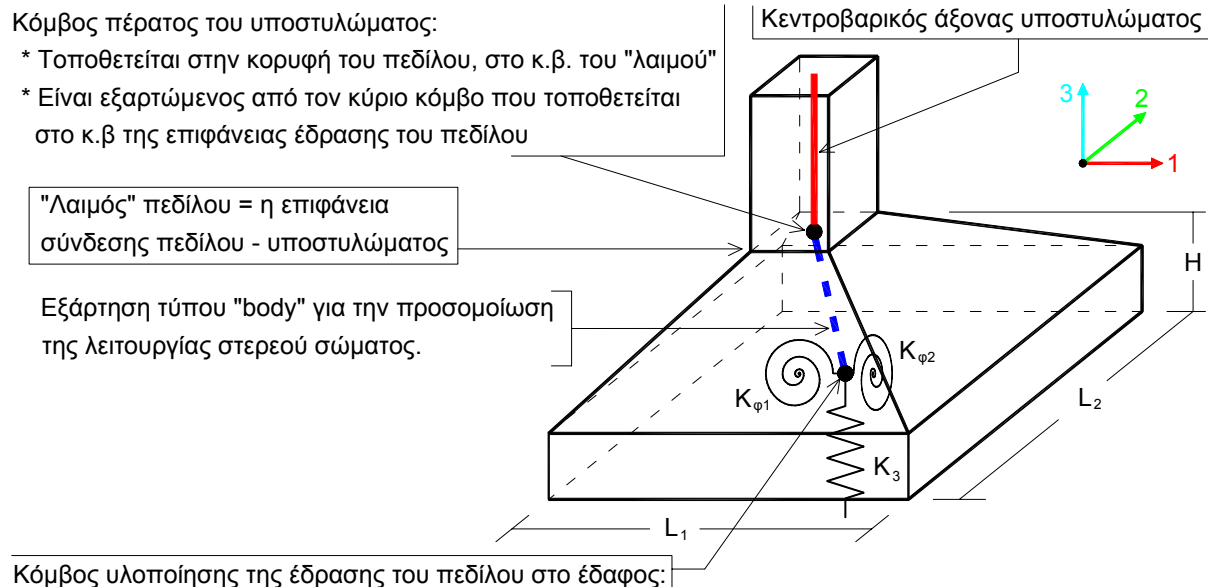


Σχήμα 1. Το γενικευμένο πεπερασμένο στοιχείο δοκού που είναι ενσωματωμένο στο ΡΑΦ.

Η χρήση του συγκεκριμένου στοιχείου δίνει δυνατότητες ακριβούς επίλυσης και ταυτόχρονα απλουστεύει σημαντικά τη διαδικασία προσομοίωσης. Έτσι, π.χ., η προσομοίωση ενός φατνώματος μιας πεδιλοδοκού είναι εφικτή με ένα μόνο πεπερασμένο στοιχείο και χωρίς την ανάγκη περαιτέρω διακριτοποίησης και τοποθέτησης μεμονωμένων ελατηρίων στους πρόσθετους ενδιάμεσους κόμβους.

Πέδιλα φέροντα ένα ή περισσότερα κατακόρυφα στοιχεία

Η αυτόματη προσομοίωση των πεδίων που φέρουν ένα ή περισσότερα κατακόρυφα στοιχεία γίνεται με βάση τη ρεαλιστική κατά κανόνα παραδοχή ότι το πέδιλο είναι ένα απολύτως στερεό σώμα. Με την παραδοχή αυτή μορφώνονται τα προσομοιώματα των ακόλουθων σχημάτων.



Σχήμα 2. Το προσομοίωμα που μορφώνει το ΡΑΦ για πέδιλο που φέρει ένα κατακόρυφο στοιχείο.

Παρατηρήσεις:

- Η εξάρτηση τύπου "body" δεσμεύει δύο ή περισσότερους κόμβους με τρόπο τέτοιο ώστε οι μετακινήσεις τους να αντιστοιχούν σε μετακινήσεις σημείων ενός απολύτως στερεού σώματος. Η προγραμματιστική υλοποίηση της συγκεκριμένης εξάρτησης επιτυγχάνεται με κατάλληλους μαθηματικούς μετασχηματισμούς και όχι με την προσθήκη απολύτως στερεών βραχιόνων. Με τη διαδικασία αυτή αποφεύγονται ενδεχόμενες αριθμητικές αστάθειες.
- Για τις σταθερές των ελατηρίων που τοποθετούνται στο κ.β. της επιφάνειας έδρασης του πεδίου δίνονται οι παρακάτω τιμές (βλ. π.χ. Αβραμίδης Ι.Ε. (2001)):

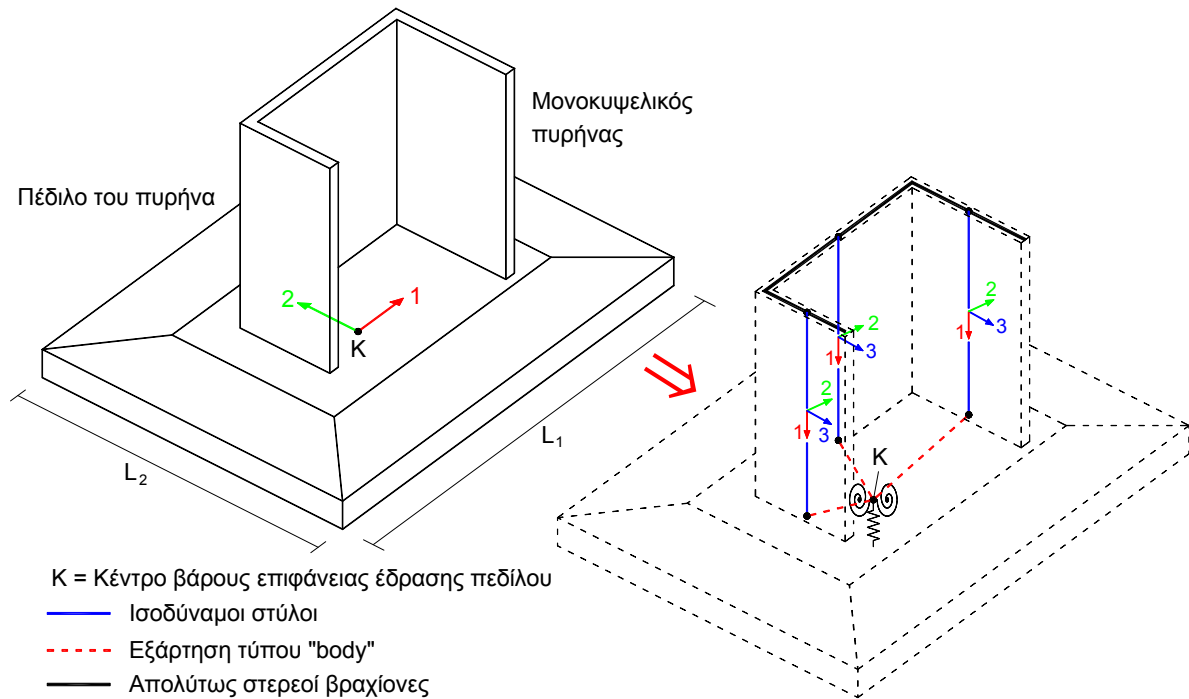
$$K_3 = K_s \cdot L_1 \cdot L_2 \quad (kN/m) \quad (1\alpha)$$

$$K_{\phi_1} = K_s \cdot \left(\frac{L_1 \cdot L_2^3}{12} \right) \quad (kNm/rad) \quad (1\beta)$$

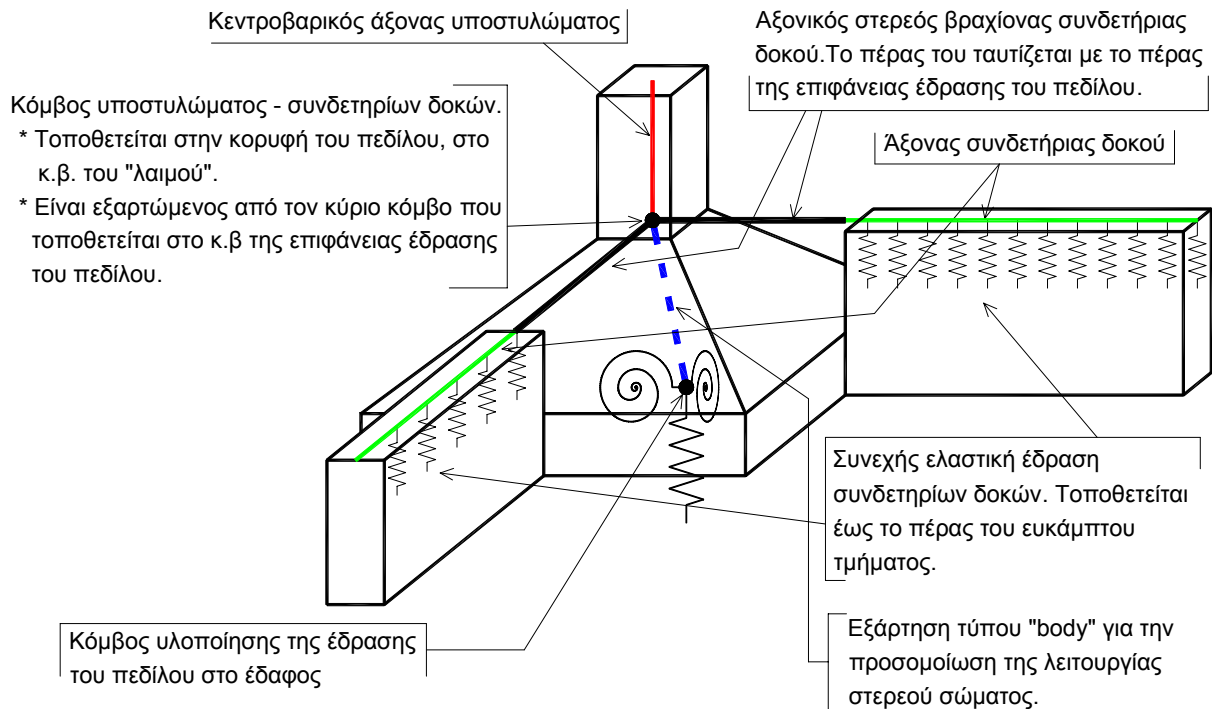
$$K_{\phi_2} = K_s \cdot \left(\frac{L_2 \cdot L_1^3}{12} \right) \quad (kNm/rad) \quad (1\gamma)$$

Όπου K_s είναι ο δείκτης εδάφους (kN/m^3).

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες προσομοίωσης για την περίπτωση έδρασης ενός μονοκυψελικού πυρήνα (Σχήμα 3), καθώς και οι λεπτομέρειες προσομοίωσης ενός κόμβου σύνδεσης πεδίου με συνδετήριες δοκούς (Σχήμα 4). Και στις δύο περιπτώσεις ακολουθούνται οι βασικές αρχές προσομοίωσης που περιγράφηκαν πιο πάνω.



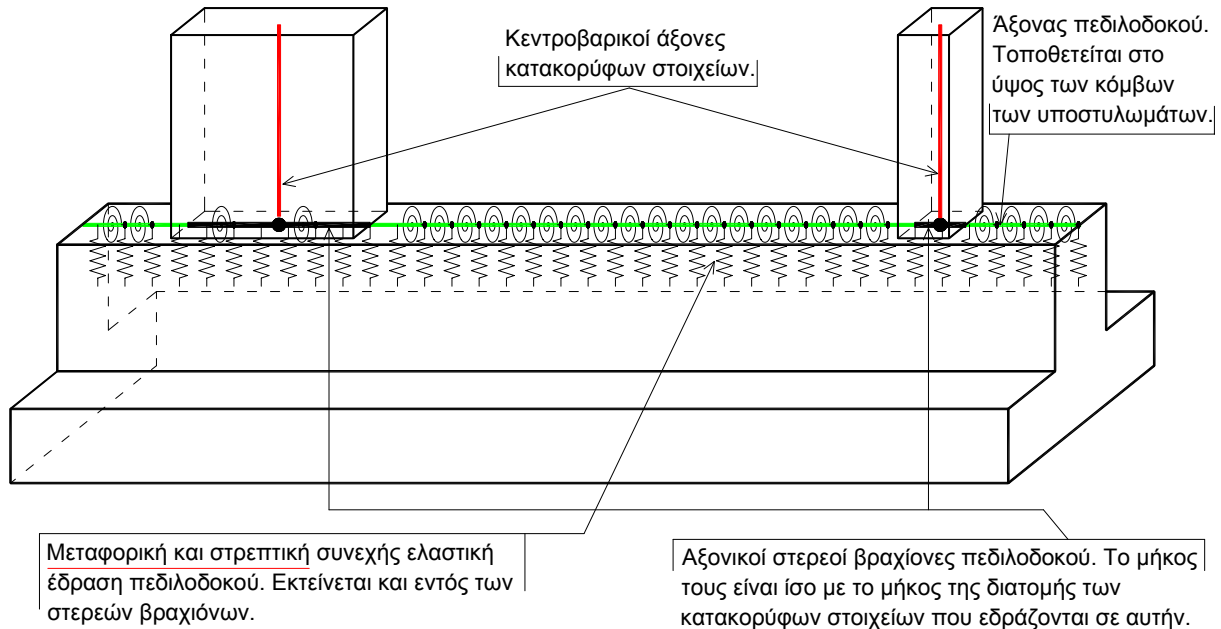
Σχήμα 3. Το προσομοίωμα που μορφώνει το ΡΑΦ για πέδιλο που φέρει μονοκυψελικό πυρήνα.



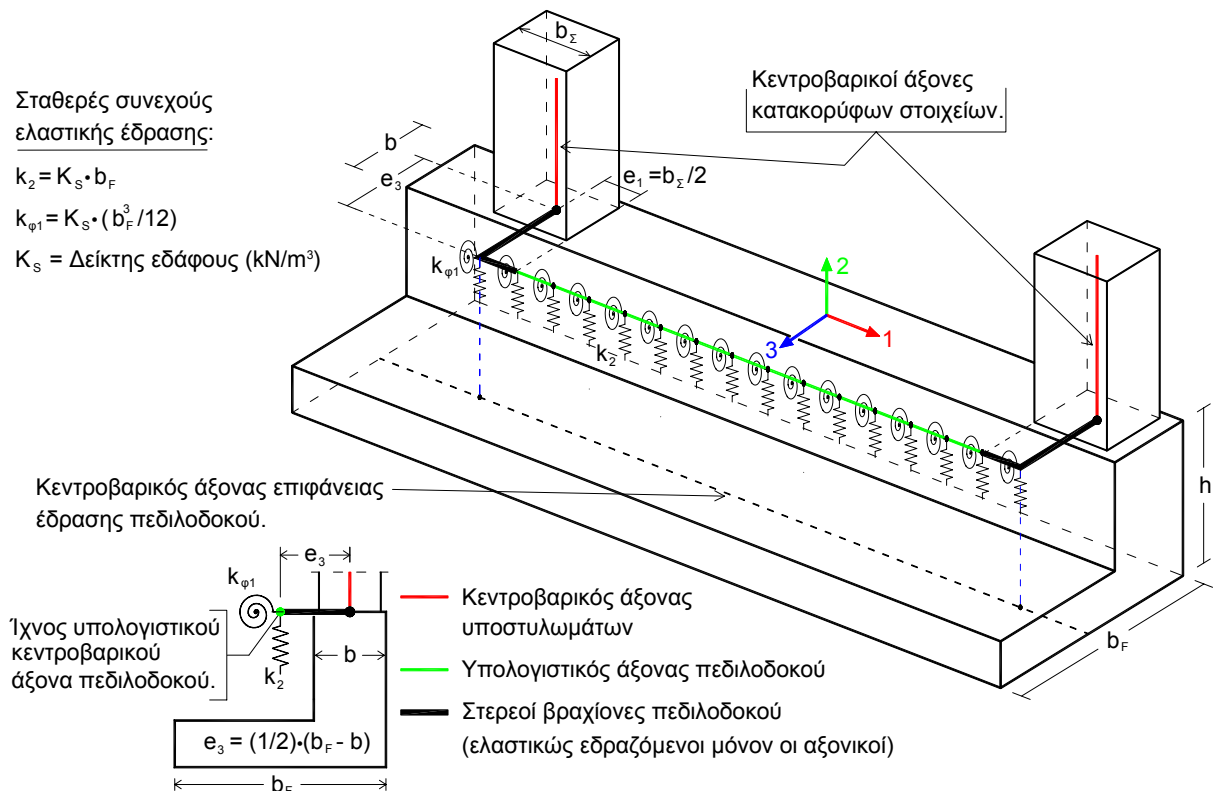
Σχήμα 4. Λεπτομέρειες προσομοίωσης των κόμβων σύνδεσης πεδίων-συνδετηρίων δοκών

Πεδιλοδοκοί / Εσχάρες πεδιλοδοκών

Η προσομοίωση των πεδιλοδοκών και των εσχάρων πεδιλοδοκών γίνεται με απλό και αξιόπιστο τρόπο, ενεργοποιώντας τη δυνατότητα του ενσωματωμένου γενικευμένου πεπερασμένου στοιχείου για θεώρηση συνεχούς ελαστικής, στρεπτικής και μεταφορικής, έδρασης (βλ. Σχήμα 1). Το ΡΑΦ δημιουργεί αυτομάτως προσομοιώματα τόσο για συμμετρικές (Σχήμα 5), όσο και για ασύμμετρες/έκκεντρες διατομές πεδιλοδοκών (Σχήμα 6).



Σχήμα 5. Το προσομοίωμα που μορφώνει το ΡΑΦ για πεδιλοδοκό συμμετρικής διατομής.



Σχήμα 6. Το προσομοίωμα που μορφώνει το ΡΑΦ για πεδιλοδοκό μη συμμετρικής διατομής.

Περιμετρικά τοιχώματα υπογείων

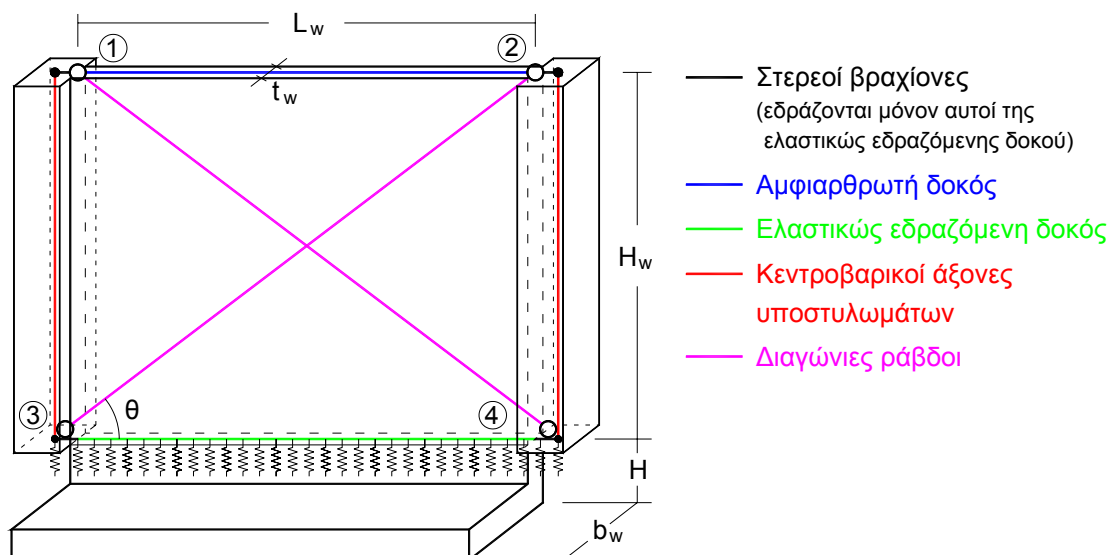
Τα περιμετρικά τοιχώματα υπογείου χρησιμοποιούνται αφενός για την κάλυψη κατασκευαστικών αναγκών των υπόγειων ορόφων ενός κτιρίου και αφετέρου για τη δημιουργία ενός άκαμπτου κλειστού ή ημιανοικτού κιβωτίου με ευεργετική δράση επί της αντισεισμικής του συμπεριφοράς. Η λειτουργία των τοιχωμάτων υπογείου συμβάλλει:

- (α) στην παραλαβή των φορτίων των πλακών των υπογείων ορόφων,
- (β) στην παραλαβή των ωθήσεων των γαιών που περιβάλουν τα υπόγεια και
- (γ) στη μεταφορά των σεισμικών δυνάμεων της ανωδομής στη θεμελίωση.

Λόγω της γεωμετρίας τους τα περιμετρικά τοιχώματα υπογείου κατατάσσονται κατά κανόνα στα «κοντά» τοιχώματα με λόγο μήκους προς ύψος μικρότερο του 2. Αυτό σημαίνει ότι η επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων στη μηχανική τους συμπεριφορά είναι πολύ σημαντική. Όπως είναι φυσικό, η πλέον ακριβής προσομοίωση στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η προσομοίωση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Ωστόσο, για να διατηρηθεί η συμβατότητα με τις διαδικασίες ελέγχου αντοχής που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια εφαρμογής των κανονισμών, το ΡΑΦ εφαρμόζει ένα προσομοίωμα που συντίθεται από ραβδωτά στοιχεία δοκού. Το προσομοίωμα αυτό στηρίζεται στις βασικές αρχές των μοντέλων Stafford-Smith (βλ. π.χ. Stafford-Smith (1981), (1984)), αλλά είναι προσαρμοσμένο κατάλληλα ώστε να καλύπτει ειδικά τις ανάγκες προσομοίωσης των τοιχωμάτων υπογείου.

Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο προσομοίωσης των περιμετρικών τοιχωμάτων μορφώνεται αυτόματα για κάθε φάτνωμα περιμετρικού πλαισίου ενός κτιρίου στις στάθμες που βρίσκονται κάτω από την οριζόμενη από τον χρήστη στάθμη ισογείου. Στο παρακάτω Σχήμα 7 παρουσιάζεται το σύνολο των επιμέρους στοιχείων, τα οποία ως σύνολο παράγονται και εισάγονται αυτόματα στο προσομοίωμα του κτιρίου και συνεργαζόμενα μεταξύ τους προσομοιώνουν το καθένα από αυτά μια από τις λειτουργίες του περιμετρικού τοιχώματος.



Σχήμα 7. Το προσομοίωμα που παράγει αυτόματα το ΡΑΦ για τα περιμετρικά τοιχώματα υπογείου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, τα στοιχεία που συνθέτουν το υπολογιστικό προσομοίωμα των φανωμάτων των περιμετρικών «πλαίσιων» των υπόγειων ανήκουν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες.

Τα χαρακτηριστικά τους καθώς και ο λόγος για τον οποίο έχουν εισαχθεί στο προσομοίωμα τεκμηριώνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 1. Τα δεδομένα και η χρήση των στοιχείων που συνθέτουν τα προσομοιώματα των περιμετρικών τοιχωμάτων υπογείου.

Στοιχείο	Κατηγορία	Λειτουργία που προσομοιώνει
1-2	Αμφιαρθρωτή δοκός	Χρησιμοποιείται μόνο για την παραλαβή των φορτίων των πλακών των υπογείων ορόφων. Το ότι είναι αμφιαρθρωτή εξασφαλίζει την μεταφορά των φορτίων των πλακών ως αξονικών δυνάμεων στα υποστυλώματα 1-3 και 2-4.
2-3 και 1-4	Διαγώνιες ράβδοι	Χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν τη διατμητική λειτουργία του τοιχώματος.
3-4	Ελαστικώς εδραζόμενη δοκός	Χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την καμπτική λειτουργία του τοιχώματος υπό την επίδραση των φορτίων των πλακών των υπογείων και των φορτίων των υποστυλωμάτων.

Παρατηρήσεις

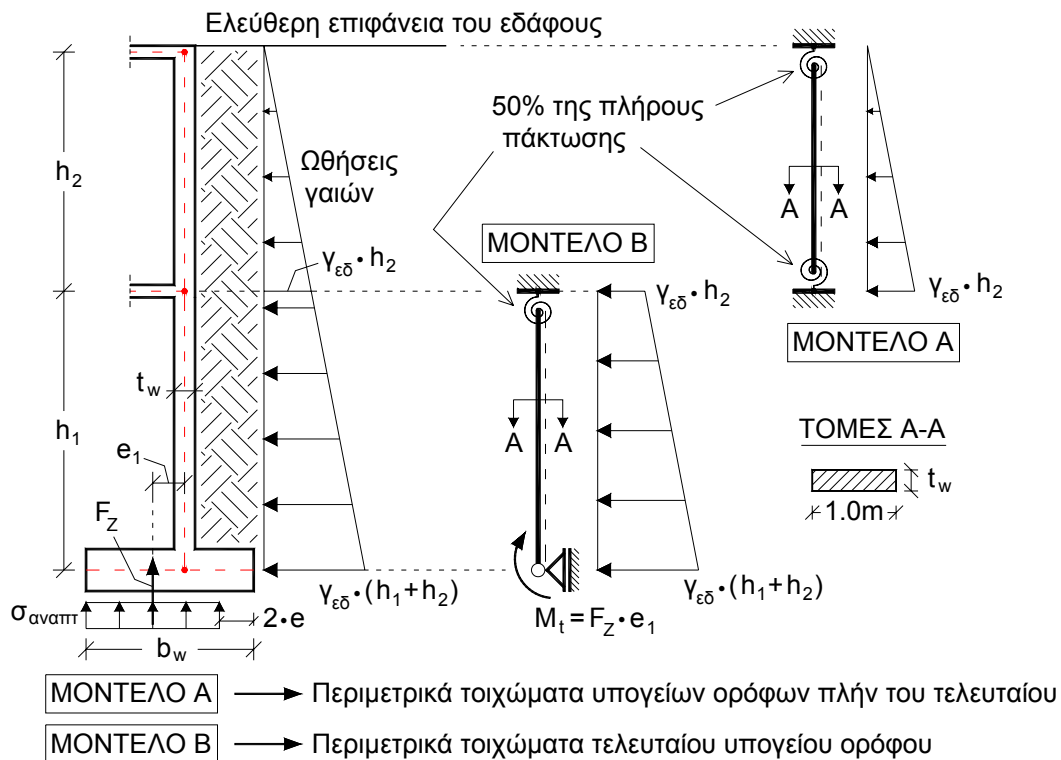
- Στη διατομή της αμφιαρθρωτής δοκού 1-2 δίνονται γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής με τιμή ίση με τη μονάδα. Καθώς η δοκός είναι αμφιαρθρωτή οι τιμές των αντιδράσεων που μεταφέρονται στα εκατέρωθεν υποστυλώματα, και οι οποίες είναι οι μόνες που μας ενδιαφέρουν, είναι ανεξάρτητες από τη διατομή της.
- Οι δύο διαγώνιες ράβδοι 1-4 και 2-3 καλούνται να προσομοιώσουν τη διατμητική λειτουργία του τοιχώματος [διαστάσεων ($H_w \times L_w$)]. Στις ράβδους αυτές δίνονται μοναδιαία χαρακτηριστικά διατομής με εξαίρεση την επιφάνεια της διατομής τους. Προκειμένου να υπολογιστεί η επιφάνεια αυτή, θεωρείται αμφίπακτο τοίχωμα διαστάσεων ($H_w \times L_w$), το οποίο υποβάλλεται σε μοναδιαία οριζόντια μετακίνηση της κεφαλής του. Υπολογίζοντας τη δύναμη που απαιτείται για τη μετακίνηση αυτή και εξισώνοντάς την με τις αξονικές δυνάμεις των δύο διαγωνίων ράβδων, οι οποίες με βάση τις παραδοχές που έγιναν καλούνται να την παραλάβουν, προκύπτουν οι ζητούμενες τιμές για τις επιφάνειες διατομής τους:

$$A = \frac{t_w \cdot L_w^2}{4 \cdot (1 + \nu) \cdot H_w \cdot \cos^3 \theta} \quad (\nu = \text{λόγος Poisson σκυροδέματος}) \quad (2)$$

- Η ελαστικώς εδραζόμενη δοκός 3-4 προσομοιώνει την καμπτική λειτουργία του περιμετρικού τοιχώματος (ως υψίκορμης πεδילוδοκού) υπό τη δράση των κατακορύφων φορτίων της πλάκας οροφής του υπογείου και των φορτίων των υποστυλωμάτων. Η διατομή που προσδίδεται σε αυτή τη δοκό είναι διατομή αντεστραμμένης πλακοδοκού (βλ. Σχήμα 7). Τα χαρακτηριστικά της έδρασης της υπολογίζονται όπως και στην περίπτωση μιας οποιασδήποτε ελαστικώς εδραζόμενης δοκού, με δεδομένα τον δείκτη εδάφους K_S και το πλάτος έδρασης b_w (βλ. Σχήμα 6).
- Οι ροπές αδράνειας των υποστυλωμάτων (ή των τοιχωμάτων) της ανωδομής που ενσωματώνονται εντός του περιμετρικού τοιχώματος του υπογείου αυξάνονται κατάλληλα έτσι ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες πάκτωσης τους στη στάθμη σύνδεσης με το

περιμετρικό τοίχωμα. Η αύξηση αυτή αφορά στις ροπές αδράνειας που αντιστοιχούν σε επίπεδο κάμψης που συμπίπτει με το επίπεδο του περιμετρικού τοιχώματος. Έτσι σε κατακόρυφα στοιχεία τα οποία ενσωματώνονται σε δύο διασταυρούμενα τοιχώματα υπογείου αυξανόνται οι ροπές αδράνειας κατά τη διεύθυνση και των δύο τοπικών τους αξόνων.

- Για την προσομοίωση της λειτουργίας του περιμετρικού τοιχώματος του υπογείου ως φορέα που παραλαμβάνει τις πλευρικές ωθήσεις των γαιών που περιβάλλουν τα υπόγεια, το ΡΑΦ δημιουργεί αυτομάτως ανεξάρτητα προσομοιώματα, που περιγράφονται συνοπτικά στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 8. Τα προσομοιώματα που παράγει αυτόματα το ΡΑΦ για την προσομοίωση των περιμετρικών τοιχωμάτων υπογείου ως φορέων που παραλαμβάνουν τις πλευρικές ωθήσεις γαιών.

Από τα προσομοιώματα αυτά προκύπτουν τα μεγέθη έντασης με τα οποία ελέγχεται η επάρκεια των οριζοντίων και των κατακορύφων ράβδων οπλισής που τοποθετούνται στο περιμετρικό τοίχωμα.

Υπολογισμός τάσεων εδάφους

Ιδιαίτερη μέριμνα έχει ληφθεί έτσι ώστε το ΡΑΦ να υπολογίζει τις ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίωσης. Η βασική παραδοχή που υιοθετείται προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός που περιγράφεται παρακάτω είναι η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής με αδρανείς περιοχές (παραδοχή Meyerhof).

- Πεδίλια

Στην περίπτωση των πεδίων το σημείο εφαρμογής της κατακόρυφης αντίδρασης του εδάφους εμφανίζει κατά κανόνα διπλή εκκεντρότητα ως προς το κ.β. της επιφάνειας έδρασης.

Έτσι, η σχέση από την οποία υπολογίζεται η αναπτυσσόμενη τάση είναι:

$$\sigma_{\text{αναπτ}} = \frac{P}{(L_1 - 2 \cdot e_1) \cdot (L_2 - 2 \cdot e_2)} \quad (3\alpha)$$

Στην παραπάνω σχέση L_1 , L_2 είναι οι διαστάσεις του πεδίου κατά τις διευθύνσεις των τοπικών του αξόνων (βλ. Σχήμα 2), και e_1 , e_2 είναι οι εκκεντρότητες της κατακόρυφης αντίδρασης του εδάφους ως προς τους συγκεκριμένους άξονες:

$$e_1 = -M_2 / P \quad e_2 = M_1 / P \quad (3\beta)$$

όπου M_1 , M_2 και P είναι οι αντιδράσεις των τριών ελατηρίων (των δύο στροφικών και του μεταφορικού) που τοποθετούνται στο κ.β. της επιφάνειας έδρασης του πεδίου (βλ. Σχήμα 2).

• Πέδιλοδοκοί

Ο υπολογισμός των αναπτυσσομένων τάσεων κάτω από το πέλμα πεδιλοδοκών γίνεται με τη θεώρηση ότι, εφόσον οι διατομές συμπεριφέρονται ως στερεά σώματα, υπάρχει αντιστοιχία με την περίπτωση πεδίων μεγάλου μήκους με απλή εκκεντρότητα. Έτσι, σε κάθε σημείο μίας πεδιλοδοκού υπολογίζεται η ανά μέτρο μήκους αναπτυσσόμενη τάση ως εξής:

Μετακινήσεις σε συγκεκριμένο σημείο i:

u_{2i} [m]: Κατακόρυφη μετακίνηση

φ_{1i} [rad]: Στροφή περί τον τοπικό άξονα 1



Σταθερές συνεχούς μεταφορικής και στρεπτικής ελαστικής έδρασης:

$$k_2 \text{ [kN/m]} \rightarrow k_2 = K_S \cdot b_F$$

$$k_{\varphi 1} \text{ [kNm/rad]} \rightarrow k_{\varphi 1} = K_S \cdot (b_F^3 / 12)$$

$$K_S = \Delta \text{είκτης εδάφους (kN/m}^3)$$



Αντιδράσεις:

Μεταφορικής έδρασης: $F_{2i} = k_2 \cdot u_{2i}$ (kN/m)

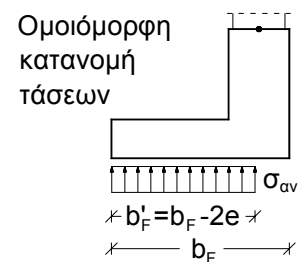
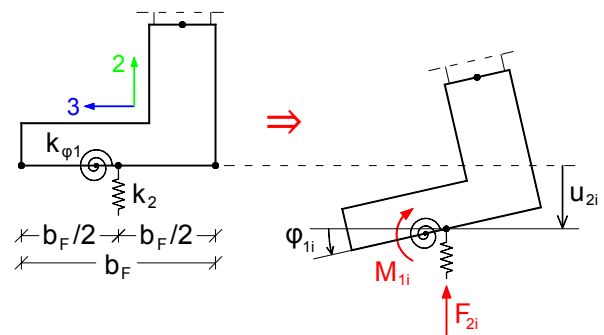
Στρεπτικής έδρασης: $M_{1i} = k_{\varphi 1} \cdot \varphi_{1i}$ (kNm/rad)

Εκκεντρότητα: $e_i = M_{1i} / F_{2i}$ (m)



Αναπτυσσόμενη τάση:

$$\sigma_{\text{αναπτ},i} = \frac{F_{2i}}{(b_F - 2e_i)} \text{ (kN/m}^2)$$

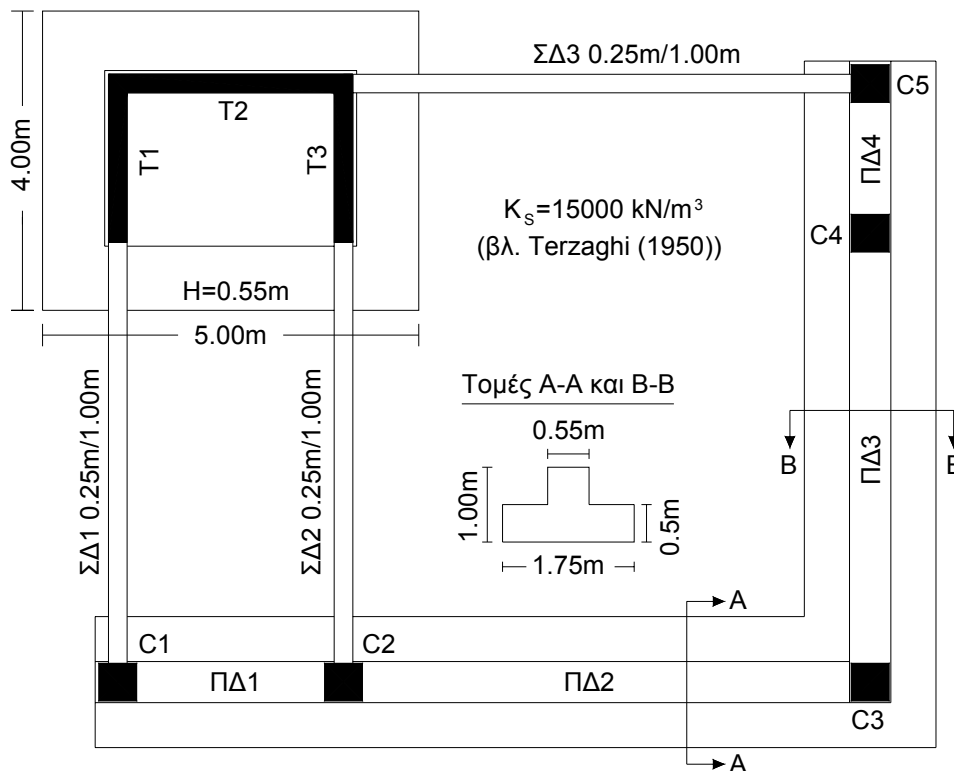
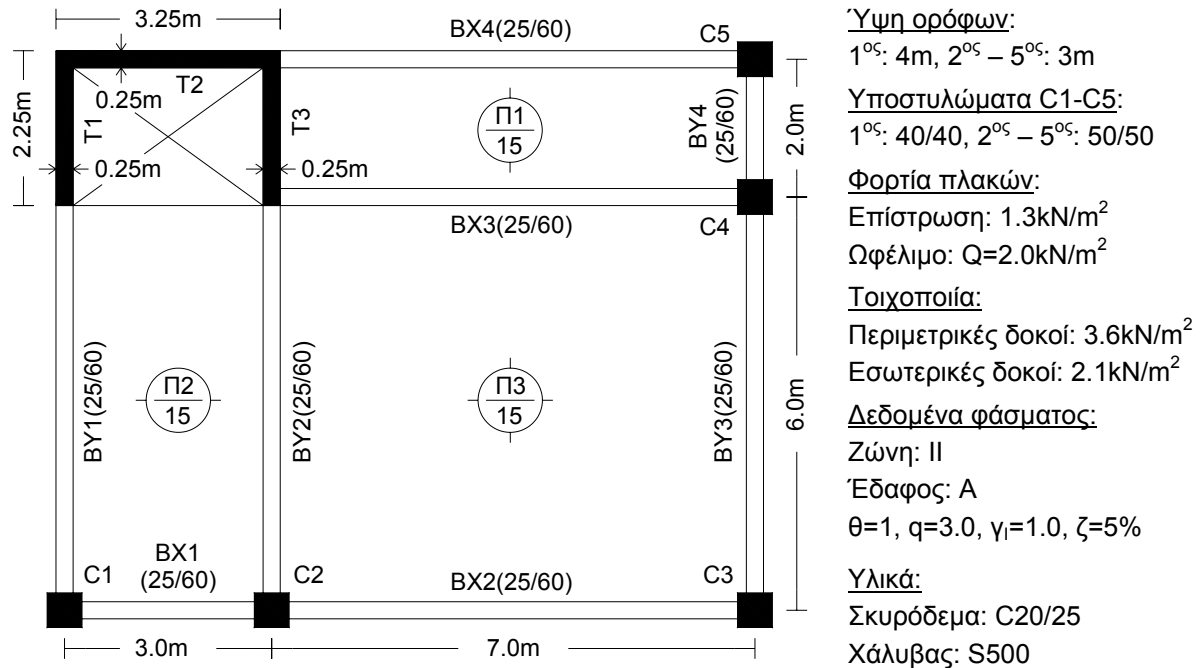


Σχήμα 9. Διαδικασία υπολογισμού αναπτυσσομένων τάσεων εδάφους στις πεδιλοδοκούς.

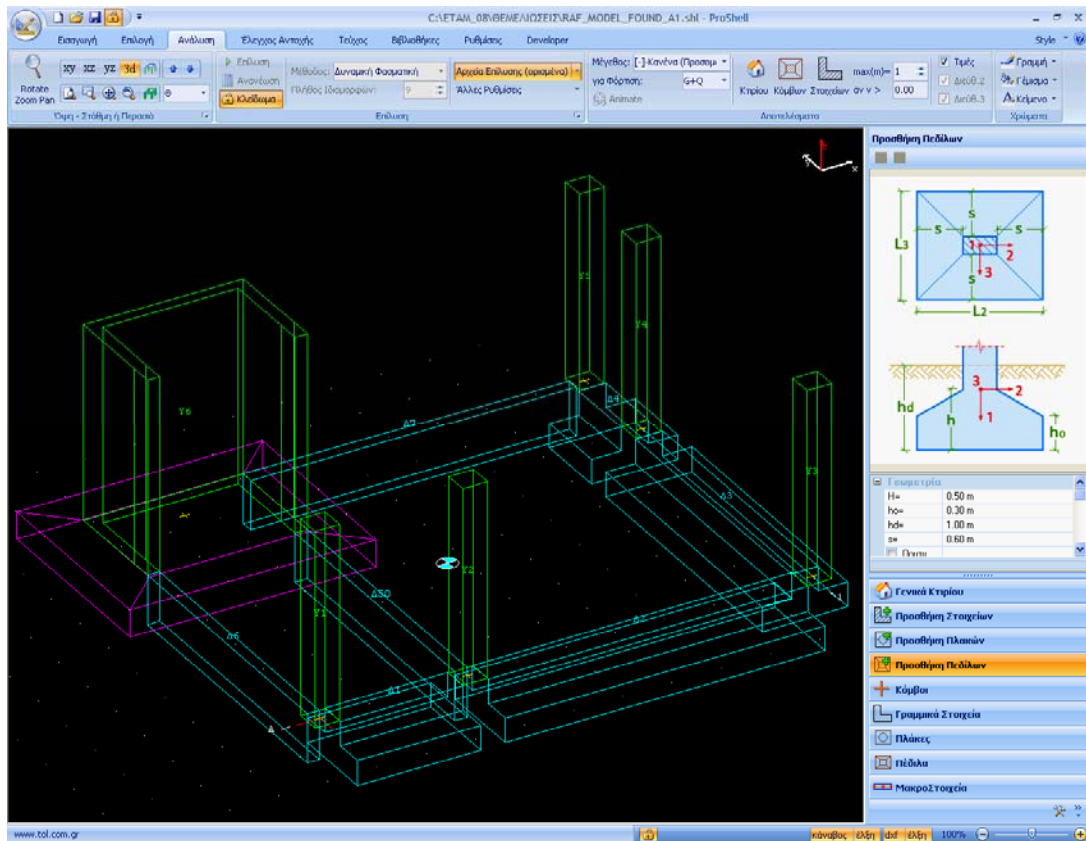
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάνοντας την παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής τάσεων με αδρανείς περιοχές, ο έλεγχος του σώματος των πεδίων και των πτερυγίων των πεδιλοδοκών σε κάμψη και διάτμηση γίνεται πολλαπλασιάζοντας τις ροπές και τις τέμνουσες σχεδιασμού με τους συντελεστές 1.05 και 0.95 αντίστοιχα. Με την προσαρμογή αυτή οι διαφορές των μεγεθών σχεδιασμού που προκύπτουν με παραδοχή γραμμικής κατανομής τάσεων (κατανομή Navier) και της ομοιόμορφης κατανομής ελαχιστοποιούνται (βλ. π.χ. Αναγνωστόπουλος Χ. (2001), Πενέλης Γ., Στυλιανίδης Κ., Κάππος Α., Ιγνατάκης Χ. (1995)).

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

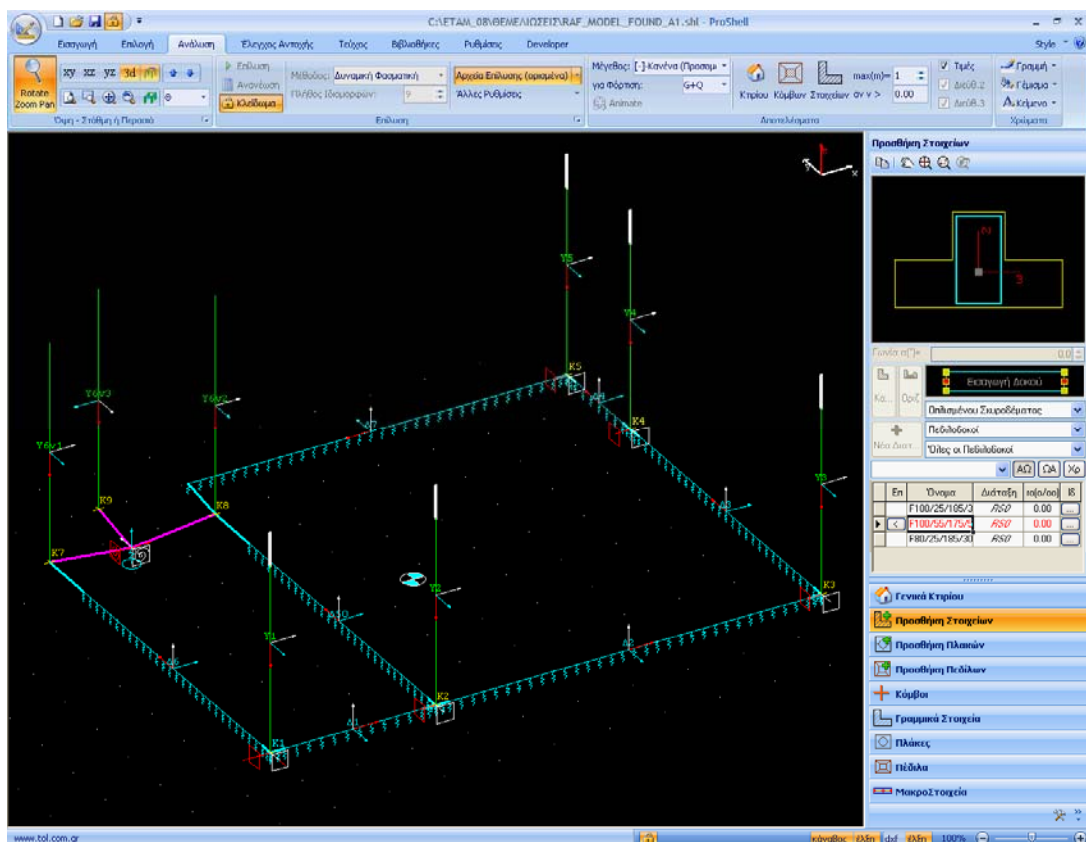
Η φιλοσοφία των μεθόδων προσομοίωσης των θεμελιώσεων που υιοθετείται από το ΡΑΦ παρουσιάζεται και αξιολογείται εδώ με τη βοήθεια του χαρακτηριστικού αριθμητικού παραδείγματος που ακολουθεί. Το παράδειγμα αυτό αφορά στο κτίριο του παρακάτω σχήματος, στο οποίο ο πυρήνας θεμελιώνεται σε ένα μη έκκεντρο πέδιλο το οποίο συνδέεται μέσω τριών συνδετήριων δοκών (ΣΔ1, ΣΔ2, ΣΔ3) με τις δύο πεδילוδοκούς (ΠΔ1-ΠΔ2 και ΠΔ3-ΠΔ4) επί των οποίων εδράζονται τα υπόλοιπα κατακόρυφα στοιχεία.



Σχήμα 10. Κάτοψη τυπικού ορόφου και θεμελίωσης. Γενικά δεδομένα κτιρίου.



(α)



(β)

Σχήμα 11. Ενδεικτική εικόνα του φορέα θεμελίωσης (α) και του προσομοιώματος (β) στο ΡΑΦ.

Κατά την επίλυση του παραδείγματος ενεργοποιούνται οι δυνατότητες του ΡΑΦ (α) για αυτόματη προσομοίωση πεδίου που φέρει περισσότερα του ενός κατακόρυφα στοιχεία (τους 3 ισοδύναμους στύλους με τους οποίους προσομοιώνεται ο πυρήνας) και (β) για την αυτόματη προσομοίωση της ελαστικής έδρασης των δοκών θεμελίωσης με εφαρμογή της ακριβούς λύσης της διαφορικής εξίσωσης που διέπει το πρόβλημα της κάμψης δοκών επί ελαστικού υποβάθρου τύπου Winkler.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση με το ΡΑΦ έγινε ανάλυση του ίδιου κτιρίου και με το SAP2000. Για την επίλυση με το SAP2000 έγινε προπάθεια μέγιστης δυνατής προσαρμογής των δεδομένων επίλυσης στα αντίστοιχα δεδομένα που παράγονται αυτόματα από το ΡΑΦ. Ο στόχος των συγκρίσεων που ακολουθούν είναι η τεκμηρίωση της ορθής μόρφωσης των προσομοιωμάτων θεμελίωσης και η εξίσου ορθή επίλυση του προσομοιώματος από το ΡΑΦ. Επιπλέον, καθίσταται σαφής η απλότητα του προσομοιώματος που μορφώνει το ΡΑΦ, καθώς για το σύνολο των δοκών θεμελίωσης απαιτείται η χρήση 6 μόνον πεπερασμένων στοιχείων δοκού, σε αντίθεση με το SAP2000, στα πλαίσια του οποίου η προσομοίωση των δοκών θεμελίωσης απαιτεί την χρήση 745 στοιχείων. Ο λόγος για τον οποίο απαιτείται η εισαγωγή ενός τόσο μεγάλου αριθμού στοιχείων στο SAP2000 είναι η ανάγκη για πυκνή διακριτοποίηση, μέσω της οποίας προσεγγίζεται η συνεχής ελαστική έδραση των δοκών. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκριτικά χαρακτηριστικά αποτελέσματα των αναλύσεων με τα προγράμματα ΡΑΦ και SAP2000 για τις περιπτώσεις φόρτισης (G), (Q), και ($\pm E$) (με τοποθέτηση των μαζών στη θέση 1 σύμφωνα με τον ΕΑΚ/2000 (Σχ. Σ.3.3.2)).

Πίνακας 2. Σύγκριση των ιδιοπεριόδων ταλάντωσης.

	SAP2000	ΡΑΦ	
	Τιμή (sec)	Τιμή (sec)	Απόκλιση%
T ₁	0,8320	0,8320	0,00%
T ₂	0,7215	0,7216	0,01%
T ₃	0,3586	0,3586	0,02%
T ₄	0,1614	0,1614	0,00%
T ₅	0,1154	0,1155	0,05%
T ₆	0,0880	0,0880	0,00%

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τιμές των ιδιοπεριόδων ταλάντωσης που προκύπτουν από την επίλυση με το ΡΑΦ συμπίπτουν με τις τιμές που προκύπτουν από το SAP2000.

Πίνακας 3. Σύγκριση των πιθανών ακραίων τιμών των μετακινήσεων στην κορυφή του κτιρίου.

		SAP2000	ΡΑΦ	
		Τιμή (m)	Τιμή	Απόκλιση%
Κορυφή κτιρίου Στύλος C1	u _x	0,0310	0,0310	0,00%
	u _y	0,0250	0,0250	-0,01%
	R _z	0,00106	0,00106	-0,01%

Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τιμές των μετακινήσεων που προκύπτουν από τον ΡΑΦ δεν αποκλίνουν περισσότερο από 0.01% από τις μετακινήσεις που προκύπτουν από την επίλυση με το SAP2000.

Πίνακας 4. Σύγκριση μεγεθών σχεδιασμού του στύλου C1 στο σημείο σύνδεσης με τη πεδιλοδοκό.

		SAP2000	ΡΑΦ	
		Τιμή	Τιμή	Απόκλιση %
1,35G+1,50Q	N=	-285,88	-285,82	-0,02%
	M ₂ =	-91,68	-91,56	-0,14%
	M ₃ =	103,06	103,06	-0,01%
G+0,30Q+E	exN=	52,49	52,56	0,12%
	M _{2,N} =	-55,24	-55,17	-0,13%
	M _{3,N} =	149,33	149,29	-0,03%
	N _{,M2} =	-181,08	-181,06	-0,01%
	exM ₂ =	76,71	76,76	0,07%
	M _{3,M2} =	148,60	148,58	-0,01%
	N _{,M3} =	-20,17	-20,15	-0,08%
	M _{2,M3} =	34,78	34,85	0,22%
	exM ₃ =	183,24	183,20	-0,02%
	extrV ₂ =	21,98	21,86	-0,55%
	extrV ₃ =	78,83	78,80	-0,03%
	G+0,30Q-E	exN=	-435,13	-435,14
M _{2,N} =		-66,81	-66,73	-0,12%
M _{3,N} =		-10,41	-10,37	-0,38%
N _{,M2} =		-201,56	-201,52	-0,02%
exM ₂ =		-198,76	-198,67	-0,05%
M _{3,M2} =		-9,68	-9,67	-0,12%
N _{,M3} =		-362,47	-362,43	-0,01%
M _{2,M3} =		-156,83	-156,75	-0,05%
exM ₃ =		-44,32	-44,29	-0,08%
extrV ₂ =		-87,06	-86,94	-0,13%
extrV ₃ =		-39,27	-39,29	0,06%

Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι οι αποκλίσεις του ΡΑΦ από το SAP2000 είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερες του 0.55%. Επομένως τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων πρακτικώς συμπίπτουν. Το ίδιο συμπέρασμα πρόκύπτει και από τη μελέτη του ακόλουθου Πίνακα 5, ο οποίος αφορά στα μεγέθη σχεδιασμού της δοκού ΒΧ1 στον πρώτο όροφο (μέγιστη απόκλιση 0.15%).

Πίνακας 5. Σύγκριση μεγεθών σχεδιασμού της δοκού ΒΧ1 στο ισόγειο.

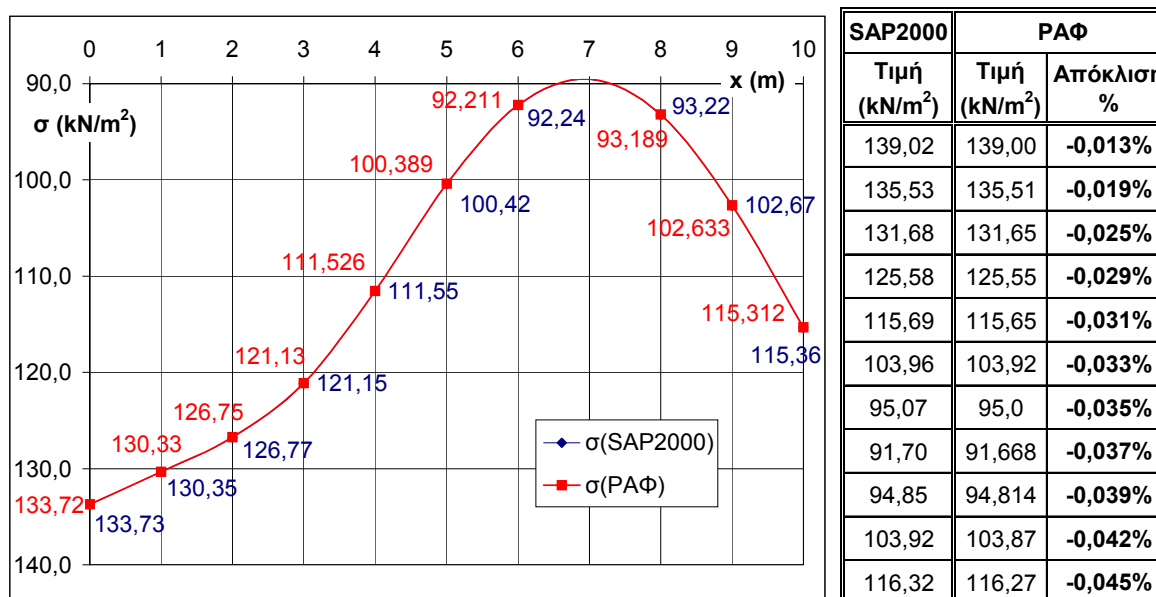
		SAP2000	ΡΑΦ	
		Τιμή	Τιμή	Απόκλιση%
1,35G+1,50Q	V ₂ =	59,84	59,80	-0,08%
	M ₃ =	89,95	89,91	-0,04%
G+0,30Q+E	extrV ₂ =	141,91	141,88	-0,02%
	extrM ₃ =	193,17	193,23	0,03%
G+0,30Q-E	extrV ₂ =	-61,83	-61,85	0,03%
	extrM ₃ =	-71,45	-71,56	0,15%

Ανάλογα με τα συμπεράσματα των προηγούμενων πινάκων είναι και τα συμπεράσματα του Πίνακα 6 που ακολουθεί. Στον πίνακα αυτόν παρουσιάζονται οι τιμές των αντιδράσεων F_3 , M_1 , M_2 που αναπτύσσονται στον κόμβο έδρασης του πεδίου του πυρήνα και των τάσεων εδάφους $\sigma_{\text{ανταπτ}}$ υπολογισμένων με βάση την σχέση (3α).

Πίνακας 6. Σύγκριση των αντιδράσεων και των αναπτυσσομένων τάσεων στο πέδιλο του πυρήνα.

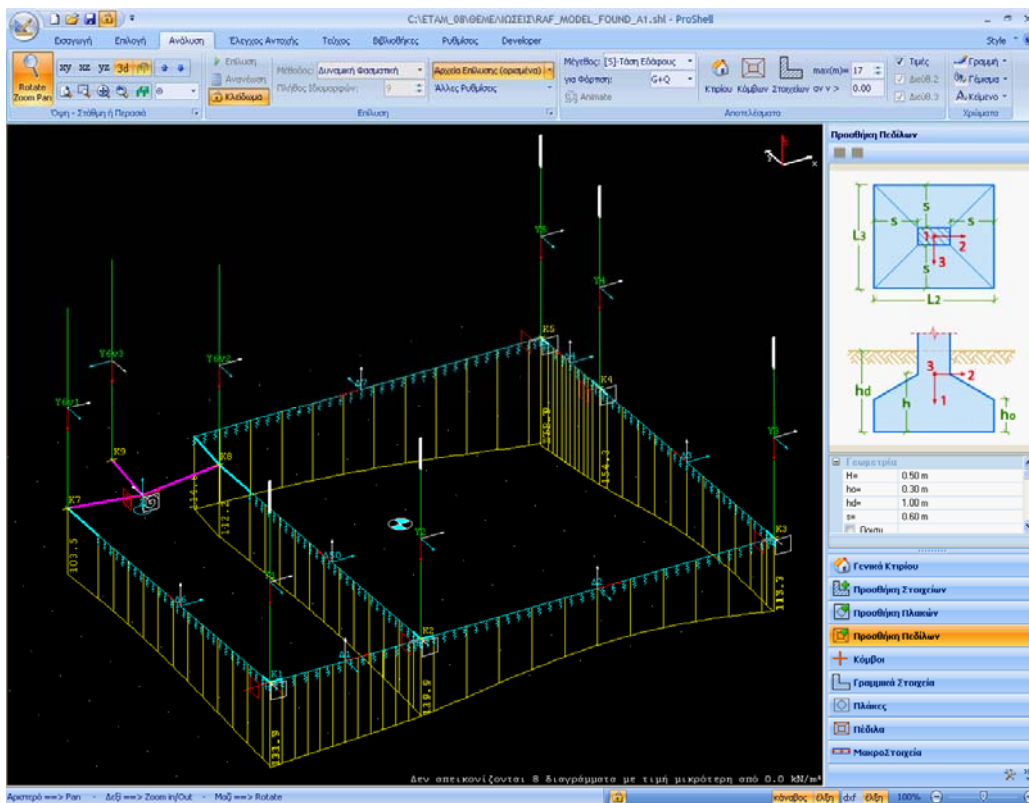
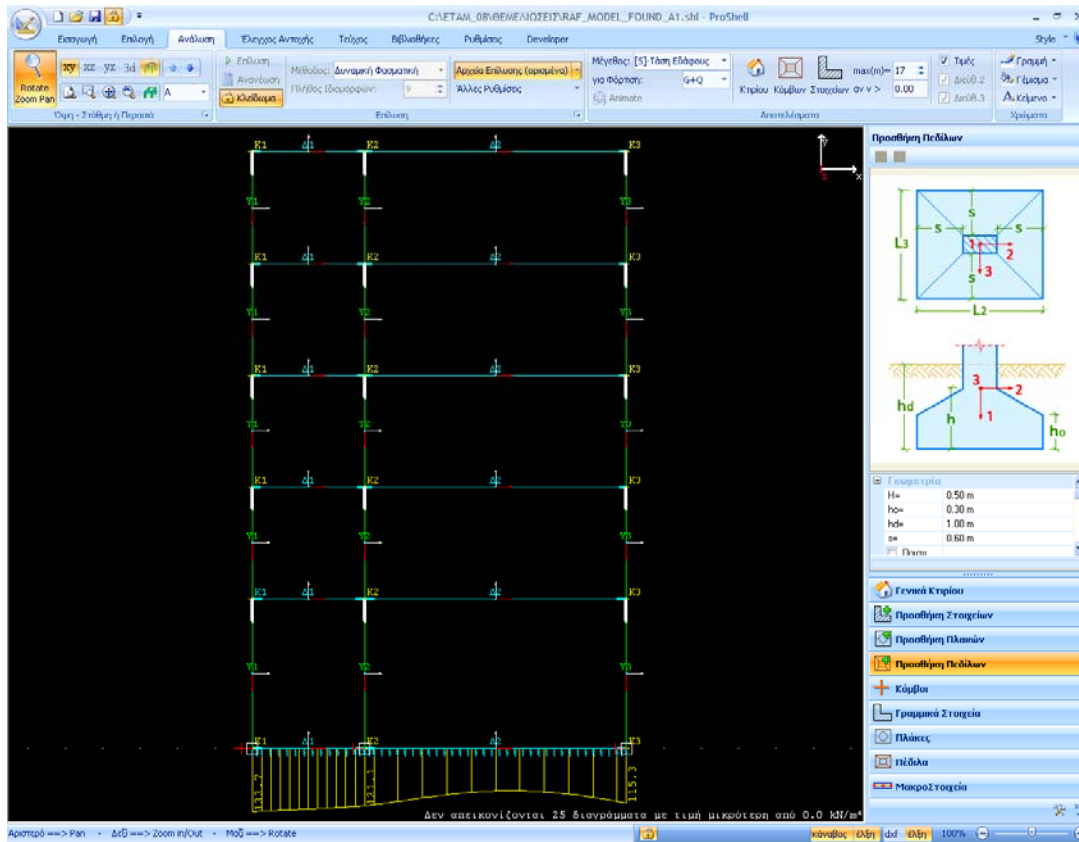
		SAP2000	ΠΑΦ	
		Τιμή	Τιμή	Απόκλιση %
1,35G+1,50Q	F_3 (kN)	2954,21	2944,81	-0,32%
	M_1 (kNm)	82,95	81,62	-1,61%
	M_2 (kNm)	-170,03	-168,26	-1,04%
	$\sigma_{\text{ανταπτ}}$ (kN/m ²)	153,34	152,80	-0,35%
G+0,30Q+E	F_3 (kN)	2619,61	2614,16	-0,21%
	M_1 (kNm)	645,06	644,07	-0,15%
	M_2 (kNm)	727,19	728,23	0,14%
	$\sigma_{\text{ανταπτ}}$ (kN/m ²)	168,03	167,77	-0,16%
G+0,30Q-E	F_3 (kN)	1379,45	1374,08	-0,39%
	M_1 (kNm)	-519,50	-520,31	0,16%
	M_2 (kNm)	-936,18	-935,19	-0,11%
	$\sigma_{\text{ανταπτ}}$ (kN/m ²)	116,64	116,45	-0,16%

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τιμές των αναπτυσσομένων τάσεων εδάφους κάτω από την πεδילוδοκό ΠΔ1-ΠΔ2 (για τα φορτία λειτουργίας G+Q), όπως υπολογίζονται αυτόματα από το ΠΑΦ και όπως υπολογίζονται μετά από επεξεργασία αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το SAP2000. Ο υπολογισμός των τάσεων αυτών γίνεται με βάση τη διαδικασία του σχήματος 9. Από τη μελέτη του σχήματος 12 προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα των δύο επιλύσεων πρακτικά συμπίπτουν.



Σχήμα 12. Σύγκριση των τιμών των αναπτυσσομένων τάσεων στην πεδילוδοκό ΠΔ1-ΠΔ2 για τα φορτία λειτουργίας G+Q.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τάσεων του σχήματος 12 για την πεδλιοδοκό ΠΔ1-ΠΔ2 αλλά και για όλη τη θεμελίωση, όπως απεικονίζονται από το ΡΑΦ:



Σχήμα 13. Απεικόνιση των διαγραμμάτων τάσεων εδάφους από το ΡΑΦ.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία περιγράφηκαν αναλυτικά τα προσομοιώματα τα οποία μορφώνει αυτόματα το πρόγραμμα στατικής κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του ΤΟΛ[®], για την προσομοίωση δομικών στοιχείων θεμελίωσης όπως μεμονωμένα πέδιλα που φέρουν ένα ή περισσότερα κατακόρυφα στοιχεία, πεδιλοδοκοί, και περιμετρικά τοιχώματα υπογείου εδραζόμενα σε ελαστικό έδαφος. Τα προσομοιώματα αυτά συντίθενται με τη χρήση ενός γενικευμένου πεπερασμένου στοιχείου δοκού το οποίο έχει ενσωματωμένα στις εξισώσεις του όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά (όπως π.χ. στερεοί βραχίονες στα άκρα, συνεχής ελαστική έδραση με βάση τις διαφορικές εξισώσεις του προβλήματος των ελαστικώς δραζόμενων δοκών) με τα οποία καθίσταται εφικτή η ακριβέστερη δυνατή απόδοση της μηχανικής συμπεριφοράς των θεμελιώσεων με σαφή και απλό τρόπο. Τα προσομοιώματα που παράγονται αυτόματα από το πρόγραμμα δεν είναι δεσμευτικά για το χρήστη, ο οποίος έχοντας στη διάθεση του τα απαραίτητα «εργαλεία» μπορεί να τα τροποποιεί κατάλληλα κατά την κρίση του. Ειδική έμφαση δίνεται από το πρόγραμμα στην προσομοίωση των περιμετρικών τοιχωμάτων υπογείου, μέσω της μόρφωσης λεπτομερών προσομοιωμάτων με τα οποία λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι της σύνθετης λειτουργίας των συγκεκριμένων στοιχείων, ως κατακόρυφων δίσκων κατά την παραλαβή οριζοντίων σεισμικών δυνάμεων, ως υψίκορμων πεδιλοδοκών εδραζόμενων επί του εδάφους, και ως πλακών που παραλαμβάνουν τις ωθήσεις των γαιών που περιβάλλουν τα υπόγεια των κτιρίων. Επιπλέον, το ΡΑΦ έχει ενσωματωμένες διαδικασίες οι οποίες επιτρέπουν τον υπολογισμό και την εποπτική απεικόνιση των τάσεων εδάφους. Η αξιοπιστία της διαδικασίας μόρφωσης των προσομοιωμάτων και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του ΡΑΦ, τεκμηριώνεται με τη βοήθεια ενός χαρακτηριστικού αριθμητικού παραδείγματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ή ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αβραμίδης Ι.Ε. (2001), «Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών - Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στις μεθόδους προσομοίωσης κατασκευών», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ.
- Αβραμίδης Ι.Ε., Μορφίδης Κ. (2000), «Γενικευμένο Πεπερασμένο Στοιχείο Δοκού επί Ελαστικού Υποβάθρου WINKLER», Τεχνικά Χρονικά, Σειρά Ι, τεύχ. 3, σελ. 99-116.
- Αναγνωστόπουλος Χ. (2001), «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Θεμελιώσεων, Αντιστηρίξεων και Γεωκατασκευών», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΑΣΤΕ 5, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ.
- ΕΑΚ/2000, *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (2000)*, ΟΑΣΠ, Αθήνα.
- Μορφίδης Κ. (2003), «Διερεύνηση και ανάπτυξη μεθοδολογιών προσομοίωσης δομικών στοιχείων θεμελίωσης και εδάφους», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Πενέλης Γ., Στυλιανίδης Κ., Κάππος Α., Ιγνατάκης Χ. (1995), «Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιεύσεων.
- Hetenyi M. (1946), "Beams on elastic foundation", University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Morfidis K., Avramidis I.E. (2002), "Formulation of a generalized beam element on a two-parameter elastic foundation with semi-rigid connections and rigid offsets", *Computers and Structures*, 80, pp. 1919-1934.

SAP2000 Non-Linear Version 7.44. (2001), Integrated finite element analysis and design of structures. Berkeley, California, USA: Computers and Structures, Inc.

Selvadurai A.P.S. (1979), "Elastic analysis of Soil – Structure Interaction", Developments in Geotechnical Engineering Vol.17, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Stafford-Smith B., Abate A. (1981), "Analysis of Non-Planar Shear Wall Assemblies by Analogous Frame", Proc. Instn Civ. Engrs 71, Part 2, pp. 395-406.

Stafford-Smith B., Girgis A.M., (1984), "Simple Analogous Frames for Shear Wall Analysis", ASCE, J.Str.Eng. 110 (1984), No.11, pp. 2655-2666.

Terzaghi K. (1955), "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction", Geotechnique, 5, pp. 297-326.

Winkler E. (1867), "Die Lehre von der Elastizitat und Festigkeit", Dominicus, Prague.