

1^ο Μέρος: Εισαγωγή στη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού και στην κανονιστική της υλοποίηση

1^ο ΜΕΡΟΣ

**Εισαγωγή στη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού
και στην κανονιστική της υλοποίηση**

1. Η φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών – Επεξήγηση θεμελιωδών αρχών και κριτικές παρατηρήσεις

Το σημαντικότερο ίσως θέμα που πρέπει να έχει κατανοήσει εις βάθος ο μελετητής δομοστατικός μηχανικός προκειμένου να εκπονή αξιόπιστες αντισεισμικές μελέτες είναι το βασικό σκεπτικό που διέπει τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, δηλαδή αυτό που συχνά αποκαλούμε «φιλοσοφία» του αντισεισμικού σχεδιασμού. Από το βασικό αυτό σκεπτικό προκύπτουν οι θεμελιώδεις κανόνες μόρφωσης του φέροντος οργανισμού μιας αντισεισμικής κατασκευής και βάσει αυτού γίνεται αντιληπτή η σημασία όλων των επί μέρους διατάξεων των ισχυόντων αντισεισμικών κανονισμών. Για τον λόγο αυτόν στο παρόν Κεφάλαιο 1 θα επεξηγηθούν και θα σχολιαστούν οι θεμελιώδεις αρχές της σύγχρονης αντισεισμικής φιλοσοφίας, και συγκεκριμένα

- θα παρουσιαστεί λεπτομερώς η τρέχουσα φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού, η οποία αποτελεί τη βάση για τον Ευρωκώδικα 8 (Μέρος 1), εφεξής απλά: ΕΚ8, αλλά και για ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς άλλων χωρών (§1.1),
- θα διατυπωθούν εν συντομία ορισμένες κριτικές παρατηρήσεις επί της τρέχουσας φιλοσοφίας αντισεισμικού σχεδιασμού (§1.2), και
- θα γίνει αναφορά στην τρέχουσα θεώρηση της αντισεισμικής ασφάλειας, όπως αυτή συγκεκριμενοποιείται σε κανονιστικά κείμενα κυρίως των ΗΠΑ, αλλά και στον ΕΚ8 (Μέρος 3), καθώς και στον ελληνικό κανονισμό επεμβάσεων ΚΑΝΕΠΕ (§1.3).

1.1 Η ισχύουσα φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών

1.1.1 Η τυχηματικότητα της σεισμικής δράσης

Η ιδιαιτερότητα της σεισμικής δράσης έναντι των υπόλοιπων φορτίσεων (όπως, π.χ., των κατακόρυφων στατικών φορτίων) στις οποίες πρέπει να αντέχει μια κατασκευή συνίσταται στα εξής:

- (α) Οι χαρακτηριστικές παράμετροι του σεισμού που επηρεάζουν τη σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών:
 - το μέγεθος του σεισμού (το οποίο αντιστοιχεί στην εκλυόμενη ενέργεια),
 - το βάθος του υποκέντρου (= της εστίας) του σεισμού,
 - η απόσταση του σεισμικού επικέντρου από την εκάστοτε μελετώμενη κατασκευή,
 - το συχνотικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης στη βάση της κατασκευής,
 - η κατευθυντικότητα της σεισμικής διέγερσης,
 - η διάρκεια της σεισμικής διέγερσης και ορισμένες άλλες,είναι πολυάριθμες και μπορούν να εκτιμηθούν αποκλειστικά με *πιθανοτικό* τρόπο.
- (β) Οι πολύ υψηλές σεισμικές επιταχύνσεις (και οι συνακόλουθες δυνάμεις) που ενδέχεται να δεχθεί μια κατασκευή έχουν σχετικά μικρή πιθανότητα εκδήλωσης κατά τη συμβατική διάρκεια ζωής της (που συνήθως θεωρείται τυπικά ίση με 50 έτη) λόγω της γενικώς μεγάλης γεωγραφικής διασποράς των υψηλών σεισμικών εντάσεων. Με άλλα λόγια, ο μεγάλος και καταστρεπτικός σεισμός θεωρείται ως μία σπάνια επιπλοήση ενός μικρού ποσοστού των κτιρίων μιας χώρας.

1.1.2 Το ανέφικτο της απόλυτης αντισεισμικής προστασίας έναντι οποιουδήποτε σεισμού

Μία πρώτη απόρροια του *πιθανοτικού (τυχηματικού)* αυτού χαρακτήρα της σεισμικής διέγερσης συνίσταται στο γεγονός ότι η κατασκευή *σεισμικώς άτρωτων* κτιρίων δεν είναι εφικτή. Συνεπώς η *απόλυτη* αντισεισμική προστασία ενός κτιρίου ή των κτιρίων μιας μεγαλύτερης γεωγραφικής περιοχής έναντι οποιουδήποτε πιθανού σεισμού που ενδέχεται να συμβεί είναι αδύνατη, ακριβώς επειδή τόσο η περιοχή και η χρονική στιγμή που θα συμβεί ένας σεισμός όσο και η έντασή του δεν μπορούν να προσδιοριστούν αιτιοκρατικά.

Μια δεύτερη, αυτονόητη, συνέπεια της τυχηματικότητας του σεισμού συνίσταται στο γεγονός ότι ο καθορισμός της *σεισμικής επικινδυνότητας* μιας μικρότερης ή μεγαλύτερης γεωγραφικής περιοχής δεν μπορεί παρά να είναι και αυτός *πιθανολογικός*. Ο *σεισμός σχεδιασμού* που προδιαγράφεται από τους εκάστοτε Αντισεισμικούς Κανονισμούς περιγράφει τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δράσης για την οποία θα πρέπει να σχεδιαστούν οι δομικές κατασκευές μας και καθορίζεται με συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασής του (π.χ. με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 έτη).

Τέλος, μια τρίτη απόρροια της τυχηματικότητας του σεισμού συνίσταται - όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω - στην αναγκαιότητα λήψης μιας σημαντικής *απόφασης*, η οποία αφορά στο *επιθυμητό* επίπεδο αντισεισμικής προστασίας για μια συγκεκριμένη κατασκευή, έναντι του *ελάχιστου* επιπέδου αντισεισμικής προστασίας που οφείλει να τηρείται βάσει των Αντισεισμικών Κανονισμών.

1.1.3 Η πλήρης και η μερική αντισεισμική προστασία για τον σεισμό σχεδιασμού

Έστω όμως ότι με βάση τις εκτιμήσεις των σεισμολόγων καθορίζεται με συγκεκριμένο τρόπο ο μέγιστος σεισμός που ενδέχεται να εμφανιστεί σε μία περιοχή και ότι αυτός πράγματι θεσπίζεται ως *σεισμός σχεδιασμού*, τον οποίο θα υποστούν (πιθανολογικά) όλα τα κτίρια της περιοχής αυτής. Με δεδομένο τον σεισμό σχεδιασμού σημειώνονται τα εξής:

- Από την πλευρά της Πολιτείας και των Κανονισμών της

Από την πλευρά της Πολιτείας, η απαίτηση να κατασκευάζονται όλα τα κτίρια έτσι ώστε να αντέχουν *χωρίς καμιά βλάβη* (τουτέστιν *ελαστικά*) στον καθορισθέντα σεισμό σχεδιασμού, δηλαδή η απαίτηση κατασκευής κτιρίων με *πλήρη* αντισεισμική προστασία, θεωρείται ως οικονομικά επαχθής, διότι θα απαιτούσε υπερβολική μεταφορά πόρων από άλλους τομείς ζωτικής σημασίας για το κοινωνικό σύνολο (π.χ. τροχαία ασφάλεια).

Πέραν τούτου, η πλήρης αντισεισμική προστασία *πιστεύεται* ότι οδηγεί σε υπερβολικά ογκώδεις και συνεπώς αντιαισθητικές κατασκευές με ενδεχομένως μειωμένη λειτουργικότητα.

Για τους λόγους αυτούς επιδιώκεται από την Πολιτεία, μέσω του Αντισεισμικού Κανονισμού που αυτή θεσπίζει, ένας συγκεκριασμός κοινωνικής πρόνοιας (δηλαδή προστασίας της ζωής και της περιουσίας των πολιτών) και οικονομίας με στόχο την επίτευξη ενός επιπέδου αντισεισμικής ασφάλειας που να είναι τόσο κοινωνικά-ψυχολογικά, όσο και οικονομικά αποδεκτό. Προς τούτο γίνεται διάκριση των

κατασκευών σε ειδικές κατασκευές «υψηλού κινδύνου» και σε συμβατικές κατασκευές «κανονικού κινδύνου».

Για κατασκευές «υψηλού κινδύνου» (όπως π.χ. συγκροτήματα ατομικών αντιδραστήρων, πετροχημικές εγκαταστάσεις με αποθήκες επικίνδυνων αερίων ή υγρών), δηλαδή για κατασκευές των οποίων οι ενδεχόμενες βλάβες και πολύ περισσότερο η κατάρρευση θα είχαν πολύ αρνητικές συνέπειες για μία ευρύτερη περιοχή και ένα μεγάλο σύνολο ανθρώπων (βλ. Σχ. 1.1.3-1), εγείρεται γενικώς η απαίτηση της παντελούς αποφυγής βλαβών. Με άλλα λόγια, υπό τον σεισμό σχεδιασμού απαιτείται πρακτικά ελαστική συμπεριφορά, δηλαδή βλάβες δεν γίνονται αποδεκτές (πλήρης αντισεισμική προστασία).



Σχ. 1.1.3-1 Κατασκευές «υψηλού κινδύνου» → Επιβάλλεται «πλήρης» προστασία.
[Καταρρεύσεις, ανάφλεξη εγκαταστάσεων και εξάπλωση πυρκαγιάς, διαφυγή τοξικών / ραδιενεργών αερίων σε πετροχημικές / πυρηνικές εγκαταστάσεις μετά από σεισμό → πρόκληση κινδύνων σε ευρύτερη περιοχή]

Αντίθετα, για κατασκευές «κανονικού κινδύνου» (όπως π.χ. κτίρια κατοικιών ή γραφείων, σχολεία, νοσοκομεία κ.ά.), δηλαδή για κατασκευές των οποίων οι βλάβες ή ακόμη και η κατάρρευση δεν έχουν ευρύτερες συνέπειες, αλλά περιορίζονται - το πολύ - στην άμεση γειτονία τους (βλ. Σχ. 1.1.3-2), εγκαταλείπεται η επιδίωξη πλήρους αντισεισμικής προστασίας και γίνεται αποδεκτή η εμφάνιση βλαβών. Αυτό σημαίνει ότι υπό τον σεισμό σχεδιασμού επιτρέπεται στην κατασκευή να εισέλθει στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς και να υποστεί μη ανιστρέψιμες πλαστικές παραμορφώσεις (μερική αντισεισμική προστασία), οι οποίες όμως να μην οδηγήσουν στην άμεση κατάρρευσή της. Για συμβατικές δηλαδή κατασκευές καθορίζεται ένα χαμηλότερο επίπεδο αντισεισμικής ασφάλειας ως θεσμικά αποδεκτός συμβιβασμός επιζητούμενης προστασίας και οικονομικών προτεραιοτήτων. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί - καταρχάς από τον δομοστατικό μελετητή, αλλά και από τον κύριο του έργου - ότι το χαμηλότερο αυτό επίπεδο αντισεισμικής ασφάλειας συμβατικών κατασκευών καθορίζεται

από τους αντισεισμικούς κανονισμούς ως το *κατ' ελάχιστον επιτρεπτό*, χωρίς βεβαίως να απαγορεύεται η επιλογή ενός υψηλότερου επιπέδου αντισεισμικής ασφάλειας.



Σχ. 1.1.3-2 Κατασκευές «κανονικού κινδύνου» → Επιτρέπεται η «μερική» προστασία.
[Κατάρρευση πολυώροφου κτιρίου κατοικιών / γραφείων σε ισχυρό σεισμό → περιορισμός κινδύνων στην άμεση γειτονία της κατασκευής]

- Από την πλευρά του μεμονωμένου ιδιοκτήτη

Βέβαια, από την πλευρά ενός μεμονωμένου ιδιοκτήτη (δηλαδή του κυρίου ενός συγκεκριμένου κτιρίου) η πλήρης αντισεισμική προστασία αποτελεί αναντίρρητα μία εύλογη απαίτηση. Η κάλυψη του τυχόν υψηλότερου κόστους της έναντι της μερικής αντισεισμικής προστασίας αφορά εν προκειμένω όχι την Πολιτεία, αλλά τον συγκεκριμένο ιδιοκτήτη, στη διακριτική ευχέρεια του οποίου είναι να καθορίσει το επίπεδο αντισεισμικής ασφάλειας της κατασκευής του.

Στο σημείο αυτό πρέπει όμως να τονιστεί ιδιαίτερα ότι λανθασμένως πιστεύεται ότι (α) η πλήρης αντισεισμική προστασία πολλαπλασιάζει το κόστος κατασκευής και (β) οδηγεί σε υπερβολικά ογκώδεις και δυσλειτουργικές κατασκευές (βλ. παρακάτω §1.2).

1.1.4 Η μερική αντισεισμική προστασία ως βασική φιλοσοφία των μέχρι σήμερα αντισεισμικών κανονισμών

Η αποδοχή βλαβών υπό τον σεισμό σχεδιασμού αποτελεί τη βάση όλων των σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών που αφορούν σε κατασκευές κανονικού κινδύνου. Η φιλοσοφία της μερικής αντισεισμικής προστασίας θα μπορούσε να συνοψιστεί στους εξής θεμελιώδεις στόχους σχεδιασμού, οι οποίοι συνιστούν τις *ελάχιστες απαιτήσεις αντισεισμικής επίδοσης* των κατασκευών (βλ. π.χ. SEAOC 1967):

(1) Για συχνούς και μικρής έντασης (ασθενείς) σεισμούς, που εκδηλώνονται περισσότερες φορές κατά τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, η κατασκευή πρέπει να παραμείνει ελαστική, δηλαδή χωρίς βλάβες στα φέροντα και στα μη φέροντα δομικά της στοιχεία.

→ *απαίτηση μηδενικών βλαβών & απρόσκοπτης λειτουργίας*
(οριακή κατάσταση λειτουργικότητας της κατασκευής)

- (2) Για μέσης έντασης σεισμούς, που εκδηλώνονται περιστασιακά (λίγες φορές) κατά τη συμβατική διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, γίνονται αποδεκτές βλάβες, κυρίως σε μη φέροντα στοιχεία, αλλά πρακτικά μηδενικές (δηλ. επουσιώδεις και εύκολα επιδιορθώσιμες) βλάβες σε φέροντα στοιχεία (Σχ. 1.1.4-1).

→ *απαίτηση περιορισμένων βλαβών & οικονομικών απωλειών
(οριακή κατάσταση κόστους)*



Σχ. 1.1.4-1 Απαίτηση για μέσης έντασης σεισμούς: Αποδεκτές βλάβες στον οργανισμό πλήρωσης (τοιχοποιίες), αλλά πρακτικά μηδενικές βλάβες στον φ/ο

- (3) Για ισχυρούς σεισμούς, που εκδηλώνονται σπάνια και έχουν ένταση τουλάχιστον της ίδιας τάξης με τους ισχυρότερους σεισμούς που εκδηλώθηκαν στο παρελθόν (ή εκτιμάται ότι θα εκδηλωθούν στο μέλλον) στην περιοχή της κατασκευής, γίνονται αποδεκτές μεγαλύτερες, ακόμη και εκτεταμένες, βλάβες στον φέροντα οργανισμό, όμως λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα ώστε η πιθανότητα μερικής ή ολικής κατάρρευσης να είναι επαρκώς μικρή (Σχ. 1.1.4-2).

→ *απαίτηση αποφυγής κατάρρευσης & προστασίας ζωής
(οριακή κατάσταση αστοχίας της κατασκευής)*



Σχ. 1.1.4-2 Απαίτηση για ισχυρούς σεισμούς: Αποδεκτές βλάβες στον φ/ο, αλλά αποφυγή κατάρρευσης

Στους τρεις παραπάνω στόχους προστίθεται συνήθως και ο εξής τέταρτος:

- (4) Σημαντικά για το κοινωνικό σύνολο κτίρια (π.χ. επιτελικού χαρακτήρα) και κτίρια των οποίων η κατάρρευση θα προκαλούσε σημαντικές απώλειες σε μία ευρύτερη περιοχή θα πρέπει ακόμη και μετά από έναν ισχυρό σεισμό να παραμείνουν λειτουργικά (και όχι απλώς να μην καταρρεύσουν).

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω στόχοι 1 έως 3 δεν είναι επαρκώς ποσοτικοποιημένοι:

- Δεν καθορίζονται με ρητό, ποσοτικό τρόπο τα όρια μεταξύ σεισμών μικρής, μέσης και μεγάλης έντασης.
- Δεν καθορίζονται με ρητό, ποσοτικό τρόπο τα επίπεδα βλαβών που θεωρούνται ανεκτά για κάθε επίπεδο σεισμικής έντασης.

Τελικά, ο συνήθης συμβατικός αντισεισμικός σχεδιασμός μιας κατασκευής και οι συνακόλουθοι υπολογισμοί γίνονται - όπως θα δούμε παρακάτω - για έναν συγκεκριμένο ισχυρό σεισμό (τον *σεισμό σχεδιασμού*) και συνοδεύονται από σειρά κανονιστικών διατάξεων που θεωρείται ότι εξασφαλίζουν την ικανοποίηση και των τριών παραπάνω στόχων. Ως εκ τούτου είναι σαφές ότι οι με αυτόν τον τρόπο μελετημένες κατασκευές δεν μπορεί παρά να εμφανίζουν γενικώς μεγάλη διασπορά στη μηχανική τους συμπεριφορά και συνεπώς στη συνολική αντισεισμική τους ασφάλεια.

Εντούτοις, αν και μη σαφώς ποσοτικοποιημένοι, οι παραπάνω στόχοι (1) έως (3) δίνουν μια γενική ποιοτική εικόνα για την κατ' ελάχιστον αποδεκτή (από πλευράς Πολιτείας, όχι κατ' ανάγκη από τον κάθε μεμονωμένο ιδιοκτήτη) συμπεριφορά κατασκευών σε σεισμικές περιοχές και υιοθετούνται σε διάφορες παραλλαγές από τους σήμερα ισχύοντες Αντισεισμικούς Κανονισμούς.

Έτσι, σύμφωνα με τον ΕΚ8, § 2.1 («Θεμελιώσεις απαιτήσεις»), οι θεμελιώσεις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν *με ικανοποιητική αξιοπιστία* για κατασκευές σε σεισμικές περιοχές είναι¹

- (α) η απαίτηση μη κατάρρευσης

(Ο φορέας θα σχεδιάζεται και θα κατασκευάζεται ώστε να παραλαμβάνει τη σεισμική δράση σχεδιασμού που καθορίζεται στο Κεφάλαιο 3 του ΕΚ8 χωρίς τοπική ή γενική κατάρρευση, διατηρώντας κατά συνέπεια τη στατική ακεραιότητά του και παραμένονσα φέρουσα ικανότητα μετά τα σεισμικά γεγονότα), και

- (β) η απαίτηση περιορισμού βλαβών.

(Ο φορέας θα σχεδιάζεται και θα κατασκευάζεται για να παραλαμβάνει σεισμική δράση με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης από τη σεισμική δράση σχεδιασμού, χωρίς την εμφάνιση βλαβών και συνεπακόλουθους περιορισμούς χρήσης, οι δαπάνες των οποίων θα ήταν δυσανάλογα υψηλές σε σύγκριση με την δαπάνη του ίδιου του φορέα).

Οι δύο αυτές απαιτήσεις του ΕΚ8 θεωρείται ότι καλύπτουν τους προαναφερθέντες στόχους (1) έως (3). Στην ίδια παράγραφο 2.1 ο ΕΚ8 καλύπτει και τον στόχο (4), απαιτώντας την αύξηση της αξιοπιστίας του αντισεισμικού σχεδιασμού για κτίρια

¹ Στο τρέχον κεφάλαιο όλα τα τμήματα του κειμένου που αφορούν στον ΕΚ8 δίνονται με **μπλε χρώμα**. Επίσης, σε όλο το βιβλίο οι αριθμοί παραγράφων ή εδαφίων του ΕΚ8 δίνονται χάριν αμεσότερης αναγνώρισης με **μπλε χρώμα**.

μεγάλης σπουδαιότητας. Η αύξηση της αξιοπιστίας θεωρείται ότι επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της τιμής της περιόδου επαναφοράς του σεισμικού γεγονότος, δηλαδή πρακτικά μέσω της αύξησης των σεισμικών φορτίων.

1.1.5 Οι θεμελιώδεις ιδιότητες των κατασκευών μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη αντισεισμική ασφάλεια

Η ικανοποίηση των προαναφερθεισών ποιοτικού χαρακτήρα απαιτήσεων (στόχων αντισεισμικού σχεδιασμού) επιβάλλει γενικώς τον *σταθμισμένο εφοδιασμό* («προικοδότηση») της κατασκευής με επαρκή και κατάλληλα κατανεμημένη στιβαρότητα¹, αντοχή και πλαστιμότητα:

- Απαιτείται ένα *επαρκές επίπεδο στιβαρότητας* του φέροντος οργανισμού, έτσι ώστε (α) κατά τους συχνούς ασθενείς σεισμούς οι μετακινήσεις του να παραμείνουν μικρές και η κατασκευή ελαστική (χωρίς βλάβες) και (β) κατά τον ισχυρό σεισμό σχεδιασμού (ή και ισχυρότερο) οι μετακινήσεις της κατασκευής να μην προκαλούν ενεργοποίηση φαινομένων 2^{ης} τάξης. Παράλληλα, η *κατανομή της στιβαρότητας* δεν θα πρέπει να δημιουργεί προβλήματα (όπως π.χ. συσσωρευση τάσεων σε μικρές περιοχές του φορέα).
- Απαιτείται ένα *επαρκές επίπεδο αντοχής* των φερόντων στοιχείων, έτσι ώστε σε σεισμούς μέτριας έντασης να διατηρηθούν σε χαμηλά επίπεδα οι βλάβες τους. Παράλληλα η *κατανομή της αντοχής* δεν θα πρέπει να δημιουργεί προβλήματα (όπως π.χ. μεγάλες διαφοροποιήσεις του λόγου εξάντλησης² διαφόρων δομικών στοιχείων).
- Απαιτείται ένα *επαρκές επίπεδο πλαστιμότητας* (Γενικός ορισμός: Πλαστιμότητα = Ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης χωρίς σημαντική απομείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής κατά τους επαναλαμβανόμενους κύκλους δυναμικής φόρτισης-αποφόρτισης), έτσι ώστε σε ισχυρούς σεισμούς οι αναπόφευκτες βλάβες των φερόντων στοιχείων να είναι πλάστιμες και όχι ψαθυρές, ώστε να μην οδηγήσουν γρήγορα σε πρόωρη κατάρρευση. Επιπλέον, απαιτείται και η *σωστή κατανομή της πλαστιμότητας* στο σύνολο του φορέα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση κινηματικών μηχανισμών κατάρρευσης.

¹ Ο όρος στιβαρότητα περιλαμβάνει τη δυσκαμψία EI, τη δυστημσία GA_s, τη δυστένεια EA και τη δυστρεψία GI_T (όπου: E = μέτρο ελαστικότητας, G = μέτρο ολίσθησης/διάτμησης, I = ροπή αδράνειας σε κάμψη, A = επιφάνεια διατομής, A_s = τεκμαρτή επιφάνεια διάτμησης και I_T=ροπή αδράνειας σε στρέψη). Δυστυχώς, τόσο στον ΕΑΚ όσο και στην ελληνική μετάφραση του ΕΚ8 χρησιμοποιούνται μερικοί αδόκιμοι όροι, όπως π.χ. «στρεπτική δυσκαμψία» αντί «δυστρεψίας» κ.ά.. Χάριν μιας ενιαίας και ορθής χρήσης των όρων παρατίθεται στο Παράρτημα 3 ένας πίνακας βασικών όρων της Μηχανικής.

² Ως «λόγος εξάντλησης» της αντοχής μιας διατομής χαρακτηρίζεται ο λόγος της σεισμικής επιπόνησής της υπό τον σεισμό σχεδιασμού προς τη διαθέσιμη αντοχή της (στα αγγλικά: Demand Capacity Ratio, DCR). Βλ. § 2.3.1(α) και § 2.3.5(α).

[illegible]

2. Τα βασικά στάδια της αντισεισμικής μελέτης και κριτική θεώρηση σχετικών διατάξεων του Ευρωκώδικα 8 (Μέρος 1)

Στο σχήμα 2-1 συνοψίζονται τα βασικά στάδια που διατρέχει η τυπική δομοστατική μελέτη του φέροντα οργανισμού μιας κατασκευής.

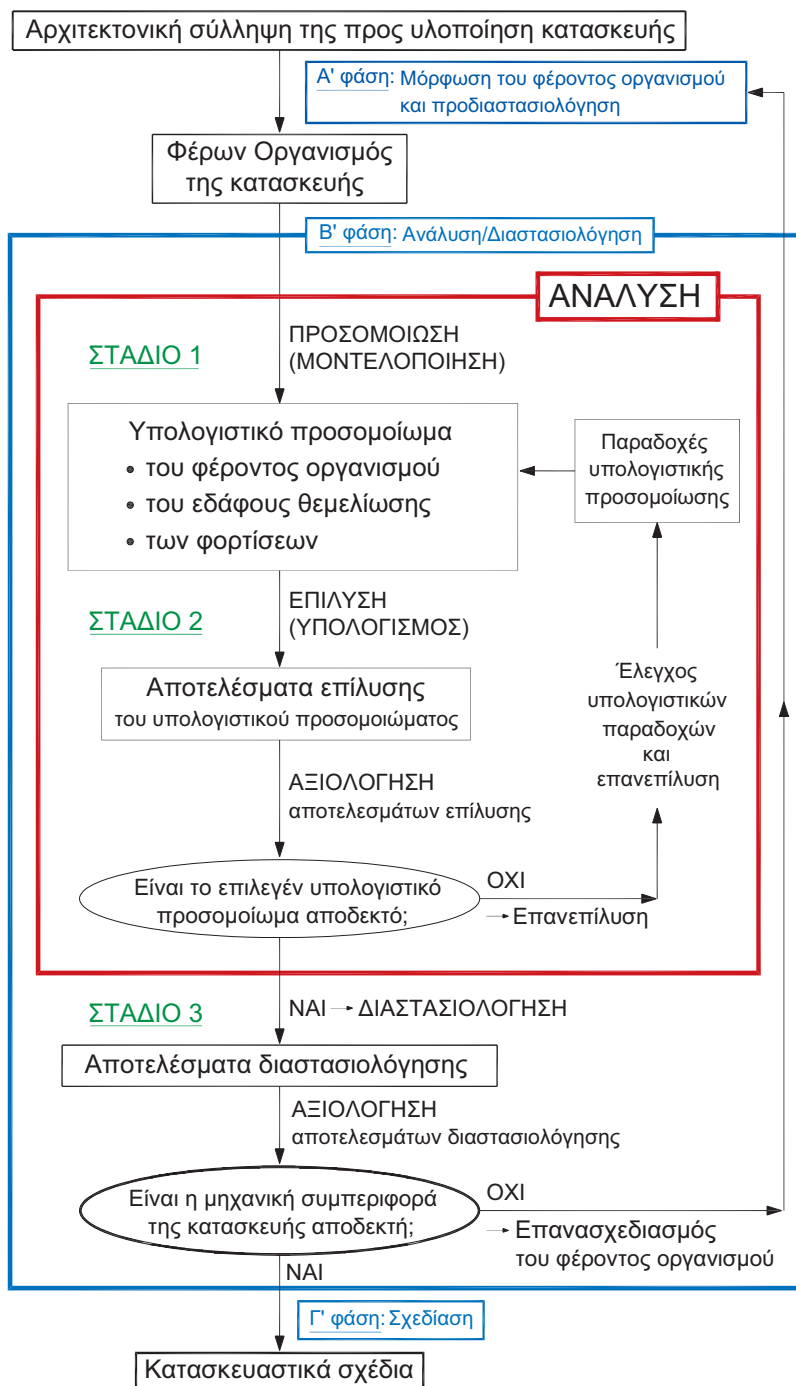
Ξεκινώντας από την αρχιτεκτονική σύλληψη της προς υλοποίηση κατασκευής, ο μελετητής δομοστατικός πολιτικός μηχανικός αναζητάει καταρχάς (Α' φάση σχεδιασμού/μόρφωσης φορέα) και συγκρίνει μεταξύ τους περισσότερες προτάσεις για το βέλτιστο στατικό σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη και θέματα κόστους (Σχ. 2-1). Με βάση γενικά κριτήρια (αρχιτεκτονικά, κατασκευαστικά, οργανωτικά, κανονισμούς, ασφάλεια κ.ά.) ο μελετητής επιλέγει βασιζόμενος στις γνώσεις του και κυρίως στη συσσωρευμένη εμπειρία του ορισμένες από τις προτάσεις αυτές προς λεπτομερέστερη διερεύνηση. Οι επιλεγείσες προτάσεις διερευνώνται σε βαθμό που να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις των βασικών παραμέτρων που ενδιαφέρουν και ακολούθως επιλέγεται η προς υλοποίηση πρόταση. Στην πρώτη (Α') αυτή φάση περιλαμβάνονται λίγες, προσεγγιστικές μόνον αριθμητικές επιλύσεις που οδηγούν στην *προδιαστασιολόγηση* του φ/ο, με την οποία συγκεκριμενοποιούνται οι καταρχάς διαστάσεις των επί μέρους δομικών στοιχείων (Περισσότερα επ' αυτού στην παρ. 2.4.1).

Σε μια δεύτερη (Β') φάση επιλέγεται αρχικά (Στάδιο 1) το υπολογιστικό προσομοίωμα του φέροντα οργανισμού (στατικό μοντέλο της ανωδομής και του φορέα θεμελίωσης, λαμβάνοντας υπόψη και την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης). Αυτό γίνεται μέσα από μια σειρά εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών, για την καταλληλότητα των οποίων και πάλι επιστρατεύονται οι γνώσεις, η πείρα και η κρίση του μελετητή. Ακολουθεί ο υπολογισμός (η επίλυση) του προσομοιώματος για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων (προσομοίωμα φόρτισης) που απαιτούν οι ισχύοντες κανονισμοί και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της όλης ανάλυσης (Στάδιο 2). Τονίζεται ότι η "ΑΝΑΛΥΣΗ" περιλαμβάνει το τρίπτυχο "ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΕΠΙΛΥΣΗ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ" (βλ. **κόκκινο πλαίσιο** στο Σχ. 2-1). Αν τα αποτελέσματα της επίλυσης κριθούν ως (καταρχάς) ικανοποιητικά, ο μελετητής προχωράει στον έλεγχο των προδιαστασιολογημένων δομικών στοιχείων (Στάδιο 3). Στην περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος το στάδιο 3 συνίσταται στον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού όλων των κρίσιμων διατομών. Ενδεχομένως ο έλεγχος αυτός να απαιτήσει τροποποιήσεις των αρχικών διαστάσεων των διατομών και αντίστοιχες επανεπιλύσεις και επαναδιαστασιολογήσεις με στόχο τη *βελτιστοποίηση* των αποτελεσμάτων.

Αφού γίνουν οριστικώς αποδεκτά τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ακολουθεί η τρίτη (Γ') και τελευταία φάση, που περιλαμβάνει τον λεπτομερή σχεδιασμό όλων των επί μέρους δομικών στοιχείων (π.χ. ακριβείς θέσεις των ράβδων οπλισμού σε ένα στύλο Ο/Σ) και τη σχεδίαση των τελικών κατασκευαστικών σχεδίων εφαρμογής.

Από τη σύντομη αυτή περιγραφή γίνονται εμφανή εκείνα τα στάδια, στα οποία οι όποιες επιλογές και αποφάσεις στηρίζονται κυρίως στη συσσωρευμένη εμπειρία του μελετητή (και όχι σε αυτοματοποιημένους υπολογισμούς στον Η/Υ). Είναι τα στάδια:

- (α) της μόρφωσης του φέροντος οργανισμού,
- (β) της επιλογής του υπολογιστικού προσομοιώματος (για κτίριο, έδαφος και φορτία),
- (γ) της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, και
- (δ) του λεπτομερούς σχεδιασμού των δομικών στοιχείων.



Σχ. 2-1 Φάσεις και στάδια μιας δομοστατικής μελέτης

Στον ακόλουθο πίνακα 2-1 δίνονται χάριν γενικότερης εποπτείας οι βασικότερες σχετικές προς τα διάφορα στάδια της μελέτης διατάξεις του Ευρωκώδικα 8.

Πίνακας 2-1 Φάσεις/στάδια δομοστατικής μελέτης και σχετικές διατάξεις του ΕΚ8

Φάσεις δομοστατικής μελέτης (αδρομερώς)		Απαιτούμενες γνώσεις μελετητή	Κυριότερες σχετικές παράγραφοι του ΕΚ8 (για κτίρια ο/σ)
	Αρχιτεκτονικά σχέδια ↓		
A.	Μόρφωση (σχεδιασμός) φ/ο και προδιαστασιολόγηση ↓	Κατανόηση σε βάθος της σύγχρονης «φιλοσοφίας» αντισεισμικού σχεδιασμού → επιλογή επιθυμητού επιπέδου αντισεισμικής επίδοσης της κατασκευής.	Κεφ. 2 Απαιτήσεις συμπεριφοράς και κριτήρια συμμόρφωσης § 4.2.1 Βασικές αρχές μελέτης διαμόρφωσης § 5.2 Βάσεις σχεδιασμού
B.	Προσομοίωση		
	(α) του φέροντος οργανισμού ανωδομής και θεμελίωσης	Γνώση των τεχνικών προσομοίωσης κατασκευών κυρίως με ισοδύναμα γραμμικά προσομοιώματα, αλλά και με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.	§ 4.2.3 Κριτήρια κανονικότητας § 4.3.1 Προσομοίωση § 4.3.6 Πρόσθετα μέτρα για φαντώματα τοιχοπληρώσεων
	(β) του εδάφους θεμελίωσης		§ 4.3.1(9)P
	(γ) των φορτίσεων ↓		Κεφ. 3 Εδαφικές συνθήκες και σεισμική δράση § 4.2.4 Συντελεστές συνδυασμού για μεταβλητές δράσεις § 4.3.2 Τυχηματικές στρεπτικές επιδράσεις
Γ.	Υπολογισμός (Ανάλυση) του προσομοιώματος και διάφοροι έλεγχοι με βάση τα μεγέθη απόκρισης ↓	Γνώση των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού κατασκευών για στατική και για σεισμική φόρτιση σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (κυρίως γραμμικών, αλλά και επιφανειακών).	§ 4.3.3 Μέθοδοι ανάλυσης § 4.3.4 Υπολογισμός μετακινήσεων Έλεγχοι: § 4.4.2.2.(2): $\theta \leq 0.1$ § 4.4.3.2.(a): $d_v \leq 0.005h$
Δ.	Τελική διαστασιολόγηση (όπλιση, σχεδιασμός) διατομών και διάφοροι έλεγχοι ↓	Ευρωκώδικας 2 και γενικότερα γνώση διαστασιολόγησης/όπλισης δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα.	Κτίρια πλαστιμότητας - μέσης (ΚΠΜ) : § 5.4 - υψηλής (ΚΠΥ): § 5.5 Αγκυρώσεις: § 5.6 Θεμελίωση: § 5.8 Τοιχοποιία: § 5.9 Πλάκες ορόφων: § 5.10 Προκατασκευές: § 5.11
E.	Σχεδίαση κατασκευαστικών σχεδίων		

Ακολουθώς γίνονται ορισμένες σύντομες παρατηρήσεις που αφορούν στη μόρφωση του φέροντος οργανισμού (§ 2.1), στην επιλογή του υπολογιστικού προσομοιώματος (§ 2.2), στις μεθόδους ανάλυσης του προσομοιώματος (§ 2.3), στην αντισεισμικά δόκιμη όπλιση δομικών στοιχείων ο/σ (§ 2.4) και στο λογισμικό ανάλυσης-διαστασιολόγησης κατασκευών (§ 2.5).

2.1 Η μόρφωση ενός αντισεισμικά δόκιμου φέροντα οργανισμού

2.1.1 Επιδιωκόμενες ιδιότητες του φέροντα οργανισμού και βασικοί κανόνες

Πολύ συχνά στην καθημερινή πράξη ο μελετητής-μηχανικός είναι αναγκασμένος να εκπονεί μελέτες υπό μεγάλη πίεση χρόνου. Ενώ δε παλαιότερα κατά μία ακραία διατύπωση «κατασκευάζαμε ό,τι μπορούσαμε να υπολογίσουμε», σήμερα είναι διάχυτη η άποψη, ότι με τη βοήθεια των Η/Υ μπορούμε να υπολογίσουμε «σχεδόν τα πάντα». Το γεγονός αυτό εμπεριέχει τον κίνδυνο να «στήνονται» στα γρήγορα ξυλότυποι περίπλοκων («όπως βολέψει») και ασαφούς λειτουργίας φερόντων οργανισμών, και ακολούθως να αναλύονται τα αντίστοιχα υπολογιστικά προσομοιώματα με κάποιο επαγγελματικό πρόγραμμα ανάλυσης με ή χωρίς πρόσθετες παραδοχές.

Όμως, η υπέρ του δέοντος συρρίκνωση του χρόνου που διατίθεται από τον μελετητή για τη μόρφωση ενός ικανοποιητικού φ/ο του κτιρίου συρρικνώνει τη μελέτη σε ένα πρόβλημα εισαγωγής δεδομένων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και παραλαβής των εκτυπωμένων αποτελεσμάτων και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη και αστοχίες, ιδιαίτερα σε κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμικές διεγέρσεις. Διότι *οι αδυναμίες ενός πλημμελούς σε σύλληψη και συνεπώς σεισμικά ευάλωτου φ/ο δεν καλύπτονται ούτε θεραπεύονται ακόμη και από τον πλέον συνεπή αριθμητικό υπολογισμό του*, όπως άλλωστε έδειξαν και οι εμπειρίες από τους σεισμούς των τελευταίων δεκαετιών.

Έτσι, ουσιαστική προϋπόθεση για μια μη απατηλή ανάλυση αποτελεί η μόρφωση ενός φ/ο με ικανοποιητική δομή και σαφή λειτουργία υπό τα προβλεπόμενα φορτία, ο οποίος να ικανοποιεί σε επαρκή βαθμό συγκεκριμένα ποιοτικά κριτήρια που απορρέουν από την τρέχουσα φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού με ελεγχόμενη αποδοχή βλαβών. Η απαίτηση αυτή είναι ανεξάρτητη του τρόπου προσομοίωσης του επιλεγέντος φ/ο και της μεθόδου ανάλυσης που θα επιλεγεί ακολούθως για τον υπολογισμό του προσομοιώματος, αποτελεί δε το κατ' εξοχήν δημιουργικό τμήμα της όλης εργασίας του δομοστατικού μελετητή.

Τα προαναφερθέντα ποιοτικά κριτήρια συνίστανται σε κατευθυντήριες γραμμές και πρακτικούς κανόνες και παρουσιάστηκαν με συνομία υπό μορφή τριών βασικών επιδιώξεων στην παράγραφο 1.1.11. Η πρώτη βασική επιδίωξη, που συνίσταται στη μεγιστοποίηση της διάχυσης/διασποράς της σεισμικής ενέργειας σε ολόκληρο τον φορέα, αφορά άμεσα στη μόρφωση του φ/ο που μας ενδιαφέρει στην παρούσα παράγραφο. Οι βασικές ιδιότητες που σύμφωνα με την επιδίωξη αυτή θα πρέπει να διαθέτει ένας αντισεισμικά δόκιμος φ/ο παρατίθενται στον πίνακα 2.1.1-1 συνοδευόμενες από τα βασικά πλεονεκτήματα που απορρέουν από αυτές.

Στις επιθυμητές ιδιότητες του φ/ο προστίθενται βέβαια και εκείνες που απορρέουν από τη δεύτερη βασική επιδίωξη που είναι η μη κατάρρευση (και επιτυγχάνεται μέσω ιεράρχησης αντοχών και υπερστατικότητας), καθώς και από την τρίτη βασική επιδίωξη που είναι η μεγιστοποίηση της κατανάλωσης σεισμικής ενέργειας (και επιτυγχάνεται μέσω πλάστιμης διαμόρφωσης διατομών, δομικών στοιχείων και συνδέσεων).

Πίνακας 2.1.1-1 Επιδιωκόμενες ιδιότητες κατά τη μόρφωση του φ/ο

- Δομική απλότητα
 - σαφήνεια διαδρομής φορτίων
 - μεταφορά φορτίων στο έδαφος θεμελίωσης από τη συντομότερη οδό
- Ομοιομορφία και συμμετρία (κανονικότητα)
 - ως προς τη γεωμετρική μορφή του (που σχετίζεται άμεσα με την κατανομή μάζας),
 - ως προς την κατανομή της στιβαρότητας, και
 - ως προς την κατανομή της αντοχής
 - ευνοϊκή συμπεριφορά κατά την ταλάντωση
 - αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων και παραμορφώσεων

Ειδικότερα:

 - αποφυγή κοντών υποστυλωμάτων
 - περιορισμός στροφών περί τον κατακόρυφο άξονα
 - περιορισμός διαφορικών μετακινήσεων

Ο βαθμός ομοιομορφίας και συμμετρίας που διαθέτει ο φορέας ελέγχεται με τη βοήθεια διαφόρων «κριτηρίων κανονικότητας» που προβλέπονται στους αντισεισμικούς κανονισμούς. Για κτίρια που θεωρούνται βάσει των κριτηρίων αυτών ως «κανονικά» οι αντισεισμικοί κανονισμοί επιφυλάσσουν ευνοϊκότερη μεταχείριση (π.χ. απλούστερες μέθοδοι υπολογισμού, λιγότεροι έλεγχοι κτλ.) σε σχέση με τα «μη κανονικά» κτίρια.
- Διαφραγματική λειτουργία στις στάθμες των ορόφων
 - περιορισμός (έως και πρακτικά μηδενισμός) των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων σε κάθε στάθμη
 - ενιαία στροφή κάθε ορόφου περί τον κατακόρυφο άξονα
- Ισχυρή θεμελίωση
 - μονολιθικότητα θεμελίωσης → ομοιόμορφη «είσοδος σεισμού» στον φ/ο
 - περιορισμός των σχετικών μετατοπίσεων και των στροφών περί οριζόντιους άξονες στη βάση τοιχωμάτων και υποστυλωμάτων

Στο πνεύμα αυτό, ο ΕΚ8 (§ 4.2.1) καθορίζει (με συντομία και χωρίς συνεκτική επιχειρηματολογία) ως βασικές ή κατευθυντήριες αρχές που πρέπει να διέπουν τον αντισεισμικό σχεδιασμό τις εξής:

- (1) Δομική απλότητα (structural simplicity)
- (2) Ομοιομορφία, συμμετρία και υπερστατικότητα (uniformity, symmetry and redundancy)
- (3) Διαξονική αντοχή και δυσκαμψία (bi-directional resistance¹ and stiffness)
- (4) Στρεπτική αντοχή και δυστρεψία (torsional resistance¹ and stiffness)
- (5) Διαφραγματική συμπεριφορά στις στάθμες των ορόφων (diaphragmatic behaviour ...)
- (6) Επαρκής θεμελίωση (adequate foundation).

¹ Ο αγγλικός όρος «resistance» («αντίσταση») δεν έχει σαφή μαθηματικό ορισμό. Χρησιμοποιείται για να δηλώσει με καθολικό-συνθετικό τρόπο τον συνδυασμό στιβαρότητας (δηλ. δυσκαμψίας, δυστένειας, κτλ.), αντοχής και πλαστικότητας μιας αντισεισμικής κατασκευής (earthquake resistant structure), ιδιότητες που όλες μαζί συνθέτουν την ικανότητα της κατασκευής να «αντιστέκεται» σε σεισμικές επιπλοήσεις (earthquake resistance = αντισεισμικότητα). Στο αγγλικό κείμενο του ΕΚ8 χρησιμοποιείται κακώς ως συνώνυμο της αντοχής. Η ελληνική μετάφραση του ΕΚ8 σωστά τον αποδίδει ως «αντοχή» και όχι ως «αντίσταση». Επίσης, σχετικά με τη δόκιμη απόδοση στα ελληνικά του όρου «torsional stiffness», καθώς και άλλων όρων, βλ. παρ. 2.3.3(δ).

Σύντομες σημειώσεις:

- (1) Η *δομική απλότητα* συνίσταται στην ύπαρξη μιας σαφούς και όσο το δυνατόν άμεσης και σύντομης διαδρομής όλων των φορτίων, στατικών και σεισμικών, από τα σημεία ή τις περιοχές που ενεργούν μέχρι το έδαφος θεμελίωσης. Η μη άμεση όδευση των φορτίων (π.χ. φυτευτά υποστυλώματα, δοκοί επί δοκών) συνεπάγεται γενικώς συγκέντρωση τάσεων και δημιουργεί κατά κανόνα αυξημένες (και ενδεχομένως μη ελέγξιμες) απαιτήσεις αντοχής και πλαστιμότητας στα συμμετέχοντα δομικά στοιχεία, αυξάνοντας έτσι τις εγγενείς αβεβαιότητες του αντισεισμικού σχεδιασμού.
- (2) Η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών έδειξε ότι κτίρια με *ομοιόμορφη* και *συμμετρική* κατανομή μάζας, στιβαρότητας και αντοχής σε κάτοψη και καθ' ύψος συμπεριφέρονται γενικώς πολύ καλύτερα σε ισχυρούς σεισμούς σε σχέση με κτίρια που δεν διαθέτουν αυτές τις ιδιότητες. Έτσι, π.χ., η ομοιομορφία και η συμμετρία σε κάτοψη συμβάλλουν στη δραστική μείωση των στρεπτικών περί τον κατακόρυφο άξονα επιπονήσεων (Σημ.: Συμμετρία σε κάτοψη δεν σημαίνει οπωσδήποτε ότι υπάρχει και ομοιομορφία σε κάτοψη. Βλ. π.χ. μία συμμετρική κάτοψη σχήματος Η ή $\vdash$ με μεγάλες προεξοχές. Η ομοιομορφία συναρτάται με τη συμπαγή μορφή της κάτοψης). Με την *υπερστατικότητα* δίνεται η δυνατότητα εναλλακτικών οδεύσεων των φορτίων σε περίπτωση υπέρβασης αντοχών, δηλαδή η δυνατότητα ανακατανομής της έντασης, γεγονός που αμβλύνει τις αβεβαιότητες του αντισεισμικού σχεδιασμού και τις επιπτώσεις τοπικών αστοχιών.
- (3) Σε αντίθεση με την ανεμοφόρτιση που θεωρείται ότι δρα κάθε φορά κατά μία μόνο διεύθυνση, η οριζόντια σεισμική διέγερση της βάσης ενός κτιρίου θεωρείται ως αποτελούμενη από δύο ανεξάρτητες και ταυτόχρονα δρώσες ορθογώνιες συνιστώσες (κατά Χ και κατά Υ) ίδιας τάξης μεγέθους. Συνεπώς είναι σκόπιμο η αντίσταση (στιβαρότητα, αντοχή, πλαστιμότητα) της κατασκευής να είναι και αυτή της ίδιας τάξης μεγέθους στις δύο διευθύνσεις.
- (4) Η στρεπτική σεισμική διέγερση περί τον κατακόρυφο άξονα είναι συνήθως αμελητέα. Εντούτοις, λόγω των συνήθως υφιστάμενων εκκεντροτήτων μαζών ή/και δυσκαμψιών, οι μεταφορικές διεγέρσεις κατά Χ και Υ προκαλούν όχι απλά μεταφορική, αλλά και στρεπτική επιπόνηση της κατασκευής. Γι' αυτό ο φ/ο πρέπει να διαθέτει επαρκή δυστρεψία και επαρκή στρεπτική αντοχή.
- (5) Οι πλάκες στις στάθμες των ορόφων ενός κτιρίου, εφόσον δεν είναι πολύ μακρόστενες και δεν έχουν μεγάλες προεξοχές ή οπές, συνεισφέρουν σημαντικά στην ευνοϊκή σεισμική συμπεριφορά, διότι λειτουργούν ως πρακτικά απαράμορφωτοι εντός του επιπέδου τους δίσκοι που αποτρέπουν τις οριζόντιες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των κόμβων των κατακόρυφων στοιχείων (πόδες ή κεφαλές της ίδιας στάθμης) και συμβάλλουν στην ομοιόμορφη κατανομή των σεισμικών φορτίων.
- (6) Μία κατά το δυνατόν δύσκαμπτη θεμελίωση που συνδέεται μονολιθικά με τους πόδες των κατακόρυφων στοιχείων της ανωδομής είναι πρωταρχικής σημασίας για την καλή σεισμική συμπεριφορά της όλης κατασκευής, διότι συμβάλλει στην ομοιόμορφη (χωρίς διαφορά φάσης) εισαγωγή της σεισμικής διέγερσης στη βάση του κτιρίου και αποτρέπει τυχόν διαφορικές καθιζήσεις. Για τους ίδιους λόγους είναι ιδιαίτερα ευμενής η ύπαρξη υπογείου με περιμετρικά τοιχώματα.

Οι παραπάνω κατευθυντήριες αρχές και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα καλύπτονται σε ικανό βαθμό αν κατά τη μόρφωση του φ/ο ακολουθηθούν οι πρακτικοί κανόνες που παρατίθενται (χωρίς απαίτηση πληρότητας) στον πίνακα 2.1.1-2:

Πίνακας 2.1.1-2 Σύνοψη βασικών κανόνων μόρφωσης του φ/ο

ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	Λόγοι των εξωτερικών διαστάσεων κτιρίου κοντά στη μονάδα.
ΔΟΜΗ ΤΟΥ Φ/Ο	Γενική δομή του κτιρίου κατά το δυνατόν απλή, απλός και σαφής ως προς τη «ροή» δυνάμεων φ/ο υψηλής υπερστατικότητας.
ΜΟΡΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΚΑΤΟΨΗ	→ Κατανομή της μάζας σε κάτοψη. Συμπαγής γεωμετρική μορφή, χωρίς περύγια ή έντονες εσοχές/εξοχές, μάζα ομοιόμορφα κατανεμημένη σε κάτοψη, ενδεχομένως τοποθέτηση αρμών.
ΠΛΑΚΕΣ ΟΡΟΦΩΝ	Επιδίωξη καλής διαφραγματικής λειτουργίας, αποφυγή μεγάλων οπών, αποφυγή ανισοσταθμιών, αποφυγή μυκητοειδών πλακών επί στύλων χωρίς δοκούς.
ΜΟΡΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ	→ Κατανομή της μάζας καθ' ύψος. Γεωμετρική μορφή χωρίς έντονες εσοχές/εξοχές, μάζα ομοιόμορφα κατανεμημένη ή ομαλά μειούμενη καθ' ύψος, αποφυγή μεγάλων μαζών/φορτίων σε υψηλούς ορόφους.
ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΣΕ ΚΑΤΟΨΗ	Επιδίωξη συμμετρικής τοποθέτησης υποστυλωμάτων και κυρίως τοιχωμάτων και πυρήνων στην κάτοψη, ενδεχομένως τοποθέτηση αρμών προς αποφυγή ασυμμετρίας, ισχυρά στοιχεία στην περίμετρο, τοιχώματα σε δύο διευθύνσεις, αποφυγή δοκών μικρού μήκους, αποφυγή έμμεσων στηρίξεων, «σαφήνεια» ξυλοτύπου.
ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ	Γενικώς αποφυγή απότομων μεταβολών της δυσκαμψίας και της αντοχής καθ' ύψος (όχι «μαλακοί» όροφοι, δηλ. πιο εύκαμπτοι ή/και πιο εύστρεπτοι έναντι των άλλων, όχι «ασθενείς» όροφοι, δηλ. μικρότερης αντοχής έναντι των άλλων), αποφυγή μεγάλων οπών σε τοιχώματα, αποφυγή κοντών υποστυλωμάτων, αποφυγή φυτευτών στύλων, «ισχυροί στύλοι - ασθενείς δοκοί».
ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ	Επιδίωξη μονολιθικότητας προς αποφυγή διαφορικών μετακινήσεων, ισχυρές συνδετήριες δοκοί, πλαισιακή σύνδεσή τους στα πέδιλα, τοιχώματα προσαρμογής σε περιπτώσεις ανισόσταθμης θεμελίωσης και σε περιοχές αλλαγής εδαφικού υπόβαθρου, διαμόρφωση υπογείου ως άκαμπτου κιβωτίου, ειδική θεμελίωση (π.χ. με μικροπασσάλους) ισχυρών τοιχωμάτων σε μαλακά εδάφη.
ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΙΣ	Επιδίωξη συμμετρικής τοποθέτησης των τοιχοπληρώσεων, αποφυγή δημιουργίας προβλημάτων στον φέροντα οργανισμό (π.χ. δημιουργία κοντών υποστυλωμάτων), ποιοτική (τουλάχιστον) θεώρηση της συμμετοχής τους στην όλη συμπεριφορά του φορέα.
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΑΡΜΟΙ	Επαρκούς εύρους αρμοί προς όμορα κτίρια, ιδιαίτερα όταν υπάρχει επαφή μόνο κατά μία πλευρά, ανισοϋψία μεταξύ των κτιρίων ή/και ανισοσταθμία των πλακών των κτιρίων.
ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ	Κατάλληλη όπλιση προς μεγιστοποίηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας κρίσιμων διατομών, δομικών στοιχείων και υποφορέων. Γενικά: λήψη κατάλληλων κατασκευαστικών μέτρων προς αποφυγή ψαθυρών θραύσεων και τοπικών αστοχιών. Αποφυγή σχηματισμού «πλαστικών μηχανισμών υποστυλωμάτων».

Η τήρηση των κανόνων αυτών - αν και οι περισσότεροι δεν είναι υποχρεωτικοί - ενισχύει την αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία της ισχύουσας φιλοσοφίας αντισεισμικού σχεδιασμού με ή χωρίς αποδοχή βλαβών και συντελεί στην ευνοϊκή μηχανική συμπεριφορά του φ/ο, ακόμη και σε πολύ ισχυρούς σεισμούς κατά τους οποίους αυτός εισέρχεται στην ανελαστική περιοχή.

Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι οι κανόνες αυτοί είναι γενικώς σκόπιμο να ακολουθούνται και στην περίπτωση που προβλέπεται μικρή μόνο ή και καθόλου είσοδος της κατασκευής στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς (δηλαδή ακόμη κι όταν επιλέγεται η πλήρης αντισεισμική προστασία, $q \leq 1.5$), αφού είναι προφανές ότι και για ελαστικούς φορείς εξασφαλίζουν ευνοϊκή στατική/δυναμική συμπεριφορά.

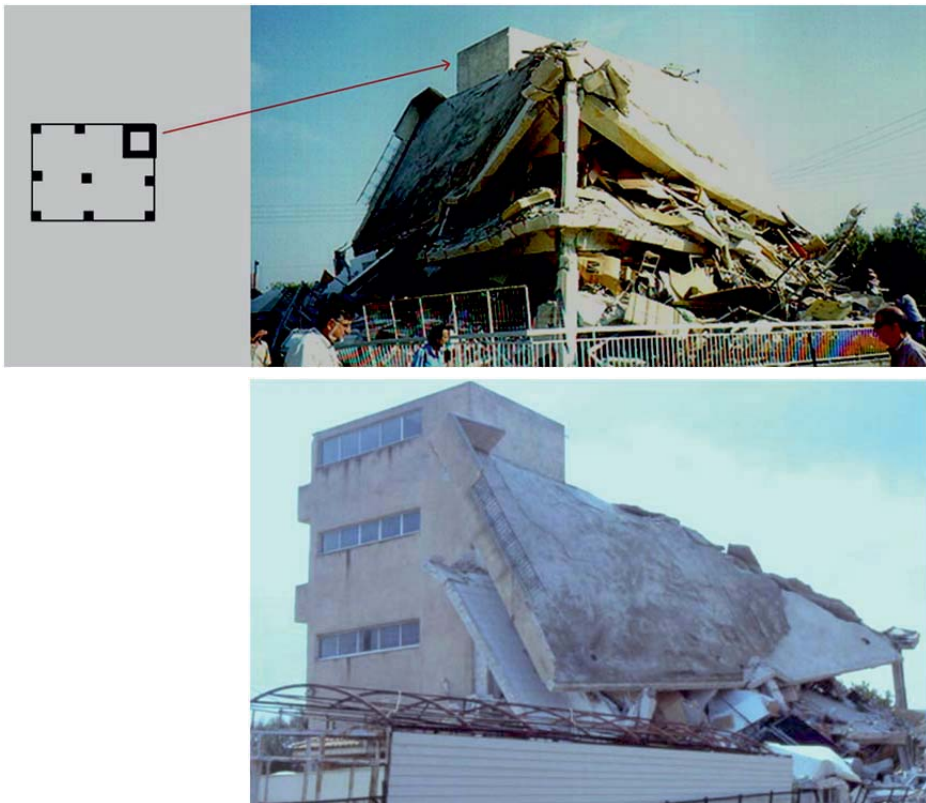
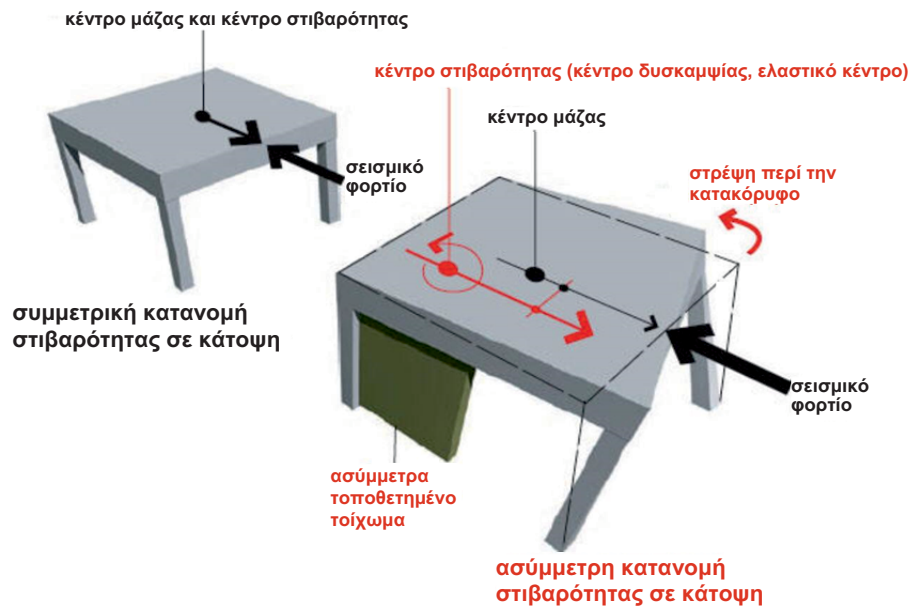
2.1.2 Συχνά παρατηρούμενες δυσμενείς περιπτώσεις μορφολογίας

Χάριν εμπέδωσης παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα 2.1.2-1 ορισμένες συνήθεις στην ελληνική πράξη περιπτώσεις δυσμενούς και συνεπώς αποφευκτέας μορφολογίας του φ/ο. Επισημαίνονται ιδιαίτερα οι περιπτώσεις 4, 5β και 6γ που οδήγησαν και οδηγούν σε κάθε ισχυρό σεισμό σε μεγάλες βλάβες (βλ. σχήματα 2.1.2-1 έως 2.1.2-3).

Πίνακας 2.1.2-1 Συχνά παρατηρούμενες δυσμενείς περιπτώσεις μορφολογίας φ/ο

1. Πολύπλοκες κατόψεις → ασαφής στατική λειτουργία
2. Μη συμπαγούς μορφής κατόψεις (πτερύγια, έντονες εσοχές/ εξοχές)
→ διατάραξη ή και άρση της διαφραγματικής λειτουργίας, εκκεντρότητες μαζών
3. Πολλές και μεγάλες εσοχές (ή εξοχές) στην καθ' ύψος μορφή του κτιρίου
→ ανισοκατανομή μαζών καθ' ύψος με αρνητική επιρροή στην ταλάντωση
4. **Έντονα ασύμμετρη τοποθέτηση τοιχωμάτων στην κάτοψη**
→ μεγάλες εκκεντρότητες δυσκαμψιών, έντονες στροφές ορόφων
5. Σύζευξη δομικών στοιχείων με μεγάλες διαφορές δυσκαμψίας
 - α. σύζευξη ισχυρών δοκών και ασθενών στύλων → κίνδυνος δημιουργίας κινηματικού μηχανισμού ορόφου
 - β. **κοντά υποστυλώματα** → κίνδυνος υπέρβασης της διατμητικής αντοχής και της διαθέσιμης πλαστιμότητάς τους, κίνδυνος ψαθυρής θραύσης
 - γ. δοκοί μικρού μήκους που συνδέουν ισχυρά κατακόρυφα στοιχεία → κίνδυνος διατμητικής αστοχίας, ψαθυρής θραύσης
6. Απότομες μεταβολές δυσκαμψίας καθ' ύψος, π.χ.
 - α. διακοπή ισχυρών τοιχωμάτων καθ' ύψος
 - β. τοιχώματα επί στύλων στο ισόγειο («ανάστροφο εκκρεμές», πιλοτή) ή σε ενδιάμεσο όροφο (μαλακός ή/και εύστρεπτος όροφος)
 - γ. έλλειψη τοιχοποιίας στο ισόγειο πλαισιακών ή σχεδόν πλαισιακών κατασκευών
→ **μαλακό ισόγειο, πιλοτή**
7. Απότομες καθ' ύψος μεταβολές της αντοχής → «ασθενής» όροφος
8. Πλάκες επί υποστυλωμάτων χωρίς δοκούς (μυκητοειδείς)
→ πρακτικά μηδενισμός της πλαισιακής λειτουργίας, κίνδυνος διάτρησης
8. Φυτευτά υποστυλώματα → κίνδυνος υπέρβασης αντοχής και διαθέσιμης πλαστιμότητας της στηρίζουσας δοκού
9. Μεγάλη λυγνρότητα δομικών στοιχείων → κίνδυνος λυγισμού
10. Ανισοϋφείς θεμελιώσεις χωρίς συναρμογή → κίνδυνος διαφορικών μετακινήσεων
11. Ανυπαρξία αρμών προς όμορα κτίρια ή αρμοί ανεπαρκούς εύρους → κίνδυνος πρόσκρουσης

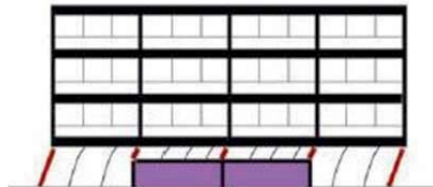
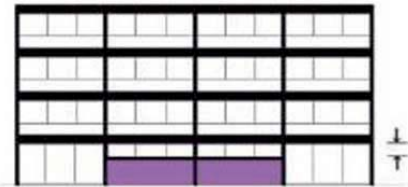
1^ο Μέρος: Εισαγωγή στη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού και στην κανονιστική της υλοποίηση



Σχ. 2.1.2-1 Έντονα ασύμμετρη κατανομή δυσκαμψίας σε κάτοψη

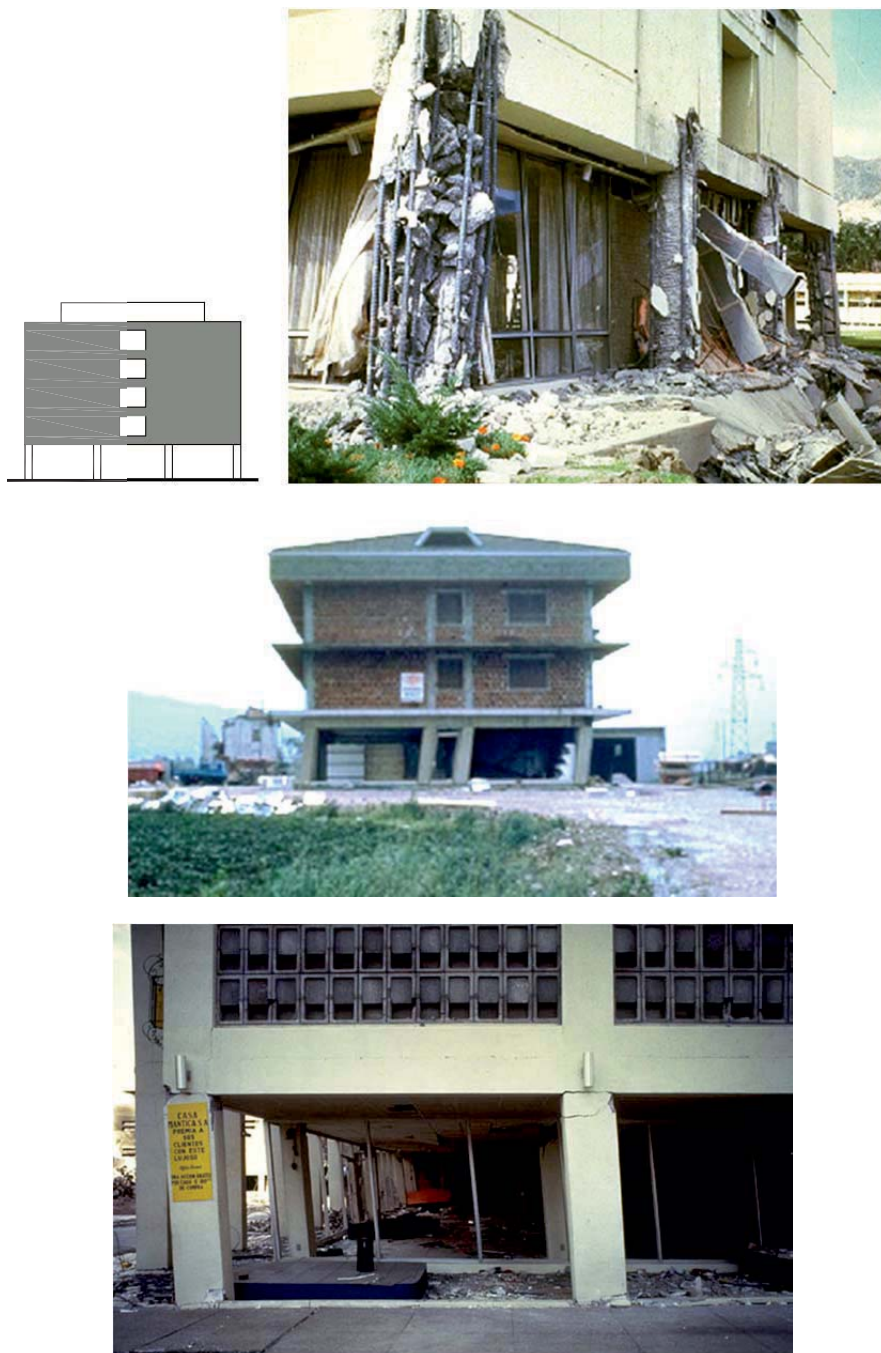


Τομή:



Σχ. 2.1.2-2 Επικίνδυνες διαμορφώσεις: **Κοντά υποστυλώματα** (άνω και κάτω αριστερά: λόγω προσθήκης τοιχοποιίας στον φ/ο, κάτω δεξιά: βάσει αρχικού σχεδιασμού)

1^ο Μέρος: Εισαγωγή στη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού και στην κανονιστική της υλοποίηση



Σχ. 2.1.2-3 Επικίνδυνες διαμορφώσεις: **Μαλακός όροφος (πιλοτή).** Άνω: Τοίχωμα επί στύλων. Μέση και κάτω: Πλαισιακή κατασκευή με μαλακό ισόγειο λόγω απουσίας στοιχείων πλήρωσης (τοιχοποιίας ή άλλων)

2.1.3 Επιλεγμένη βιβλιογραφία σχετικά με τη μόρφωση του φ/ο

Μεταξύ των διαφόρων γνωστών συγγραμμάτων (ελληνικών και ξένων) περί αντισεισμικών κατασκευών, προτείνονται ειδικότερα για ζητήματα αντισεισμικά δόκιμης μόρφωσης του φέροντα οργανισμού οι παρακάτω βιβλιογραφικές πηγές:

Αναστασιάδης Κ. (1989), Αντισεισμικές Κατασκευές Ι, εκδόσεις Ζήτη, Θεσ/νίκη.
[βλ. ειδικότερα κεφ. 2]

Naeim F. (ed.) (1989), The Seismic Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989. [βλ. ειδικότερα κεφ. 5]

Fintel M. (1991), Need for shear walls in concrete buildings for seismic resistance: Observations on the performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years (δημοσιοποιημένο στο Internet).

Bachmann H. (2003), Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities, Swiss Federal Office for Water and Geology, Zurich, 2003.

Αβραμίδης Ι.Ε. (2003), «Αρχιτέκτονες: Εχθροί ή φίλοι του Αντισεισμικού Σχεδιασμού των Κατασκευών; », Ενημερωτικό Δελτίο του ΤΕΕ, 7 Απριλίου 2003, τεύχος 2242, σελ. 72-73.

Booth E. & Key (2006), Earthquake Design Practice for Buildings, Thomas Telford, London, 2006. [βλ. ειδικότερα κεφ. 1 και 5]

Αναστασιάδης Κ. (2008), «Η εξέλιξη των αντισεισμικών κανονισμών», Άρθρο στην Ειδική έκδοση με τίτλο «30 χρόνια μετά το σεισμό της Θεσσαλονίκης - Μνήμες και προοπτική» της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Μάιος 2008.

Elghazouli A.Y. (ed.) (2009), Seismic Design of Buildings to Eurocode 8, Spon Press, London and New York, 2009. [βλ. ειδικότερα κεφ. 4]

Fardis M. (2009), Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings based on EN-Eurocode 8, Springer, 2009. [βλ. ειδικότερα κεφ. 2]

Penelis G. and Penelis Gr. (2014), Concrete Buildings in Seismic Regions, CRC Press, 2014.

Moehle J. (2014), Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings, McGraw-Hill Professional, 2014.

Fardis M., Carvalho E., Fajfar P. and Pecker A. (2015), Seismic Design of Concrete Buildings to Eurocode 8, CRC Press, 2015.

Avramidis, I., Athanatopoulou, A., Morfidis, K., Sextos, A. and Giaralis, A. (2016), Eurocode-Compliant Seismic Analysis and Design of R/C Buildings - Concepts, Commentary and Worked Examples with Flowcharts, Springer [Series: Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Vol. 38], 2016.

[illegible]

3. Η πορεία των υπολογισμών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 – Διαγράμματα ροής και διευκρίνιση του τρόπου εφαρμογής ορισμένων διατάξεων

3.1 Η γενική πορεία της αντισεισμικής μελέτης

Στο κεφάλαιο 2 (βλ. Σχ. 2-1 και Πίν. 2-1) παρουσιάστηκαν οι τρεις φάσεις που διατρέχει μία τυπική δομοστατική μελέτη:

Φάση Α': Μόρφωση του φ/ο και προδιαστασιολόγηση

Φάση Β': Ανάλυση/Διαστασιολόγηση

Φάση Γ': Τελικά κατασκευαστικά σχέδια

και τα βασικά στάδια της Β' φάσης:

Στάδιο 1: Προσομοίωση (Μοντελοποίηση)

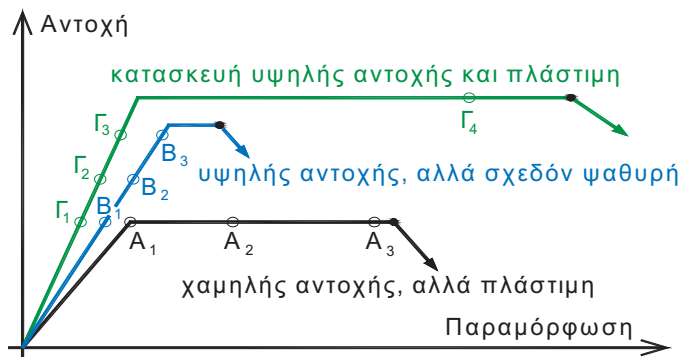
Στάδιο 2: Υπολογισμός (Επίλυση ή και Ανάλυση)

Στάδιο 3: Διαστασιολόγηση (Οριστικοποίηση διατομών και οπλισμού).

Το παρόν κεφάλαιο θα επικεντρωθεί στο Στάδιο 2 Β' φάσης, όπου θα παρουσιαστούν με περισσότερες λεπτομέρειες όλες τις βασικές διαδικασίες που απαιτούνται, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, για τη διεξαγωγή των υπολογισμών (της ανάλυσης) του φ/ο μιας κατασκευής.

Καταρχάς υπενθυμίζεται η πρώτη σημαντική απόφαση που πρέπει να ληφθεί κατά την Α' φάση μιας αντισεισμικής μελέτης: Αφού καθοριστεί βάσει των αρχιτεκτονικών σχεδίων ο φ/ο ως προς τη γενική μορφή και γεωμετρία του, θα πρέπει ο δομοστατικός μηχανικός - σε συμφωνία με τον κύριο του έργου - να καθορίσει το επιθυμητό επίπεδο αντισεισμικής επίδοσης (επιτελεστικότητας) της κατασκευής. Τα όσα σχετικά εξετέθησαν σε προηγούμενες παραγράφους συνοψίζονται χάριν υπενθύμισης στο παρακάτω σχήμα 3.1-1, όπου φαίνονται απλουστευμένα υπό μορφή διαγράμματος σε όρους «αντοχής – παραμόρφωσης» (ή «τέμνουσας βάσης – οριζόντιας μετατόπισης») οι πιθανοί τρόποι απόκρισης τριών διαφορετικών κατασκευών σε σεισμούς μικρής, μέσης και μεγάλης έντασης, καθώς και σε σεισμούς που υπερβαίνουν τον σεισμό σχεδιασμού:

- Για μικρής έντασης σεισμούς και οι τρεις κατασκευές Α, Β και Γ συμπεριφέρονται ελαστικά (μηδενικές βλάβες στον φ/ο, σημεία Α₁, Β₁, Γ₁).
- Για μέσης έντασης σεισμούς οι υψηλής αντοχής κατασκευές Β και Γ παραμένουν ελαστικές (σημεία Β₂, Γ₂), ενώ η χαμηλότερης αντοχής κατασκευή Α εισέρχεται στην πλαστική περιοχή (σημείο Α₂).
- Υπό τον μεγάλης έντασης σεισμό σχεδιασμού οι υψηλής αντοχής κατασκευές Β και Γ εξακολουθούν να συμπεριφέρονται ελαστικά (σημεία Β₃, Γ₃), ενώ η χαμηλότερης αντοχής κατασκευή Α εισέρχεται βαθύτερα στην πλαστική περιοχή, χωρίς όμως να καταρρεύσει, αφού διαθέτει επαρκή πλαστιμότητα (σημείο Α₃). Η αξιοποίηση της πλαστιμότητάς της συνεπάγεται βεβαίως ένα αντίστοιχο επίπεδο βλαβών (διαρροών, πλαστικοποιήσεων).
- Τέλος, στην περίπτωση υπέρβασης του σεισμού σχεδιασμού, μόνο η υψηλής αντοχής και υψηλής πλαστιμότητας κατασκευή Γ έχει πιθανότητες αποφυγής της κατάρρευσης.



Απόκριση σε σεισμούς					
Κατασκευή	συντελεστής συμπεριφοράς $q=q_{απαιτ}$ διαθέσιμη πλαστιμότητα $\mu=\mu_{διαθ}$	μικρής έντασης (συχνοί)	μέσης έντασης (περιστασιακοί)	μεγάλης έντασης (σπάνιοι) [σεισμός σχεδιασμού]	πολύ υψηλής έντασης (πολύ σπάνιοι) [$>$ σεισμού σχεδιασμού]
A χαμηλής αντοχής, αλλά πλάστιμη	q : μεγάλο μ : μεγάλη	A1 χωρίς διαρροές (βλάβες)	A2 με μικρές διαρροές (βλάβες) → Ο σεισμός παραλαμβάνεται <u>με</u> εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητας	A3 με μεγάλες διαρροές (βλάβες)	--- Αστοχία
B υψηλής αντοχής, αλλά σχεδόν ψαθυρή	μ : μικρή q : μικρό	B1 χωρίς διαρροές (βλάβες)	B2 χωρίς διαρροές (βλάβες) → Ο σεισμός παραλαμβάνεται <u>χωρίς</u> εκμετάλλευση της (ούτως ή άλλως αμελητέας) διαθέσιμης πλαστιμότητας	B3 χωρίς διαρροές (βλάβες)	--- Αστοχία
Γ υψηλής αντοχής και πλάστιμη	q : μικρό μ : μεγάλη	Γ1 χωρίς διαρροές (βλάβες)	Γ2 χωρίς διαρροές (βλάβες)	Γ3 χωρίς διαρροές (βλάβες)	Γ4 με μικρές+μεγάλες βλάβες → ο σεισμός παραλαμβάνεται χωρίς εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητας με εκμετάλλευση

Σχ. 3.1-1 Επιλογή του επιθυμητού επιπέδου επιτελεστικότητας (απλουστευμένα)

Η κατά την έναρξη της μελέτης λαμβανόμενη απόφαση σχετικά με το επιθυμητό επίπεδο αντισεισμικής επίδοσης της κατασκευής έχει - όπως εξηγήθηκε στην § 2.4.1 - άμεση επίπτωση στην προδιαστασιολόγηση των διατομών των διαφόρων δομικών στοιχείων. Η επιλογή υψηλής επιτελεστικότητας οδηγεί γενικώς σε ισχυρότερες (μεγαλύτερες) διατομές, ενώ η επιλογή χαμηλής επιτελεστικότητας σε μικρότερες διατομές και σε αντίστοιχους οπλισμούς (βλ. Σχ. 2.4.1-1 και Πίν. 3.1-1).

Σημείωση 1: Η διαδικασία της προδιαστασιολόγησης

Σημειώνεται ότι για την προδιαστασιολόγηση δεν υπάρχουν τυποποιημένες διαδικασίες. Η καταρχάς επιλογή των διατομών (έχοντας πάντα κατά νου το ήδη επιλεγέν επίπεδο επιτελεστικότητας) πραγματοποιείται

- συνήθως με βάση την εμπειρία του μελετητή από την ενασχόλησή του με παρόμοια έργα, και
- ενδεχομένως με βάση ορισμένους προσεγγιστικούς, προκαταρκτικούς υπολογισμούς (συνήθως στατικούς και όχι δυναμικούς) με χρήση απλουστευμένων προσομοιωμάτων του φ/ο ή υποφορέων αυτού.

Σημείωση 2: Έλεγχοι και τροποποιήσεις των προδιαστασιολογημένων διατομών

Είναι σαφές ότι οι κατά την προσδιαστασιολόγηση επιλεγείσες διατομές των διαφόρων δομικών στοιχείων ελέγχονται σε επόμενο στάδιο της μελέτης ως προς την επάρκειά τους και από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενδέχεται να απαιτηθούν αλλαγές, όπως αύξηση διαστάσεων αν οι διατομές προκύψουν ανεπαρκείς ή ακόμη και μείωση διαστάσεων αν προκύψουν υπερεπαρκείς. Υπενθυμίζεται επίσης στο σημείο αυτό η χρησιμότητα του λόγου εξάντλησης της αντοχής μιας διατομής, ο οποίος θα πρέπει να επιδιώκεται να είναι κατά το δυνατόν ομοιόμορφα κατανεμημένος σε όλον τον φορέα και να παίρνει τιμές σαφώς μικρότερες της μονάδας (βλ. § 2.3.1(α) και 2.3.5(α)).

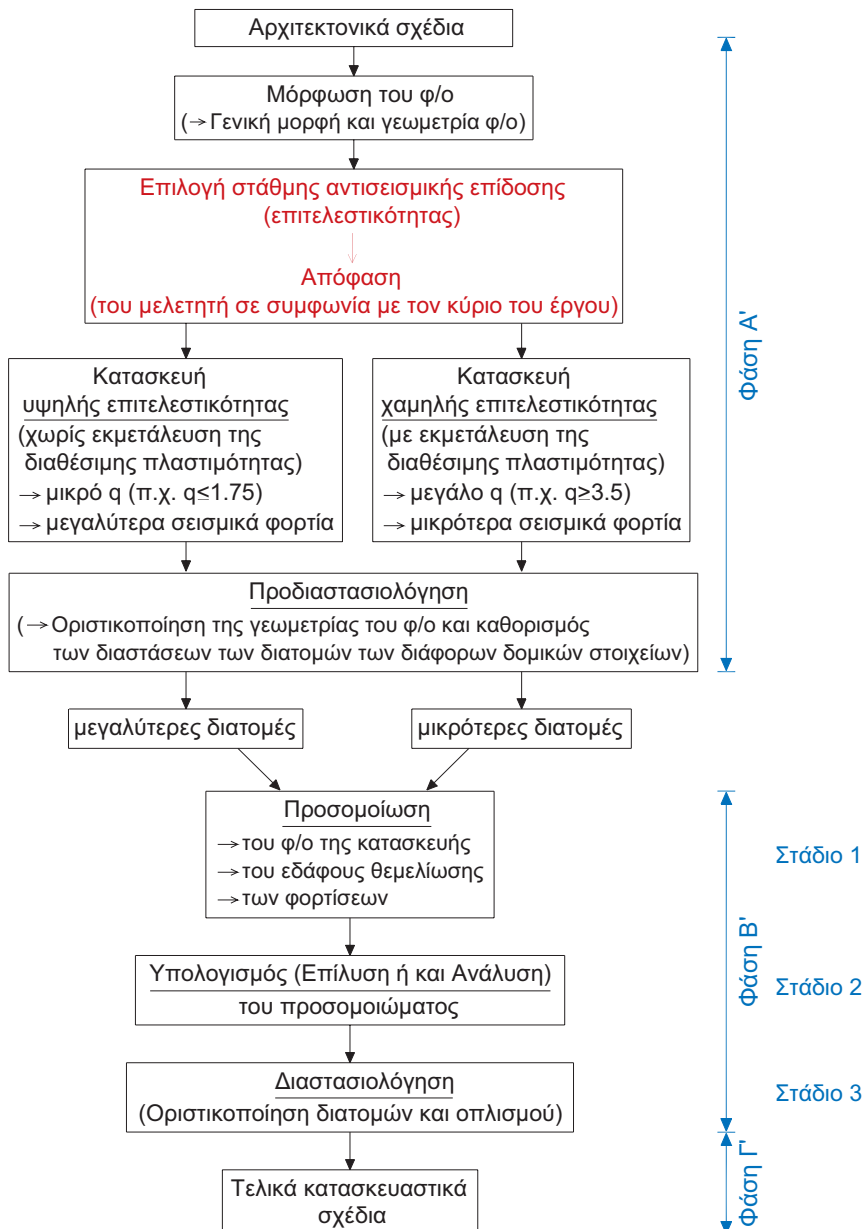
Τονίζεται ότι η επιλογή του επιπέδου επιτελεστικότητας εκφράζεται άμεσα μέσω της επιλογής της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q , με τον οποίο μειώνονται οι τεταγμένες του ελαστικού φάσματος που καθορίζουν τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού με τα οποία ακολούθως διενεργείται η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση του φ/ο. Πιο συγκεκριμένα:

- Σε περίπτωση που επιλεγεί κατασκευή χαμηλής επιτελεστικότητας, η ανώτατη επιτρεπτή τιμή $max_{q_{επιτ}}$ του συντελεστή συμπεριφοράς θα πρέπει να καθοριστεί σύμφωνα με τις διαδικασίες που προβλέπονται στον ΕΚ8 (βλ. παρακάτω, § 3.2.6).
Προσοχή: Η τελικώς επιλεγόμενη για τη σεισμική ανάλυση τιμή του q δεν πρέπει να είναι σε καμιά περίπτωση μεγαλύτερη από την ανώτατη επιτρεπτή τιμή $max_{q_{επιτ}}$.
- Εάν αντίθετα επιλεγεί κατασκευή υψηλής επιτελεστικότητας και καθοριστεί εξ αρχής μια αντίστοιχα μικρή τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q (π.χ. $q \leq 1.75$), τότε *μπορούν να παρακαμφθούν* όλες οι σχετικές με τον καθορισμό του q διατάξεις του ΕΚ8.

Έχοντας προδιαστασιολογήσει τον φ/ο της κατασκευής, ο μελετητής μπορεί να προχωρήσει στον καθορισμό του υπολογιστικού προσομοιώματός του, συνεκτιμώντας ενδεχομένως την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης, σύμφωνα με όσα εξετάστηκαν στην § 2.2 (βλ. Πίν. 2.2.1-1).

Σχετικά με την προσομοίωση του φ/ο και του εδάφους, τόσο ο ΕΚ8 όσο και ο ΕΑΚ περιέχουν μόνο ορισμένες γενικές οδηγίες/διατάξεις (βλ. § 2.2.1 (α)&(β)).

Πίνακας 3.1-1 Η γενική πορεία της αντισεισμικής μελέτης



Αντίθετα, η προσομοίωση της φόρτισης, και ειδικότερα της σεισμικής φόρτισης, περιγράφεται με πληρότητα σε αμφότερους τους αντισεισμικούς κανονισμούς (βλ. § 2.2.1 (γ)). Προσοχή απαιτείται πάντως όσον αφορά στην επιλογή της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των σεισμικών φορτίων σχεδιασμού.

Με καθορισμένο πλέον το συνολικό υπολογιστικό προσομοίωμα (φ/ο-εδάφους-φόρτισης)

- διενεργείται η ανάλυση, δηλαδή ο υπολογισμός των μεγεθών έντασης και παραμόρφωσης του φ/ο για όλες τις προβλεπόμενες από τους κανονισμούς περιπτώσεις φόρτισης,
- πραγματοποιούνται όλοι οι απαιτούμενοι από τους κανονισμούς έλεγχοι, και
- οριστικοποιούνται (ενδεχομένως μετά από πολλαπλές τροποποιήσεις και επανεπιλύσεις) οι διατομές των δομικών στοιχείων καθώς και ο οπλισμός αυτών.

Στις ακόλουθες παραγράφους θα παρουσιαστούν υπό μορφή διαγραμμάτων ροής (Δ.Ρ.) όλες οι διαδικασίες που απαιτούνται βάσει του Ευρωκώδικα 8 για τη διεξαγωγή των υπολογισμών (της ανάλυσης) του φ/ο μιας κατασκευής.

3.2 Η πορεία των υπολογισμών – Διαγράμματα ροής

Στις ακόλουθες παραγράφους συνοψίζεται υπό μορφή διαγραμμάτων ροής (Δ.Ρ.) η αλληλουχία των υπολογιστικών διαδικασιών που απαιτούνται κατά την εκπόνηση της αντισεισμικής μελέτης μιας κατασκευής. Παράλληλα, όπου κρίνεται αναγκαίο, δίνονται διάφορες επεξηγήσεις.

Οι αναφερόμενοι εντός παρενθέσεως, σε διάφορα σημεία των διαγραμμάτων, αριθμοί παραγράφων ή εδαφίων (σε **μπλε χρώμα** χάριν αμεσότερης αναγνώρισης) αφορούν στον ΕΚ8 και στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα.

3.2.1 Γενικό διάγραμμα ροής εργασιών - Δ.Ρ.1

Καταρχάς παρατίθεται το Διάγραμμα Ροής 1 (Δ.Ρ.1), το οποίο δείχνει τα βασικά βήματα που ακολουθεί βάσει του ΕΚ8 ο αντισεισμικός υπολογισμός του φ/ο (Στάδιο 2 της Β' φάσης της μελέτης), ακριβέστερα: ο αντισεισμικός υπολογισμός του προσομοιώματος του φ/ο που καθορίστηκε προηγουμένως (στο Στάδιο 1).

Στο Δ.Ρ.1 γίνονται παραπομπές σε ακόλουθα διαγράμματα ροής (Δ.Ρ.2 έως Δ.Ρ.11), στα οποία παρουσιάζεται η πορεία των διαφόρων επί μέρους διαδικασιών.

Παρατήρηση:

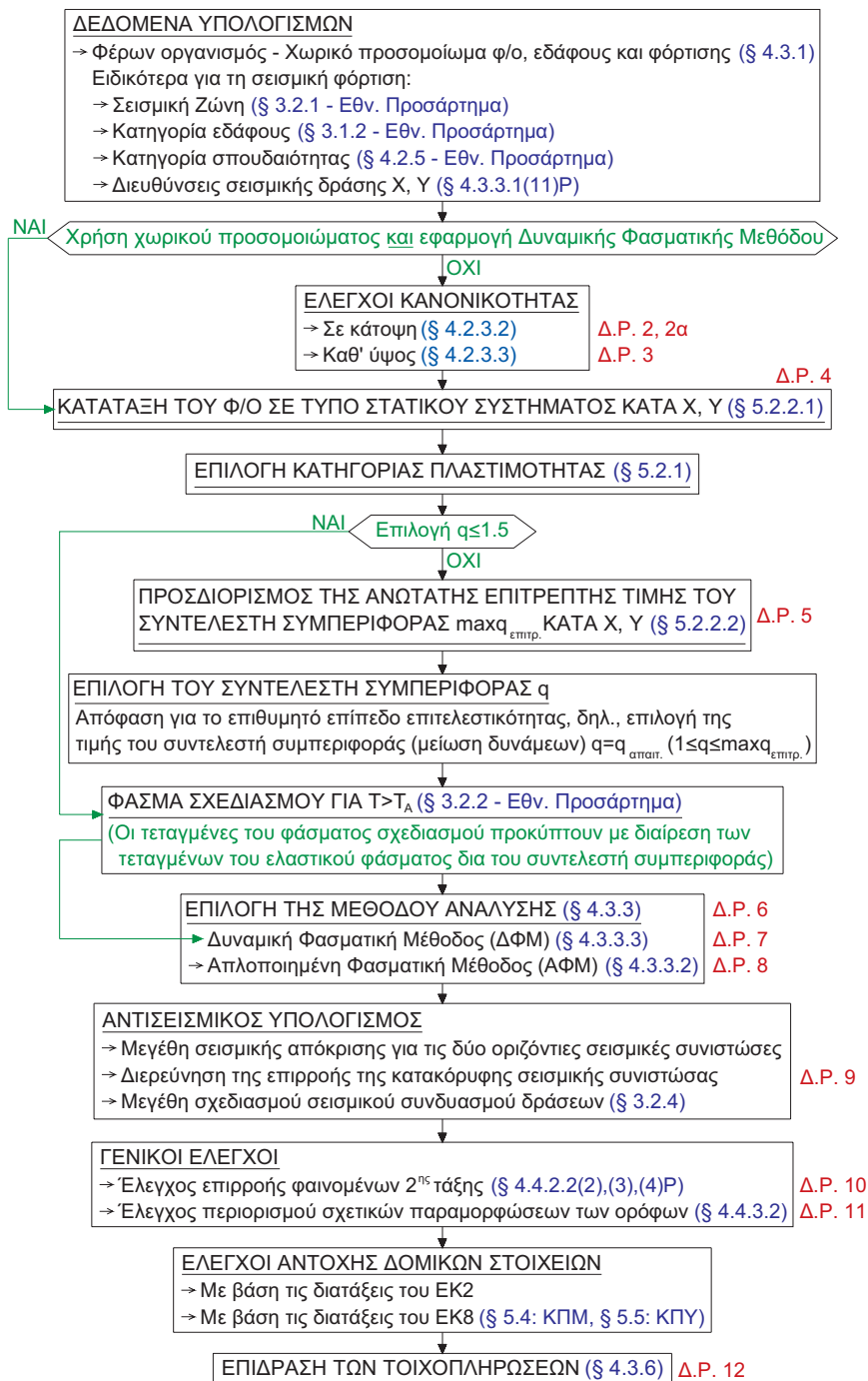
Επισημαίνεται ότι εάν για τη μελετώμενη κατασκευή

- (1) επιλεγεί υψηλή επιτελεστικότητα (υψηλή αντισεισμική επίδοση) και καθοριστεί για τον συντελεστή q απομείωσης των σεισμικών φορτίων (συντελεστή συμπεριφοράς) τιμή $q \leq 1.5$,
- (2) επιλεγεί εξαρχής χωρικό (3-διάστατο) προσομοίωμα για τον φ/ο, και
- (3) επιλεγεί εξαρχής ως μέθοδος ανάλυσης η δυναμική φασματική μέθοδος,

τότε καθίσταται δυνατή η παράκαμψη μερικών ή και όλων των ενδιάμεσων ελέγχων και διαδικασιών (βλ. π.χ. **πράσινη** διαδρομή στο Δ.Ρ.1). Ειδικότερα, σε συνάρτηση από την επιλεγόμενη τιμή του συντελεστή q , μπορούν να παρακαμφθούν:

- ο έλεγχος κανονικότητας σε κάτοψη (Δ.Ρ.2, Δ.Ρ.2α),
- ο έλεγχος κανονικότητας καθ' ύψος (Δ.Ρ.3),
- η διαδικασία κατάταξης του φ/ο σε τύπο στατικού συστήματος (Δ.Ρ. 4), και
- η διαδικασία προσδιορισμού της ανώτατης επιτρεπτής τιμής $\max q_{\text{επιτρ}}$ του συντελεστή συμπεριφοράς q (Δ.Ρ.5).

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ 1: ΓΕΝΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ



3.2.2 Έλεγχοι κανονικότητας σε κάτοψη και καθ' ύψος

Σύμφωνα με τον ΕΚ8 τα κτίρια (ακριβέστερα: οι φ/ο των κτιρίων) μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής δύο κατηγορίες:

- κτίρια κανονικά ή μη κανονικά σε κάτοψη, και σε
- κτίρια κανονικά ή μη κανονικά καθ' ύψος.

Για ποιόν λόγο γίνεται αυτή η διάκριση; Διότι στην περίπτωση κανονικών κτιρίων επιτρέπεται, λόγω της ευνοϊκότερης και πιο αξιόπιστα προβλέψιμης δυναμικής συμπεριφοράς τους υπό σεισμική φόρτιση, να γίνουν διάφορες απλοποιήσεις και ευμενέστερες επιλογές κατά την ανάλυσή τους, οι οποίες αναφέρονται:

- (α) στην επιλογή του στατικού προσομοιώματος (επίπεδο ή χωρικό)
- (β) στην επιλογή της μεθόδου ανάλυσης (Απλοποιημένη Φασματική Μέθοδος, ΑΦΜ, ή Δυναμική Φασματική Μέθοδος, ΔΦΜ), και
- (γ) στην επιλογή του συντελεστή συμπεριφοράς q (απομειωμένου ή μη).

Οι επιπτώσεις της κανονικότητας σε κάτοψη και καθ' ύψος στη σεισμική ανάλυση δίνονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα 3.2.2-1 (βλ. ΕΚ8, Πίνακας 4.1):

Πίνακας 3.2.2-1 Επιπτώσεις κανονικότητας στη σεισμική ανάλυση και μελέτη

Κανονικότητα σε		Επιλογή προσομοιώματος	Επιλογή μεθόδου ανάλυσης	Μείωση ή μη της τιμής αναφοράς q_0 του συντελεστή συμπεριφοράς
κάτοψη	καθ' ύψος			
Ναι	Ναι	Επίπεδο	ΑΦΜ	Τιμή αναφοράς
Ναι	Όχι	Επίπεδο	ΔΦΜ	Μειωμένη τιμή (-20%)
Όχι	Ναι	Χωρικό	ΑΦΜ	Τιμή αναφοράς
Όχι	Όχι	Χωρικό	ΔΦΜ	Μειωμένη τιμή (-20%)

Παρατηρήσεις:

- (α) Η κανονικότητα ή μη σε κάτοψη επηρεάζει μόνο την επιλογή του προσομοιώματος, ενώ η κανονικότητα ή μη καθ' ύψος επηρεάζει την επιλογή τόσο της μεθόδου ανάλυσης όσο και της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς.
- (β) Η επιλογή απλούστερου, δηλαδή επίπεδου, προσομοιώματος στην περίπτωση κανονικότητας σε κάτοψη προφανώς *δεν είναι υποχρεωτική*, κάτι που θα ήταν αντιφατικό προς τη σύγχρονη πρακτική. Δηλαδή, ακόμη και σε περίπτωση κανονικότητας σε κάτοψη, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα χωρικό προσομοίωμα, το οποίο σε κάθε περίπτωση οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα (βλ. § 2.2.4(α)).
- (γ) Ομοίως, η επιλογή της Απλοποιημένης Φασματικής Μεθόδου στην περίπτωση κανονικότητας καθ' ύψος επίσης *δεν είναι υποχρεωτική*. Αντίθετα, η ανάλυση του κτιρίου μπορεί πάντοτε να γίνεται με την ακριβέστερη και γενικής εφαρμογής Δυναμική Φασματική Μέθοδο (βλ. § 2.3.3 και 2.3.4).
- (δ) Τέλος, η μείωση της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς στο 80% της βασικής τιμής αναφοράς q_0 (δηλ. $q=0.80q_0$), η οποία πρέπει να γίνεται στην περίπτωση μη κανονικότητας καθ' ύψος, *μπορεί* να γίνεται ακόμη κι αν το κτίριο είναι κανονικό καθ' ύψος, αφού μικρότερο q αυξάνει την επιτελεστικότητα της κατασκευής.

Ο χαρακτηρισμός ενός κτιρίου ως κανονικού ή μη βασίζεται σε κριτήρια που δίνονται για μεν την κανονικότητα σε κάτοψη στην § 4.2.3.2, για δε την κανονικότητα καθ' ύψος στην § 4.2.3.3 του ΕΚ8, όπου και παραπέμπεται ο αναγνώστης¹.

(α) Έλεγχος κανονικότητας σε κάτοψη – Δ.Ρ.2, Δ.Ρ.2α

Παρατηρούμε καταρχάς (βλ. παρακάτω Πίνακα 3.2.2-2) ότι

- (1) ορισμένα από τα κριτήρια κανονικότητας είναι *ποσοτικά*, δηλαδή βασίζονται στον υπολογισμό και τον εν συνεχεία έλεγχο συγκεκριμένων μεγεθών,
- (2) ορισμένα άλλα κριτήρια είναι *ποιοτικά* και συνεπώς δεν μπορούν να ελεγχθούν αριθμητικά, αλλά απαιτούν την κρίση του μελετητή, και
- (3) υπάρχουν και κριτήρια *μικτού τύπου*, δηλαδή κριτήρια τα οποία είναι μεν ποιοτικά και απαιτούν την κρίση του μελετητή, αλλά η κρίση αυτή μπορεί να βασιστεί σε κάποια βοηθητικά μεγέθη επιδεκτικά υπολογισμού.

Πίνακας 3.2.2-2 Ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια κανονικότητας

	ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ	ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΚΑΤΟΨΗ
ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	Έλεγχος κανονικότητας των εσοχών εφόσον υπάρχουν [§ 4.2.3.3(5)].	- Λυγγρότητα κτιρίου σε κάτοψη $\lambda = L_{\min}/L_{\max} < 4$ [§ 4.2.3.2(5)]. - Έλεγχος στατικών εκκεντροτήτων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις: $e_0 < 0.30 \cdot r$ [§ 4.2.3.2(6)]. - Έλεγχος στρεπτικής ευαισθησίας: $r \geq I_s$ [§ 4.2.3.2(6)].
ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	---	- «Σχεδόν» συμμετρική κάτοψη [§ 4.2.3.2(2)]. - Διαφραγματική λειτουργία (Έλεγχος γεωμετρικού σχήματος της κάτοψης L, Π, Η, Ι, Χ), [§ 4.2.3.2(4)].
ΜΙΚΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	- «Σχεδόν» σταθερή δυσκαμψία και μάζα καθ' ύψος [§ 4.2.3.3(3)]. - Συστήματα ανάληψης οριζοντίων φορτίων χωρίς διακοπή καθ' ύψος [§ 4.2.3.3(2)]. - Σε κτίρια πλαισιακού τύπου με «σχεδόν» σταθερή υπεραντοχή ορόφων καθ' ύψος [§ 4.2.3.3(4)]. - Έλεγχος της κατανομής των τοιχοπληρώσεων καθ' ύψος [§ 4.3.6.3.2].	- «Συμπαγής» κάτοψη. Έλεγχος των τυχόν αποκλίσεων από την κυρτότητα της κάτοψης λόγω εσοχών στην περίμετρο [§ 4.2.3.2(3)]. - Έλεγχος της κατανομής των τοιχοπληρώσεων σε κάτοψη [§ 4.3.6.3.1].

¹ Αξίζει να τονιστεί ότι παρά τις εκτεταμένες σχετικές έρευνες, δεν υπάρχει ακόμη διεθνής ομοφωνία σχετικά με τα κανονιστικά κριτήρια βάσει των οποίων κρίνεται η κανονικότητα ή μη ενός κτιρίου.

Παράλληλα επισημαίνεται ότι κεντρική θέση μεταξύ των κριτηρίων κανονικότητας σε κάτοψη έχει το κριτήριο της § 4.2.3.2(6) του ΕΚ8 που ορίζει ότι:

«Σε κάθε επίπεδο (στάθμη, όροφο) και για κάθε διεύθυνση της ανάλυσης (X και Y) η στατική εκκεντρότητα e_o και η ακτίνα δυστρεψίας r ικανοποιούν τις δύο παρακάτω συνθήκες:

$$e_{oX} \leq 0.30 \cdot r_X \quad e_{oY} \leq 0.30 \cdot r_Y \quad \leftarrow \text{εξ. (4.1a) του ΕΚ8}$$

$$r_X \geq l_s \quad \text{και} \quad r_Y \geq l_s \quad \leftarrow \text{εξ. (4.1b) του ΕΚ8}$$

όπου:

e_{oX} , e_{oY} είναι η απόσταση μεταξύ του ελαστικού κέντρου (κέντρου δυσκαμψίας) και του κέντρου μάζας, που μετράται κατά τη διεύθυνση (X ή Y αντιστοίχως) που είναι κάθετη στην εξεταζόμενη διεύθυνση της διέγερσης,

r_X , r_Y είναι η ακτίνα δυστρεψίας ως προς το ελαστικό κέντρο, δηλαδή η τετραγωνική ρίζα του λόγου της δυστρεψίας προς τη δυσκαμψία στην διεύθυνση Y ή X αντιστοίχως, και

l_s είναι η ακτίνα αδρανείας της μάζας της πλάκας του ορόφου σε κάτοψη, δηλαδή η τετραγωνική ρίζα του λόγου (α) της μαζικής ροπής αδρανείας J_m της πλάκας του ορόφου σε κάτοψη, ως προς το κέντρο μάζας της πλάκας, προς (β) τη μάζα m της πλάκας του ορόφου».

Η ακολουθούμενη ροή εργασιών για τον έλεγχο της κανονικότητας δίνεται στο διάγραμμα ροής Δ.Ρ.2.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, δυστυχώς, οι ακτίνες δυστρεψίας (r_X , r_Y) και οι στατικές εκκεντρότητες (e_{oX} , e_{oY}) μπορούν να οριστούν με ορθολογικό τρόπο μόνο σε μονώροφα συστήματα και σε συγκεκριμένες κατηγορίες πολυώροφων κτιρίων (εν προκειμένω στα «ισότροπα» κτίρια), διότι μόνο σ' αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να προσδιοριστεί μονοσήμαντα ένας «ελαστικός άξονας» με τρόπο που να του προσδίδει φυσική σημασία (βλ. τη **Σημαντική Επισήμανση** στην επόμενη § 3.2.3). Ως «ισότροπα» θεωρούνται κτίρια στα οποία η καθ' ύψος κατανομή των παραμορφώσεων των επί μέρους υποσυστημάτων ανάληψης οριζόντιων φορτίων (πυρήνες, τοιχώματα και πλαίσια) υπό οριζόντια φορτία δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές. Η συνθήκη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι ικανοποιείται στις περιπτώσεις αμιγώς πλαισιακών συστημάτων ή συστημάτων τοιχωμάτων που είναι συνεχή, χωρίς διακοπή, από τα θεμέλια έως την κορυφή του κτιρίου (βλ. ΕΚ8, § 4.2.3.2(8)).

Αντίθετα, στη γενική περίπτωση των ασύμμετρων «διπλών» συστημάτων, δηλαδή των πολυώροφων κτιρίων με μικτό φέροντα οργανισμό πλαισίων-τοιχωμάτων, η προαναφερθείσα συνθήκη δεν ικανοποιείται. Εντούτοις, για τη γενική αυτή περίπτωση (που είναι και η συνήθης περίπτωση στον ελληνικό χώρο) ο ΕΚ8 επιτρέπει τη χρήση διαδικασιών που δίνονται στα Εθνικά Προσαρτήματα. Το ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα παραπέμπει σχετικώς στην § 3.3.3 και στο παράρτημα ΣΤ του ΕΑΚ-2000, όπου εισάγεται η έννοια του «πλασματικού άξονα». Καθίσταται έτσι δυνατός ο προσεγγιστικός καθορισμός των παραπάνω μεγεθών (r_X , r_Y , e_{oX} , e_{oY}) και μπορούν έτσι να διεξαχθούν οι έλεγχοι των ανισώσεων (4.1a) και (4.1b) του ΕΚ8. Η ακολουθούμενη ροή υπολογισμών δίνεται στο διάγραμμα ροής Δ.Ρ.2α.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

[illegible]

4. Η προσομοίωση κτιριακών κατασκευών Ο/Σ

4.1 Αντικείμενο και στόχοι του κεφαλαίου 4

Στις τρεις φάσεις που περιλαμβάνει μια τυπική δομοστατική μελέτη μιας κατασκευής (Μόρφωση του φέροντα οργανισμού – Ανάλυση / Διαστασιολόγηση - Σχεδίαση) έγινε αναφορά στην αρχή του κεφαλαίου 2 (Σχ. 2-1), όπου και τονίστηκε ότι αυτό που μονολεκτικά ονομάζεται "ανάλυση" δεν συνίσταται απλά στους διενεργούμενους υπολογισμούς, αλλά συμπεριλαμβάνει την προσομοίωση της μελετούμενης κατασκευής, τον υπολογισμό του προσομοιώματός της και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (βλ. **κόκκινο πλαίσιο** στο Σχ. 2.1). Το πρώτο μέρος αυτού του τρίπτυχου, δηλαδή ο καθορισμός του προσομοιώματος του φ/ο της κατασκευής, αποτελεί το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου. Σ' αυτό παρουσιάζονται αρκετά διεξοδικά ευρέως διαδεδομένες πρακτικές αντιμετώπισης μιας σειράς βασικών προβλημάτων που ανακύπτουν κατά την προσομοίωση κτιριακών κατασκευών Ο/Σ (βλ. πίνακα 2.2.1-1). Τηρουμένων των αναλογιών, οι προτεινόμενες λύσεις αφορούν εν μέρει και σε άλλου είδους δομικές κατασκευές.

4.2 Η δεσπόζουσα σημασία της μόρφωσης του φέροντα οργανισμού

Δεδομένου ότι η διαδικασία προσομοίωσης αφορά σε έναν φ/ο που ήδη έχει επιλεγεί από τον δομοστατικό μελετητή, έπεται δηλαδή της μόρφωσης του φ/ο της κατασκευής, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί και πάλι η δεσπόζουσα σημασία που έχει η μόρφωση ενός δόκιμου φ/ο.

Όπως σημειώθηκε στην § 2.1.1, οι αδυναμίες ενός πλημμελούς σε σύλληψη και συνεπώς σεισμικά ευάλωτου φ/ο δεν θεραπεύονται ούτε από την ακόλουθη "προσεκτική" προσομοίωσή του ούτε από τον εν συνεχεία "ακριβή" αριθμητικό υπολογισμό του προσομοιώματος, όπως άλλωστε έδειξαν και οι εμπειρίες από τους σεισμούς των τελευταίων δεκαετιών.

Τονίζεται λοιπόν και επαναλαμβάνεται με έμφαση ότι η αντισεισμικά δόκιμη μόρφωση του φ/ο είναι σημαντικότερη από οποιαδήποτε υπολογιστική εξασφάλιση της κατασκευής.

Λόγω της θεμελιώδους σπουδαιότητάς τους, επαναλαμβάνονται εδώ οι βασικές κατευθυντήριες αρχές, οι οποίες σύμφωνα με τον **EK8** οφείλουν να διέπουν τον σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών:

- (1) Δομική απλότητα
- (2) Ομοιομορφία, συμμετρία και υπερστατικότητα
- (3) Επαρκείς διαξονική αντοχή και δυσκαμψία
- (4) Επαρκείς στρεπτική αντοχή και δυστρεψία περί τον κατακόρυφο άξονα
- (5) Διαφραγματική συμπεριφορά στις στάθμες των ορόφων
- (6) Επαρκής θεμελίωση

Η αναλυτική παρουσίασή τους εκφεύγει των στόχων του παρόντος βιβλίου και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στην πλούσια σχετική βιβλιογραφία (βλ. § 2.1.3).

4.3 Η μετατόπιση του "κέντρου βάρους" της ανάλυσης από τους υπολογισμούς στην προσομοίωση

Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και παράλληλα των υπολογιστικών μεθόδων που βασίζονται στη χρήση τους όπως η ΜΠΣ, επηρέασε σημαντικά τον τρόπο εκπόνησης της Στατικής Μελέτης. Οι υπολογισμοί διενεργούνται πλέον αποκλειστικά με χρησιμοποίηση κατάλληλου λογισμικού (προγραμμάτων) που 'τρέχει' σε ισχυρούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οι οποίοι είναι πλέον προσιτοί σε όλους τους μελετητές. Η εξέλιξη αυτή έθεσε στο περιθώριο μία από τις βασικές παλαιότερες επιδιώξεις, που ήταν η όσο το δυνατόν δραστικότερη μείωση του όγκου των υπολογισμών, οι οποίοι έπρεπε να διεκπεραιωθούν "χειρωνακτικά" με τον λογαριθμικό κανόνα ή με απλές, μη προγραμματιζόμενες αριθμομηχανές. Πράγματι, μία μεγάλη σειρά απλουστευμένων προσομοιωμάτων και μεθόδων υπολογισμού τους αναπτύχθηκε στο παρελθόν με μοναδικό κίνητρο και σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των αγνώστων μεγεθών στο προς επίλυση σύστημα εξισώσεων ή και την πλήρη αποφυγή επίλυσης εξισώσεων. Η περίφημη μέθοδος Cross, κατά την οποία η επίλυση του φορέα γίνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις χωρίς επίλυση εξισώσεων, είναι μία από τις παλαιότερες αυτές μεθόδους, η οποία συναντάται ακόμη και σήμερα σε διδακτικά συγγράμματα της Στατικής. Άλλες, όπως π.χ. οι "γραφικές μέθοδοι" που έκαναν χρήση γεωμετρικών συλλογισμών, έχουν πλέον προ πολλού εξαφανισθεί μαζί με μεθόδους που ήταν προσαρμοσμένες αποκλειστικά στην επίλυση ενός συγκεκριμένου τύπου φορέων (π.χ. εσχάρας δοκών ή ορθογωνικών κανονικών μονώροφων πλαισίων).

Σήμερα, το πλήθος των προς επίλυση εξισώσεων δεν παίζει πια σχεδόν κανένα ρόλο στις συνήθεις περιπτώσεις της δομικής πράξης. Ως συνέπεια αυτού, ο μηχανικός είναι απαλλαγμένος από τον υπολογιστικό φόρτο. Οι όποιοι υπολογισμοί γίνονται με ταχύτητα και ακρίβεια από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων, δίνοντας έτσι στον μηχανικό τη δυνατότητα να επικεντρώσει την προσοχή του σε θέματα ουσίας, όπως είναι

- η ρεαλιστικότερη προσομοίωση της κατασκευής και της φόρτισης¹ και
- η διενέργεια περισσοτέρων επιλύσεων του φέροντα οργανισμού με παραλλαγές της αρχικής προσομοίωσης προς διαπίστωση τυχόν ευαισθησιών της κατασκευής υπό συγκεκριμένες φορτίσεις.

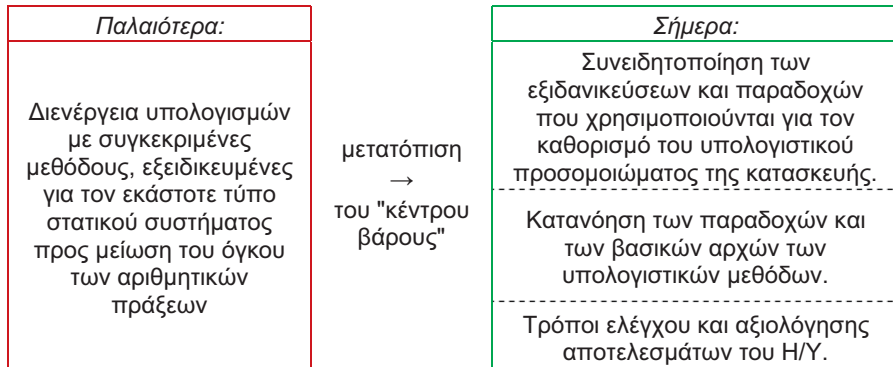
Τα πλεονεκτήματα αυτά αντισταθμίζονται δυστυχώς από εγγενή μειονεκτήματα που φέρνει μαζί της η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή:

- Ένα από αυτά είναι η δυσκολία που παρουσιάζει ο έλεγχος των αποτελεσμάτων ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή, η οποία σχετίζεται με την πολυπλοκότητα των υπολογισμών και τη μικρότερη ή μεγαλύτερη αδιαφάνεια του προγράμματος και των παραδοχών του.

¹ Κίρτας Ε. και Παναγόπουλος Γ.: *Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα Η/Υ*. Εκδ. Κάλλιπος, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/1607>, 2015.

- Ένα άλλο είναι η τάση των μελετητών για όλο και περισσότερους υπολογισμούς, προκειμένου να εκτιμηθεί αρτιότερα η συμπεριφορά της κατασκευής, γεγονός που παράγει τεράστιους όγκους αποτελεσμάτων, τα οποία λόγω δυσκολίας αξιολόγησής τους γίνονται συχνά αποδεκτά άνευ ελέγχου.

Πάντως, το "κέντρο βάρους" της ανάλυσης έχει μετατοπισθεί από τη διενέργεια των αριθμητικών υπολογισμών στη συνειδητοποίηση των παραδοχών της προσομοίωσης, στην κατανόηση των βασικών αρχών των υπολογιστικών μεθόδων και στον έλεγχο και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο σχήμα 4.3-1.



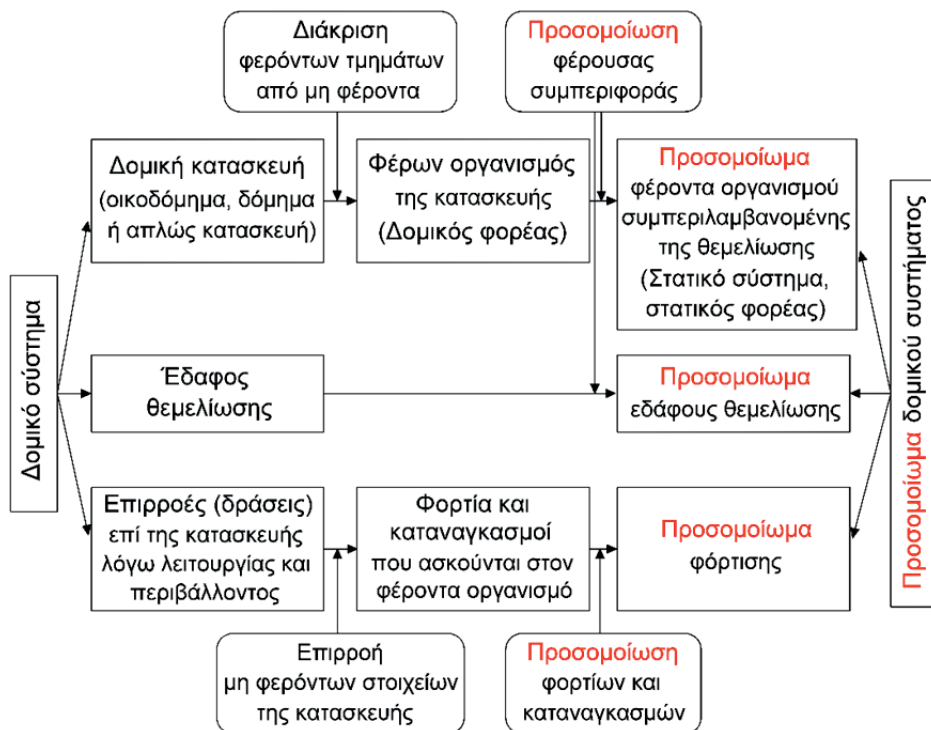
Σχ. 4.3-1 Μετατόπιση του "κέντρου βάρους" της Στατικής Μελέτης

Είναι βέβαια σαφές ότι ο καθορισμός ενός δόκιμου και ρεαλιστικού προσομοιώματος για τη μελέτη μιας κατασκευής προϋποθέτει την κατανόηση της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς της υπό την επίδραση των διαφόρων φορτίσεων. Όπως οι αδόκιμοι στη σύλληψη φέροντες οργανισμοί, έτσι και οι τυχόν αδόκιμες προσομοιώσεις αποδεκτών κατά τα λοιπά φερόντων οργανισμών οδηγούν -άσχετα από τους ενδεχομένως προσεγγμένους υπολογισμούς των προσομοιωμάτων- σε κατασκευές με εγγενείς αδυναμίες και -υπό ορισμένες συνθήκες- με μειωμένη φέρουσα ικανότητα.

4.4 Το δομικό σύστημα και το μηχανικό/υπολογιστικό του προσομοίωμα

4.4.1 Ορισμός του δομικού συστήματος

Οι δομικές κατασκευές είναι σύνθετα μηχανικά συστήματα αποτελούμενα από διαφόρων τύπων φέροντα *δομικά στοιχεία* συζευγμένα μεταξύ τους μέσω συνδέσμων, καθώς και από άλλα στοιχεία και τμήματα που δεν συμμετέχουν στον *φέροντα οργανισμό* (*δομικό φορέα*). Προορισμός του φέροντα οργανισμού είναι να παραλάβει όλες τις επιρροές (*φορτίσεις, δράσεις*) που δέχεται η κατασκευή λόγω της χρήσης της και λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο είναι εκτεθειμένη (π.χ. ίδιο βάρος, ωφέλιμα φορτία, θερμοκρασιακούς καταναγκασμούς, σεισμικές διεγέρσεις κ.ά.) και να τις μεταβιβάσει με ασφάλεια στο στερεό *έδαφος θεμελίωσης*, με το οποίο συνδέεται μέσω στηρίξεων (εφεδράνων και θεμελίων διαφόρων μορφών). Είναι προφανές ότι το υπό μελέτη συνολικό *δομικό σύστημα* συμπεριλαμβάνει, εκτός από την ίδια την κατασκευή, το έδαφος θεμελίωσης και τις φορτίσεις (Σχ. 4.4.1-1).



Σχ. 4.4.1-1 Τα συστατικά του δομικού συστήματος και η προσομοίωσή του

4.4.2 Μηχανικό και υπολογιστικό προσομοίωμα

Η πολυπλοκότητα της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών συστημάτων μας αναγκάζει να χρησιμοποιούμε λιγότερο ή περισσότερο απλοποιημένα *μηχανικά προσομοιώματα* προκειμένου να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των εντάσεων και των παραμορφώσεών τους. Με τον όρο *μηχανικό προσομοίωμα* χαρακτηρίζουμε ένα μοντέλο της κατασκευής, το οποίο προκύπτει μέσα από μια σειρά εξιδανικεύσεων της πραγματικής κατασκευής που ισοδυναμούν με μικρότερες ή μεγαλύτερες απλοποιήσεις

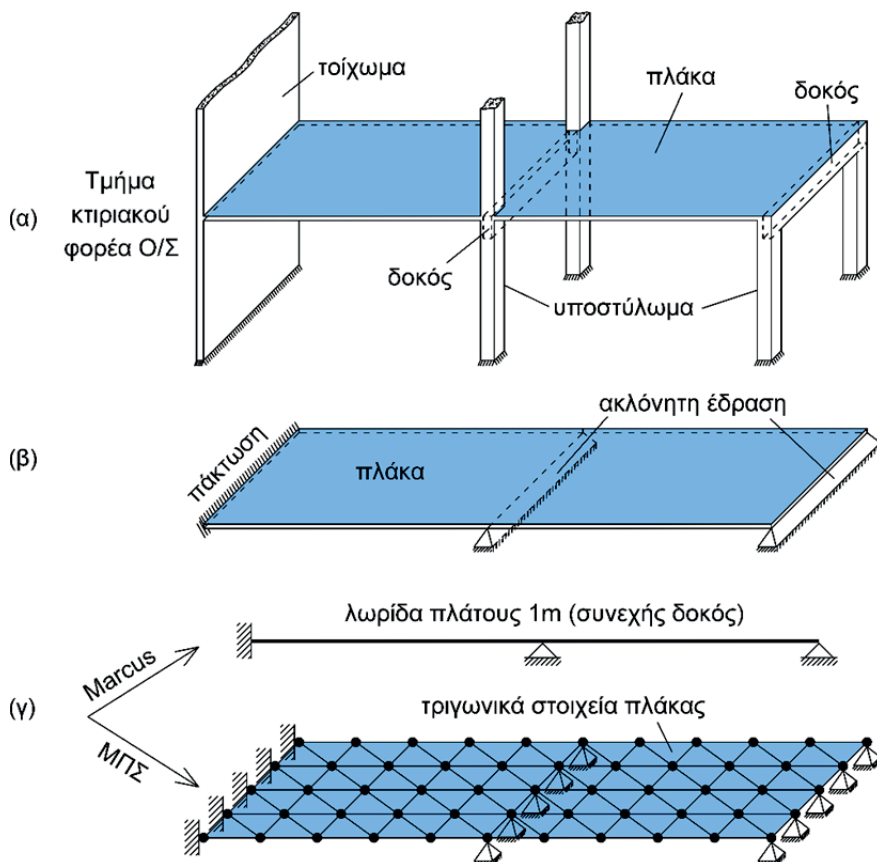
- (α) των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κατασκευής (ανωδομής, θεμελίωσης) και των μηχανικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών από τα οποία κατασκευάζεται ο φέρων οργανισμός της (προσομοίωμα φέροντα οργανισμού ή *στατικό σύστημα* ή *στατικός φορέας*),
- (β) των ιδιοτήτων του εδάφους πάνω στο οποίο θεμελιώνεται η κατασκευή (εδαφικό προσομοίωμα) και
- (γ) των χαρακτηριστικών των διαφόρων φορτίσεων στις οποίες αναμένεται να υποβληθεί η κατασκευή (φορτιστικό προσομοίωμα).

Το μηχανικό αυτό προσομοίωμα του όλου δομικού συστήματος (βλ. Σχ. 4.4.1-1, δεξιά) επιλύεται στη συνέχεια είτε με ακριβείς, αναλυτικές μεθόδους (σπανίως) είτε με προσεγγιστικές υπολογιστικές μεθόδους (σχεδόν πάντα στην πράξη), όπως η Μέθοδος

των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ). Στη δεύτερη περίπτωση υπεισέρχεται επομένως και μία ακόμη σειρά απλουστεύσεων και παραδοχών που αφορούν στις ίδιες τις μεθόδους υπολογισμού, οπότε μπορεί να μιλήσει κανείς για το *υπολογιστικό προσομοίωμα* της κατασκευής προς διάκριση από το μηχανικό.

Έστω, π.χ., ότι απαιτείται ο υπολογισμός της πλάκας στο τμήμα ενός κτιριακού φορέα που φαίνεται στο σχήμα 4.4.2-1(α). Ως μηχανικό προσομοίωμα της πλάκας μπορεί να θεωρηθεί η πλάκα αποσπασμένη από τον υπόλοιπο κτιριακό φορέα και εδραζόμενη επί ακλόνητων στηρίξεων (πάκτωση αριστερά και απλή στήριξη στις θέσεις των δοκών, Σχ. 4.4.2-1(β)). Προφανώς, η αγνόηση της παραμορφωσιμότητας των δοκών επί των οποίων εδράζεται η πλάκα, αποτελεί μία απλοποιητική παραδοχή του μηχανικού μοντέλου.

Η επίλυση μιας τέτοιας ακλόνητα εδραζόμενης πλάκας μπορεί να γίνει, π.χ., με τη μέθοδο των λωρίδων κατά Marcus (που συνίσταται στην επίλυση μιας συνεχούς



Σχ. 4.4.2-1 Τμήμα πραγματικής κατασκευής (α), απλοποιημένο μηχανικό προσομοίωμα της πλάκας (β) και δύο πιθανά υπολογιστικά προσομοιώματα της πλάκας (γ)

δοκού) ή, αν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, με τη ΜΠΣ, χρησιμοποιώντας επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία πλάκας. Επομένως, το υπολογιστικό προσομοίωμα είναι διαφορετικό για τις δύο αυτές περιπτώσεις επίλυσης, παρόλο που αυτές αναφέρονται στο ίδιο μηχανικό προσομοίωμα. Είναι δε σαφές ότι η επιλογή του υπολογιστικού προσομοιώματος θα επηρεάσει την ποιότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, το κατά πόσο δηλαδή αυτά αποδίδουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής.

Σημειώνεται ότι συνήθως στην πράξη δεν γίνεται διάκριση μεταξύ μηχανικού και υπολογιστικού μοντέλου και με τον όρο *υπολογιστικό προσομοίωμα* ή και μόνο *προσομοίωμα* νοούνται κατά συγχώνευση και τα δύο μαζι². Διότι, αν και η διάκριση αυτή οφείλει να παραμένει συνειδητή στον μελετητή, εκείνο που ενδιαφέρει τελικά είναι το μοντέλο που εισάγεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, δηλαδή το υπολογιστικό μοντέλο, από την ποιότητα του οποίου εξαρτάται και η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

Επίσης, σημειώνεται ότι αντί του όρου *μηχανικό μοντέλο* χρησιμοποιείται συχνά και ο όρος *στατικό μοντέλο*, ακόμη και σε περιπτώσεις που η φόρτιση δεν είναι μόνον στατική. Ορθότερο είναι πάντως να γίνεται διάκριση μεταξύ στατικού και *δυναμικού μοντέλου* μιας κατασκευής. Διότι, ενώ στο στατικό μοντέλο οι διάφορες μοντελοποιήσεις αφορούν στα γεωμετρικά και ελαστικά χαρακτηριστικά (αποστάσεις, ιδιότητες διατομών κτλ.), στο δυναμικό μοντέλο συμπεριλαμβάνεται επιπλέον και η *προσομοίωση των μαζών*, καθώς και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής (π.χ. αποσβέσεις). Οφείλει επομένως να γίνει διάκριση μεταξύ της *ελαστικής* και της *αδρανειακής* προσομοίωσης μιας κατασκευής. Σπανιότερα συναντάται και ο -μάλλον παρεξηγήσιμος- όρος *μαθηματικό μοντέλο*.

4.4.3 Ανάλυση παραλλαγών του προσομοιώματος, στατικό αισθητήριο και η αρχή της αρμονικής ακρίβειας

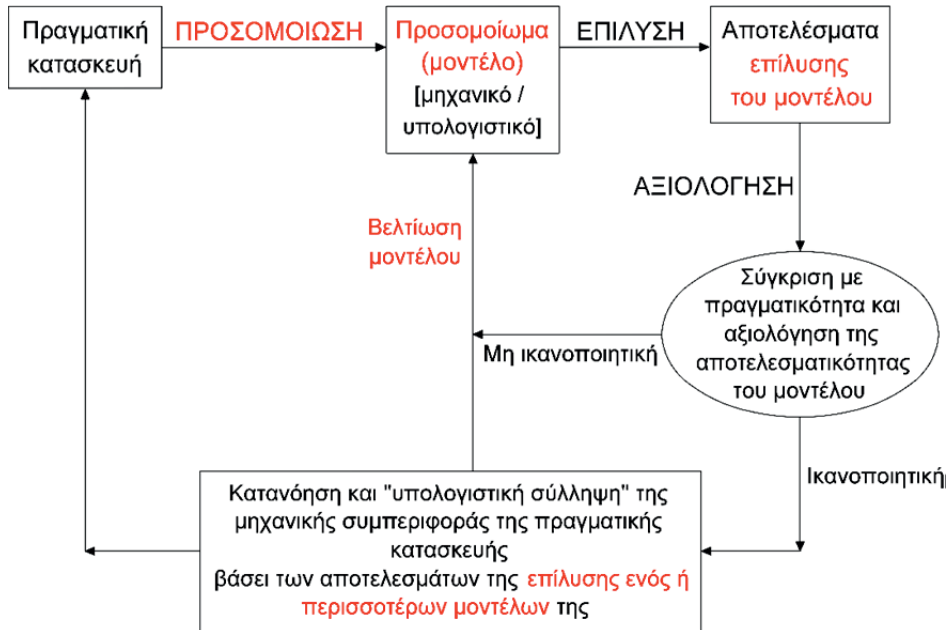
Είναι πρόδηλο ότι μόνο μέσα από μία ώριμη επιλογή προσομοιωμάτων θα προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα, δηλαδή αποτελέσματα που θα αποδίδουν με επαρκή για την εκάστοτε περίπτωση ακρίβεια τη μηχανική συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής.

Είναι επίσης αυτονόητο ότι μια πραγματική κατασκευή δεν μπορεί να αποδοθεί μονοσήμαντα από ένα και μόνο στατικό μοντέλο. Ακόμη και μέσα στα στενά όρια της γραμμικής ελαστικής θεωρίας, η εξιδανίκευση του φορέα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ως εκ τούτου, οποιοδήποτε προσομοίωμα είναι πάντοτε επιδεκτικό βελτιώσεων, οι οποίες θα προέλθουν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προηγηθείσας επίλυσης (Σχ. 4.4.3-1).

Με αυτό το δεδομένο, ο μελετητής θα πρέπει να επιδιώξει εξ αρχής τη διερεύνηση περισσότερων παραλλαγών του αρχικού προσομοιώματος της υπό μελέτη δεδομένης κατασκευής και να μην περιοριστεί στην ανάλυση ενός και μόνου μοντέλου, όσο "ακριβές" και αν υποτίθεται ότι είναι αυτό. Οι παραλλαγές μπορεί να αναφέρονται τόσο

² Αβραμίδης Ι., *Υπολογιστικά Προσομοιώματα στην Έρευνα και στην Πράξη*, 15^ο Ελλ Συνέδρ. Σκυροδ., Γενική Εισήγηση, τόμ. Α, σελ. 41-61, Αλεξανδρούπολη, Οκτ. 2006.

σε γενικά προβλήματα μοντελοποίησης (π.χ. προσομοίωση πυρήνων με χρήση ισοδύναμων πλαισίων ή επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, § 4.10), όσο και σε επί μέρους παράγοντες και στην ποσοτική τους εκτίμηση (π.χ. επιρροή διαφορετικού βαθμού ελαστικής πάκτωσης τοιχωμάτων στο έδαφος).



Σχ. 4.4.3-1 Ο κύκλος της ανάλυσης: Προσομοίωση-Επίλυση-Αξιολόγηση

Γενικά, υπολογισμοί σύνθετων κατασκευών που γίνονται με ένα και μοναδικό στατικό μοντέλο, όσο "ακριβείς" και αν είναι, εμπεριέχουν την πιθανότητα αστοχιών. Γι' αυτό, η δύναμη και η ταχύτητα των σύγχρονων Η/Υ θα πρέπει να αξιοποιηθούν όχι τόσο για την επίτευξη "ακριβών" λύσεων, όσο για την πληρέστερη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς διαφόρων παραλλαγών του βασικού μοντέλου του φέροντα οργανισμού. Μια τέτοια τακτική μελέτης συμβάλλει και στην τόνωση του "στατικού αισθητηρίου" του μηχανικού, που εξαιτίας της ευρείας χρήσης του Η/Υ ως black box έχει την τάση να εξασθενεί. Η στατική αυτή διαίσθηση, η ικανότητα δηλαδή ποιοτικής παρακολούθησης των φαινομένων (παραμορφώσεις, ροή δυνάμεων, συγκεντρώσεις τάσεων, κ.ά.) αποτελεί, ιδιαίτερα σήμερα, καθοριστικό παράγοντα για την εκπόνηση ώριμων μελετών και την υλοποίηση καλοσταθμισμένων κατασκευών.

Η ανάλυση περισσότερων παραλλαγών του αρχικού μοντέλου παίρνει τη μορφή απαίτησης όταν πρόκειται για "ευαίσθητους" φορείς, στους οποίους μικρές μεταβολές γεωμετρικών ή φορτιστικών δεδομένων μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες μεταβολές των εντασιακών μεγεθών. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση κτιρίων με ελαστικώς επί του εδάφους εδραζόμενα πέδιλα ή/και πεδιλοδοκούς. Λόγω του σχετικά ευρέως φάσματος διακύμανσης του δείκτη εδάφους c και της έντονης

εξάρτησης από αυτόν των μεγεθών έντασης/παραμόρφωσης, επιβάλλεται η ανάλυση του μοντέλου για δύο ή και περισσότερες τιμές του c (βλ. § 4.12.3).

Πάντως, σε κάθε περίπτωση, η προσομοίωση και οι ακόλουθες επιλύσεις θα πρέπει να διέπονται από την αρχή της αρμονικής ακρίβειας, η οποία επιβάλλει την προσαρμογή των δυνατοτήτων του μοντέλου στις απαιτήσεις του εκάστοτε προς επίλυση προβλήματος: Δεν έχει νόημα, π.χ., να κάνουμε χονδροειδείς απλοποιήσεις σχετικά με το μηχανικό προσομοίωμα και στη συνέχεια να το επιλύουμε με τις πλέον ακριβείς μεθόδους υπολογισμού ("αναρμονική" ακρίβεια!).

Οι παραπάνω σκέψεις προδιαγράφουν για τα επαγγελματικά προγράμματα ανάλυσης κατασκευών ορισμένες πρόσθετες βασικές απαιτήσεις προς εξασφάλιση μιας *ευέλικτης και φιλικής επιφάνειας χρήσης* του προγράμματος: Το πρόγραμμα πρέπει να δίνει στον χρήστη πλήρεις δυνατότητες εύκολης τροποποίησης των δεδομένων και άμεσης επανεπίλυσης του φορέα. Πρέπει δηλαδή να επιτρέπει με ευχέρεια τη διαδικασία 'τι αλλάζει αν', μέχρις ότου επιτευχθεί η εκάστοτε βέλτιστη λύση. Προς τούτο, το πρόγραμμα πρέπει να διαθέτει επαρκώς ισχυρούς προεπεξεργαστές δεδομένων και μετεπεξεργαστές αποτελεσμάτων με ικανοποιητικές δυνατότητες γραφικών απεικονίσεων στατικών και δυναμικών μεγεθών έντασης και παραμόρφωσης.

4.5 Γενικά περί προσομοίωσης κτιρίων Ο/Σ

4.5.1 Η προσομοίωση κατά την ανάλυση του φ/ο

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην § 4.4.2, το υπολογιστικό προσομοίωμα μιας κτιριακής κατασκευής περιέχει απλοποιήσεις και εξιδανικεύσεις που αφορούν

- (Α) στις φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή (φορτιστικό προσομοίωμα),
- (Β) στο έδαφος θεμελίωσης (εδάφικό προσομοίωμα) και
- (Γ) στα δομικά στοιχεία του φ/ο της κατασκευής (προσομοίωμα φορέα ανωδομής και θεμελίωσης).

A. Το φορτιστικό προσομοίωμα

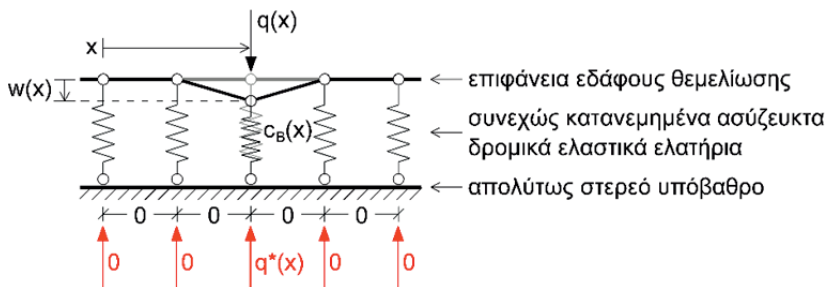
Ιδιαίτερα μεγάλη προσοχή κατά την εκπόνηση μιας δομοστατικής μελέτης πρέπει να δίνεται στην πρόβλεψη και στον καθορισμό όλων των φορτίων (οριζόντιων και κατακόρυφων στατικών, σεισμικών και αμιγώς δυναμικών) και όλων των καταναγκασμών (συστολές ξήρανσης, θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, κ.ά.) που δρουν ή μπορεί να δράσουν πάνω στην κατασκευή, τόσο κατά τη φάση ανέγερσης, όσο και καθ' όλη τη μετέπειτα χρήση της.

Το φορτιστικό προσομοίωμα (ή μοντέλο φόρτισης) για κατασκευές Ο/Σ περιγράφεται με ικανοποιητική πληρότητα στους σχετικούς Δομικούς Κανονισμούς και ο καθορισμός του εκ μέρους του μελετητή για μια συγκεκριμένη κατασκευή δεν παρουσιάζει, γενικώς, ιδιαίτερα προβλήματα. Παρ' όλα αυτά, υπενθυμίζεται ότι όπως για την προσομοίωση της ίδιας της κατασκευής, έτσι και για τις διάφορες εξιδανικεύσεις και απλοποιήσεις των φορτίσεων που ενεργούν επάνω της ισχύει η αρχή της αρμονικής ακρίβειας (βλ. § 4.4.3). Έτσι, π.χ., ένας υπερβολικά σχολαστικός και λεπτομερής καθορισμός του

φορτιστικού προσομοιώματος έχει νόημα μόνο όταν και το προσομοίωμα της κατασκευής είναι αντίστοιχα λεπτομερές.

B. Το εδαφικό προσομοίωμα

Εάν το έδαφος πάνω στο οποίο θεμελιώνεται μια κατασκευή είναι βραχώδες, οι στηρίξεις του φ/ο (π.χ. τα πέδιλα των υποστυλωμάτων του) μπορούν να θεωρηθούν ως *ακλόνητες*. Σε πολλές όμως περιπτώσεις της δομικής πράξης το έδαφος είναι *ενδόσιμο* και συνεπώς οι στηρίξεις του φ/ο υφίστανται μετακινήσεις, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης και από τις αναπτυσσόμενες αντιδράσεις στήριξης. Σε συμβατικές κατασκευές η ενδοσιμότητα του εδάφους προσομοιώνεται συνήθως με βάση το μοντέλο Winkler (Σχ. 4.5.1-1). Σύμφωνα με αυτό, το ενδόσιμο έδαφος προσομοιώνεται με μεμονωμένα και ανεξάρτητα μεταξύ τους (ασύζευκτα) ελαστικά ελατήρια, τα οποία συνδέουν τα δομικά στοιχεία θεμελίωσης (πέδιλα, πεδιλοδοκούς, πλάκες κοιτόστρωσης) με το στερεό υπόβαθρο. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργείται ένα *ενιαίο προσομοίωμα κτιρίου-εδάφους*, το οποίο υποβάλλεται στις προβλεπόμενες από τους κανονισμούς φορτίσεις. Περισσότερες λεπτομέρειες θα παρουσιαστούν στις § 4.12 και 4.13.



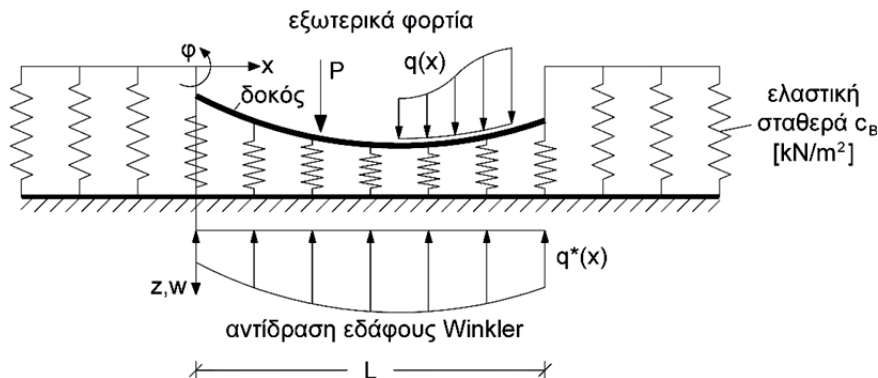
Παραδοχή Winkler: $q^*(x) = c_B(x) \cdot w(x)$

όπου: $q^*(x)$ = φορτίο επί του εδάφους θεμελίωσης στο σημείο x
 = αντίδραση του εδάφους θεμελίωσης στο σημείο x [kN/m]

$c_B(x)$ = ελατηριακή σταθερά Winkler [kN/m²]
 (Προκύπτει από εδαφοτεχνική μελέτη σε συνδυασμό με το γεωμετρικό σχήμα του εδραζόμενου πέλματος του στοιχείου θεμελίωσης, βλ. § 4.12-Γ)
 $w(x)$ = υποχώρηση (βύθιση) του εδάφους στο σημείο x [m]

Σχ. 4.5.1-1 Απλουστευμένη προσομοίωση ενδόσιμου εδάφους ("μοντέλο Winkler")

Είναι σαφές ότι στην προσομοίωση του εδάφους κατά Winkler η βύθιση $w(x)$ σε κάθε σημείο x του εδάφους θεωρείται ως ευθέως ανάλογη του φορτίου $q^*(x)$ που ασκείται στο σημείο αυτό: όπου δεν υπάρχει πίεση, δεν υπάρχει βύθιση. Ή αντιστρόφως: η αντίδραση $q^*(x)$ του εδάφους επί της δοκού που εδράζεται επ' αυτού είναι ευθέως ανάλογη της βύθισης $w(x)$ της δοκού σε κάθε σημείο της x (Σχ. 4.5.1-2).



Σχ. 4.5.1-2 Δοκός ελαστικά εδραζόμενη σε έδαφος Winkler ($q^*(x) = c_B(x) \cdot w(x)$)

Γ. Το προσομοίωμα του ϕ/θ (ανωδομής και θεμελίωσης)

Οι διάφορες εξιδανικεύσεις και απλοποιήσεις κατά την προσομοίωση του ϕ/θ αφορούν

- στην υλική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων και στη συνδεσμολογία τους (π.χ. ελαστικός ή ανελαστικός νόμος υλικού, αρθρωτές / άκαμπτες / ημιάκαμπτες συνδέσεις, απολύτως στερεά διαφράγματα, ακλόνητες ή ενδόσιμες στηρίξεις, κ.ά.),
- στα γεωμετρικά μεγέθη (π.χ. ροπές αδράνειας πλακοδοκών, επίπεδων τοιχωμάτων ανωδομής/υπογείου και πυρήνων, μήκη στερεών κόμβων, κ.ά.),
- στην κατανομή της μάζας της κατασκευής (π.χ. συγκέντρωσή της στο κέντρο βάρους των ορόφων ή σε ορισμένους κόμβους, κ.ά.),
- και σε μια σειρά άλλων παραγόντων.

Για την προσομοίωση του ϕ/θ κτιρίων οι Κανονισμοί δίνουν μόνον ορισμένες γενικές οδηγίες, αφήνοντας τη συγκεκριμενοποίηση των προσομοιωμάτων στην κρίση του μελετητή (π.χ. προσομοίωση επίπεδων τοιχωμάτων και πυρήνων με διάφορα "ισοδύναμα" πλαίσιακά μοντέλα ή με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία).

Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον Ευρωκώδικά 8, αλλά και με όλους τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, κατά την ανάλυση ενός φορέα πρέπει να απομειωθεί καταλλήλως η στιβαρότητα των δομικών του στοιχείων (Σημ.: Υπενθυμίζεται ότι ο όρος στιβαρότητα περιλαμβάνει τη δυσκαμψία EI , τη δυστημσία GA_s , τη δυστένεια EA και τη δυστρέψια GI_T), προκειμένου να ληφθεί υπόψη -έστω χονδρικά- η ανελαστική συμπεριφορά τους κατά τον σεισμό σχεδιασμού. Π.χ., ο Ευρωκώδικας 8 προβλέπει απομείωση της δυσκαμψίας και της δυστημσίας των καμπτόμενων δομικών στοιχείων κατά 50%. Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σοβαρό, δεδομένου ότι οι όποιες απομειώσεις των στιβαροτήτων ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για εμβάθυνση στον σχετικό προβληματισμό, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης θα πρέπει να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία.

Στον ακόλουθο πίνακα 4.5.1-1 παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα βασικά θέματα που ανακύπτουν κατά την ελαστική προσομοίωση κτιριακών κατασκευών. Στα θέματα αυτά θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στις § 4.7 έως 4.14.

Πίνακας 4.5.1-1 Αντικείμενα ελαστικής προσομοίωσης σε κτιριακές κατασκευές (ενδεικτικά)

α.	Προσομοίωση της πλήρους ή μερικής διαφραγματικής λειτουργίας των πλακών	(1) Ατενείς πλάκες → πλήρης διαφραγματική λειτουργία (2) Παραμορφώσιμες εντός του επιπέδου τους πλάκες (3) Κεκλιμένες ατενείς πλάκες
β.	Προσομοίωση πλαισίων	(1) Χωρίς απολύτως στερεούς κόμβους (2) Με απολύτως στερεούς κόμβους
γ.	Προσομοίωση επίπεδων τοιχωμάτων ανωδομής	(1) Με τη βοήθεια του "ισοδύναμου πλαισιακού μοντέλου" (2) Με τη βοήθεια άλλων ισοδύναμων γραμμικών μοντέλων (3) Με τη βοήθεια επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων
δ.	Προσομοίωση περιμετρικών τοιχωμάτων υπογείου	
ε.	Προσομοίωση σύνθετων τοιχωμάτων του χώρου (πυρήνων)	
στ.	Προσομοίωση δομικών στοιχείων θεμελίωσης σε ενδόσιμο έδαφος	(1) Με σημειακά ελατήρια Winkler (2) Με δοκούς/πλάκες επί συνεχούς ελαστικής έδρασης (3) Με επιφανειακά ή τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

4.5.2 Η προσομοίωση κατά τη διαστασιολόγηση του ϕ/σ

Οι εξιδανικεύσεις και απλοποιήσεις δεν περιορίζονται όμως μόνον στην ανάλυση της κατασκευής. Εφόσον τα αποτελέσματα της (κατά κανόνα ελαστικής) ανάλυσης αξιολογηθούν κατ' αρχάς ως ικανοποιητικά (βλ. Σχ. 2-1, [Στάδια 1](#) και [2](#)), η μελέτη εισέρχεται στο στάδιο της διαστασιολόγησης (Στάδιο 3), το οποίο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού των στοιχείων Ο/Σ, τη διενέργεια των λοιπών ελέγχων που επιβάλλουν οι Κανονισμοί, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους και την ενδεχόμενη τροποποίηση του αρχικού φορέα (αλλαγές των διαστάσεων επί μέρους διατομών ή επανασχεδιασμός του φέροντα οργανισμού). Είναι σαφές ότι στις διαδικασίες διαστασιολόγησης εμπεριέχεται μεγάλο πλήθος εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών: από τους μη γραμμικούς (ανελαστικούς) νόμους τάσεων παραμορφώσεων για σκυρόδεμα και χάλυβα, έως το συνολικό σκεπτικό της ασφάλειας της κατασκευής έναντι οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας και αστοχίας. Συνεπώς, είναι εύλογη η αναφορά σε προσομοιώσεις που αφορούν στη μεθοδολογία της διαστασιολόγησης των δομικών στοιχείων, οι οποίες μάλιστα ενδέχεται να είναι τυπικά ασύμβατες με παραδοχές της προηγηθείσας ανάλυσης (π.χ., θεώρηση Ο/Σ ως ελαστικού υλικού κατά την ανάλυση και ως μη ελαστικού κατά τη διαστασιολόγηση).

4.5.3 Το συνολικό υπολογιστικό προσομοίωμα της κατασκευής

Το υπολογιστικό προσομοίωμα της κατασκευής μαζί με το σύνολο των εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών που αφορούν στη διαστασιολόγηση αποτελεί το συνολικό προσομοίωμα της κατασκευής. Κάθε στοιχείο του συνολικού προσομοιώματος είναι από μόνο του ένα επί μέρους μοντέλο της πραγματικότητας είτε πρόκειται για τις παραδοχές φόρτισης (π.χ. ο σεισμός μπορεί να προσομοιώνεται μέσω οριζόντιων στατικών φορτίων) είτε για τη χρησιμοποίηση του ελαστικού νόμου του Hooke (όπου το ανομοιογενές, ανισότροπο και ελαστοπλαστικό οπλισμένο σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως ομογενές, ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό υλικό) είτε για τα κριτήρια αντοχής/θραύσης μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος.

4.6 Η συνήθης πρακτική κατά την προσομοίωση κτιρίων Ο/Σ

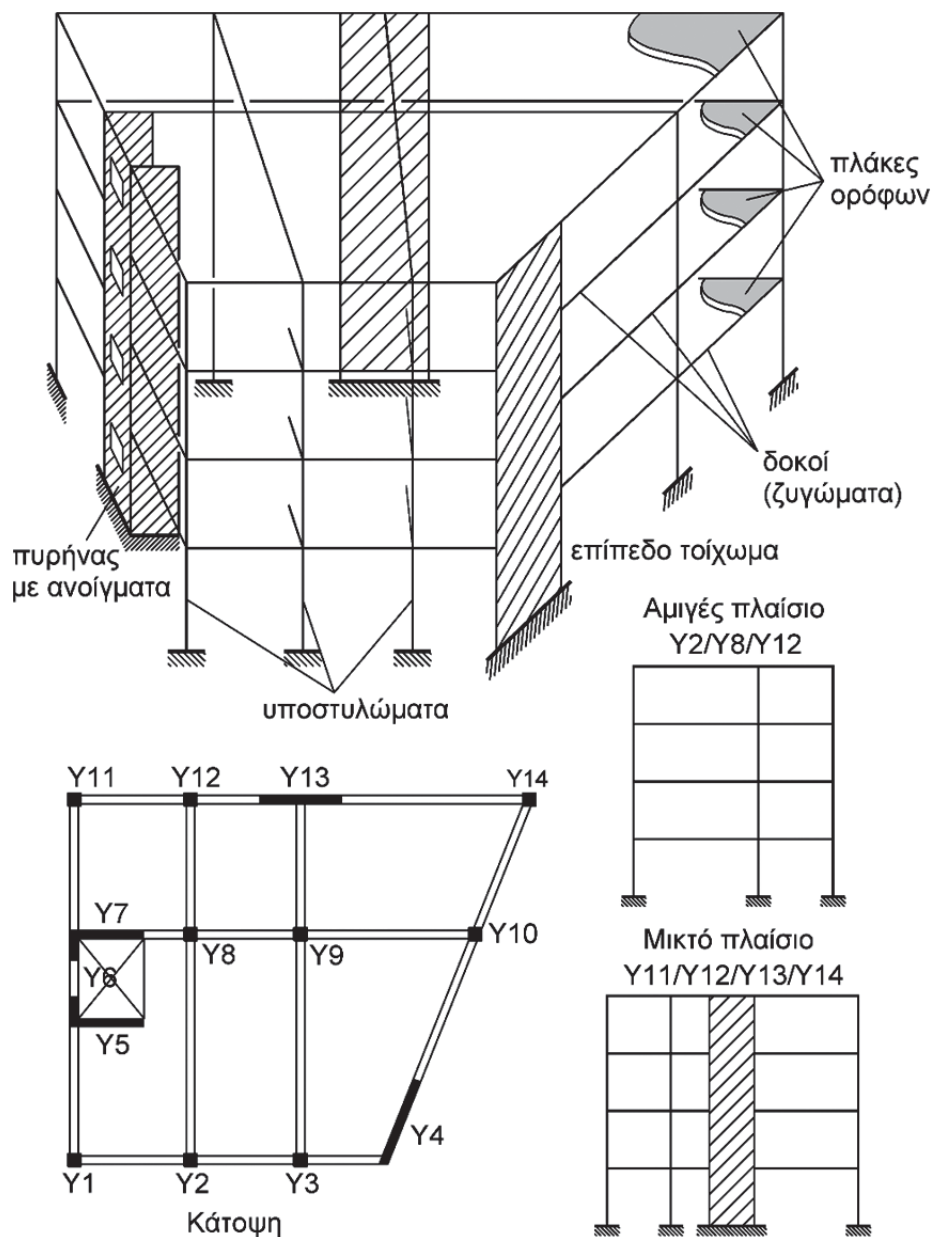
4.6.1 Βασικά δομικά στοιχεία και υποφορείς πολυωρόφων κτιρίων Ο/Σ

Η ανωδομή των σύγχρονων κτιριακών κατασκευών Ο/Σ συμπεριλαμβάνει τα εξής βασικά δομικά στοιχεία για την παραλαβή και μεταφορά στο έδαφος θεμελίωσης των κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων (Σχ. 4.6.1-1 και Σχ. 4.6.1-2):

- *πλάκες* στις στάθμες των ορόφων (οριζόντιες, με ή χωρίς οπές, ενδεχομένως κεκλιμένες ως οροφή του τελευταίου ορόφου),
- *υποστυλώματα* (στύλους) και *δοκούς*, δηλαδή κατακόρυφα, οριζόντια ή κεκλιμένα γραμμικά δομικά στοιχεία,
- *επίπεδα τοιχώματα*, δηλαδή κατακόρυφα επιφανειακά δομικά στοιχεία διατομής $L \times t$ (όπου $L > 4t$) με κυρίως καμπτική μηχανική συμπεριφορά (καμπτικού τύπου τοιχώματα, ψιλόλιγνα τοιχώματα με λόγο ύψους προς μήκος $H/L > 4$, Σχ. 4.6.1-2(2α)) ή με κυρίως διατμητική συμπεριφορά (διατμητικού τύπου τοιχώματα, χθαμαλά τοιχώματα με λόγο ύψους προς μήκος $H/L < 2$, Σχ. 4.6.1-2(2β)),
- *πυρήνες*, δηλαδή κατακόρυφα σύνθετα τοιχώματα του χώρου, αποτελούμενα από 2, 3 ή και περισσότερα επίπεδα τοιχώματα σε χωρική διάταξη (Σχ. 4.6.1-2(4α) και (4β)),
- *κεκλιμένες δοκούς/πλάκες των κλιμακοστασίων*, εάν αυτά δεν περιβάλλονται από τα τοιχώματα του πυρήνα.

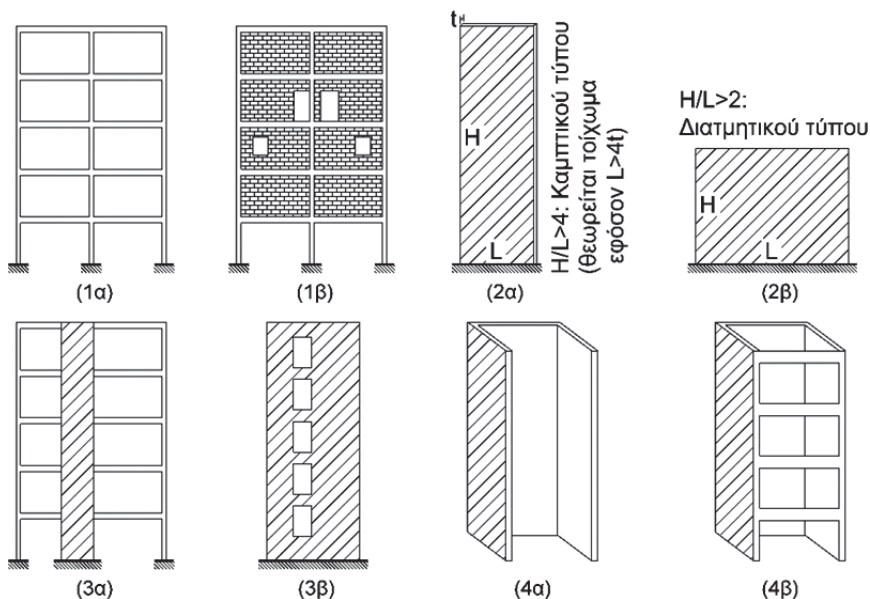
Σημειώνεται ότι οι *τοιχοπληρώσεις* (τοιχοποιίες) δεν θεωρούνται, γενικώς, ως φέροντα στοιχεία λόγω της σχετικά μικρής αντοχής τους σε σχέση με τα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς και για μία σειρά επιπλέον λόγων που έχουν να κάνουν με την έλλειψη τυποποίησης της παραγωγής τους και της επί τόπου δόμησής τους.

Τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία της ανωδομής, δηλαδή τα υποστυλώματα, τα επίπεδα τοιχώματα και οι πυρήνες, εδράζονται κατά κανόνα μονολιτικά επί πεδίων, πεδילוδοκών, εσχάρων πεδילוδοκών ή γενικών κοιτοστρώσεων που αποτελούν τον *φορέα θεμελίωσης* (Δεν απεικονίζονται στο Σχ. 4.6.1-1). Στην προσομοίωση των δομικών στοιχείων του φορέα θεμελίωσης και της ενδοσιμότητας του εδάφους θα γίνει αναφορά στις § 4.12 και 4.13.



Σχ. 4.6.1-1 Βασικά δομικά στοιχεία και υποφορείς πολυωρόφων κτιρίων Ο/Σ

Από την κατά κανόνα μονολιθική σύζευξη των υποστυλωμάτων με τις δοκούς σχηματίζονται, ως υποφορείς, τα *αμιγή πλαίσια*, που μπορεί να είναι επίπεδα ή χωρικά (βλ. Σχ. 4.6.1-2 (1α), (1β) και Σχ. 4.6.1-3).



Σχ. 4.6.1-2 Χαρακτηριστικοί υποφορείς της ανωδομής πολυώρων κτιρίων Ο/Σ (1α και 1β: αμιγή πλαίσια χωρίς και με τοιχοπλήρώσεις, 2α και 2β: επίπεδα τοιχώματα καμπικού και διατμητικού τύπου, 3α: μικτό πλαίσιο, 3β: επίπεδο τοίχωμα με οπές ή δύο συνδεδεμένα τοιχώματα μέσω δοκών σύζευξης, 4α: ανοικτός πυρήνας, 4β: ημιανοικτός πυρήνας με δοκούς αυτοσύζευξης)



Σχ. 4.6.1-3 Επίπεδο αμιγές πλαίσιο ως υποφορέας μιας χωρικής μικτής κατασκευής πλαισίων-τοιχωμάτων που φέρουν πλάκες στις στάθμες των ορόφων

Επίσης, από τη μέσω των δοκών σύζευξη των υποστυλωμάτων με τοιχώματα ή/και με πυρήνες σχηματίζονται υποφορείς που χαρακτηρίζονται ως *μικτά πλαίσια* ή *διπλά συστήματα* (βλ. Σχ. 4.6.1-2 (3α) και Σχ. 4.6.1-4).



(α)



(β)

Σχ. 4.6.1-4 Επίπεδα μικτά πλαίσια ως υποφορείς μιας χωρικής μικτής κατασκευής πλαισίων-τοιχωμάτων που φέρουν πλάκες στις στάθμες των ορόφων

Αμιγή και μικτά πλαίσια ενδέχεται να έχουν τοιχοπληρώσεις με ή χωρίς ανοίγματα για θύρες και παράθυρα (Σχ. 4.6.1-2 (1β)). Ανοίγματα μπορεί να έχουν και τα επίπεδα τοιχώματα (Σχ. 4.6.1-2 (3β) και Σχ. 4.6.1-4(β)) όπως και οι πυρήνες (Σχ. 4.6.1-5), οι οποίοι συνήθως περιέχουν το κλιμακοστάσιο του κτιρίου και το φρεάτιο του ανελκυστήρα.



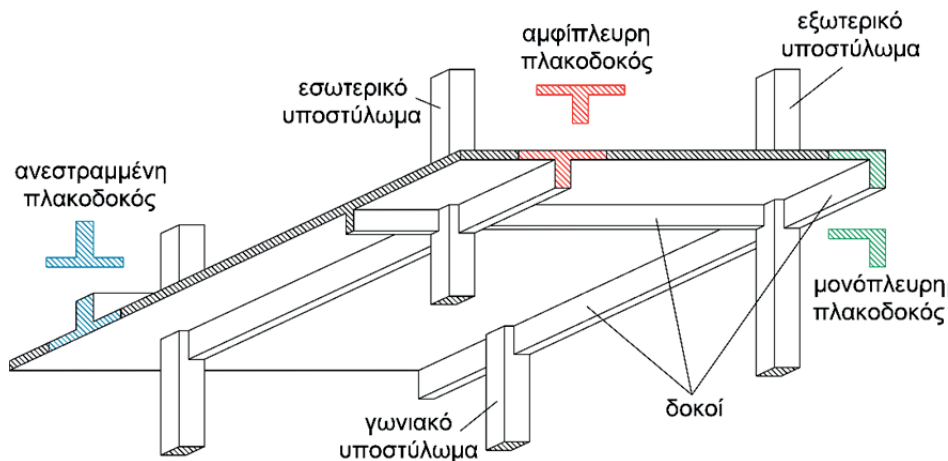
(α)



(β)

Σχ. 4.6.1-5 Πυρήνας χωρίς ανοίγματα (α) και πυρήνας με ανοίγματα (β)

Σημειώνεται ότι εφόσον οι πλάκες εδράζονται επί των δοκών και είναι μονολιθικά συνδεδεμένες με αυτές, η διατομή των ζυγμάτων των αμιγών ή μικτών πλαισίων είναι διατομή αμφίπλευρης ή μονόπλευρης πλακοδοκού (Σχ. 4.6.1-6). Το "συνεργαζόμενο" με τη δοκό εύρος της πλάκας του ορόφου, δηλαδή πλάτος της πλάκας της πλακοδοκού, το οποίο θα ληφθεί υπόψη κατά την ανάλυση, καθορίζεται από τους Δομικούς Κανονισμούς, αποτελώντας μία από τις παραδοχές (απλοποιήσεις) του μηχανικού προσομοιώματος του κτιρίου.



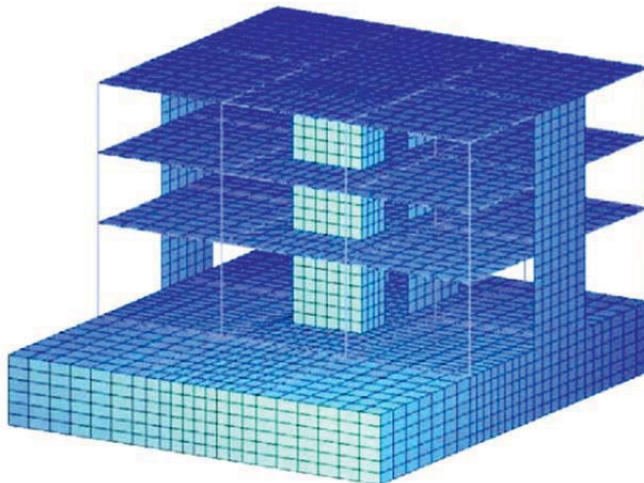
Σχ. 4.6.1-6 Πλάκα ορόφου επί δοκών - Διατομές αμφί- και μονόπλευρης πλακοδοκού

Πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα, επίπεδα τοιχώματα και πυρήνες αποτελούν τα βασικά δομικά συστατικά της ανωδομής, τα οποία μαζί με τα πέδιλα, τις πεδιλοδοκούς και τις πλάκες κοιτόστρωσης του φορέα θεμελίωσης συνθέτουν τον *φέροντα οργανισμό* (φ/ο) μικρών και μεγάλων κτιριακών κατασκευών. Μέσω του φ/ο παραλαμβάνονται και μεταφέρονται στο έδαφος θεμελίωσης όλα τα φορτία, κατακόρυφα και οριζόντια, που ενεργούν επάνω στην κατασκευή.

Σημειώνεται ότι γενικά δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ δομικών στοιχείων που φέρουν τα κατακόρυφα και δομικών στοιχείων που φέρουν τα οριζόντια φορτία. Εντούτοις, συχνά γίνεται αναφορά στο *σύστημα ανάληψης οριζόντιων φορτίων* (λόγω σεισμού και ανεμοπίεσης). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει εκείνο το σύνολο των υποφορέων που είναι κατ' ουσία υπεύθυνο για τη μεταφορά των οριζόντιων φορτίων στο έδαφος θεμελίωσης. Είναι προφανές ότι το σύστημα ανάληψης οριζόντιων φορτίων συνίσταται από πλαίσια, τοιχώματα και πυρήνες, που βέβαια συμμετέχουν ταυτόχρονα και στην παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων.

4.6.2 Η προσομοίωση του φ/ο με γραμμικά μόνο στοιχεία

Από τα προηγουμένως αναφερθέντα γίνεται σαφές ότι ο συνήθης δομικός φορέας της ανωδομής πολυωρόφων κατασκευών συναποτελείται από *γραμμικά στοιχεία* (υποστυλώματα, δοκοί ανωδομής, πεδιλοδοκοί θεμελίωσης), *επιφανειακά στοιχεία* (πλάκες ορόφων, τοιχώματα, πυρήνες, πλάκα γενικής κοιτόστρωσης) και *τρισδιάστατα στοιχεία όγκου* (πέδιλα). Έτσι, το κατ' αρχάς μηχανικό του προσομοίωμα αποτελείται και από τα τρία είδη δομικών στοιχείων, οπότε μια συνεπής εφαρμογή της ΜΠΣ θα απαιτούσε για τη διακριτοποίησή του τη χρησιμοποίηση αντίστοιχων πεπερασμένων στοιχείων: γραμμικά στοιχεία για δοκούς, υποστυλώματα και πεδιλοδοκούς, επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (δίσκου, πλάκας ή κέλυφους, ανάλογα με την περίπτωση) για πλάκες, τοιχώματα και πυρήνες, καθώς και τρισδιάστατα στοιχεία για τα πέδιλα (βλ. Σχ. 3.4.1-3 και Σχ. 4.6.2-1).



Σχ. 4.6.2-1 Διακριτοποίηση κτιρίου και τμήματος του εδάφους θεμελίωσης με γραμμικά, επιφανειακά και τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία¹

Εντούτοις, τα συνήθη (συμβατικά) κτίρια μελετώνται κατά κανόνα στην πράξη με τρόπο που παρακάμπτει την ανάγκη χρήσης επιφανειακών και τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, διότι αυτή

- (1) απαιτεί από τον μελετητή εμπεριστατωμένες γνώσεις της ΜΠΣ στη γενική της μορφή (δηλαδή όχι μόνο για γραμμικά στοιχεία) και μεγάλη εμπειρία στη χρησιμοποίηση σχετικών επαγγελματικών προγραμμάτων,
- (2) προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα κατάλληλων επαγγελματικών προγράμματος που να συνδυάζουν τη χρήση γραμμικών, επιφανειακών και τρισδιάστατων στοιχείων όχι

¹ Werkle H. and Volarevic J., Modelling of dynamic soil-structure-interaction in the three-dimensional finite element analysis of buildings, 2nd Europ. Conf. on Earthq. Eng and Seismology, Istanbul, Aug. 25-29, 2014.

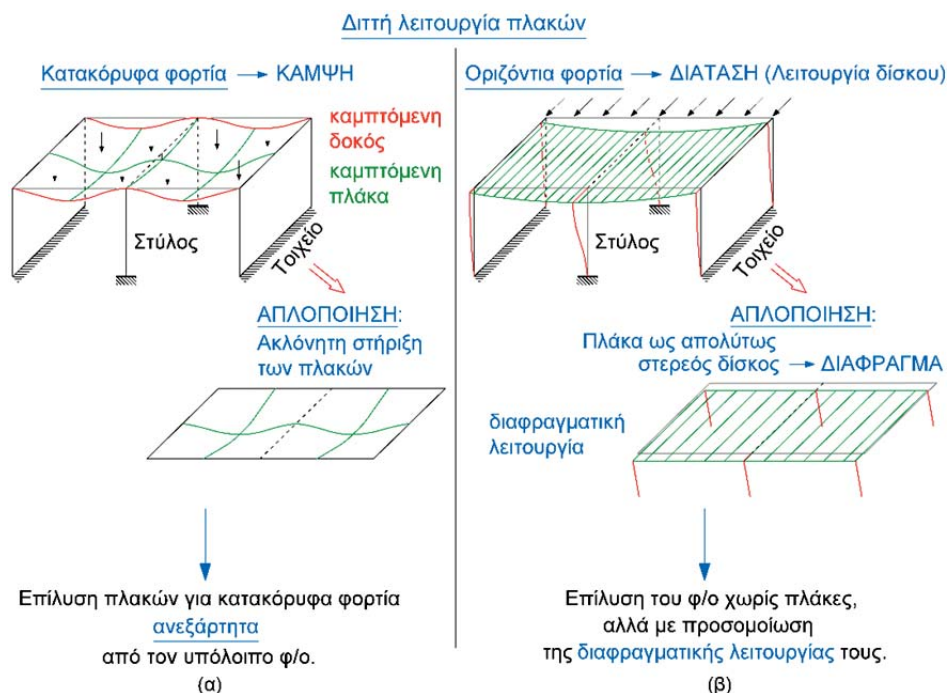
μόνο για στατικές, αλλά και για δυναμικές (σεισμικές) αναλύσεις, και, το κυριότερο ίσως,

- (3) θεωρείται υπερβολική ("αναρμονική ακρίβεια"!) για συνήθεις κατασκευές λόγω της ισχύος μιας μεγάλης σειράς λίγο έως πολύ απλουστευτικών παραδοχών.

Για τους λόγους αυτούς επιδιώκεται η περαιτέρω απλοποίηση του μηχανικού μοντέλου του πολυωρόφου κτιρίου με τέτοιο τρόπο, ώστε τελικώς να προκύψει ένα μηχανικό προσομοίωμα αποτελούμενο αποκλειστικά από γραμμικά στοιχεία (*ισοδύναμο χωρικό πλαίσιο*), το οποίο όμως θα λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη των πλακών στις στάθμες των ορόφων. Προς τούτο γίνεται κατ' αρχάς διαχωρισμός της καμπτικής από τη μεμβρανική λειτουργία των πλακών, όπως περιγράφεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

4.6.3 Η διττή λειτουργία των πλακών στις στάθμες των ορόφων

Κατά κανόνα οι πλάκες στις στάθμες των ορόφων κτιριακών κατασκευών έχουν διττή λειτουργία (Σχ. 4.6.3-1): Αφενός μεταφέρουν μέσω της *καμπτικής* τους μηχανικής συμπεριφοράς όλα τα κατακόρυφα φορτία (μόνιμα και κινητά) στις δοκούς επί των οποίων εδράζονται και αφετέρου, όντας μονολιθικά συνδεδεμένες με τις δοκούς, τα υποστυλώματα, τα τοιχώματα και τους πυρήνες, μεταφέρουν μέσω της *μεμβρανικής* (*διαφραγματικής*) τους μηχανικής συμπεριφοράς όλα τα οριζόντια φορτία (σεισμικά/ αδρανειακά, ανεμοπίεση και άλλα) στο σύστημα ανάληψης οριζόντιων φορτίων.

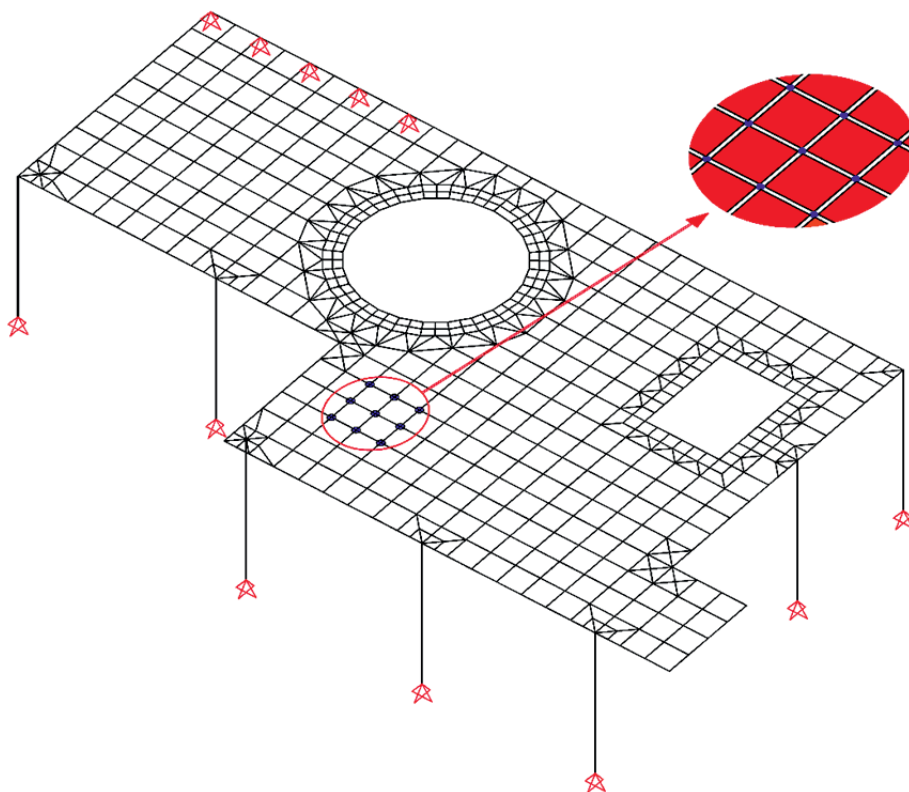


Σχ. 4.6.3-1 Καμπτική (α) και διαφραγματική (β) λειτουργία πλακών σε κτίρια Ο/Σ

4.6.4 Η συνήθης πορεία προσομοίωσης-ανάλυσης συμβατικών κτιρίων

Με βάση τη διάκριση μεταξύ καμπτικής και διαφραγματικής συμπεριφοράς των πλακών, η προσομοίωση και η εν συνεχεία ανάλυση συνήθων, συμβατικών κτιρίων ακολουθεί κατά κανόνα τα εξής βήματα:

- (1) Σε ένα πρώτο βήμα υπολογίζονται, ανεξάρτητα από τον υπόλοιπο φ/ο, οι πλάκες, φορτιζόμενες με τα κατακόρυφά τους φορτία (*καμπτική λειτουργία πλακών*) και θεωρούμενες ως ακλόνητα εδραζόμενες επί των δοκών, των υποστυλωμάτων και των τοιχωμάτων (Σχ. 4.6.3-1(α)). Ο υπολογισμός των πλακών διενεργείται με κατάλληλες μεθόδους της Στατικής των Επιφανειακών Φορέων που αφορούν στην κάμψη πλακών. Συνήθως χρησιμοποιούνται σχετικά απλές προσεγγιστικές μέθοδοι, όπως για παράδειγμα η μέθοδος των λωρίδων κατά Marcus, η μέθοδος Pieper-Martens, κ.ά.. Αν οι πλάκες έχουν πολύπλοκη μορφή με προεξοχές, οπές, κτλ., τότε απαιτείται ενδεχομένως η χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων πλάκας ή κελύφους (Σχ. 4.6.4-1). Από τους υπολογισμούς προκύπτουν -μεταξύ άλλων- και οι αντιδράσεις στήριξης των πλακών επί των δοκών-ζυγωμάτων του φ/ο.



Σχ. 4.6.4-1 Προσομοίωση (διακριτοποίηση) πλάκας πολύπλοκης γεωμετρίας με τη βοήθεια επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

- (2) Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των πλακών για τα κατακόρυφα στατικά φορτία, υπολογίζεται ο "υπόλοιπος" τρισδιάστατος φ/ο έχοντας ως φορτία τις αντιδράσεις των πλακών, καθώς και με όλα τα λοιπά φορτία που οφείλει να φέρει η κατασκευή (π.χ. τα στατικά φορτία τοιχοποιίας που ενεργούν επί των δοκών, τα σεισμικά, αλλά και τυχόν καταναγκασμούς, θερμοκρασιακούς και άλλους). Ο "υπόλοιπος" αυτός φ/ο, που συχνά χαρακτηρίζεται ως *σκελετός του κτιρίου*, συντίθεται από υποστυλώματα, επίπεδα τοιχώματα και πυρήνες που συνδέονται (συζεύγγονται) μεταξύ τους μέσω των δοκών. Οι τελευταίες έχουν κατά κανόνα διατομή μονό- ή αμφίπλευρης πλακοδοκού (Σχ. 4.6.1-6), έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η καμπτική (σε κατακόρυφα επίπεδα) λειτουργία των πλακών. Στη συνέχεια ο σκελετός αυτός του κτιρίου επιλύεται με κάποια από τις επιτρεπόμενες από τους Δομικούς Κανονισμούς μεθόδους ανάλυσης, λαμβάνοντας πλέον υπόψη τις πλάκες μόνο όσον αφορά στην διαφραγματική λειτουργία τους.

Με τον όρο *διαφραγματική λειτουργία* των πλακών των ορόφων εννοούμε συνήθως την *απόλυτη* διαφραγματική λειτουργία, θεωρούμε δηλαδή τις πλάκες ως τελείως अपαραμόρφωτες (ατενείς) μέσα στο επίπεδό τους (Σχ. 4.6.3-1(β)). Εντούτοις, σε αρκετές περιπτώσεις η παραδοχή αυτή παύει να είναι ρεαλιστική, οπότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η εντός επιπέδου παραμορφωσιμότητα του διαφράγματος. Αναφορά στο θέμα αυτό θα γίνει στην § 4.7.3.

- (3) Κατά την επίλυση του 3-διάστατου σκελετού του κτιρίου οι δοκοί/πλακοδοκοί και τα υποστυλώματα θεωρούνται εξ αρχής ως γραμμικά στοιχεία και η προσομοίωσή τους γίνεται με το γνωστό ("κλασικό") γραμμικό πεπερασμένο στοιχείο δοκού-στύλου (βλ. εξ. (2.15.1-4)). Ορισμένες σχετικές λεπτομέρειες θα συζητηθούν στην § 4.8. Αντίθετα, τα επίπεδα τοιχώματα και οι πυρήνες αποτελούν κατ' αρχάς επιφανειακού τύπου δομικούς υποφορείς, οι οποίοι μόνο υπό ορισμένες προϋποθέσεις μπορούν να προσομοιωθούν με τη βοήθεια κατάλληλων γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων. Στις προϋποθέσεις αυτές θα γίνει αναφορά στις § 4.9 και 4.10.

Εφόσον συντρέχουν οι προϋποθέσεις αυτές, τοιχώματα και πυρήνες προσομοιώνονται κάνοντας χρήση της *ισοδύναμης πλαισιακής προσομοίωσης*, οπότε προκύπτει το 3-διάστατο ισοδύναμο πλαισιακό προσομοίωμα του φ/ο της ανωδομής του κτιρίου που αποτελείται μόνο από γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία. Στη συνήθη καθημερινή πρακτική η ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση θεωρείται γενικώς ρεαλιστική και εφαρμόζεται εφόσον τα τοιχώματα και οι πυρήνες είναι καμπτικού τύπου (βλ. Σχ. 4.6.1-2(2α)) και δεν εμφανίζουν έντονες γεωμετρικές ανωμαλίες ή έντονη στρεπτική καταπόνηση. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν υπάρχουν χθαμαλά, διατμητικού τύπου τοιχώματα (βλ. Σχ. 4.6.1-2(2β)) ή τοιχώματα με έντονες γεωμετρικές ανωμαλίες ή πυρήνες με έντονη στρεπτική καταπόνηση, τα δομικά αυτά στοιχεία οφείλουν να προσομοιωθούν ακριβέστερα με τη βοήθεια κατάλληλων επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων επιπέδου κελύφους. Στη γενικότερη αυτή περίπτωση, το 3-διάστατο προσομοίωμα του κτιρίου περιλαμβάνει όχι μόνο γραμμικά, αλλά και επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 4.6.4-2.

[illegible]

2^ο ΜΕΡΟΣ

Αριθμητικά Παραδείγματα

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΣΗΜΕΙΩΣΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Α: 5-ώροφος μικτός φορέας με απλή συμμετρία.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Β: 5-ώροφος μικτός φορέας με στρεπτική ευαισθησία.

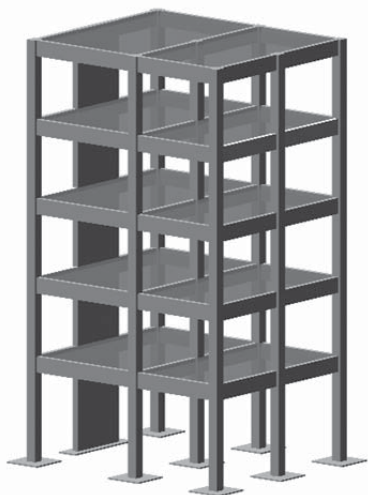
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Γ: 4-ώροφος μικτός φορέας με τοιχώματα, πυρήνα και υπόγειο με περιμετρικά τοιχώματα, εδραζόμενος σε ενδόσιμο έδαφος.

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Στις επόμενες σελίδες θα παρουσιαστούν λεπτομερώς τα εξής τρία παραδείγματα κτιριακών φορέων ο/σ.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Α

5-ώροφος μικτός φορέας
με απλή συμμετρία



Αντισεισμικά **μη** δόκιμος φ/ο

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Β

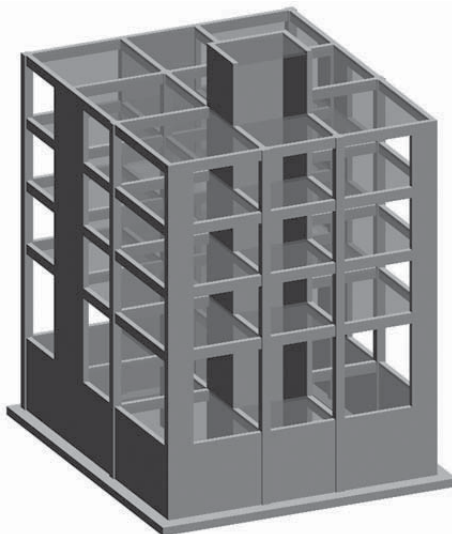
5-ώροφος μικτός φορέας
με στρεπτική ευαισθησία



Αντισεισμικά **μη** δόκιμος φ/ο

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Γ

4-ώροφος μικτός φορέας με τοιχώματα, πυρήνα και
υπόγειο με περιμετρικά τοιχώματα, εδραζόμενος σε ενδόσιμο έδαφος



Αντισεισμικά δόκιμος φ/ο

Τα δύο πρώτα παραδείγματα Α και Β είναι ακαδημαϊκού χαρακτήρα. Αφενός είναι σαφές ότι δεν ικανοποιούνται ορισμένοι στοιχειώδεις κανόνες της αντισεισμικά δόκιμης μόρφωσης του φέροντα οργανισμού (π.χ. η έντονα έκκεντρη τοποθέτηση τοιχωμάτων όπως και η παντελής έλλειψη τοιχωμάτων σε μία διεύθυνση είναι σε κάθε περίπτωση αποφευκτές). Αφετέρου, συγκρινόμενα τα κτίρια αυτά με πραγματικές κατασκευές, είναι ιδιαίτερα απλής μορφολογίας και σχετικά περιορισμένου μεγέθους. Η σκοπιμότητα της επιλογής τους εδώ συνίσταται στα εξής σημεία:

- (α) Η σχετική απλότητά τους επιτρέπει την παράθεση όλων των αρχικών δεδομένων και όλων σχεδόν των βασικών ενδιάμεσων και τελικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις διενεργηθείσες αναλύσεις.
- (β) Καθίσταται έτσι ευκολότερη για τον αναγνώστη η παρακολούθηση και εμπέδωση της πορείας των υπολογισμών και των ελέγχων που επιβάλλει ο ΕΚ8.
- (γ) Επιπλέον, τα απλά αυτά παραδείγματα μπορούν σχετικά εύκολα να επιλυθούν με επαγγελματικά προγράμματα διαφόρων οίκων λογισμικού και να χρησιμεύσουν έτσι για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων αυτών.
- (δ) Τέλος, τα συγκεκριμένα παραδείγματα Α και Β έχουν επιλυθεί παλαιότερα βάσει των διατάξεων του ΕΑΚ-2000¹, οπότε δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των δύο κανονισμών, τόσο ως προς την απαιτούμενη από αυτούς διαδικασία των υπολογισμών και ελέγχων, όσο και ως προς τα προκύπτοντα αριθμητικά αποτελέσματα.

Το πρώτο παράδειγμα Α είναι ένα μονοσυμμετρικό μικτό σύστημα πακτωμένο στη βάση του. Η ασυμμετρία δημιουργείται από το έκκεντρα τοποθετημένο τοίχωμα, το οποίο προσομοιώνεται σύμφωνα με το «μοντέλο του ισοδυνάμου πλαισίου». Το σύστημα επιλύεται τόσο με την απλοποιημένη φασματική μέθοδο (ΑΦΜ) όσο και με τη δυναμική φασματική μέθοδο (ΔΦΜ) ανάλυσης. Καθίστανται έτσι σαφέστερες οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων και αποκτάται μία αίσθηση για τη διαφορετικότητα των αποτελεσμάτων τους.

Το δεύτερο παράδειγμα Β είναι ένα σχεδόν διπλά συμμετρικό (Σημ.: Η ασυμμετρία ως προς τον άξονα Υ είναι μικρή) μικτό σύστημα πακτωμένο στη βάση του. Η ιδιαιτερότητα του παραδείγματος αυτού έγκειται στο γεγονός ότι είναι στρεπτικώς ευαίσθητο, οπότε δίνεται η ευκαιρία εφαρμογής των σχετικών με τη στρεπτική ευαισθησία διατάξεων του ΕΚ8. Η ανάλυση διενεργείται με τη ΔΦΜ.

Για τα παραπάνω δύο ακαδημαϊκού χαρακτήρα παραδείγματα Α και Β η παρουσίαση περιορίζεται μόνο στο σκέλος της ανάλυσης.

¹ Βλ. Παραδείγματα 11 και 14 στο βιβλίο: Αβραμίδης Ι. Ε. κ.ά., «Πρότυπα Αριθμητικά Παραδείγματα Ανάλυσης Κατασκευών - Για την ορθή εφαρμογή του ΕΑΚ και τον έλεγχο των προγραμμάτων Η/Υ», Εκδόσεις Αιβάζη, Θεσσαλονίκη, 2005.

Αντίθετα, για το τρίτο παράδειγμα Γ, το οποίο χωρίς να είναι ιδιαίτερα μεγάλο ή πολύπλοκο αποτελεί μία ρεαλιστική περίπτωση συνήθους κτιρίου με αντισεισμικά δόκιμο φέροντα οργανισμό, δίνονται όχι μόνο τα αποτελέσματα της ανάλυσης (με τη ΔΦΜ), αλλά και αποτελέσματα της διαστασιολόγησης (όπλισης) ορισμένων χαρακτηριστικών δομικών του στοιχείων (δοκός, υποστύλωμα, τοίχωμα). Σημειώνεται

- (α) ότι ο φ/ο του παραδείγματος Γ περιλαμβάνει και έναν πυρήνα διατομής Π, ο οποίος προσομοιώνεται με τρεις ισοδύναμους στύλους σύμφωνα το «μοντέλο του ισοδυνάμου πλαισίου», και
- (β) ότι σε αντίθεση με τους πακτωμένους στη βάση φορείς των δύο πρώτων παραδειγμάτων Α και Β, το κτίριο του παραδείγματος Γ περιλαμβάνει υπόγειο με περιμετρικά τοιχώματα και έδραση σε ενδόσιμο έδαφος.

Όπως τονίστηκε στην παράγραφο 3.1, τα αρχικά βήματα της αντισεισμικής μελέτης ενός κτιρίου είναι (βλ. Πίν. 3.1-1):

- η μόρφωση του φ/ο βάσει των αρχιτεκτονικών σχεδίων,
- η επιλογή της επιθυμητής (από τον κύριο του έργου) στάθμης αντισεισμικής προστασίας (επιτελεστικότητας), και
- η προδιαστασιολόγηση των διαφόρων δομικών στοιχείων.

Στα εδώ παρουσιαζόμενα αριθμητικά παραδείγματα, τα τρία αυτά αρχικά βήματα υποτίθεται ότι έχουν ήδη γίνει και συνεπώς έχει οριστικοποιηθεί τόσο η γεωμετρία του φ/ο όσο και οι καταρχάς διαστάσεις των διατομών των διαφόρων δομικών στοιχείων.

Έτσι, η παρουσίαση των παραδειγμάτων ξεκινάει

- με την παράθεση όλων των γεωμετρικών, φορτιστικών και λοιπών δεδομένων του κάθε κτιρίου,

και συνεχίζει

- με την αναφορά όλων των παραδοχών, απλοποιήσεων και εξιδανικεύσεων βάσει των οποίων καθορίζεται το υπολογιστικό προσομοίωμα που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση,
- με τη διεξαγωγή των απαιτούμενων αναλύσεων, και
- με τη διαστασιολόγηση των οπλισμών (διενέργεια ελέγχων αντοχής) των δομικών στοιχείων (μόνο για το Παράδειγμα Γ).

Ειδικότερα, και σύμφωνα με το γενικό Διάγραμμα Ροής Δ.Ρ.1 (βλ. § 3.2.1), η ανάλυση περιλαμβάνει τα εξής επί μέρους βήματα:

- Έλεγχος κανονικότητας σε κάτοψη και καθ' ύψος (βλ. § 3.2.2 - Δ.Ρ.2, 2α και 3).
- Κατάταξη του φ/ο σε τύπο στατικού συστήματος (βλ. § 3.2.3 - Δ.Ρ.4).
- Επιλογή της κατηγορίας διαθέσιμης πλαστιμότητας (βλ. § 3.2.4).
- Καθορισμός της ανώτατης επιτρεπτής τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q (βλ. § 3.2.5 - Δ.Ρ.5).
- Επιλογή της μεθόδου σεισμικής ανάλυσης (βλ. § 3.2.6 - Δ.Ρ.6).
- Διενέργεια της *στατικής* ανάλυσης για τον υπολογισμό των μεγεθών απόκρισης λόγω μόνιμων φορτίων βαρύτητας (βλ. § 3.2.6(α)).

- Διενέργεια της *σεισμικής* ανάλυσης για τον υπολογισμό των μεγεθών απόκρισης (βλ. § 3.2.6 (β, γ, δ) - Δ.Π.6, Δ.Π.7, Δ.Π.8, και § 3.2.7 - Δ.Π.9).
- Διενέργεια των απαιτούμενων από τον ΕΚ8 γενικών ελέγχων (βλ. § 3.3 - Δ.Π.10α, 10β, 11α και 11β).

Η παραπάνω ροή εργασιών εφαρμόζεται ως έχει στα δύο πρώτα κτίρια (Παραδείγματα Α και Β), για τα οποία επιλέγεται η πλήρης εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητάς τους. Αντίθετα, για το τρίτο κτίριο (Παράδειγμα Γ) ακολουθείται η προταθείσα στην παράγραφο 3.5 τακτική: Επιλέγονται δηλαδή εξαρχής

- (1) μικρή τιμή ($q=2 < \max_{\text{επιτρ}}=3$) για τον συντελεστή συμπεριφοράς ($\rightarrow$ υψηλή επιτελεσματικότητα, μικρή εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητας),
- (2) μέση κατηγορία διαθέσιμης πλαστιμότητας (ΚΠΜ),
- (3) τρισδιάστατο προσομοίωμα (που ούτως ή άλλως είναι πάγια επιλογή), και
- (4) ανάλυση με τη ΔΦΜ.

Οι επιλογές αυτές επιτρέπουν την παράκαμψη αρκετών διαδικασιών και ελέγχων (βλ. σχετική *Παρατήρηση* στην § 3.2.1).

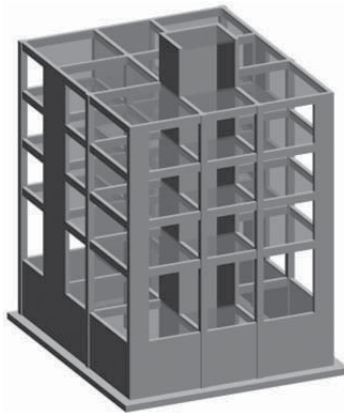
Για τις αναλύσεις των παραδειγμάτων Α, Β και Γ χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SAP2000 της CSI, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.

Οι διστασιολογήσεις στο παράδειγμα Γ έγιναν «με το χέρι» (με χρήση του EXCEL).

[illegible]

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Γ

4-ώροφος μικτός φορέας με τοιχώματα, πυρήνα και υπόγειο με περιμετρικά τοιχώματα, εδραζόμενος σε ενδόσιμο έδαφος



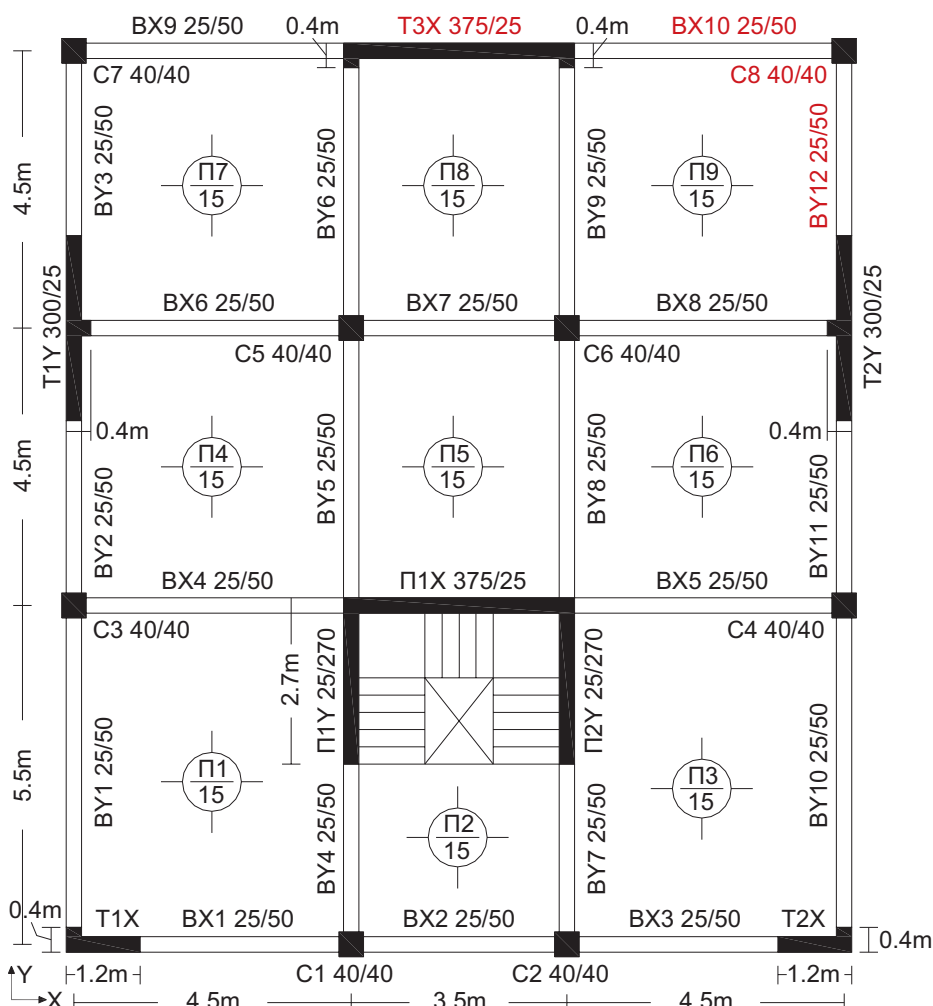
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
Γ1. Δεδομένα	Γ-3
Γ2. Παραδοχές προσομοίωσης	Γ-6
Γ3. Έλεγχοι κανονικότητας	Γ-18
Γ4. Κατάταξη του φ/ο σε τύπο στατικού συστήματος	Γ-23
Γ5. Επιλογή της κατηγορίας διαθέσιμης πλαστιμότητας	Γ-25
Γ6. Προσδιορισμός της ανώτατης τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς η	Γ-25
Γ7. Επιλογή/Καθορισμός της μεθόδου σεισμικής ανάλυσης	Γ-27
Γ8. Στατική ανάλυση για μόνιμα φορτία (Συνδυασμός $G+\psi_2 Q$)	Γ-27
Γ9. Σεισμική ανάλυση - Δυναμική φασματική μέθοδος (ΔΦΜ)	Γ-28
Γ9.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης	Γ-29
Γ9.2 Εντασιακά μεγέθη απόκρισης	Γ-30
Γ9.3 Έλεγχος της επιρροής των φαινομένων 2 ^{ης} τάξης	Γ-40
Γ9.4 Έλεγχος περιορισμού των σχετικών μετατοπίσεων ορόφων	Γ-40
Γ9.5 Έλεγχος των τάσεων του εδάφους	Γ-41
Παράρτημα: Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών πεδίων και πεδιλοδοκών	Γ-49
Γ10. Διαστασιολόγηση (όπλιση) χαρακτηριστικών δομικών στοιχείων	Γ-55
Γ10.1 Διαστασιολόγηση δοκού σε κάμψη	Γ-55
Γ10.2 Διαστασιολόγηση υποστυλώματος σε κάμψη	Γ-68
Γ10.3 Διαστασιολόγηση δοκού σε διάτμηση	Γ-73
Γ10.4 Διαστασιολόγηση υποστυλώματος σε διάτμηση	Γ-78
Γ10.5 Διαστασιολόγηση πλάστιμου τοιχώματος σε κάμψη	Γ-83
Γ10.6 Διαστασιολόγηση πλάστιμου τοιχώματος σε διάτμηση	Γ-87
Γ10.7 Υπολογισμός περιβαλλουσών για το τοίχωμα T3X	Γ-90

Γ1. Δεδομένα

- **Μονάδες μέτρησης:** Μήκος:m, Δύναμη:kN, Μάζα t ($1t=10^3kg$), Χρόνος:sec.
- **Υλικό:** Οπλισμένο σκυρόδεμα ($E=2.9 \cdot 10^7 kN/m^2$, $\nu=0.2$, $\gamma=25kN/m^3$).
- **Περιγραφή και δεδομένα ανωδομής και θεμελίωσης:**

Πρόκειται για ένα κτίριο με τέσσερις υπέργειους και έναν υπόγειο όροφο με όμοια ορθογωνική κάτοψη. Το κτίριο έχει στην περίμετρο της κάτοψης τοιχώματα και στο εσωτερικό της έναν μονοκυψελικό πυρήνα, μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένο το κλιμακοστάσιο και ο ανελκυστήρας. Τα τοιχώματα έχουν διαπλάτυνσεις στις διατομές τους στα σημεία σύνδεσης με τις δοκούς για κατασκευαστικούς λόγους (επαρκής αγκύρωση των οπλισμών των δοκών). Ο πυρήνας του κτιρίου εκτείνεται καθ' ύψος κατά 3m άνωθεν του δώματος, σχηματίζοντας έτσι την απόληξη του κλιμακοστασίου.

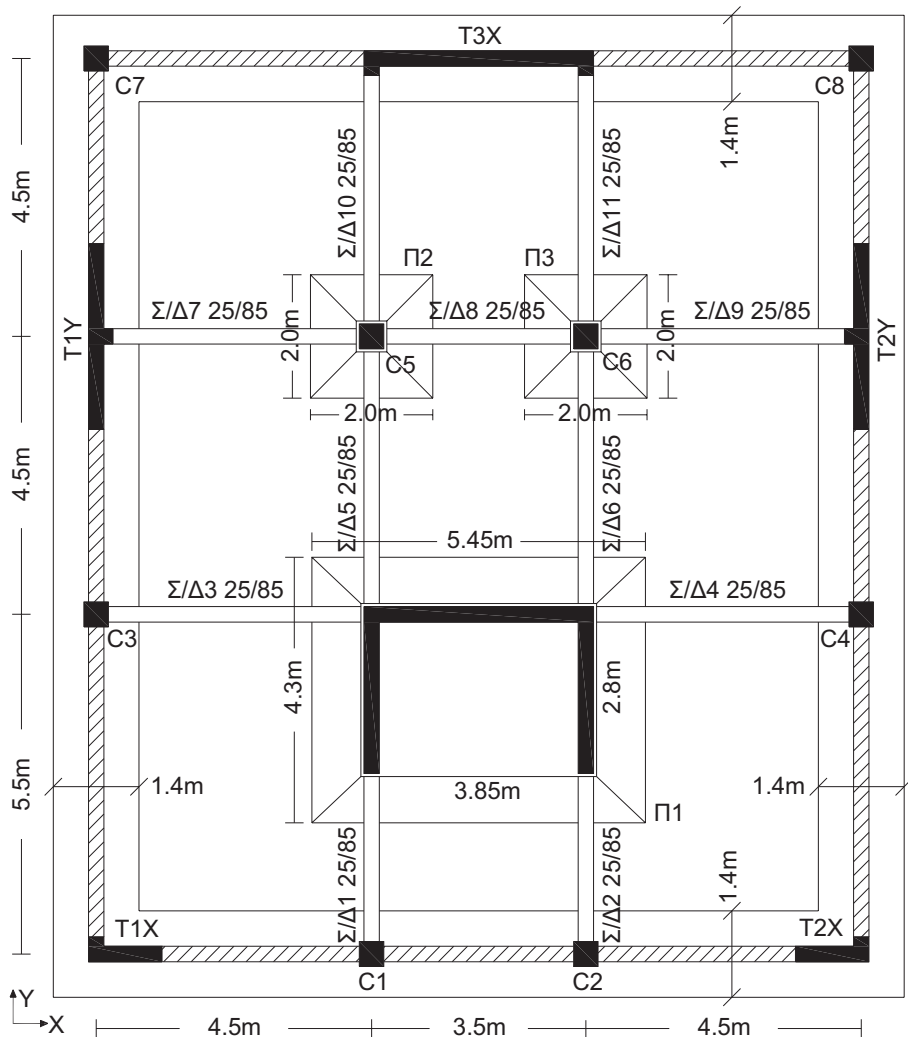


Σχ. Γ1-1 Κάτοψη ορόφων ανωδομής (με **κόκκινο** τα δομικά στοιχεία για τα οποία δίνονται αναλυτικότερα αποτελέσματα)

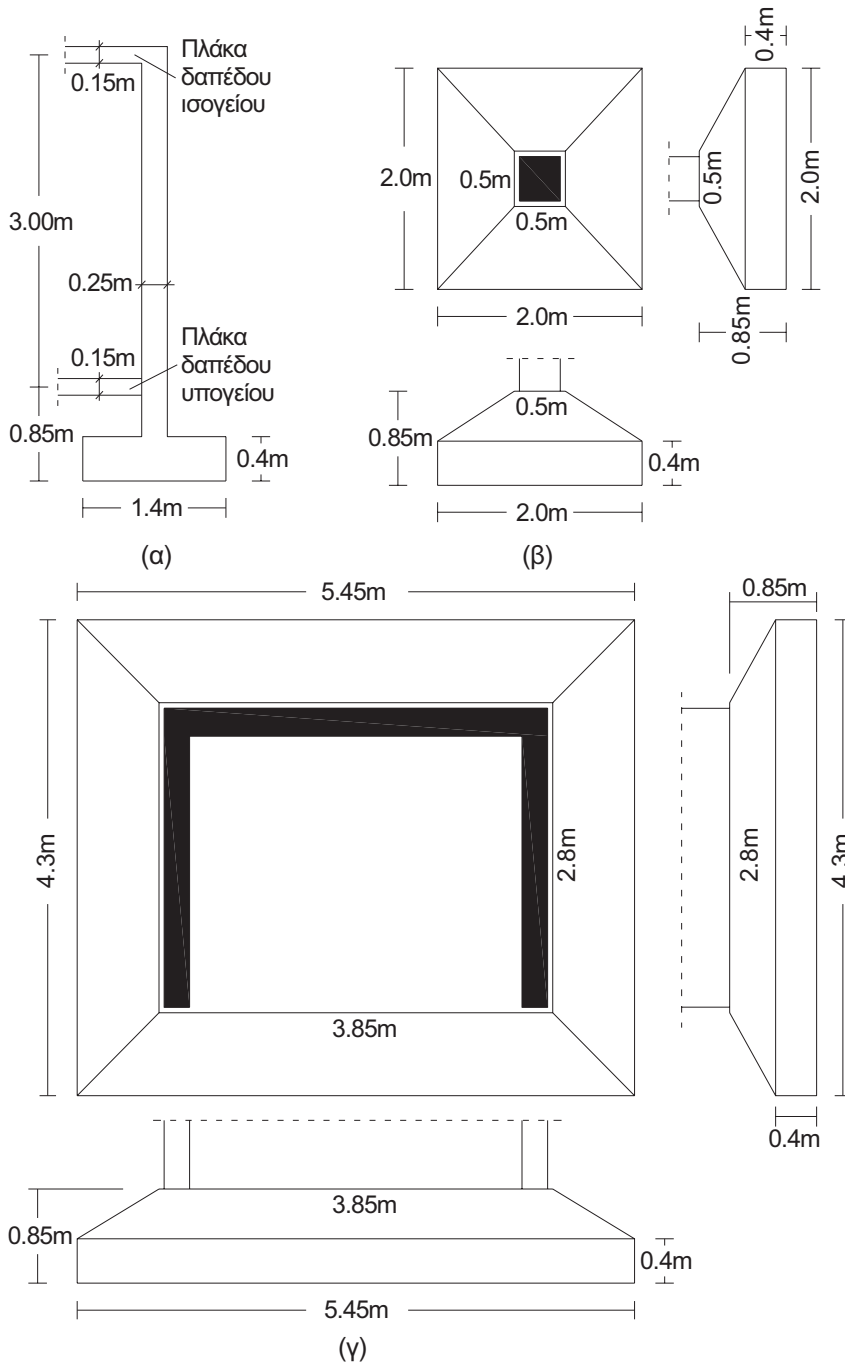
Η θεμελίωση του κτιρίου συντίθεται από

- (α) τα πέδιλα, επί των οποίων εδράζονται τα εσωτερικά υποοστελώματα και ο πυρήνας,
- (β) τις θεμελιοδοκούς 1.40m x 0.85m, επί των οποίων εδράζονται τα περιμετρικά τοιχώματα του υπογείου, και
- (γ) τις συνδετήριες δοκούς 0.25m x 0.85m, οι οποίες συνδέουν τα πέδιλα με το περιμετρικό τοίχωμα υπογείου.

Η πλάκα δαπέδου του υπογείου έχει πάχος 15cm και βρίσκεται σε ύψος 0.85m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους θεμελίωσης.



Σχ. Γ1-2 Κάτοψη θεμελίωσης



Σχ. Γ1-3 Δεδομένα δομικών στοιχείων θεμελίωσης: Τομή περιμετρικού τοιχώματος (α), Γεωμετρία πεδίων εσωτερικών υποστυλωμάτων C5, C6 (β), Γεωμετρία πεδίου πυρήνα (γ).

- **Ύψη ορόφων:**

Υπόγειο: 3m

Ισόγειο: 4.5m

1^{ος} – 3^{ος} : 3m

- **Κατακόρυφα φορτία πλακών - δοκών**

- Περιμετρικά το κτίριο έχει μπατική τοιχοποιία (3.6kN/m^2).
- Κατά μήκος των εσωτερικών δοκών υπάρχει δομική τοιχοποιία (2.1kN/m^2) σε όλους τους ορόφους, πλην του υπογείου και του δώματος.
- Στο δώμα υπάρχει κατά μήκος όλης της περιμέτρου στηθαίο από μπατική τοιχοποιία ύψους 1m.
- Τα δάπεδα σε όλους τους ορόφους και το κλιμακοστάσιο έχουν επίστρωση μαρμάρου, βάρους 1.3kN/m^2 .
- Το ωφέλιμο φορτίο (μεταβλητή δράση) ελήφθη ίσο με $Q=2\text{kN/m}^2$ για τις πλάκες και $Q=3.5\text{kN/m}^2$ για το κλιμακοστάσιο.

- **Διευθύνσεις δράσης σεισμικών δυνάμεων:** Άξονες X, Y [EK8, § 4.3.3.1(11)P].

- **Κατηγορία διαθέσιμης πλαστιμότητας:** Θα επιλεγεί παρακάτω (βλ. § Γ5).

- **Δεδομένα Φάσματος σχεδιασμού:** EK8 (§ 3.2.2.5).

- Το κτίριο επιλύθηκε για επιτάχυνση εδάφους $A=0.20g$
- Ποσοστό απόσβεσης: $\zeta=5\%$
- Συντελεστής συμπεριφοράς q : Η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q θα προσδιοριστεί παρακάτω (βλ. § Γ6).

- **Δεδομένα εδάφους θεμελίωσης**

Πυκνή άμμος.

Δείκτης εδάφους: $K_s=90000\text{kN/m}^3$ (Πίνακες Terzaghi).

Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών: βλ. Παράρτημα.

Γ2. Παραδοχές προσομοίωσης

Γ2.1 Παραδοχές για την προσομοίωση του φορέα (βλ. § 2.2.1(α), (β))

- Για την ανάλυση του φ/ο χρησιμοποιείται χωρικό προσομοίωμα (βλ. § 2.2.4(α)).
- Διαφραγματική λειτουργία πλακών:
Οι πλάκες θεωρούνται ως απαραμόρφωτα εντός του επιπέδου τους διαφράγματα (βλ. § 3.2.6(α), Σχ. 3.2.6-1). Οι ακριβείς στάθμες στις οποίες τοποθετούνται τα διαφράγματα ορίζονται με τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα Γ2-1.
- Συνεργαζόμενο πλάτος πλακοδοκών (σύμφωνα με τον EK2, § 5.3.2.1):
Για πλακοδοκούς Τ: $b_{\text{eff}}=b_w+0.2\cdot l_0$
Για πλακοδοκούς Γ: $b_{\text{eff}}=b_w+0.1\cdot l_0$
($l_0=0.85\cdot l$ για ακραία ανοίγματα και $l_0=0.70\cdot l$ για μεσαία ανοίγματα, όπου το l είναι το θεωρητικό άνοιγμα που λαμβάνεται εδώ ίσο με το μήκος μεταξύ των δύο παρειών στήριξης των δοκών). Με βάση τις σχέσεις αυτές προκύπτουν οι τιμές του παρακάτω πίνακα:

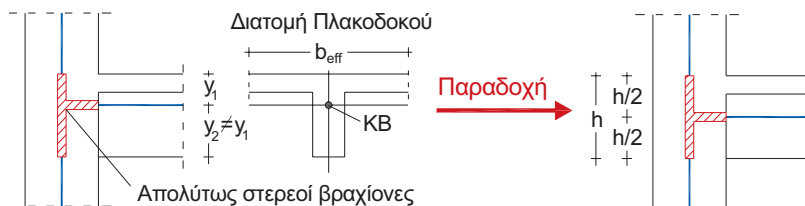
ΔΟΚΟΣ	Μήκος (m)	b _w (m)	Άνοιγμα	Μορφή	b _{eff} (m)
BX1, BX3	3.225	0.250	Μεσαίο*	Γ	0.476
BX2	3.1	0.250	Μεσαίο	Γ	0.467
BX4, BX5	4.175	0.250	Ακραίο	Τ	0.960
BX6, BX8	4.025	0.250	Ακραίο	Τ	0.934
BX7	3.1	0.250	Μεσαίο	Τ	0.684
BX9, BX10	4.175	0.250	Ακραίο	Γ	0.605
BY1, BY10	5.025	0.250	Ακραίο	Γ	0.677
BY2, BY11	2.8	0.250	Μεσαίο	Γ	0.446
BY3, BY12	2.8	0.250	Ακραίο	Γ	0.488
BY4, BY7	2.725	0.250	Ακραίο	Τ	0.713
BY5, BY8	4.175	0.250	Μεσαίο	Τ	0.835
BY6, BY9	4.025	0.250	Ακραίο	Τ	0.934

* Η αρχή της δοκού BX1 και το πέρας της δοκού BX3 συνδέονται με τα τοιχώματα T1X και T2X αντίστοιχα, και μπορούν να θεωρηθούν ως πακτωμένες στα συγκεκριμένα άκρα. Για τον λόγο αυτόν θεωρείται ότι ανήκουν σε μεσαίο άνοιγμα και επομένως για τον υπολογισμό του συνεργαζόμενου πλάτους τους λαμβάνεται $\ell_0=0.70 \cdot \ell$.

• Απομείωση στιβαροτήτων (βλ. § 2.2.4(β)):

Έχοντας υπόψη τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.4(β), η δυσκαμψία EI και η δυστημψία GA_s των δομικών στοιχείων λαμβάνονται ίσες με το 50% των αντίστοιχων τιμών των μη ρηγματωμένων διατομών (EK8, § 4.3.1(7)), ενώ η δυστρεψία GI_t θεωρείται - ελλείψει συγκεκριμένων οδηγιών στον EK8 - ίση με το 10% της δυστρεψίας της αρηγμάτωτης διατομής τους (δηλαδή όπως προβλέπει ο ΕΑΚ-2000). Η δυστένεια EA δεν απομεινώνεται σε κανένα δομικό στοιχείο, δεδομένου ότι τα μεν κατακόρυφα στοιχεία βρίσκονται γενικώς υπό μόνιμη θλίψη λόγω των φορτίων βαρύτητας, οι δε δοκοί είναι ενσωματωμένες στις θεωρούμενες ως απαραμόρφωτες εντός του επιπέδου τους πλάκες (διαφραγματική λειτουργία). Σημειώνεται ότι για την ανάλυση λόγω κατακόρυφων φορτίων ο EK2 (§ 5.4(2)) επιτρέπει να θεωρήσουμε τις διατομές ως αρηγμάτρες (δηλ. χωρίς απομειώσεις). Επειδή όμως η απομείωση θεωρείται ότι είναι γενικώς προς την πλευρά της ασφάλειας, διατηρείται αυτή και για τις κατακόρυφες φορτίσεις, όπως ακριβώς στις επιλύσεις για σεισμικά φορτία. Συνεπώς, σε όλες τις αναλύσεις, στατικές και σεισμικές, χρησιμοποιείται το ίδιο προσομοίωμα του φ/ο.

- Λαμβάνονται υπόψη καμπτικές, διατμητικές, αξονικές και στρεπτικές παραμορφώσεις.
- Κατά τη μόρφωση του προσομοιώματος του φ/ο θεωρούνται στους κόμβους απολύτως στερεά τμήματα («άκαμπτοι κόμβοι», «άκαμπτοι βραχίονες») σύμφωνα με το εδάφιο 4.3.1(2) του EK8 (βλ. Σχ. Γ2-1).



Σχ. Γ2-1 Λεπτομέρεια προσομοίωσης των πλαισιακών κόμβων

- Η δυσκαμψία και η δυστένεια των τοιχοποιιών αγνοούνται κατά την προσομοίωση του φορέα σύμφωνα με το εδάφιο 4.3.1(8) του ΕΚ8, θεωρώντας εδώ ότι η συνεισφορά τους στην οριζόντια στιβαρότητα και στην αντοχή του κτιρίου είναι ασήμαντη.

Γ2.2 Ειδικότερες παραδοχές για την προσομοίωση των επίπεδων τοιχωμάτων

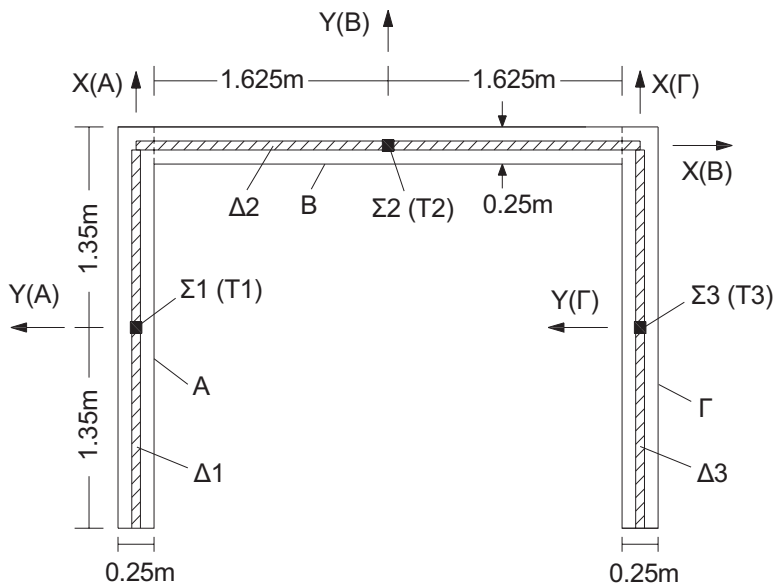
Η προσομοίωση των επίπεδων τοιχωμάτων του κτιρίου γίνεται σύμφωνα με το «μοντέλο του ισοδύναμου πλαισίου», δηλαδή με έναν ισοδύναμο στύλο S στο κέντρο βάρους της διατομής τους και με απολύτως στερεούς βραχίονες στις στάθμες των ορόφων, οι οποίοι (βραχίονες) διήκουν μέχρι τις εκατέρωθεν παρειές του εκάστοτε τοιχώματος. Λεπτομέρειες δόθηκαν στο παράδειγμα Α (Σχ. Α2-2). Εδώ απλώς δίνονται στον παρακάτω πίνακα οι γεωμετρικές ιδιότητες των ισοδύναμων στύλων για κάθε ένα από τα τοιχώματα του κτιρίου:

	S					
ΤΟΙΧΩΜΑ	A	I_{xx}	I_{yy}	I_T	A_{SX}	A_{SY}
T1X,T2X	0.3	0.036	0.001563	0.00543	0.25	0.25
T3X	0.9375	1.0986	0.004883	0.0187	0.7813	0.7813
T1Y,T2Y	0.75	0.5625	0.003906	0.0148	0.625	0.625

Οι ιδιότητες των ισοδύναμων στύλων S μειώνονται σύμφωνα με τις προαναφερθείσες παραδοχές προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι χάριν απλούστευσης οι γεωμετρικές ιδιότητες των διατομών που δίνονται στον παραπάνω πίνακα αντιστοιχούν σε ορθογωνικές διατομές και όχι στις διατομές των τοιχωμάτων με τις διαπλατύνσεις που έχουν στα άκρα τους (βλ. τοιχώματα T1X, T2X, T3X, T1Y, T2Y στο σχήμα Γ1-1).

Γ2.3 Ειδικότερες παραδοχές για την προσομοίωση του πυρήνα

Η προσομοίωση του πυρήνα γίνεται σύμφωνα με το «μοντέλο του ισοδύναμου πλαισίου» και πιο συγκεκριμένα με τρεις ισοδύναμους στύλους στα κέντρα βάρους των επιμέρους σκελών και με οριζόντιους, απολύτως στερεούς βραχίονες στις στάθμες των ορόφων. Οι ιδιότητες των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση δίνονται στον παρακάτω πίνακα:



	$\Sigma_1 (T_1)$	$\Sigma_2 (T_2)$	$\Sigma_3 (T_3)$
A	$A_A=0.675$	$A_B=0.8125$	$A_\Gamma=0.675$
I_{xx}	$I_{xx(A)}=0.003516$	$I_{xx(B)}=0.004232$	$I_{xx(\Gamma)}=0.003516$
I_{yy}	$I_{yy(A)}=0.4101$	$I_{yy(B)}=0.7152$	$I_{yy(\Gamma)}=0.4101$
I_T	$I_{TA}=0.0132$	$I_{TB}=0.0161$	$I_{T\Gamma}=0.0132$
A_{sx}	$A_{SA}=0.675$	$A_{SB}=0.8125$	$A_{S\Gamma}=0.675$
A_{sy}	0.0	0.0	0.0

Όσον αφορά στις γεωμετρικές ιδιότητες των διατομών των δοκών Δ1, Δ2, Δ3, που τοποθετούνται στις στάθμες των ορόφων, αυτές θεωρούνται απολύτως ατενείς, άκαμπτες και άτμητες, αλλά με πεπερασμένη δυστρεψία προκειμένου να προσομοιωθεί η στρέβλωση της διατομής του πυρήνα υπό στρεπτική φόρτιση. Οι πεπερασμένες τιμές της δυστρεψίας των δοκών Δ1, Δ2, Δ3 είναι διαφορετικές σε κάθε όροφο και υπολογίζονται με τον τρόπο που περιγράφηκε στην αντίστοιχη παράγραφο του παραδείγματος Β. Εδώ απλώς δίνονται στον παρακάτω πίνακα οι τιμές των δυστρεψιών των δοκών Δ1, Δ2, Δ3 σε όλους τους ορόφους του κτιρίου:

	Δ1	Δ2	Δ3
Απόληξη	$I_T=0.007$	$I_T=0.007$	$I_T=0.007$
$4^{ος} - 3^{ος} - 2^{ος}$	$I_T=0.0148$	$I_T=0.0148$	$I_T=0.0148$
$1^{ος}$	$I_T=0.0187$	$I_T=0.0187$	$I_T=0.0187$
Ισόγειο	$I_T=0.0265$	$I_T=0.0265$	$I_T=0.0265$

Υπενθυμίζεται, τέλος, ότι όλες οι γεωμετρικές ιδιότητες των στοιχείων με τα οποία προσομοιώνεται ο πυρήνας απομειώνονται με τα ίδια ποσοστά που απομειώνονται οι γεωμετρικές ιδιότητες και των υπόλοιπων δομικών στοιχείων.

Γ2.4 Ειδικότερες παραδοχές για την προσομοίωση του περιμετρικού τοιχώματος του υπογείου και της ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης

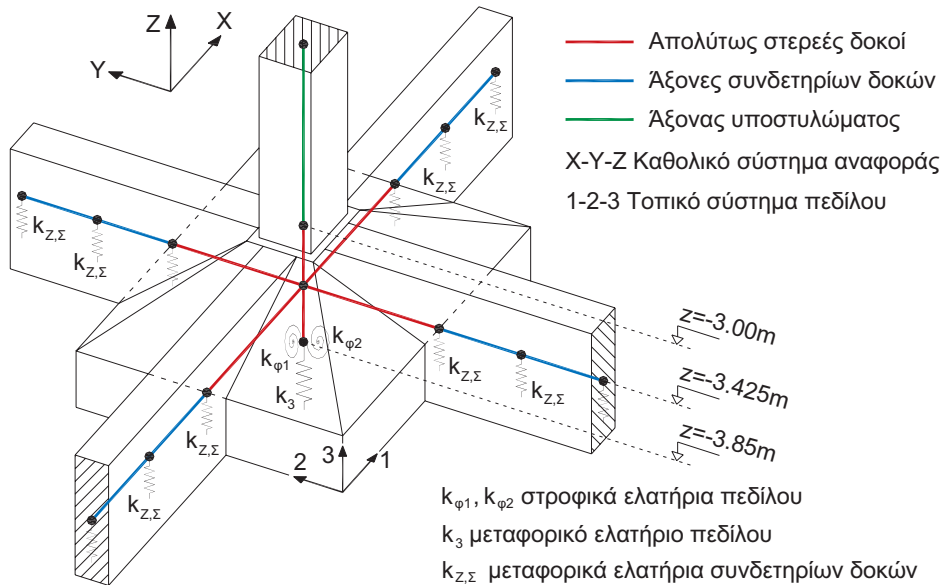
▪ Προσομοίωση πεδίων / συνδετηρίων δοκών

Η προσομοίωση των πεδίων γίνεται τοποθετώντας καταρχάς έναν κόμβο στο κέντρο βάρους της επιφάνειας έδρασης τους (Σχ. Γ2-2). Σημειώνεται ότι στο παράδειγμά μας, η επιφάνεια έδρασης των πεδίων όπως και όλων των υπόλοιπων δομικών στοιχείων της θεμελίωσης βρίσκεται στη στάθμη $z=-3.85\text{m}$, δηλ. 3.85m κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Ο κόμβος αυτός συνδέεται με τον κόμβο του πόδα του επί του πεδίου εδραζόμενου υποστυλώματος μέσω μίας απολύτως στερεής δοκού, δεδομένου ότι τα πέδιλα θεωρούνται λόγω του όγκου τους ως απολύτως στερεά σώματα. Ειδικά στην περίπτωση του πεδίου επί του οποίου εδράζεται ο πυρήνας (πέδιλο Π1), ο οποίος όπως προαναφέρθηκε προσομοιώνεται με τρεις ισοδύναμους στύλους, ο κόμβος στο κέντρο βάρους της επιφάνειας έδρασης συνδέεται με τους πόδες των ισοδύναμων στύλων μέσω τριών απολύτως στερεών δοκών).

Στους κόμβους που τοποθετούνται στα κέντρα βάρους της επιφάνειας έδρασης εισάγονται τρία ελατήρια: ένα κατακόρυφο μεταφορικό (κατά τη διεύθυνση του καθολικού άξονα Z) και δύο στροφικά για στροφή γύρω από τους δύο οριζόντιους άξονες που είναι παράλληλοι με τις πλευρές των πεδίων (Σχ. Γ2-2). Ο υπολογισμός των ελατηριακών σταθερών γίνεται με βάση τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

Οι συνδετήριες δοκοί ορθογωνικής διατομής 25/85 προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία, τα οποία τοποθετούνται στη στάθμη του κεντροβαρικού άξονα της διατομής των συνδετηρίων δοκών, δηλαδή στη στάθμη $z=-3.425\text{m}$ $[=(-3.85+(-3))/2]$. Η διακριτοποίησή τους γίνεται με στοιχεία ίσου μήκους, στους κόμβους των οποίων τοποθετούνται κατακόρυφα μεταφορικά ελατήρια προκειμένου να προσομοιωθεί η ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης. Ο τρόπος υπολογισμού των τιμών των ελατηρίων αυτών παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η σύνδεση των στοιχείων των συνδετηρίων δοκών με τα πέδιλα υλοποιείται μέσω απολύτως στερεών δοκών.

Όλες οι λεπτομέρειες για τον τρόπο προσομοίωσης των πεδίων, των συνδετηρίων δοκών και της μεταξύ τους σύνδεσης παρουσιάζονται στο σχήμα Γ2-2.



Σχ. Γ2-2 Λεπτομέρεια προσομοίωσης πεδίων και συνδετηρίων δοκών

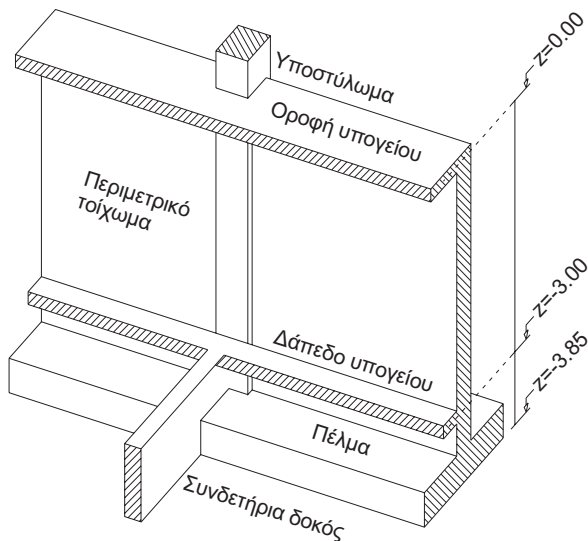
▪ **Προσομοίωση του περιμετρικού τοιχώματος του υπογείου**

Το περιμετρικό τοίχωμα υπογείου (βλ. Σχ. Γ2-3) προσομοιώθηκε με επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους και με πεπερασμένα στοιχεία δοκού. Με τα επίπεδα στοιχεία κελύφους προσομοιώθηκε ο κορμός του τοιχώματος μεταξύ της μέσης στάθμης της οροφής και του δαπέδου του υπογείου (στάθμες $z=0.00$ και $z=-3.00\text{m}$ αντίστοιχα). Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους πάχους 25cm , όσο δηλαδή είναι και το πάχος του κορμού του τοιχώματος.

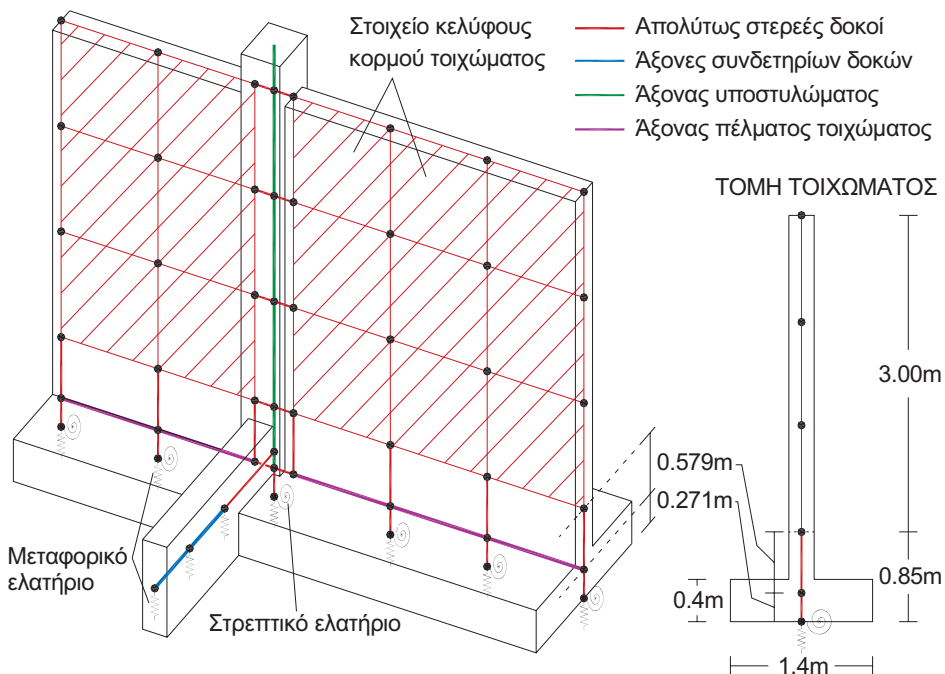
Μεταξύ της μέσης γραμμής του δαπέδου του υπογείου (στάθμη $z=-3.00\text{m}$) και της στάθμης θεμελίωσης (στάθμη $z=-3.85\text{m}$) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού με γεωμετρικές ιδιότητες διατομής που αντιστοιχούν σε ανεστραμμένη πλακοδοκό ύψους 0.85m . Ο άξονας των στοιχείων αυτών τοποθετήθηκε σε ύψος $z=-3.579\text{m}$, το οποίο αντιστοιχεί στη στάθμη που βρίσκεται το κέντρο βάρους της ανεστραμμένης πλακοδοκού. Οι δοκοί διακριτοποιήθηκαν με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία μήκους ίσου με το μήκος των στοιχείων κελύφους του κορμού και η μεταξύ τους σύνδεση έγινε με κατακόρυφα απολύτως στερεά στοιχεία δοκού (Σχ. Γ2-4).

Η έδραση των τοιχωμάτων στο έδαφος προσομοιώθηκε με μεμονωμένα μεταφορικά και στρεπτικά ελατήρια, τα οποία τοποθετήθηκαν στους κόμβους των στοιχείων δοκού με τρόπο τέτοιο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η απόσταση μεταξύ του άξονα της δοκού και της επιφάνειας θεμελίωσης (βλ. Σχ. Γ2-4). Για τον λόγο αυτόν τοποθετήθηκαν κατακόρυφα, απολύτως στερεά στοιχεία μήκους $3.85-3.579=0.271\text{m}$. Τα στρεπτικά ελατήρια τοποθετήθηκαν προκειμένου να προσομοιωθεί η αντίσταση που αναπτύσσεται στο ενδόσιμο έδαφος λόγω της στρεπτικής παραμόρφωσης της θεμελιοδοκού επί της οποίας εδράζεται το τοίχωμα. Ο τρόπος υπολογισμού των ελατηρίων δίνεται στο Παράρτημα.

Τέλος, σημειώνεται ότι στις στάθμες των πλακών οροφής και δαπέδου του υπογείου θεωρήθηκε – όπως και στις στάθμες των πλακών της ανωδομής – ότι υφίσταται διαφραγματική λειτουργία.

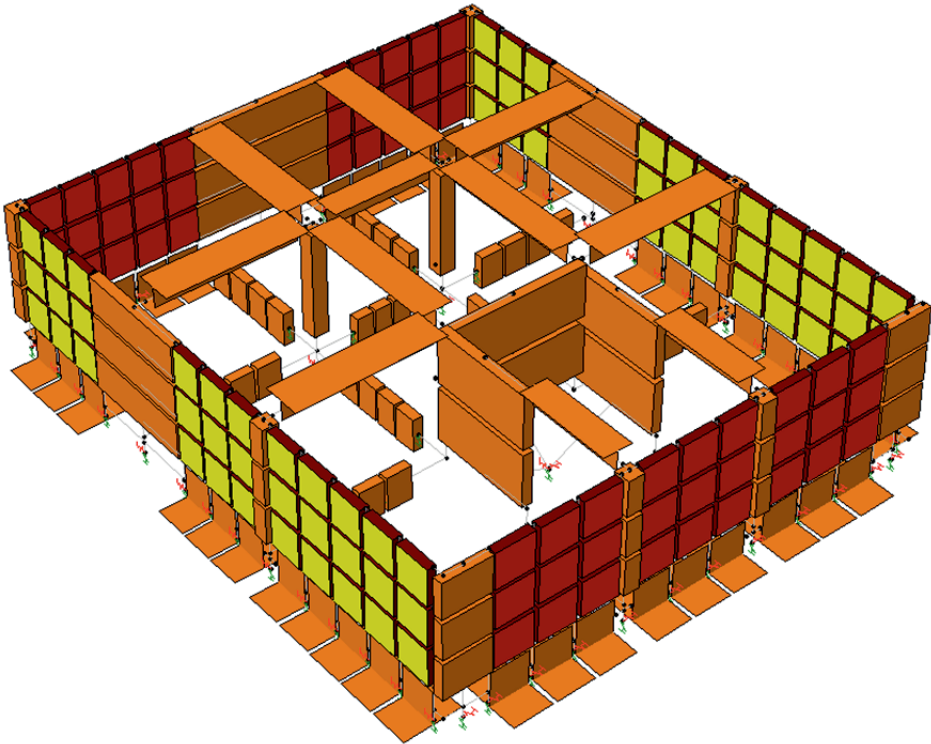


Σχ. Γ2-3 Σκαρίφημα τμήματος του περιμετρικού τοιχώματος του υπογείου



Σχ. Γ2-4 Λεπτομέρεια προσομοίωσης του περιμετρικού τοιχώματος του υπογείου

Στο παρακάτω σχήμα Γ2-5 παρουσιάζεται μία συνολική άποψη της προσομοίωσης του διακριτοποιημένου φορέα θεμελίωσης και των δομικών στοιχείων του υπογείου υπό τη μορφή «συμπαγούς» απεικόνισης του προγράμματος SAP2000. Στο σχήμα διακρίνονται και τα ελατήρια που προσομοιώνουν τη στήριξη στο ενδόσιμο έδαφος.

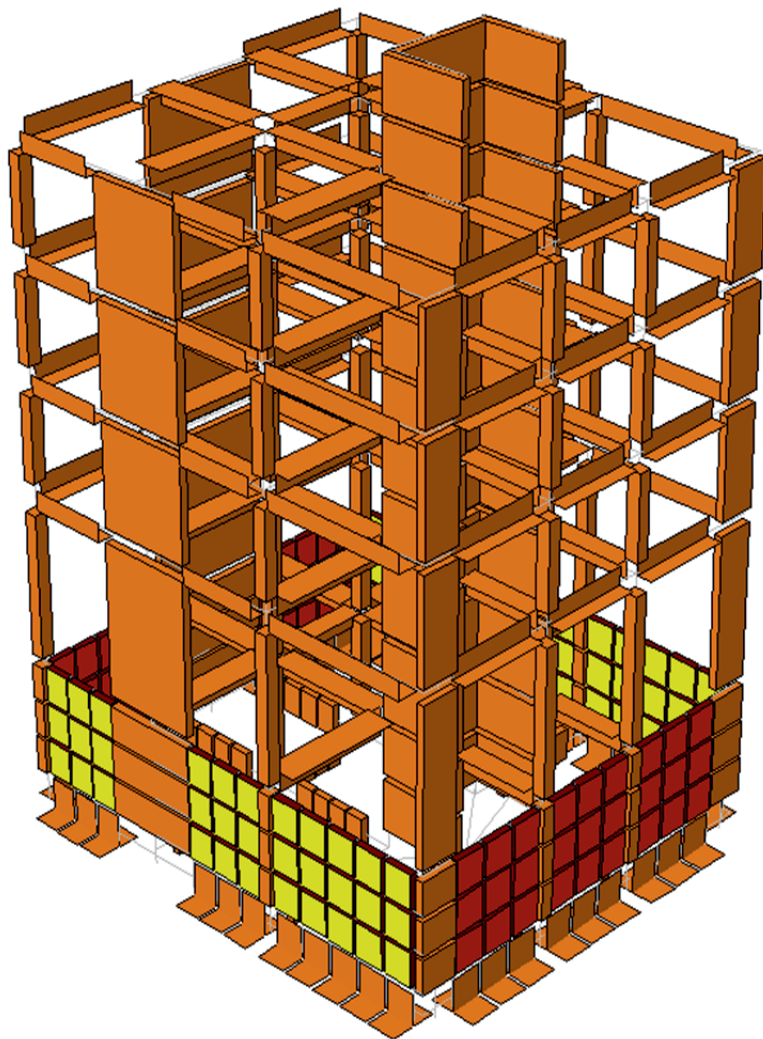


Σχ. Γ2-5 Σκαρίφημα του διακριτοποιημένου φορέα θεμελίωσης και των δομικών στοιχείων του υπογείου σε «συμπαγή» απεικόνιση του προγράμματος SAP2000)

Σημείωση:

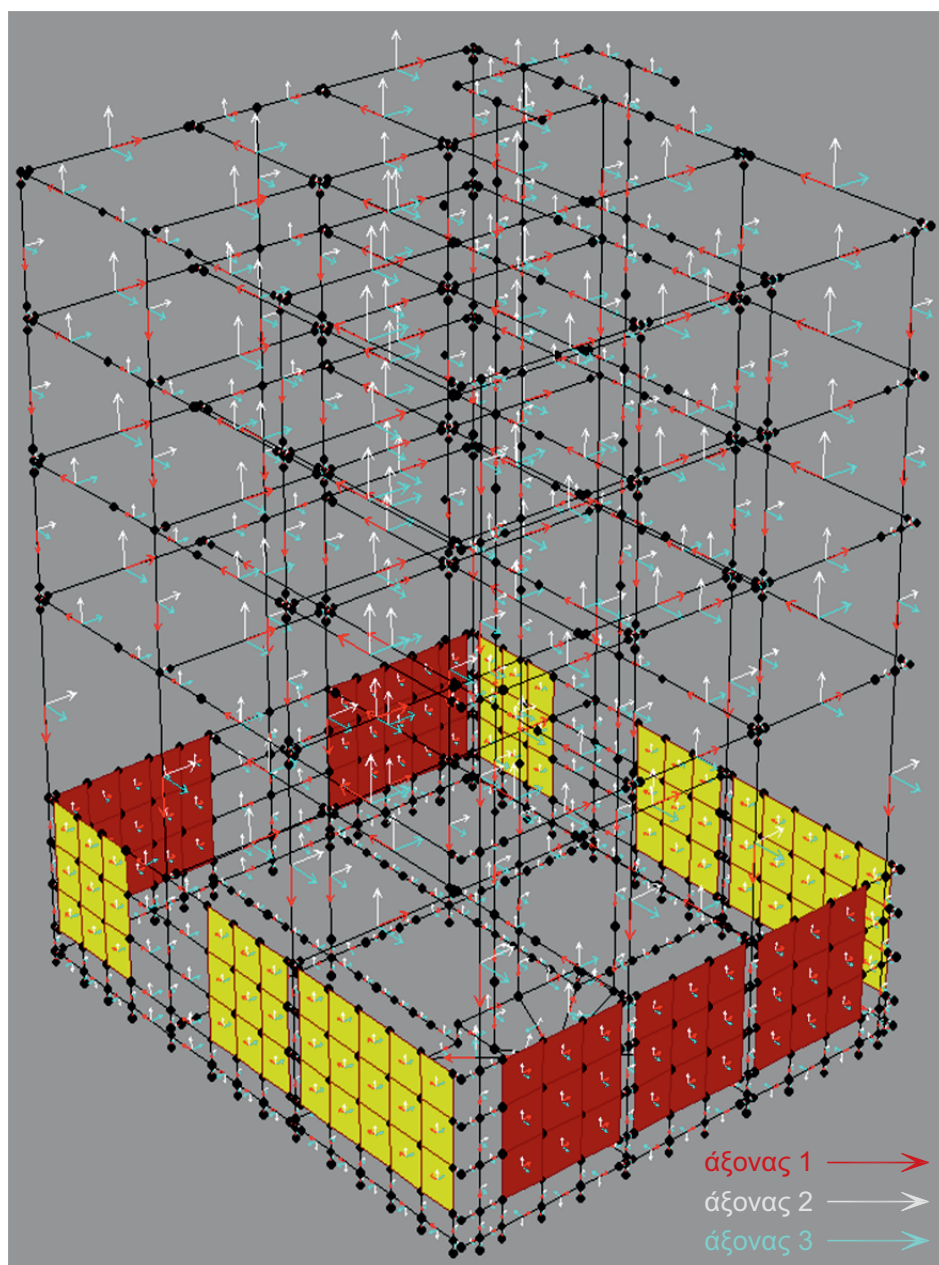
Η χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των τοιχωμάτων του υπογείου (και βέβαια και της ανωδομής) απαιτεί τη χρήση κατάλληλου λογισμικού ανάλυσης-διαστασιολόγησης κατασκευών, το οποίο αφενός δεν είναι πάντα διαθέσιμο στην πράξη και αφετέρου απαιτεί από τον μελετητή καλή γνώση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για τον λόγο αυτόν, σε αρκετές περιπτώσεις της πράξης χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των τοιχωμάτων του υπογείου συνήθων κατασκευών αντί των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων "ισοδύναμα πλαίσια" (όπως άλλωστε και για τα τοιχώματα της ανωδομής), τα οποία υπό ορισμένες βασικές προϋποθέσεις παρέχουν επαρκή ακρίβεια. Η "ισοδύναμη πλαίσιακή προσομοίωση" εφαρμόζεται στο παρόν παράδειγμα για τον πυρήνα και τα τοιχώματα της ανωδομής. Αντίθετα, επειδή η προσομοίωση των τοιχωμάτων του υπογείου με "ισοδύναμα πλαίσια" είναι αρκετά πολυπλοκότερη σε σχέση με τα τοιχώματα της ανωδομής (βλ. § 4.14), επιλέχθηκε εδώ η διακριτοποίησή τους με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.

Αντίστοιχο σκαρίφημα του προσομοιώματος ολόκληρου του κτιρίου δίνεται στο επόμενο σχήμα Γ2-6.

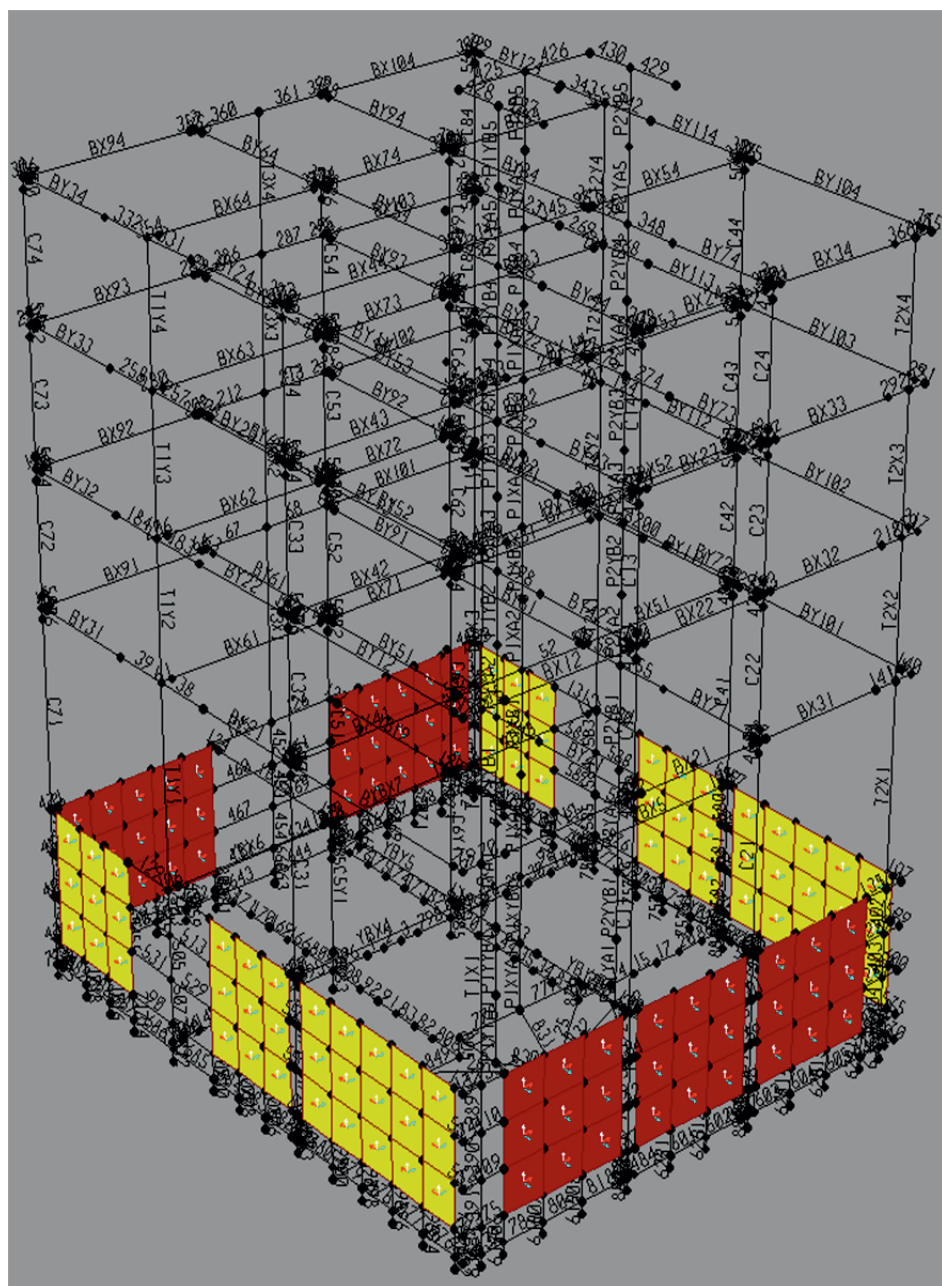


Σχ. Γ2-6 Τρισδιάστατη «συμπαγής» απεικόνιση του κτιρίου

Διαφορετική είναι η απεικόνιση του προσομοιώματος στα σχήματα Γ2-7α και Γ2-7β, όπου όσα δομικά στοιχεία προσομοιώθηκαν ως γραμμικά (δοκοί, υποστυλώματα, τοιχώματα, πυρήνας, πεδιλοδοκοί και βοηθητικές, απολύτως στερεές δοκοί) απεικονίζονται με μία απλή γραμμή, ενώ τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία με τα οποία προσομοιώθηκαν τα τοιχώματα του υπογείου αποδίδονται ως απλοί δίσκοι. Οι κόμβοι του προσομοιώματος αποδίδονται ως μαύρες βούλες. Στο σχήμα Γ2-7α φαίνεται το προσομοίωμα με τους τοπικούς άξονες αναφοράς των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στο σχήμα Γ2-7β δίνεται η αρίθμηση των γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων.



Σχ. Γ2-7α Διακριτοποίηση φ/ο – Κόμβοι και γραμμικά/επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία με τους τοπικούς άξονες αναφοράς



Σχ. Γ2-7β Διακριτοποίηση φ/ο – Αρίθμηση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων

