

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ:
“ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ”**

ΜΙΧΑΗΛ Ν. ΦΑΡΔΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

2005

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο βασικότερος τομέας δραστηριότητας του Πολιτικού Μηχανικού είναι η παραγωγή “Δομημάτων” (όρος που αντιστοιχεί στον αγγλικό “Structures”), ή, όπως αποκαλούνται συνηθέστερα, “Κατασκευών”. Η παραγωγή των έργων αυτών έχει δύο στάδια: Το πρώτο είναι ο “Σχεδιασμός”, ή “Μελέτη”, ή “Σύνθεση” (όροι που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα για να εκφράσουν τον όρο design της Αγγλικής) και το δεύτερο είναι η “Κατασκευή” ή “Εκτέλεση”. Στο δεύτερο στάδιο ο Μηχανικός έχει κεντρικό επιτελικό και διευθυντικό ρόλο, χωρίς όμως να είναι ο βασικός φορέας της παραγωγής του έργου. Στο πρώτο όμως στάδιο ο Μηχανικός έχει όχι μόνο τον κύριο, πρωταγωνιστικό ρόλο, αλλά είναι και ο ίδιος ο αποκλειστικός σχεδόν φορέας της παραγωγής.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σταδίων της παραγωγής ενός δομήματος είναι μεγάλη. Είναι προφανές ότι το στάδιο του σχεδιασμού ή μελέτης είναι καθοριστικό αυτού της εκτέλεσης, καθόσον στο στάδιο της εκτέλεσης ακολουθείται κατά γράμμα το αποτέλεσμα του σχεδιασμού, και συγκεκριμένα οι προδιαγραφές, τα κατασκευαστικά σχέδια και οι σχετικές οδηγίες που τα συνοδεύουν. Υπάρχει όμως και εξάρτηση ή επιρροή και στην αντίστροφη κατεύθυνση: δεδομένου ότι ένα δόμημα σχεδιάζεται (ή “μελετάται”) για να υλοποιηθεί, ο τρόπος της υλοποίησής του πρέπει να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα του σχεδιασμού. Με άλλα λόγια, ο Μηχανικός πρέπει να σχεδιάσει το δόμημα έχοντας πλήρη και σαφή εικόνα του πως ακριβώς θα υλοποιηθεί η μελέτη του, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα τεχνικά μέσα, υλικά και εργατοτεχνικό προσωπικό. Θα πρέπει μάλιστα να φροντίσει ώστε η μελέτη του να είναι τέτοια που να μπορεί να υλοποιηθεί σε εύλογο χρόνο και με χαμηλό κόστος με τους εκάστοτε διαθέσιμους υλικούς και ανθρώπινους πόρους. Ακόμα και αν φαίνεται άψογη και τέλεια στα χαρτιά, μία μελέτη που είναι δύσκολο να υλοποιηθεί είναι κακή μελέτη. Επιπλέον, και ιδιαίτερα στα πλαίσια του αντισεισμικού σχεδιασμού, είναι ανασφαλής μελέτη, καθότι η δυσχέρεια υλοποίησής της συνεπάγεται πλημμελή και ατελή εκτέλεση του έργου.

Η τελευταία επισήμανση έχει εξαιρετική σημασία για τις αντισεισμικές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, επειδή:

- η σεισμική συμπεριφορά και ασφάλεια εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από τις λεπτομέρειες όπλισης και κατασκευστικής διαμόρφωσης, και
- σε αντίθεση με τις περιπτώσεις όπου καθοριστικά είναι μόνον τα κατακόρυφα φορτία

(οπότε τα προβλήματα από τυχόν κακοτεχνίες κ.λ.π. μπορεί να εκδηλωθούν νωρίς, όπως π.χ. κατά την αφαίρεση των ξυλοτύπων, ή λίγο πριν δοθεί το δόμημα σε χρήση), στις αντισεισμικές κατασκευές τα προβλήματα αυτά γίνονται φανερά μόνο μέσω των καταστρεπτικών συνεπειών τους, δηλαδή κατά τον ίδιο το σεισμό. Τονίζεται δε ότι ο σεισμός “βλέπει” μόνον πως είναι στην πραγματικότητα το δόμημα. Το πως, με ποιά μέθοδο, με ποιά υπολογιστικά εργαλεία ή με ποιές καλές προθέσεις μελετήθηκε το δόμημα, παίζει ρόλο μόνο στο βαθμό που αυτό αντικατοπτρίζεται στη γεωμετρία και στους οπλισμούς του.

Για ορισμένα ειδικά δομήματα, όπως, π.χ. οι γέφυρες, ο τρόπος και η μέθοδος κατασκευής καθορίζει και τη μελέτη. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για το οπλισμένο σκυρόδεμα, για το οποίο υπάρχει αφενός μεν η δυνατότητα προκατασκευής του συνόλου ή μέρους του και συναρμολόγησης επιτόπου, αφετέρου δε αυτή της επιτόπου χύτευσης σ' ένα μονολιθικό σύνολο. Για τα κτίρια, όμως, που αποτελούν και τη συντριπτική πλειονότητα των αντισεισμικών έργων της πράξης, ο τρόπος κατασκευής είναι σχεδόν μονοσήμαντος: αυτός της επί τόπου χύτευσης των οριζοντίων και κατακορύφων στοιχείων που αποτελούν το σύστημα ανάληψης της σεισμικής δράσης και της μονολιθικής σύνδεσής τους, όχι μόνο μεταξύ τους, αλλά και με τις πλάκες των πατωμάτων και της στέγης, καθώς και με τη θεμελίωση. Η κατασκευή γίνεται βέβαια σε στάδια, συνήθως με ένα στάδιο για κάθε οριζόντια στάθμη και τα υποκείμενα κατακόρυφα στοιχεία (δηλαδή για κάθε όροφο), ή και με δύο (δηλαδή χωριστά για τα κατακόρυφα στοιχεία και χωριστά για τα οριζόντια), γεγονός που επηρεάζει καθοριστικά τον τρόπο όπλισης των στοιχείων και των λεπτομερειών τους.

Εφόσον ο τελικός στόχος είναι η παραγωγή, δηλαδή η υλοποίηση, ενός δομήματος και ο σχεδιασμός αποτελεί απλώς το πρώτο στάδιο της παραγωγής του, γίνεται σαφές ότι πολλά βασικά στοιχεία του γνωστικού αντικείμενου της Αντισεισμικής Μηχανικής δεν αποτελούν παρά εργαλεία του σχεδιασμού. Η Τεχνική Σεισμολογία και η Εδαφοδυναμική, π.χ., έχουν κύριο στόχο τον καθορισμό της σεισμικής εδαφικής κίνησης, ή γενικότερα της σεισμικής δράσης, για την οποία θα σχεδιασθεί η κατασκευή. Η (Δυναμική) Ανάλυση των Κατασκευών στοχεύει απλώς στον προσδιορισμό της απόκρισης μιας καθορισμένης κατασκευής σε ορισμένη σεισμική δράση, ώστε, είτε να επιβεβαιωθεί ότι η συμπεριφορά είναι ικανοποιητική (ή έστω επαρκής), είτε να επιλεγούν οι διαστάσεις και οι οπλισμοί έτσι ώστε η συμπεριφορά αυτή να είναι η επιθυμητή. Στο στάδιο του σχεδιασμού ο Μηχανικός, παράλληλα με αυτά τα εργαλεία, χρησιμοποιεί και

την κρίση και την εμπειρία του, ώστε να παράγει τελικά ένα προϊόν (τη "Μελέτη") που να εγγυάται την ασφάλεια του τελικού προϊόντος (του δομήματος) και αυτών που το χρησιμοποιούν, κατά οικονομικό τρόπο. Η εμπειρία του Μελετητή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον επιτυχή σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών. Όχι μόνον επειδή μπορεί να του προσφέρει ερεθίσματα και ιδέες από προηγούμενα, ενδεχομένως παρόμοια, έργα, αλλά και επειδή μπορεί να αποτρέψει άστοχες επιλογές (που μπορεί να οδηγήσουν σε κατασκευαστικές δυσχέρειες ή σε ασυμβατότητες με την αρχιτεκτονική ή Η/Μ μελέτη), ή ακόμα και σφάλματα.

Με ελάχιστες εξαιρέσεις (Ιαπωνία, Καλιφόρνια), διεθνώς η τεχνολογία σχεδιασμού δομημάτων έναντι σεισμού είναι θέμα των τριών τελευταίων δεκαετιών του 20ου αιώνα. Στο διάστημα αυτό η εξέλιξη των γνώσεων, της τεχνικής και των Κανονισμών για τις αντισεισμικές κατασκευές ήταν, και εξακολουθεί να είναι, ραγδαία. Ως αποτέλεσμα, τα δομήματα που σχεδιάζονται σήμερα στην Ελλάδα και σε όλες τις τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες του κόσμου, χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας έναντι σεισμού, σε σχέση με τις προγενέστερες. Όμως:

- το υψηλότερο σημερινό επίπεδο ασφάλειας συνοδεύεται από σημαντική αύξηση του κόστους,
- η αποτελεσματικότητα ή όχι των τεχνικών και των Κανονισμών που εφαρμόζουμε σήμερα και η τυχόν ανάγκη αναθεωρήσεων θα κριθεί μόνο σε μελλοντικούς ισχυρούς σεισμούς, οι οποίοι - ευτυχώς - είναι σπάνιοι, και
- οι επιστημονικές γνώσεις στο αντικείμενο αυτό εξελίσσονται συνεχώς.

Για τους λόγους αυτούς είναι εξίσου βέβαιο ότι, παρά το γεγονός ότι σήμερα θεωρούμε ικανοποιητικό το επίπεδο ασφάλειας των νέων έργων, σε λίγες δεκαετίες ο αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών θα είναι αρκετά διαφορετικός από το σημερινό. Οι διαφορές θα είναι μάλλον προς την κατεύθυνση της επίτευξης του ίδιου (ή και υψηλότερου) επιπέδου ασφαλείας με χαμηλότερο κόστος και με χρήση μεθόδων που θα είναι λιγότερο εμπειρικές και θα στηρίζονται περισσότερο στη λογική και στην επιστήμη απ' ό,τι οι σημερινές. Το βασικό όχημα αυτών των εξελίξεων θα είναι ασφαλώς οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί, και ιδιαίτερα αυτοί των περισσότερο προηγμένων στον τομέα αυτό περιοχών του πλανήτη, δηλαδή των ΗΠΑ, των χωρών της Ευρωπαϊκής Τυποποίησης (CEN) και της Ιαπωνίας.

Η ιδιαίτερη σημασία των Κανονισμών για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οφείλεται στο ότι, σε αντίθεση με το τι συμβαίνει σε άλλα αντικείμενα του Πολιτικού Μηχανικού, όπως

τα Υδραυλικά Έργα, η Τεχνολογία Περιβάλλοντος, η ακόμα και η Ανάλυση των Κατασκευών, για τα οποία οι διαθέσιμες σε επιστημονικά συγγράμματα και άλλα τεχνικά κείμενα γνώσεις επαρκούν γενικώς για την τεχνικά άρτια και τεκμηριωμένη αντιμετώπιση και επίλυση των διαφόρων θεμάτων, ο σχεδιασμός των κατασκευών, και ιδιαίτερα ο αντισεισμικός, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε απλοποιητικές και μερικές φορές εμπειρικές προσεγγίσεις, που δεν διαθέτουν πλήρη επιστημονική τεκμηρίωση. Μέσω του Αντισεισμικού Κανονισμού η Πολιτεία προδιαγράφει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ασφάλεια και την ικανοποιητική συμπεριφορά των δομημάτων έναντι σεισμού, και δίνει τεχνικούς κανόνες και οδηγίες για την ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών, κανόνες και οδηγίες που συνήθως στηρίζονται στις απλοποιητικές προσεγγίσεις που προαναφέρθηκαν. Με τον τρόπο αυτό η Πολιτεία αναλαμβάνει και την ευθύνη για τις (σπάνιες) περιπτώσεις που, παρά την πιστή εφαρμογή των κανόνων και οδηγιών του Κανονισμού, η σεισμική συμπεριφορά δεν θα είναι τελικά ικανοποιητική, είτε επειδή ο σεισμός ήταν ισχυρότερος από αυτόν που προδιαγράφει ο Κανονισμός, είτε επειδή οι απλοί και προσεγγιστικοί κανόνες του τελευταίου μπορεί να είναι σε ορισμένες περιπτώσεις ανεπαρκείς. Ακριβώς λόγω της προσεγγιστικής και ημι-εμπειρικής φύσεως των κανόνων αυτών, οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί αναθεωρούνται ως προς αυτούς συχνά. Για το λόγο αυτό, και παρά την εξαιρετική σημασία των Κανονισμών για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, το παρόν βοήθημα για τον αντισεισμικό σχεδιασμό δομημάτων σκυροδέματος δεν εστιάζεται στις διατάξεις των σύγχρονων διεθνών Αντισεισμικών Κανονισμών. Αντίθετα, στοχεύει στο να αναπτύξει την κρατούσα σήμερα φιλοσοφία για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, να δώσει τις θεμελιώδεις γνώσεις που απαιτούνται γι' αυτόν και να προετοιμάσει τον αναγνώστη για τις διαφαινόμενες για τα επόμενα χρόνια σχετικές εξελίξεις.

Η διαδικασία του σχεδιασμού ή μελέτης ενός αντισεισμικού δομήματος από οπλισμένο σκυρόδεμα περιλαμβάνει τέσσερις διακριτές φάσεις:

- A. Τη φάση της αρχικής σύλληψης ή μόρφωσης (conceptual design) του δομήματος, που περιλαμβάνει την επιλογή του τύπου και της γεωμετρίας του δομικού συστήματος (structural system) ανάληψης των σεισμικών και των άλλων δράσεων, και έναν πρώτο καθορισμό διαστάσεων των μελών του (sizing).
- B. Τη φάση της ανάλυσης, που συνίσταται στην εκτίμηση της έντασης και της παραμόρφωσης του δομικού συστήματος και των μελών του λόγω της σεισμικής δράσης σχεδιασμού μέσω υπολογισμών.

Γ. Τη φάση της διαστασιολόγησης (dimensioning, ή στις ΗΠΑ proportioning) των δομικών μελών (structural members) για την ένταση που προκαλεί ο σεισμός σχεδιασμού. Η φάση αυτή περιλαμβάνει αφενός μεν τον έλεγχο ότι οι διαστάσεις των μελών οπλισμένου σκυροδέματος είναι επαρκείς για την ικανοποίηση όλων των σχετικών απαιτήσεων των Κανονισμών, αφετέρου δε τον υπολογισμό των οπλισμών τους.

Δ. Τη φάση καθορισμού των λεπτομερειών όπλισης (detailing) και σύνταξης των κατασκευαστικών σχεδίων (drafting) και των σχετικών οδηγιών και βοηθημάτων για την υλοποίησή τους (όπως προδιαγραφές υλικών, προμετρήσεις ποσοτήτων, κ.α.).

Το βασικό προϊόν της διαδικασίας του σχεδιασμού είναι αυτό της φάσης Δ, καθότι αυτό και μόνον χρειάζεται - αλλά και επαρκεί - για την υλοποίησή της. Έτσι το αποτέλεσμα της φάσης αυτής και μόνον, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως "Μελέτη". Τα αποτελέσματα των φάσεων Β και Γ, ή τουλάχιστον περίληψή τους, συνοδεύουν συνήθως αυτά της φάσης Δ, απλώς για λόγους τεκμηρίωσης και διευκόλυνσης του ελέγχου της "Μελέτης". Αντίθετα η φάση Α είναι προσωπική υπόθεση του Μηχανικού, και δεν περιλαμβάνεται στην τεκμηρίωση της μελέτης. Εντούτοις η φάση αυτή είναι η σημαντικότερη από τις τέσσερις, όχι μόνον επειδή τα αποτελέσματά της επηρεάζουν σημαντικά την πορεία και επιτυχή κατάληξη των επομένων τριών φάσεων, αλλά κυρίως - και ειδικά για τον αντισεισμικό σχεδιασμό - επειδή η ασφάλεια και η ικανοποιητική ή όχι συμπεριφορά του έργου σε μελλοντικό σεισμό εξαρτάται κυρίως από τις επιλογές που θα έχουν γίνει στη φάση της αρχικής σύλληψης ή μόρφωσής του. Καμία ανάλυση - όσο ακριβής και λεπτομερής και αν είναι - και καμία διαστασιολόγηση, δεν μπορεί να διορθώσει τις δυσμενείς επιπτώσεις που μπορεί να έχει μία ατυχής αρχική σύλληψη του δομήματος, στην ασφάλεια και οικονομικότητά του.

Το θέμα της αρχικής σύλληψης ή μόρφωσης του έργου με στόχο την ικανοποιητική σεισμική συμπεριφορά του αναλύεται στο Κεφάλαιο 3. Στις φάσεις Γ και Δ της διαδικασίας σχεδιασμού είναι αφιερωμένο το Κεφάλαιο 4. Το Κεφάλαιο 1 καλύπτει τις απαιτήσεις που θέτουν οι Κανονισμοί για τη σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών και διαγράφει τις γενικές αρχές και τη φιλοσοφία που διέπουν σήμερα και στο προβλεπτό μέλλον τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Τέλος το 2ο Κεφάλαιο δίνει το υπόβαθρο γνώσεων για το Κεφάλαιο 4, και συγκεκριμένα για τη συμπεριφορά των υλικών και των συνηθισμένων τύπων δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε ανακυκλιζόμενη ένταση και παραμόρφωση, όπως αυτή που προκαλείται από το σεισμό.

Για να μη δημιουργηθεί η εσφαλμένη εντύπωση - ή και αυταπάτη - ότι η ανάπτυξη των ικανοτήτων του Μηχανικού στον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι θέμα κυρίως γνώσεων, όπως αυτές που επιχειρείται να δωθούν εδώ, επαναλαμβάνεται ένα βασικό σημείο αυτού του Προλόγου: για τον αντισεισμικό σχεδιασμό η εμπειρία και η κρίση του Μηχανικού είναι εξίσου, αν όχι περισσότερο, σημαντικές από τις γνώσεις του. Η εμπειρία και η κρίση θα του επιτρέψουν να ξεχωρίσει τι είναι σημαντικό για τη σεισμική συμπεριφορά του δομήματος που σχεδιάζει και τι όχι, θα τον βοηθήσουν να διατηρήσει μία συνολική και σφαιρική εικόνα του αντικειμένου, αντί να χαθεί στις λεπτομέρειες, και θα τον προφυλάξουν από τυχόν παραλείψεις και σφάλματα. Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι για να μπορέσει ο Μηχανικός αφενός μεν να αξιοποιήσει την κρίση και τη δημιουργικότητά του, αφετέρου δε να αναπτύξει την ιδιαίτερη νοητική λειτουργία που απαιτεί η διαδικασία της σύνθεσης ή σχεδιασμού (δηλαδή την επεξεργασία πληροφοριών κατά τρόπο παράλληλο, με ταυτόχρονη θεώρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους), θα πρέπει ως μελετητής να διαθέτει χρονική άνεση, νηφαλιότητα και δυνατότητα συγκέντρωσης σ' όλη τη διάρκεια της σχετικής διαδικασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΟΜΗΜΑΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σκοπός του Κεφαλαίου 1 είναι να διατυπώσει τις απαιτήσεις που θέτουν οι σύγχρονοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί για τη σεισμική συμπεριφορά των έργων και να περιγράψει τις γενικές αρχές και τη φιλοσοφία που διέπουν σήμερα, αλλά και στο άμεσο μέλλον, τον αντισεισμικό σχεδιασμό δομημάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

1.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η βασική απαίτηση που κατά κανόνα θέτουν οι σημερινοί Κανονισμοί για τον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι η αποφυγή διακινδύνευσης της ζωής ή της σωματικής ακεραιότητας ανθρώπων, λόγω κατάρρευσης του συνόλου ή μέρους του δομήματος υπό το σεισμό σχεδιασμού. Για δομήματα συνήθους σημασίας η σεισμική δράση σχεδιασμού ορίζεται συμβατικά ως αυτή που έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια. Η πιθανότητα αυτή μεταφράζεται σε μέση περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού 475 χρόνια. Συνήθως, αλλά όχι πάντοτε, οι σύγχρονοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί θέτουν κάποια κριτήρια περιορισμού βλαβών σε φέροντα ή μή-φέροντα στοιχεία, για μία συχνότερη σεισμική δράση "λειτουργικότητας", που ορίζεται ως το 50% περίπου του σεισμού σχεδιασμού των 475 ετών.

Το βάρος που δίνεται στην απαίτηση αποφυγής κατάρρευσης οφείλεται στο ότι η Πολιτεία, η οποία θεσπίζει και τις βασικές απαιτήσεις σεισμικής συμπεριφοράς των έργων, είναι υπεύθυνη και μεριμνά κυρίως για την προστασία της ανθρώπινης ζωής. Παρά την αναμφισβήτητη σημασία της ανθρώπινης ζωής, η εμπειρία από τους σεισμούς της τελευταίας δεκαετίας του 20^{ου} αιώνα σε σχετικά αναπτυγμένες χώρες έδειξε ότι η αποφυγή κατάρρευσης δεν μπορεί να μονοπωλεί την προσοχή των Κανονισμών και, μέσω αυτών, του αντισεισμικού σχεδιασμού. Η εμπειρία αυτή δείχνει ότι σχετικά σύγχρονα δομήματα είναι επαρκώς αντισεισμικά ώστε να μην καταρρέουν εν όλω ή εν μέρει, μπορεί όμως να υποστούν βλάβες στο δομικό τους σύστημα υπό αρκετά ισχυρούς σεισμούς που να είναι τόσο σοβαρές ώστε να καθιστούν οικονομικά ασύμφορη την

επισκευή τους. Επιπλέον, συχνοί σεισμοί μικρής σχετικά έντασης μπορεί να προκαλέσουν στα μή-φέροντα στοιχεία συγχρόνων δομημάτων αρκετά εκτεταμένες βλάβες, ώστε η συνολική επιβάρυνση του ιδιοκτήτη, αλλά και της τοπικής ή εθνικής οικονομίας για την επισκευή τους, να είναι απαράδεκτα υψηλή. Περαιτέρω, στις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες η σοβαρότερη επίπτωση ενός μετρίου έως ισχυρού σεισμού φαίνεται να είναι όχι τα ανθρώπινα θύματα που προκαλεί, αλλά η προσωρινή αποδιοργάνωση ή και διακοπή της οικονομικής ζωής λόγω των βλαβών των υποδομών, ιδιωτικών ή δημοσίων. Χαρακτηριστικό Ελληνικό παράδειγμα αποτελεί η Καλαμάτα το 1986, όπου η παραγωγή και η λοιπή οικονομική δραστηριότητα στην πόλη είχαν ουσιαστικά μηδενισθεί για διάστημα μηνών. Σε διεθνές επίπεδο χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η σχεδόν πλήρης ακρήστευση της συγκοινωνιακής υποδομής και του λιμανιού του Kobe το 1995, καθώς και οι τεράστιες άμεσες ή έμμεσες οικονομικές επιπτώσεις στην περιοχή του Los Angeles από το σεισμό του Northridge στην Καλιφόρνια το 1994.

Για τους ανωτέρω λόγους τα τελευταία χρόνια εμφανίσθηκε στις ΗΠΑ, και επεκτάθηκε και σε άλλες περιοχές του κόσμου, μία τάση για την αντικατάσταση της μοναδικής ουσιαστικά σημερινής απαίτησης για αποφυγή κατάρρευσης υπό το σεισμό των 475 χρόνων, από ένα σύστημα απαιτήσεων ή στόχων για τη συμπεριφορά του δομήματος υπό ένα φάσμα σεισμών με διαφορετική ένταση και συχνότητα. Απαιτήσεις που έχουν προταθεί ως στόχοι για διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης είναι οι εξής:

- 1) Η συνέχιση της κανονικής λειτουργίας του δομήματος κατά τη διάρκεια του σεισμού (“Λειτουργικότητα κατά το σεισμό” - "operational" ή "functionality").
- 2) Η άμεση επαναφορά του δομήματος σε χρήση μετά το σεισμό, μετά από τυχόν προσωρινή διακοπή της λειτουργίας του (“άμεση χρήση” - "immediate occupancy").
- 3) Η αποφυγή βλαβών που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο έστω και μία ανθρώπινη ζωή και που δεν είναι οικονομικά επισκευάσιμες (“προστασία ζωής” ή - "life safety").
- 4) Η πάση θυσία αποφυγή της συνολικής κατάρρευσης, ή γενικότερα κατάρρευσης που μπορεί να προκαλέσει μεγάλο αριθμό θυμάτων, αδιαφορώντας για το αν το δόμημα θα είναι μετά επισκευάσιμο ή θα χρειασθεί να κατεδαφισθεί (“οιονεί κατάρρευση” - "collapse prevention" ή “near collapse”).

Οι ανωτέρω απαιτήσεις συμπεριφοράς ονομάζονται “στάθμες επιτελεστικότητας” (“performance levels”).

Για τα συνήθως σημασίας έργα η στάθμη επιτελεστικότητας “προστασία ζωής”, είναι

λογικό να τίθεται για το “σπάνιο” σεισμό των 475 χρόνων (με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια). Η ικανοποίηση της απαίτησης αυτής συνήθως εξασφαλίζει αυτόματα την αποφυγή κατάρρευσης του συνόλου (στάθμη επιτελεστικότητας “οιονεί κατάρρευσης”) κατά το “μέγιστο δυνατό” ή “εξαιρετικά σπάνιο” σεισμό που κρίνεται ότι μπορεί να πλήξει το έργο, ο οποίος έχει μέση περίοδο επανάληψης 1000 έως και 2500 χρόνια (πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια 5% ή 2% αντίστοιχα).

Η στάθμη επιτελεστικότητας “άμεση χρήση” μετά το σεισμό θεωρείται λογικό να τίθεται για τον “ενδεχόμενο” σεισμό με πιθανότητα υπέρβασης 20% έως 50% σε 50 χρόνια (σεισμός με μέση περίοδο επανάληψης 75 έως 225 χρόνια). Η στάθμη επιτελεστικότητας “λειτουργικότητα κατά το σεισμό” κρίνεται συνήθως κατάλληλη για το “συχνό” σεισμό, που έχει πιθανότητα υπέρβασης 50% έως και 85% σε 50 χρόνια (μέση περίοδος επανάληψης 25 έως 75 χρόνια).

- Από φυσική άποψη, *λειτουργικότητα κατά το σεισμό* ("operational") σημαίνει τα εξής:
 - Οι βλάβες στο *δομικό σύστημα* είναι ασήμαντες, περιορίζονται δηλαδή σε λεπτές ρωγμές, που μετά το σεισμό φαίνονται σαν τριχοειδείς. Η συμπεριφορά του δομικού συστήματος είναι ουσιαστικά ελαστική (κατά κανόνα δεν διαρρέουν οι ράβδοι οπλισμού), διατηρείται η αρχική αντοχή και δυσκαμψία του και δεν εμφανίζονται μόνιμες παραμορφώσεις. Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στην κορυφή του δομήματος δεν ξεπερνούν σημαντικά το 0.5% της απόστασης από τη βάση για πλαίσια δομικά συστήματα, ή το 0.25% αυτής για τοιχωματικά.
 - Οι βλάβες στα *μή-φέροντα στοιχεία κτιρίων* περιορίζονται σε ελαφρά ρηγμάτωση των τοιχοπληρώσεων και των επιχρισμάτων. Το κόστος των βλαβών αυτών δεν ξεπερνά γενικά το 10% του αρχικού κόστους κατασκευής των μη-φερόντων στοιχείων.
 - Οσον αφορά τη *χρήση* του έργου: Οι λειτουργίες που εξυπηρετούνται απ’ αυτό συνεχίζονται, έστω και με κάποια ποιοτική υποβάθμιση. Αν πρόκειται για κτίριο, εξακολουθεί να υπάρχει παροχή νερού, ηλεκτρικού, κ.λ.π., ενδεχόμενα από εφεδρικές πηγές (δεξαμενές, ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, κ.λ.π.) και λειτουργούν κανονικά όλες οι Η/Μ εγκαταστάσεις.
- Η *άμεση χρήση* μετά το σεισμό ("immediate occupancy") αντιστοιχεί στα εξής:
 - Το *δομικό σύστημα* εμφανίζει ελαφρές βλάβες, όχι όμως αισθητές παραμένουσες παραμορφώσεις. Για δομήματα οπλισμένου σκυροδέματος οι βλάβες αυτές μπορεί να

- περιλαμβάνουν: α) διάσπαρτες τριχοειδείς ρωγμές, αλλά και ορισμένες μεγαλύτερες, ανοίγματα μέχρι 1mm ή 2mm, β) τοπική αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης των οπλισμών, όχι όμως εκτεταμένη αστοχία και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος σε θλίψη, γ) ενδείξεις ελαφράς ολίσθησης σε αρμούς διακοπής εργασίας τοιχωμάτων δυσκαμψίας. Τέτοιες βλάβες υποδηλώνουν διαρροή του χάλυβα κατά το σεισμό σε ορισμένες θέσεις ή και μικρή ολίσθηση των οπλισμών, εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του μή-περισφιγμένου σκυροδέματος έξω από τους συνδετήρες, όχι όμως και υπέρβαση της συμβατικής βράχυνσης αστοχίας του (δηλαδή του 0.35%). Μπορεί να υποδηλώνουν επίσης στιγμιαίες οριζόντιες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού που να φθάνουν και στο ένα-τρίτο αυτών που αντιστοιχούν στην οριακή αντοχή του δομικού συστήματος (δηλαδή στη μέγιστη οριζόντια δύναμη που μπορεί αυτό να αναπτύξει). Οι μετακινήσεις αυτές μπορεί να αντιστοιχούν σε ανηγμένη γωνιακή παραμόρφωση του δομήματος καθ' ύψος (λόγος οριζόντιας μετακίνησης, δ , προς ύψος, H_{tot} , βλ. Σχ. 1.2) περίπου 1% για πλαισιακά δομικά συστήματα, ή 0.5% για τοιχωματικά. Παρά το γεγονός, όμως, ότι το δομικό σύστημα βγήκε από τη γραμμική-ελαστική περιοχή συμπεριφοράς, διατηρεί μετά το σεισμό την αρχική αντοχή και δυσκαμψία του.
- Τα *μή-φερόντα στοιχεία κτιρίων* εμφανίζουν ελαφρές βλάβες και συγκεκριμένα: α) αποκολλήσεις τοιχοπληρώσεων από το δομικό σύστημα και ρηγματώσεις πλάτους μέχρι και 3mm β) τοπικές αποκολλήσεις επιστρώσεων και επικαλύψεων τοίχων (πλακιδίων, κ.α.) και επιχρισμάτων (ιδίως στις γωνίες ανοιγμάτων) γ) μετακινήσεις από τη θέση τους κάποιου ποσοστού φατνωμάτων ψευδοροφών και πτώση ενός μικρού ποσοστού τους και δ) θραύση κάποιων υαλοπινάκων. Το κόστος των βλαβών αυτών εκτιμάται ότι φθάνει μέχρι και το 30% της αρχικής αξίας των μη-φερόντων στοιχείων.
 - Δεν συμβαίνουν πτώσεις ή ανατροπές H/M εξοπλισμού κτιρίων. Όμως, οι H/M εγκαταστάσεις ενδέχεται να μη λειτουργούν μετά το σεισμό λόγω εσωτερικής μηχανικής βλάβης ή λόγω διακοπής των παροχών ηλεκτρικού ή νερού. Το τυχόν σύστημα πυρόσβεσης παραμένει σε λειτουργία, οι δε ανελκυστήρες λειτουργούν κανονικά μετά την αποκατάσταση της ηλεκτρικής παροχής. Επιτραπέζιος εξοπλισμός και μη στερεωμένα αντικείμενα μπορεί να πέσουν.
 - Η πιθανότητα σοβαρών τραυματισμών λόγω των βλαβών είναι πολύ μικρή. Οι λειτουργίες που εξυπηρετούνται από το έργο μπορεί να διακοπούν προσωρινά, όμως

- μπορούν να συνεχισθούν μετά την επισκευή-επαναλειτουργία των τυχόν Η/Μ εγκαταστάσεων και τις απαραίτητες εργασίες καθαριότητας.
- Ενδέχεται να απαιτηθούν επισκευές του δομικού συστήματος και/ή των μή-φερόντων στοιχείων. Οι επισκευές όμως αυτές μπορούν να γίνουν σε εύθετο χρόνο μετά την επαναλειτουργία του κτιρίου.
- Η *προστασία ζωής* ("life-safety") σημαίνει αναλυτικότερα τα εξής:
 - Το *δομικό σύστημα* έχει υποστεί σοβαρές βλάβες, διαθέτει όμως σημαντικό περιθώριο ασφαλείας έναντι μερικής ή ολικής κατάρρευσης, ακόμα και κατά τη μετασεισμική περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει επαρκής αντοχή για τα κατακόρυφα φορτία και ότι όλοι οι όροφοι διαθέτουν σημαντική παραμένουσα αντοχή και δυσκαμψία έναντι οριζοντίων φορτίων. Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις δομημάτων οπλισμένου σκυροδέματος κατά το σεισμό αντιστοιχούν σε γωνιακή παραμόρφωση (οριζόντια μετακίνηση δια του ύψους) 2% περίπου σε πλαίσιακά δομικά συστήματα, ή μέχρι 1% σε τοιχωματικά, και σε παραμένουσες παραμορφώσεις 1% ή 0.5%, περίπου, αντίστοιχα. Γενικά οι μετακινήσεις αυτές δεν ξεπερνούν τα δύο-τρίτα αυτών που αντιστοιχούν στην οριακή αντοχή του δομικού συστήματος. Σε δομήματα οπλισμένου σκυροδέματος οι βλάβες συνίστανται σε: α) σοβαρή καμπτική ή και διατμητική (λοξή) ρηγμάτωση πλάτους 2mm έως 3mm σε δοκούς, υποστυλώματα, τοιχώματα, κόμβους και τυχόν κοντά υποστυλώματα β) αποφλοιώση σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών σε πολλές θέσεις, αλλά περιορισμένες τοπικές αστοχίες (αποδιοργάνωση) του σκυροδέματος σε θλίψη, που εντοπίζονται στα άκρα δοκών, υποστυλωμάτων μικρής σημασίας, και κρυφών υποστυλωμάτων τοιχωμάτων γ) λυγισμό (αλλά όχι θραύση) διαμήκων ράβδων σε περιορισμένο αριθμό άκρων δοκών, υποστυλωμάτων ή τοιχωμάτων, ιδίως σε θέσεις απώλειας του σκυροδέματος της επικάλυψης ή και τοπικής θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος δ) οριζόντια ολίσθηση σε αρμούς διακοπής εργασίας σε περιορισμένο αριθμό τοιχωμάτων ε) τοπικές αστοχίες στις γωνίες και στην περίμετρο τυχόν ανοιγμάτων σε τοιχώματα στ) αποδιοργάνωση σκυροδέματος δοκών σύζευξης τοιχωμάτων ζ) διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ πεδίων μέχρι 0.1% περίπου της απόστασής τους, και η) ενδεχόμενη ρηγμάτωση πατωμάτων, ιδίως κατ' επέκταση ρωγμών σε δοκούς ή κόμβους.
 - Όσον αφορά τα *μή-φέροντα στοιχεία κτιρίων*, οι τοιχοπληρώσεις υφίστανται βαριές βλάβες, και συγκεκριμένα εκτεταμένη ρηγμάτωση και τοπική αστοχία σε θλίψη, ιδίως

- κοντά στις γωνίες των πλαισίων που τις περιβάλλουν, μένουν όμως στη θέση τους. Δεν προκαλούνται ανατροπές και πτώσεις τοίχων ή στηθαίων, που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Πολλά κουφώματα δεν ανοίγουν μετά το σεισμό και μεγάλο ποσοστό υαλοστασίων έχει σπάσει. Οι επικαλύψεις τοίχων και τα επιχρίσματα παρουσιάζουν εκτεταμένες αποκολλήσεις και πτώσεις. Το ίδιο ισχύει και για φατνώματα ψευδοροφών. Διακοσμητικά οικοδομικά στοιχεία καταστρέφονται και πιθανόν πέφτουν. Σε οικονομικούς όρους, οι βλάβες φθάνουν μέχρι και το 50% της αρχικής αξίας των μη-φερόντων στοιχείων.
- Οι Η/Μ εγκαταστάσεις κτιρίων και τα δίκτυα υφίστανται σοβαρές βλάβες και τίθενται εκτός λειτουργίας. Η/Μ εξοπλισμός μπορεί να μετακινηθεί ή και να ανατραπεί, καταστρέφοντας τη σύνδεση με τα δίκτυα. Οι ανελκυστήρες δεν λειτουργούν, ούτε το σύστημα πυρασφάλειας. Επιτραπέζιος εξοπλισμός και αντικείμενα σε ράφια πέφτουν, αλλά βαρειά τεμάχια επίπλωσης, όπως ντουλάπια, κ.λ.π., δεν ανατρέπονται.
 - Παρά το ότι είναι πιθανό να προκληθούν σωματικές βλάβες κατά τη διάρκεια του σεισμού, η πιθανότητα θανατηφόρων τραυματισμών εξαιτίας των βλαβών στο δομικό σύστημα ή στον οργανισμό πλήρωσης είναι χαμηλή.
 - Η πιθανότητα μερικής ή ολικής κατάρρευσης από μετασεισμό είναι μικρή, αλλά χρειάζεται υποστήριξη ή έστω πρόχειρη επισκευή, προτού επανέλθει το κτίριο σε χρήση.
 - Το αν θα επισκευασθεί τελικά το κτίριο ή θα κατεδαφισθεί, είναι θέμα τεχνικο-οικονομικό (ενδέχεται δηλαδή το κόστος επισκευής να είναι απαγορευτικό και να συμφέρει καλύτερα η ανακατασκευή).
- Τέλος, η απαίτηση *οιονεί κατάρρευση* ("collapse prevention" ή "near collapse") σημαίνει ότι:
 - Το *δομικό σύστημα* έχει υποστεί βαρύτερες βλάβες, εξ' αιτίας των οποίων η αντοχή και η δυσκαμψία του έναντι οριζοντίων δράσεων έχουν μειωθεί σε μικρό ποσοστό της αρχικής τους τιμής. Όμως διατηρεί την αντοχή του έναντι κατακορύφων φορτίων, έστω με μικρό περιθώριο ασφάλειας (δηλαδή οριακά). Ενδέχεται τα κατακόρυφα στοιχεία να έχουν πάρει κλίση, μέχρι και 4% για πλαισιακά δομικά συστήματα οπλισμένου σκυροδέματος, ή 2% για τοιχωματικά, τιμές δηλαδή που πλησιάζουν ή και ξεπερνούν αυτές στις οποίες αναπτύσσεται η οριακή αντοχή του δομήματος. Οι βλάβες στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής: α)

- εκτεταμένη ρηγματώση με διαμπερείς ρωγμές πλάτους αρκετών mm και ενδεχόμενη θραύση των οπλισμών στις θέσεις των ρωγμών (ιδίως οπλισμών διάτμησης σε λοξές ρωγμές)· β) εκτεταμένη απώλεια του σκυροδέματος επικάλυψης οπλισμών και σε ορισμένες θέσεις πλήρη αστοχία του σκυροδέματος σε θλίψη (κατακερματισμός, αποδιοργάνωση, δημιουργία κενών), ιδιαίτερα σε άκρα δοκών και υποστυλωμάτων, σε μεγάλο τμήμα του μήκους κοντών υποστυλωμάτων και στα κρυφά υποστυλώματα της περιοχής βάσης τοιχωμάτων· γ) λυγισμό (ενίοτε με συνακόλουθη θραύση λόγω κάμψης και αναδίπλωσης) ράβδων οπλισμού στο κάτω πέλμα δοκών, στις ακραίες περιοχές υποστυλωμάτων και στα κρυφά υποστυλώματα στη βάση τοιχωμάτων· δ) αισθητή μεταβολή μήκους στοιχείων (μήκυνση δοκών, βράχυνση υποστυλωμάτων)· ε) πλήρη διάλυση ορισμένων κόμβων (κυρίως εξωτερικών) και δοκών σύζευξης τοιχωμάτων· στ) διαμπερείς ρηγματώσεις ή και τοπικές αστοχίες σκυροδέματος σε πλάκες πατωμάτων, και ζ) ορατές καθιζήσεις πεδίων και κλίση του δομήματος ως προς την κατακόρυφο εξαιτίας διαφορικών καθιζήσεων.
- Οσον αφορά τα *μή-φέροντα στοιχεία κτιρίων*, οι τοιχοπληρώσεις υφίστανται βαριά διαμπερή ρηγματώση ή και τοπική θλιπτική αστοχία, που οδηγεί κάποιες φορές σε απόσπαση τμήματος ή του συνόλου φατνωμάτων τοιχοπληρώσεων από το περιβάλλον πλαίσιο και ανατροπή/πτώση τους. Στηθαία χωρίς εγκάρσια στήριξη ανατρέπονται. Ολα σχεδόν τα τζάμια θραύονται και πολλά κουφώματα δεν λειτουργούν μετά το σεισμό. Οι επικαλύψεις και τα επιχρίσματα τοίχων και οροφών και οι ψευδοροφές έχουν αποκολληθεί και πέσει, σχεδόν στο σύνολό τους. Πόρτες, διάδρομοι και κλιμακοστάσια έχουν μπλοκαρισθεί από μπάζα. Το κόστος των βλαβών αυτών μπορεί να φθάνει μέχρι και το 80% του αρχικού κόστους των μη-φερόντων στοιχείων.
 - Οι Η/Μ εγκαταστάσεις κτιρίων και ο εξοπλισμός παθαίνουν σοβαρές βλάβες και τίθενται εκτός λειτουργίας. Βαριά τεμάχια Η/Μ εξοπλισμού αποσπώνται από τις στηρίξεις τους και ανατρέπονται ή πέφτουν. Βαριά έπιπλα μετακινούνται και ανατρέπονται.
 - Το δόμημα δίνει την εντύπωση ότι μόλις στέκεται και ότι είναι στα πρόθυρα της κατάρρευσης λόγω κατακορύφων φορτίων και των επιρροών 2ας τάξεως που αυτά δημιουργούν. Επισημαίνεται βεβαίως ότι υπάρχει τεράστια αβεβαιότητα ως προς τα περιθώρια έναντι κατάρρευσης ενός δομήματος με βαριές βλάβες και ότι η δυνατότητα ανακατανομής των κατακορύφων φορτίων και αλλαγής του τρόπου λειτουργίας του δομικού συστήματος πολλές φορές εκπλήσσει. Επί παραδείγματι,

μετά την απώλεια αρκετών γειτονικών υποστυλωμάτων του ισογείου, εσωτερικών ή εξωτερικών, οι όροφοι μπορούν να γεφυρώσουν το κενό που δημιουργείται, λειτουργώντας ως αμφιέριστες δοκοί ή πρόβολοι, με τα οριζόντια στοιχεία (δοκούς-πλάκες) σαν εφελκούμενα ή θλιβόμενα πέλματα και τις τοιχοπληρώσεις σαν κορμούς σε διάτμηση. Επιπλέον, ένα κατακόρυφο μέλος με βαριές βλάβες που έχουν οδηγήσει σε απώλεια της αντοχής του έναντι οριζοντίων δράσεων (δηλαδή σε ροπή και τέμνουσα), διατηρεί μεγάλο ποσοστό της αντοχής του σε κεντρική θλίψη (π.χ. το 40-50%) και έχει δυνατότητα να φέρει την αξονική δύναμη λόγω μονίμων και οιονει-μονίμων δράσεων. Έτσι είναι πρακτικά αδύνατο να προσδιορισθεί το όριο πέραν από το οποίο το δόμημα θα καταρρεύσει, ιδίως αν έχει αυξημένη υπερστατικότητα.

- Κατά πάσα πιθανότητα το δόμημα δεν θα είναι επισκευάσιμο και θα χρειασθεί να κατεδαφισθεί. Με κατάλληλη προσωρινή στερέωση μπορεί να είναι επισκέψιμο, ώστε να αφαιρεθεί τυχόν εξοπλισμός και/ή κινητά περιουσιακά στοιχεία.
- Το βασικό στοιχείο της συμπεριφοράς είναι ότι, με την ενδεχόμενη εξαίρεση θανατηφόρων τραυματισμών από πτώση τοίχων, στηθαίων, επιχρισμάτων ή και βαρέων αντικειμένων και εξοπλισμού, δεν υπάρχουν ανθρώπινα θύματα και οι τυχόν χρήστες μπορούν να εγκαταλείψουν το κτίριο πριν τους μετασεισμούς.

Είναι προφανές ότι το επιθυμητό είναι να ικανοποιούνται όλες οι παραπάνω στάθμες επιτελεστικότητας για τους αντίστοιχους σεισμούς, δηλαδή το “συχνό” των 25 έως 75 χρόνων, τον “ενδεχόμενο” των 75 έως 225 χρόνων, το “σπάνιο” των 475 και το “μέγιστο δυνατό” των 1000 έως 2500 χρόνων. Μάλιστα θεωρείται πολύ πιθανό ότι, εφόσον αναπτυχθούν αντίστοιχα κριτήρια για την ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών, στο μεσοπρόθεσμο μέλλον οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί θα ενθαρρύνουν, ή ακόμη και θα ζητούν, τον έλεγχο ότι πληρούνται και οι τέσσερις αυτές στάθμες επιτελεστικότητας. Προφανή παραδείγματα τέτοιων κριτηρίων είναι τα εξής:

- Κριτήριο για την αποφυγή ή τον περιορισμό των βλαβών σε μη-φέροντα στοιχεία, όπως οι τοιχοπληρώσεις τα υαλοστάσια και τα διαχωριστικά, ως μέρος των απαιτήσεων πλήρους λειτουργικότητας ή και άμεσης χρήσης, είναι ο περιορισμός του μεγέθους της γωνιακής παραμόρφωσής τους, όπως αυτή προκύπτει από τις (οιονει-ελαστικές) σεισμικές μετακινήσεις (οριζόντιες και κατακόρυφες) του δομικού συστήματος.
- Κριτήριο για την αποφυγή βλαβών σε H/M εγκαταστάσεις και εξοπλισμό κτιρίων και

για την αποφυγή πτώσεων αντικειμένων, στηθαίων, κ.α., ως τμήμα των απαιτήσεων πλήρους λειτουργικότητας ή και άμεσης χρήσης, είναι το μέγεθος των απολύτων επιταχύνσεων που θα τους μεταβιβάσει το δόμημα στις θέσεις στήριξής τους, με την οιονεί-ελαστική απόκρισή του.

- Ως κριτήριο για τον περιορισμό των βλαβών στο δομικό σύστημα σε όρια που δεν μειώνουν την αντοχή και τη δυσκαμψία του και δεν δημιουργούν ανάγκη επισκευών κατά την απαίτηση άμεσης χρήσης, μπορεί να υιοθετηθεί η εξάντληση των συμβατικών ορίων αστοχίας του σκυροδέματος και του χάλυβα σε όρους παραμορφώσεων (π.χ. 0.35% ή 0.3% βράχυνση για το σκυρόδεμα κατά τους Ευρωπαϊκούς ή τους Αμερικανικούς Κανονισμούς αντίστοιχα, και 1% μήκυνση για το χάλυβα κατά ορισμένους Κανονισμούς όπως ο ΕΚΟΣ 2000, ή χάριν απλότητας χωρίς όριο κατά τους περισσότερους), με θεώρηση όμως ότι τα υλικά λειτουργούν με τις ονομαστικές (ή χαρακτηριστικές) αντοχές τους, χωρίς δηλαδή συντελεστή ασφαλείας υλικού, γ_m .
- Ως κριτήρια για την οιονεί κατάρρευση ("collapse prevention") ή για την προστασία ζωής ("life-safety") μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υπέρβαση της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί περίπου σε αστοχία των δομικών μελών (ουσιαστική απώλεια φέρουσας ικανότητας έναντι κατακορύφων φορτίων), ή αντίστοιχα στην οριακή αντοχή τους (μέγιστη τιμή της αντίστασης), λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τις επιρροές 2ας τάξεως.

Απ' όλα τα ανωτέρω κριτήρια οι σημερινοί Κανονισμοί χρησιμοποιούν για τα κτίρια μόνον αυτό του περιορισμού της γωνιακής παραμόρφωσης του οργανισμού πλήρωσης, για την ικανοποίηση μέρους της απαίτησης άμεσης χρήσης. Η πλήρωση του κριτηρίου αυτού καθορίζει, κατά κανόνα, τις διαστάσεις των διατομών των μελών του δομικού συστήματος. Για δε την ικανοποίηση της απαίτησης προστασίας ζωής, οι σύγχρονοι Κανονισμοί χρησιμοποιούν ως κριτήριο τον περιορισμό του μεγέθους των παραμορφώσεων των πλάστιμων μελών σε επίπεδο διατομής. Ο περιορισμός όμως αυτός δεν γίνεται άμεσα, λεπτομερειακά και με διαφανή τρόπο, αλλά έμμεσα και για το σύνολο του δομικού συστήματος αντί για τα επιμέρους μέλη του, μέσω της γνωστής έννοιας του συνολικού συντελεστή συμπεριφοράς q (ή συντελεστή μείωσης των δυνάμεων, R , κατά τους Αμερικανικούς Κανονισμούς) και των κατασκευαστικών διατάξεων (λεπτομερειών όπλισης των μελών). Η χρήση του συντελεστή q (ή R) στα πλαίσια των σύγχρονων Κανονισμών και η αιτιολόγησή της παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην Ενότητα 1.2 παρακάτω.

Με το να χρησιμοποιούν δύο μόνον κριτήρια για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, δηλαδή αφενός μεν τον περιορισμό των μετακινήσεων για τον έλεγχο των βλαβών στον οργανισμό πλήρωσης κτιρίων, αφετέρου δε τη διαστασιολόγηση των δομικών μελών για οριακές αντοχές συμβατές με το συνολικό συντελεστή συμπεριφοράς q (ή R), οι σύγχρονοι Κανονισμοί έμμεσα υπονοούν ότι η ικανοποίηση των δύο αυτών κριτηρίων εξασφαλίζει την ικανοποίηση όλων των τεσσάρων σταθμών επιτελεστικότητας για τους αντίστοιχους σεισμούς. Αυτό είναι επιθυμητό, αλλά καθόλου βέβαιο. Για να εξακριβωθεί το αν η πλήρωση ενός κριτηρίου ή μίας στάθμης επιτελεστικότητας κατά κανόνα υπερκαλύπτει και κάποια άλλη, χρειάζεται να γίνουν εκτεταμένες και λεπτομερείς μελέτες και εφαρμογές, που να καλύπτουν το σύνολο σχεδόν των συνήθων περιπτώσεων της πράξης. Επιπλέον όμως η σεισμικότητα της περιοχής επηρεάζει σημαντικά ένα τέτοιο συμπέρασμα, καθότι σε δύο τεκτονικά διαφορετικές περιοχές η σχέση της έντασης (π.χ. της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης) των σεισμών που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές απαιτήσεις, π.χ. των σεισμών των 75 και των 475 χρόνων, δεν είναι η ίδια. Έτσι μπορεί στη μία περιοχή η ικανοποίηση της επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας για το σεισμό των 75 χρόνων να υπερκαλύπτει αυτόματα αυτήν που αναφέρεται στο σεισμό των 475 χρόνων, ενώ στην άλλη περιοχή αυτό μπορεί να μην ισχύει.

Το συμπέρασμα είναι, λοιπόν, ότι αν η μελλοντική κατεύθυνση του αντισεισμικού σχεδιασμού είναι προς την ικανοποίηση διαφόρων σταθμών επιτελεστικότητας για διάφορες στάθμες σεισμικού κινδύνου, αυτό θα είναι πολύ εις βάρος της απλότητας της διαδικασίας σχεδιασμού. Σ' ένα τέτοιο ενδεχόμενο μελλοντικό σύστημα η διαδικασία του σχεδιασμού θα γίνεται αναγκαστικά σε φάσεις και πιθανόν θα περιλαμβάνει επαναλήψεις μεταξύ φάσεων. Συγκεκριμένα, θα γίνεται ο λεπτομερειακός σχεδιασμός του δομήματος με βάση τη στάθμη επιτελεστικότητας και τα κριτήρια που θα κρίνονται ως κατά πάσα πιθανότητα καθοριστικά, και κατόπιν θα ελέγχεται με λεπτομέρεια και ακρίβεια το αν το έτσι σχεδιασμένο δόμημα πληροί τις άλλες στάθμες επιτελεστικότητας για τις αντίστοιχες στάθμες σεισμικού κινδύνου. Αν όχι, θα γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές και οι έλεγχοι θα επαναλαμβάνονται. Αυτό σημαίνει ότι μία μόνο φάση του σχεδιασμού (η πρώτη) θα έχει τη συνήθη μορφή του καθορισμού του οπλισμού με βάση κάποια μεγέθη έντασης ή παραμόρφωσης που έχουν προκύψει από ανάλυση. Στη συνέχεια θα γίνεται ουσιαστικά ανάλυση του ήδη καθορισμένου σε λεπτομέρεια δομήματος για λόγους "αποτίμησης" ("evaluation"), δηλαδή για να ελεγχθεί αν είναι ικανοποιητική ή όχι η σεισμική του συμπεριφορά. Αυτού του τύπου οι αναλύσεις πιθανόν να είναι μή-γραμμικές, στατικές ή

δυναμικές, αντί των γραμμικών-ελαστικών που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον υπολογισμό της έντασης για την οποία θα διαστασιολογηθεί το δόμημα.

1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΗΜΑΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

Κατά κανόνα οι σύγχρονοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί λαμβάνουν ως σεισμική δράση σχεδιασμού συνήθων δομημάτων αυτήν που έχει μέση περίοδο επανάληψης 475 χρόνια, δηλαδή πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια. Στις περισσότερες σεισμικές περιοχές του κόσμου η σεισμική δράση των 475 χρόνων είναι τόσο ισχυρή, που αν απαιτούσαμε ελαστική απόκριση σ' αυτήν το δομικό σύστημα θα χρειαζόταν να σχεδιασθεί για οριζόντιες δυνάμεις με μέγεθος της τάξεως του 50% του συνολικού βάρους του δομήματος. Παρόλο που κάτι τέτοιο είναι τεχνικά εφικτό, είναι εξαιρετικά αντιοικονομικό για το δομικό σύστημα και για τη θεμελίωσή του και δυσμενές για τη λειτουργία του δομήματος κατά το σεισμό και για την προστασία των αντικειμένων και των χρηστών που φιλοξενεί. Και τούτο καθότι, αν η απόκριση είναι ελαστική, οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στις διάφορες στάθμες του δομήματος και μεταβιβάζονται στους χρήστες και τα διάφορα αντικείμενα είναι πολύ υψηλές.

Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητο να σχεδιασθεί το δομικό σύστημα για να παραμείνει ελαστικό υπό το σεισμό σχεδιασμού του, καθότι ο σεισμός είναι μία δυναμική δράση που αντιπροσωπεύει για το δόμημα την απαίτηση να ανταπεξέλθει όχι σ' ένα σύστημα επιβεβλημένων δυνάμεων, αλλά σε μία ποσότητα ενέργειας ταλάντωσης που εισάγεται σ' αυτό από το έδαφος καθώς και σε κάποιες επιβεβλημένες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί, παλιοί, σύγχρονοι και μελλοντικοί, επιτρέπουν να αναπτυχθούν κατά το σεισμό σχεδιασμού σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις, αρκεί αυτές να μη θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα των μελών και του συνόλου του δομικού συστήματος.

Για λόγους παράδοσης αλλά και ευκολίας (η ισορροπία δυνάμεων είναι οικεία στο Μηχανικό και επιτρέπει άμεση κατάστρωση των σχετικών εξισώσεων), ο αντισεισμικός σχεδιασμός γίνεται και σήμερα με βάση τις δυνάμεις. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα μέλη διαστασιολογούνται έναντι σεισμού με βάση την οριακή κατάσταση αστοχίας για να αντέξουν τις εσωτερικές δυνάμεις (ένταση) που υπολογίζονται από γραμμική-ελαστική ανάλυση για ορισμένες οριζόντιες δυνάμεις. Αυτές οι οριζόντιες δυνάμεις

προκύπτουν από το φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού, το οποίο ουσιαστικά προκύπτει ως υποπολλαπλάσιο του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων του σεισμού σχεδιασμού για απόσβεση 5%. Ο διαιρέτης του ελαστικού φάσματος για να προκύψει το φάσμα σχεδιασμού είναι ο γνωστός “συντελεστής συμπεριφοράς” q των Ευρωπαϊκών Κανονισμών και του Ελληνικού, ή “μείωσης των δυνάμεων” R των Αμερικανικών. (Για την ακρίβεια, στο τμήμα του φάσματος από $T=0$ μέχρι την αρχή του τμήματος σταθερών επιταχύνσεων η διαίρεση γίνεται με κάτι μικρότερο από q , βλ. και εξ.(1.2)). Στη συνέχεια τα μέλη του δομικού συστήματος που είναι από τη φύση τους πλάστιμα (δηλαδή είναι σε θέση να αναπτύξουν σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις, ακόμα και ανακυκλιζόμενες, χωρίς να μειωθεί ουσιαστικά η αντοχή τους), διαστασιοποιούνται για τις εσωτερικές δυνάμεις που προκύπτουν με ελαστική ανάλυση από το (μειωμένο κατά q ή R) φάσμα και διαμορφώνονται κατασκευαστικά έτσι ώστε να μπορούν να αντέξουν με επαρκή ασφάλεια τις ανελαστικές παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στην τιμή του q (ή R) που χρησιμοποιήθηκε.

Η αντιστοίχιση των ανελαστικών παραμορφώσεων μελών με το συντελεστή q (ή R) ξεκινά κατά κανόνα από τον δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_δ , στην κορυφή του δομικού συστήματος, ή στο σημείο εφαρμογής της συνισταμένης των οριζοντίων σεισμικών δυνάμεων. Αυτός ο δείκτης πλαστιμότητας, μ_δ , ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της οριζόντιας μετάθεσης κατά το σεισμό στο σημείο όπου αναφέρεται ο μ_δ , διαιρεμένη δια της αντίστοιχης τιμής στη διαρροή, δηλαδή στο σημείο όπου η κλίση του διαγράμματος τεμνουσών βάσης-οριζόντιας μετάθεσης εμφανώς αλλάζει. Αν η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής βρίσκεται πέραν της τιμής, T_C , όπου αρχίζει ο φθίνων κλάδος του φάσματος επιταχύνσεων (δηλαδή εκεί όπου η φασματική ψευδοταχύτητα και η φασματική επιτάχυνση μεγιστοποιούνται ταυτόχρονα), τότε ισχύει κατά καλή προσέγγιση ο κανόνας των ίσων (οριζοντίων) μετακινήσεων του ελαστικού και του ανελαστικού συστήματος, οπότε προκύπτει:

$$\mu_\delta = q, \text{ αν } T > T_C \quad (1.1)$$

Αν αντίθετα η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος T είναι μικρότερη της T_C , βρίσκεται δηλαδή στο τμήμα σταθερών επιταχύνσεων του φάσματος, τότε ισχύει κατά καλή προσέγγιση η εξής προσέγγιση των Vidic, Fajfar, Fischinger (1994):

$$\mu_{\delta} = 1 + (q - 1) \frac{T_C}{T}, \quad \text{αν } T \leq T_C \quad (1.2)$$

Σημειωτέον ότι σε δομικά συστήματα οπλισμένου σκυροδέματος που αναπτύσσουν ανελαστική απόκριση, η θεμελιώδης ελαστική ιδιοπερίοδος καθορίζεται από τη δυσκαμψία των ρηγματωμένων μελών και είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη της T_C , οπότε ισχύει η εξ.(1.1). Εξάιρεση ενδέχεται να αποτελούν πλήρως τοιχωματικά συστήματα ή μονόροφα πλαισιακά κτίρια, που μπορεί να έχουν θεμελιώδη ιδιοπερίοδο μικρότερη από την T_C .

Η συνολική απαίτηση πλαστιμότητας, που εκφράζεται από την επιθυμητή τιμή του δείκτη μ_{δ} , κατανέμεται όσο γίνεται πιο ομοιόμορφα στο σύνολο εκείνων των δομικών μελών και των περιοχών του δομικού συστήματος που είναι σε θέση να αναπτύξουν επιτυχώς σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αρχής του Ικανοτικού Σχεδιασμού, που αναλύεται παρακάτω. Μετά την κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή των απαιτήσεων ανελαστικής παραμόρφωσης στα πλάστιμα μέλη και τμήματα του δομικού συστήματος, μεριμνάται, μέσω των κανόνων λεπτομερειών όπλισης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης, να είναι αυτά σε θέση να αναπτύξουν κατά ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο τις απαιτούμενες ανελαστικές παραμορφώσεις και τοπικές απαιτήσεις πλαστιμότητας.

Κλείνοντας τονίζεται ότι η ισχύς του κανόνα των ίσων μετακινήσεων (ελαστικού και ανελαστικού συστήματος) και η εφαρμογή της έννοιας του συντελεστή συμπεριφοράς για τον καθορισμό της αντοχής του δομήματος έναντι της σεισμικής δράσης σημαίνουν ότι: Ο σεισμός γεννάει τη μετακίνηση (έστω για δεδομένη ιδιοπερίοδο του δομήματος) και το δόμημα γεννάει (ή καθορίζει) τη δύναμη που θα αναπτυχθεί. Επομένως, το ερώτημα που συχνά τίθεται στην Ελλάδα μετά από κάποιο σεισμό, δηλαδή τί σεισμικό συντελεστή βάσης προκάλεσε ο σεισμός στα δομήματα, δεν έχει νόημα και είναι παραπλανητικό. Οποιοσδήποτε ισχυρός σεισμός προκαλεί στα δομήματα σεισμικό συντελεστή βάσης που είναι πιθανότατα ο ίδιος για διαφορετικούς σεισμούς αλλά διαφορετικός για κάθε δόμημα: είναι ίσος με την αντοχή του δομήματος σε οριζόντιες δράσεις δια του ολικού του βάρους. Αυτό που διαφέρει από σεισμό σε σεισμό και που καθορίζει την ικανοποιητική ή όχι απόκριση των δομημάτων, είναι η μέγιστη μετακίνηση που προκαλεί στο δόμημα.

1.3 ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

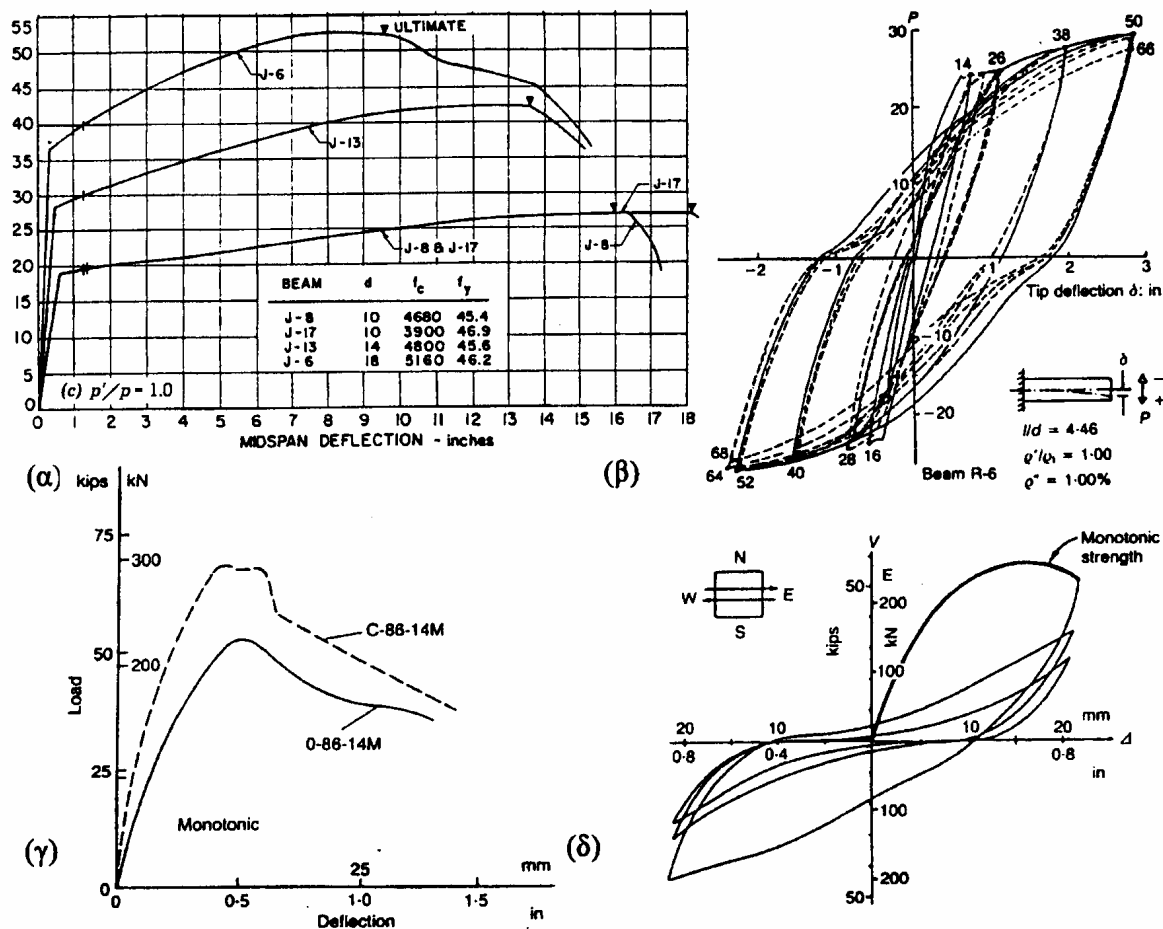
1.3.1 Η ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.2, για δεδομένη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του δομήματος η συνολική οριζόντια μετακίνηση που θα προκαλέσει ο σεισμός σχεδιασμού στην κορυφή του δομικού συστήματος ή στο σημείο εφαρμογής της συνισταμένης οριζόντιας αδρανειακής δύναμης είναι περίπου δεδομένη. Επίσης και η ενέργεια που θα εισάγει ο σεισμός σχεδιασμού σ' αυτήν προς απορρόφηση και μετατροπή σε δυναμική (ενέργεια παραμόρφωσης) και/ή κινητική ενέργεια, είναι επίσης περίπου δεδομένη: κατά καλή προσέγγιση η μέγιστη κινητική ενέργεια κατά την απόκριση του δομήματος, η οποία στο επόμενο τεταρτοκύκλιο της απόκρισης χρειάζεται να μετατραπεί σε δυναμική, ισούται με το γινόμενο της συνολικής μάζας επί τη φασματική ψευδοταχύτητα για απόσβεση 5%, η οποία, για $T > T_C$, είναι ανεξάρτητη της ιδιοπεριόδου T .

Το πως θα κατανεμηθούν οι δεδομένες συνολικές απαιτήσεις (ανελαστικής) μετακίνησης και ενέργειας ταλάντωσης στην έκταση του δομικού συστήματος και στα επιμέρους στοιχεία του είναι θέμα του σχεδιασμού ή μελέτης του, τόσο στη φάση της αρχικής σύλληψης ή μόρφωσης, όσο και στη φάση της διαστασιολόγησης. Ο ικανοτικός σχεδιασμός είναι το βασικό εργαλείο που διαθέτουν στο Μελετητή η Αντισεισμική Τεχνολογία και οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί για να κατευθύνει τη συνολική απαίτηση παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας σ' εκείνα τα μέλη και περιοχές του δομικού συστήματος που κρίνει σκοπιμότερο. Κριτήρια στην επιλογή αυτών των δομικών μελών ή περιοχών είναι:

- η εγγενής ικανότητά τους να παραμορφώνονται ανελαστικά και να απορροφούν ενέργεια υπό ανακύκλιση χωρίς ουσιαστική απώλεια φέρουσας ικανότητας (δηλαδή αυτό που ονομάζεται πλαστιμότητα),
- η σημασία τους για την ασφάλεια και την ακεραιότητα των λοιπών στοιχείων και του συνόλου του δομήματος (η σημασία αυτή αυξάνεται από τα οριζόντια στοιχεία στα κατακόρυφα και από την κορυφή του δομήματος προς τη θεμελίωσή του), και
- η επισκεψιμότητα και η ευχέρεια ελέγχου και επισκευής.

Με βάση τα ανωτέρω κριτήρια είναι δυνατή η ιεράρχηση των μελών ή περιοχών του δομικού συστήματος ανάλογα με το πόσο νωρίς (ή σε ποιά ένταση της σεισμικής κίνησης) θα τους επιτραπεί να μπουν στην ανελαστική περιοχή της απόκρισης (δηλαδή να διαρρεύσουν). Όργανο για την υλοποίηση αυτής της ιεράρχησης είναι ο ικανοτικός σχεδιασμός.



Σχ. 1.1. Τυπική πλαστική συμπεριφορά: (α) υπό οιονεί-μονοτονική ή (β) υπό ανακυκλιζόμενη ένταση και παραμόρφωση, και τυπική ψαθυρή συμπεριφορά: (γ) υπό μονοτονική και (δ) υπό ανακυκλιζόμενη παραμόρφωση

Όπως θα δούμε αναλυτικότερα στο υπόλοιπο της παρούσας ενότητας, ο ικανοτικός σχεδιασμός ("capacity design") κάνει το εξής: Για τα δομικά μέλη ή περιοχές που ιεραρχούνται υψηλότερα από απόψεως σημασίας για το σύνολο, ή δυσχέρειας επίσκεψης/ελέγχου/επισκευής και/ή χαμηλότερα από απόψεως εγγενούς πλαστιμότητας, καθορίζει τις απαιτούμενες ικανότητες ("capacities") σε όρους δυνάμεων, δηλαδή τις αντοχές, με βάση τις διαθέσιμες ικανότητες (αντοχές) γειτονικών δομικών μελών ή περιοχών που ιεραρχούνται χαμηλότερα με το πρώτο κριτήριο (της σημασίας ή της δυσχέρειας επίσκεψης) και/ή υψηλότερα κατά το κριτήριο της πλαστιμότητας. Ο καθορισμός γίνεται με στόχο, και κατά τρόπο που, αυτά τα τελευταία μέλη να φθάνουν την ικανότητά τους σε όρους δυνάμεων (δηλαδή να διαρρεύσουν) πριν τα πρώτα, και μάλιστα έτσι ώστε η εξάντληση της ικανότητάς τους να εμποδίζει πρακτικά τα πρώτα

μέλη από το να φθάσουν τη δική τους ικανότητα (να διαρρεύσουν). Βασικό εργαλείο του ικανοτικού σχεδιασμού είναι οι εξισώσεις ισορροπίας, γεγονός που φανερώνει ότι πρόκειται ουσιαστικά για μέθοδο πλαστικής μελέτης με βάση το στατικό θεώρημα, το οποίο ως γνωστόν δίνει λύσεις τύπου κάτω ορίου.

Οι περιοχές και τα δομικά μέλη όπου ανατίθεται, μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού, η ανάπτυξη ανελαστικών παραμορφώσεων και η απορρόφηση ενέργειας κατά την ανακύκλιση, είναι αυτές οι οποίες έχουν διάγραμμα έντασης-παραμόρφωσης (π.χ. ροπών (M) - καμπυλοτήτων (φ), ή δυνάμεων (F) - μετακινήσεων (δ), κ.λ.π.) της μορφής του Σχ. 1.1(α) για μονοτονική φόρτιση, ή του Σχ. 1.1(β) για ανακυκλιζόμενη. Αντίθετα οι περιοχές ή δομικά μέλη που επιδιώκεται μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού να παραμείνουν στην ελαστική περιοχή, ως ακατάλληλα για την ανάπτυξη σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων, ιδίως ανακυκλιζόμενων, είναι αυτά που συμπεριφέρονται όπως στο Σχ. 1.1(γ) υπό μονοτονική φόρτιση, ή Σχ. 1.1(δ) υπό ανακυκλιζόμενη. Ο τρόπος συμπεριφοράς των Σχ. 1.1(α), 1.1(β) ονομάζεται, ως γνωστόν, *πλάστιμος* και αυτός των Σχ. 1.1(γ), 1.1(δ) *ψαθυρός*. Μετά τη διαρροή τους τα πλάστιμα μέλη μπορούν να συνεχίζουν να παραμορφώνονται πρακτικά απεριόριστα υπό σταθερή ένταση κατά το Σχ. 1.1(α), δηλαδή χωρίς να χρειασθεί να επιβληθεί πρόσθετη ένταση. Επειδή, μάλιστα, στο οπλισμένο σκυρόδεμα αυτός ο τρόπος συμπεριφοράς χαρακτηρίζει την κάμψη και τις καμπτικές παραμορφώσεις (καμπυλότητες, γωνίες στροφής χορδής, κ.λ.π.), θυμίζει τη συμπεριφορά αρθρώσεων, οι οποίες επιτρέπουν την πρακτικά απεριόριστη στροφή υπό μηδενική επιβεβλημένη ροπή. Για το λόγο αυτό οι περιοχές όπου αναπτύσσεται μετά τη διαρροή συμπεριφορά του τύπου του Σχ. 1.1(α) ονομάζονται "*πλαστικές αρθρώσεις*". Στο οπλισμένο σκυρόδεμα πρόκειται για περιοχές πεπερασμένου μήκους σε γραμμικά δομικά μέλη (δοκούς, υποστυλώματα, τοιχώματα με μεγάλο μήκος σε σχέση με τις διαστάσεις διατομής) στις οποίες συγκεντρώνεται η ρηγμάτωση, η τυχόν αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών, η διαρροή και ο τυχόν λυγισμός των ράβδων, και όπου τελικά συμβαίνει και η αστοχία.

Συμβατικά, ως πλάστιμη χαρακτηρίζεται η συμπεριφορά ενός δομικού μέλους ή περιοχής, όταν η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_δ , ξεπερνά το 2.5. Εν προκειμένω, η διαθέσιμη τιμή του μ_δ ορίζεται ως ο λόγος (α) της τιμής της μετακίνησης στην αστοχία του, προς (β) τη μετακίνηση στη γωνία ενός διγραμμικού διαγράμματος δυνάμεων (F) – μετακινήσεων (δ) που προσεγγίζει την πλήρη καμπύλη F- δ ή την περιβάλλουσα των κύκλων υστέρησης υπό ανακυκλιζόμενη ένταση (: μετακίνηση

διαρροής, δ_y). Διαφορετικά, δηλαδή αν $\mu_s < 2.5$, η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή.

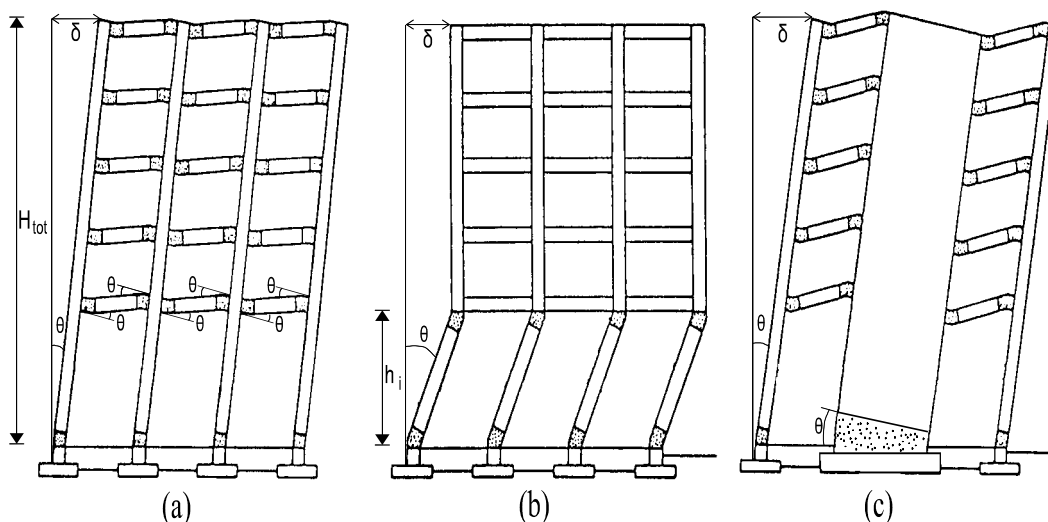
1.3.2 Η ΑΝΑΓΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σε δομήματα όπου υπάρχουν οριζόντια δομικά στοιχεία σε διάφορα επίπεδα σχηματίζοντας ορόφους, όπως δηλαδή στα πολυόροφα κτίρια, η διασπορά των απαιτούμενων ανελαστικών παραμορφώσεων σχετικά ομοιόμορφα στο σύνολο του δομικού συστήματος, σημαίνει ότι όλοι οι όροφοι θα πρέπει να αναπτύξουν ανελαστική συμπεριφορά. Σε έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνον αν οι κόμβοι κάθε κατακόρυφου μέλους με τα οριζόντια (στις στάθμες των ορόφων) παραμείνουν σε ευθυγραμμία, δηλαδή μόνον αν τα κατακόρυφα μέλη (υποστυλώματα και τοιχώματα) παραμένουν ουσιαστικά ελαστικά σ' όλους τους ορόφους, με εξαίρεση τη θέση πάκτωσής τους στη θεμελίωση. Στη θέση αυτή επιτρέπεται να αναπτυχθεί σημαντική στροφή, είτε μέσω της ανάπτυξης πλαστικών αρθρώσεων στο κατακόρυφο μέλος, είτε μέσω παραμορφώσεων του εδάφους και στροφής (λίκνισης) του στοιχείου θεμελίωσης.

Αν τα κατακόρυφα δομικά μέλη επιτρέπεται να στραφούν περί τη βάση τους, παραμένοντας όμως ελαστικά πάνω απ' αυτήν, η κινηματική υπαγορεύει ότι ανελαστικές (δηλαδή μεγάλες) οριζόντιες μεταθέσεις θα πρέπει να συνοδεύονται από την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων και στα δύο άκρα όλων των οριζοντίων μελών του δομικού συστήματος. Κάτι τέτοιο προκαλεί τη μέγιστη δυνατή διασπορά στο δομικό σύστημα της συνολικής απαίτησης ανελαστικής παραμόρφωσης ή απορρόφησης ενέργειας, άρα και στο μικρότερο δυνατό μέγεθος των τοπικών απαιτήσεων ανελαστικής παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας στα επιμέρους δομικά μέλη (καθόσον μία δεδομένη συνολική απαίτηση διαιρείται περίπου δια του αριθμού των θέσεων όπου αυτή θα μοιρασθεί).

Πράγματι, ας θεωρήσουμε ένα πολυόροφο κτίριο όπως αυτό των Σχ. 1.2(α) ή 1.2(γ), στο οποίο οι πλαστικές αρθρώσεις αναπτύσσονται στα δύο άκρα των δοκών (η μία σε θετική κάμψη, η άλλη σε αρνητική) καθώς και στη σύνδεση των κατακόρυφων στοιχείων με τη θεμελίωση. Τότε η μέγιστη τιμή της γωνίας στροφής χορδής θ στα άκρα των δοκών και στη βάση των κατακόρυφων δομικών μελών (που ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η εφαπτόμενη στον άξονα του μέλους στο άκρο, με τη χορδή που συνδέει τα δύο άκρα στην παραμορφωμένη του κατάσταση κατά το Σχ. 1.3 και ισούται περίπου με

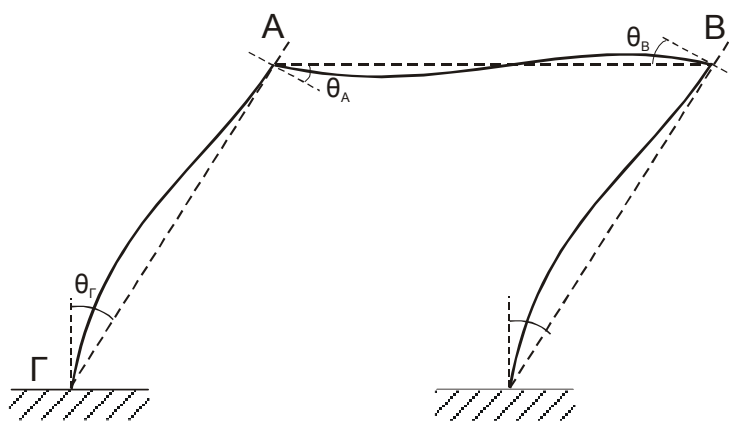
τη συνολική γωνία στροφής της αντίστοιχης πλαστικής άρθρωσης), ισούται περίπου με την οριζόντια μετάθεση δ της κορυφής του κτιρίου ανηγμένη στο συνολικό του ύψος, H_{tot} (δηλαδή με τη μέση γωνιακή του παραμόρφωση καθ' ύψος, δ/H_{tot}). Επιπλέον, η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής στα άκρα των μελών (δηλαδή η μέγιστη γωνία στροφής χορδής κατά την απόκριση, διαιρεμένη με τη γωνία στροφής χορδής κατά τη διαρροή στο άκρο αυτό του μέλους) ισούται με την απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων στην κορυφή, μ_δ . Επειδή κατά τις εξ.(1.1), (1.2) η τιμή του μ_δ είναι της τάξεως του q (ή R), δηλαδή σχετικά χαμηλή, τέτοιες απαιτήσεις τοπικής πλαστιμότητας μπορούν να ικανοποιηθούν εύκολα, μέσω κατάλληλης κατασκευαστικής διαμόρφωσης και λεπτομερειών όπλισης στις ακραίες περιοχές των δομικών μελών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται κατά τον οικονομικότερο τρόπο η απαιτούμενη τιμή της συνολικής πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_δ , που αντιστοιχεί στην τιμή του q (ή R) που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό.



Σχ. 1.2: Μηχανισμός: (α) "δοκών" σε κτίριο με πλαισιακό δομικό σύστημα, (β) "μαλακού ορόφου", και (γ) "δοκών" σε κτίριο με τοιχώματα

Για να δούμε το άλλο άκρο, ας θεωρήσουμε την περίπτωση του κτιρίου του Σχ. 1.2(β), όπου το σύνολο των ανελαστικών παραμορφώσεων συγκεντρώνονται σ' έναν μόνον όροφο. Αυτό είναι κινηματικά δυνατό μόνον αν σχηματισθούν πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα όλων των κατακορύφων δομικών στοιχείων του ορόφου και μάλιστα με αντίθετο πρόσημο ροπής στα δύο άκρα (δηλαδή την ίδια φορά δράσης επί των κόμβων στα άκρα των κατακορύφων στοιχείων του υπόψη ορόφου). Αυτός ο πλαστικός μηχανισμός ονομάζεται μηχανισμός "μαλακού ορόφου" ή "μηχανισμός υποστολωμάτων" (σε

αντίθεση με το μηχανισμό των Σχ. 1.2(a) ή 1.2(c) που λέγεται "μηχανισμός δοκών"). Στο μηχανισμό αυτό οι μέγιστες γωνίες στροφής χορδής στα άκρα των υποστυλωμάτων του "μαλακού ορόφου" ισούνται περίπου με την οριζόντια μετάθεση στην κορυφή του κτιρίου, δ , δια του ύψους h_i του "μαλακού ορόφου". Ετσι, για την ίδια τιμή του δ είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες τιμές στο "μηχανισμό δοκών" κατά H_{tot}/h_i φορές. Παρομοίως, η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής στα άκρα των υποστυλωμάτων του "μαλακού ορόφου" ισούνται περίπου με $\mu_\delta H_{tot}/h_i$, φθάνοντας, ιδιαίτερα σε υψηλά κτίρια με $H_{tot} \gg h_i$, τιμές που δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν μέσω της κατασκευαστικής διαμόρφωσης και των λεπτομερειών όπλισης των περιοχών των άκρων των υποστυλωμάτων αυτών. Ετσι η αστοχία των περιοχών αυτών είναι αναπόφευκτη.



Σχ. 1.3: Ορισμός γωνίας στροφής χορδής στα άκρα των μελών

Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι ο καλύτερος τρόπος για να διασπαρεί η συνολική απαίτηση πλαστιμότητας στο σύνολο του δομικού συστήματος και να αποφευχθεί η συγκέντρωσή της τοπικά σ' ένα "μαλακό όροφο", είναι να αναγκασθούν τα κατακόρυφα στοιχεία να παραμείνουν καθ' ύψος (περίπου) ευθύγραμμα, δηλαδή ελαστικά, με εξαίρεση την περιοχή της βάσης τους. Ο στόχος αυτός επιδιώκεται μέσω συστηματικής υπερδιαστασιολόγησης των κατακόρυφων δομικών στοιχείων σε κάμψη ως προς τις απαιτήσεις της ελαστικής ανάλυσης σ' όλες τις θέσεις πάνω από τη βάση του κτιρίου. Εννοείται βεβαίως ότι οι δοκοί και η διατομή βάσης των κατακόρυφων δομικών στοιχείων στη σύνδεσή τους με τη θεμελίωση δεν υπερδιαστασιολογούνται σε κάμψη συστηματικά πέραν από τις απαιτήσεις της ανάλυσης. Η υπερδιαστασιολόγηση των κατακόρυφων δομικών στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής του ικανοτικού σχεδιασμού των υποστυλωμάτων ή των τοιχωμάτων σε κάμψη, όπως σκιαγραφείται παρακάτω.

Μέχρις εδώ ο ικανοτικός σχεδιασμός κατακορύφων στοιχείων σε κάμψη παρουσιάστηκε ως υπερδιαστασιολόγησή τους σε σύγκριση με τις δοκούς, με στόχο να επιβληθεί κινηματικά η μεγαλύτερη δυνατή διασπορά των απαιτήσεων ανελαστικής παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας καθ' ύψος του δομικού συστήματος. Αυτό συνάδει με το γενικότερο ορισμό που εισήγαγε η Υποενότητα 1.3.1 για τον ικανοτικό σχεδιασμό, ως μέσο επιβολής της επιθυμητής ακολουθίας της διαρροής των στοιχείων: Λόγω της επιρροής της (θλιπτικής) αξονικής δύναμης, τα κατακόρυφα στοιχεία είναι εγγενώς λιγότερο πλάστιμα από τις δοκούς. Επίσης είναι σημαντικότερα από τις δοκούς για την ασφάλεια του συνόλου. Έτσι, χρειάζεται να προστατευθούν από το ενδεχόμενο να διαρρεύσουν σε κάμψη και να αναπτύξουν πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα τους, προτού αυτό συμβεί στις δοκούς.

1.3.3. ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

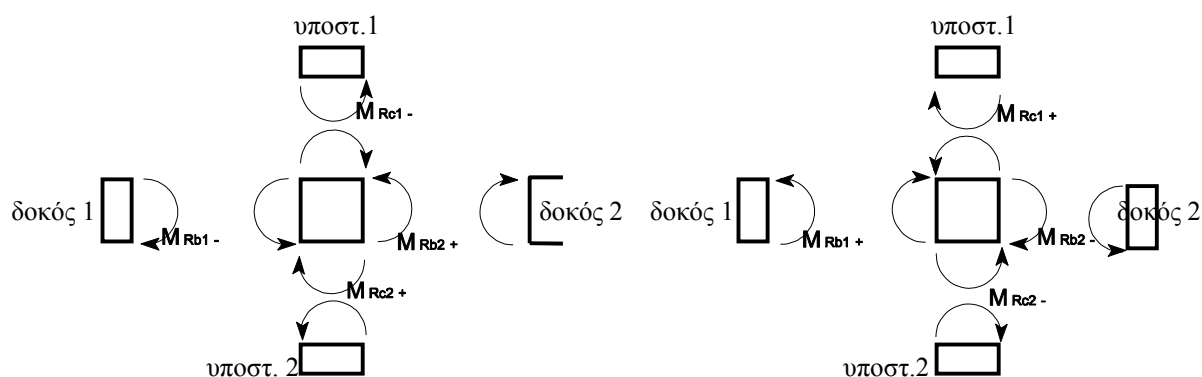
Ας δούμε σε γενικές γραμμές πως υλοποιείται στην πράξη ο ικανοτικός σχεδιασμός των υποστυλωμάτων σε κάμψη:

- 1) Οι διαμήκεις οπλισμοί των δοκών στην παρειά στήριξης στα υποστυλώματα διαστασιολογούνται με βάση: α) τις καμπτικές ροπές σχεδιασμού, M_{Ed} , που προκύπτουν για τις διατομές αυτές από γραμμική ελαστική ανάλυση, είτε για το βασικό συνδυασμό των κατακορύφων δράσεων, είτε για το συνδυασμό της σεισμικής δράσης σχεδιασμού, E_d , με τα οιονεί-μόνιμα κατακόρυφα φορτία, $G+\psi_2Q$ (όποια ροπή είναι μεγαλύτερη), ή β) (αν είναι δυσμενέστερο) τους κανόνες των Κανονισμών για τους ελάχιστους οπλισμούς πάνω και κάτω πέλματος δοκών στις στηρίξεις τους στα κατακόρυφα δομικά στοιχεία.
- 2) Στη συνέχεια διαστασιολογούνται οι διατομές των άκρων των υποστυλωμάτων που συντρέχουν σ' ένα κόμβο, έτσι ώστε να πληρούται η συνθήκη:

$$\sum M_{Rc} \geq \gamma_{Rd} \sum M_{Rb} \quad (1.3)$$

Στην εξ.(1.3) M_R συμβολίζει τη ροπή αντοχής (στην πραγματικότητα την τιμή σχεδιασμού της, M_{Rd}), οι δείκτες c και b υποδηλώνουν υποστυλώματα και δοκούς αντίστοιχα, και γ_{Rd} είναι συντελεστής υπεραντοχής για τις δοκούς με τιμή μεγαλύτερη από 1.0 (ουσιαστικά ένας επιπλέον συντελεστής ασφαλείας). Το άθροισμα $\sum M_{Rb}$ αφορά τις αντοχές των δοκών που συντρέχουν στον κόμβο μέσα σ' ένα κατακόρυφο επίπεδο

(δηλαδή και από τις δύο πλευρές του κόμβου). Οι δύο ροπές αντοχής M_{Rb} που αθροίζονται στο ΣM_{Rb} λαμβάνονται έτσι ώστε να έχουν την ίδια φορά επί του κόμβου (δηλαδή αν πρόκειται για εσωτερικό κόμβο, στα άκρα των δοκών η μία M_{Rb} αντιστοιχεί σε εφελκυσμό στο κάτω πέλμα - θετική κάμψη - και η άλλη, στην απέναντι δοκό, σε εφελκυσμό στο πάνω πέλμα - αρνητική κάμψη). Οι ροπές αντοχής M_{Rc} των υποστυλωμάτων πάνω και κάτω από τον κόμβο λαμβάνονται επίσης έτσι ώστε να έχουν και οι δύο την ίδια φορά όταν δρουν στο κόμβο και αντίθετη από τη φορά δράσης των M_{Rb} στον κόμβο, έτσι ώστε αυτός να ισορροπεί (Σχ. 1.4).



Σχ. 1.4: Ροπές αντοχής στα άκρα δοκών (M_{Rb}) και υποστυλωμάτων (M_{Rc}) που συντρέχουν σ' ένα κόμβο, για τις δύο δυνατές φορές της οριζόντιας σεισμικής δράσης.

Η εξ.(1.3) είναι η μορφή του ικανοτικού σχεδιασμού υποστυλωμάτων που υιοθετεί ο Ευρωκώδικας 8 (EN1998-1:2004) και οι Αμερικανικοί Κανονισμοί. Και οι δύο αυτές περιπτώσεις Κανονισμών επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται στην εξ.(1.3) ως M_{Rc} και M_{Rb} , αντίστοιχα, οι ροπές αντοχής των υποστυλωμάτων ή των δοκών, αντίστοιχα, στη διατομή παρειάς τους στον κόμβο. Κανονικά όμως η εξ.(1.3) – επειδή σχετίζεται με την ισορροπία ροπών ως προς το κέντρο του κόμβου – θα έπρεπε να εφαρμόζεται μεταφέροντας τις ροπές αντοχής των δοκών και των υποστυλωμάτων από τις παρειές στο θεωρητικό σημείο (κέντρο) του κόμβου, με βάση την ισορροπία. Η μεταφορά αυτή ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό του αθροίσματος των ροπών αντοχής των υποστυλωμάτων επί $(1+h_b/l_c)$, και αυτού των δοκών επί $(1+h_c/l_b)$, όπου h_b και h_c το ύψος διατομής της δοκού ή του υποστυλώματος, αντίστοιχα, μέσα στο επίπεδο όπου ελέγχεται η εξ.(1.3) και l_b , l_c , αντίστοιχα, το μέσο καθαρό άνοιγμα των δοκών, ή το μέσο καθαρό ύψος του υποστυλώματος στον όροφο πάνω και κάτω από τον κόμβο. Επειδή είναι, γενικά, $h_b/l_c \geq h_c/l_b$, αν η εξ.(1.3) ισχύει με χρήση ως M_{Rc} και M_{Rb} των ροπών αντοχής στις παρειές

του κόμβου, θα ισχύει ακόμα περισσότερο αυτή που κανονικά θα έπρεπε να ικανοποιείται, δηλαδή η ανίσωση για τα αθροίσματα των ροπών αντοχής στις παρειές, πολλαπλασιασμένα επί $(1+h_b/l_c)$ ή επί $(1+h_c/l_b)$, αντίστοιχα.

Ο Ευρωκώδικας 8 επιτρέπει τον έλεγχο της εξ.(1.3) με $\gamma_{Rd}=1.3$ και με χρήση των τιμών σχεδιασμού των ροπών αντοχής, $M_{Rb,d}$ και $M_{Rc,d}$ αντίστοιχα ως M_{Rb} και M_{Rc} . Οι Αμερικανικοί Κανονισμοί καθορίζουν $\gamma_{Rd}=1.2$ και ζητούν τη χρήση των ονομαστικών τιμών των M_{Rb} , M_{Rc} (αυτών που προκύπτουν με βάση τις χαρακτηριστικές αντοχές υλικών, f_{ck} και f_{yk} , αντί των τιμών σχεδιασμού, f_{cd} και f_{yd}). Λόγω της διαφοράς των επιμέρους συντελεστών υλικού στο χάλυβα και στο σκυρόδεμα, η τιμή σχεδιασμού της M_{Rc} υπολείπεται της ονομαστικής της τιμής περισσότερο από όσο υπολείπεται η τιμή σχεδιασμού της M_{Rb} από την αντίστοιχη ονομαστική τιμή. Έτσι, μαζί με τη διαφορά στις τιμές του γ_{Rd} , ο Ευρωκώδικας 8 φαίνεται να είναι πιο απαιτητικός στην εφαρμογή του ικανοτικού σχεδιασμού υποστυλωμάτων απ' ό,τι οι Αμερικανικοί Κανονισμοί. Από την άλλη πλευρά όμως, η M_{Rb} πρέπει να υπολογίζεται προσμετρώντας στον οπλισμό πάνω πέλματος της δοκού όλες τις παράλληλες προς τη δοκό ράβδους της πλάκας που αγκυρώνονται επαρκώς πέραν από τη διατομή της παρειάς στήριξης της δοκού στον κόμβο και βρίσκονται μέσα σ' ένα συνεργαζόμενο σε εφελκυσμό πλάτος της πλάκας, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο κατά τους Αμερικανικούς Κανονισμούς (25% του ανοίγματος της δοκού, συνολικά, αλλά όχι περισσότερο από 16 φορές το πάχος της πλάκας, h_f , για πλακοδοκούς διατομής T, ή $6h_f$ για πλακοδοκούς διατομής Γ), παρά κατά τον Ευρωκώδικα 8 (ο οποίος έχει στο σημείο αυτό τις ίδιες διατάξεις με τον Ελληνικό Κανονισμό ΕΚΟΣ 2000, δηλαδή $4h_f$ προς κάθε πλευρά του υποστυλώματος σε εσωτερικά υποστυλώματα με εγκάρσιους δοκούς, καθόλου σε εξωτερικά χωρίς εγκάρσια δοκό, και $2.5h_f$ ή $2h_f$ προς κάθε πλευρά του υποστυλώματος για τις ενδιάμεσες περιπτώσεις). Έτσι για ελαφρά οπλισμένες δοκούς οι Αμερικανικοί Κανονισμοί μπορεί να προκύπτουν τελικά πιο απαιτητικοί στην εφαρμογή της εξ.(1.3) απ' ό,τι ο Ευρωκώδικας 8.

Η εξ.(1.3) πρέπει να ικανοποιείται για τη δυσμενέστερη για την M_{Rc} τιμή της αξονικής δύναμης των υποστυλωμάτων. Αυτό, γενικά, σημαίνει με την ελάχιστη τιμή της αξονικής δύναμης για τις (δύο) εναλλακτικές φορές της σεισμικής δράσης, εκτός αν η αξονική δύναμη στο υποστυλώμα λόγω κατακορύφων δράσεων είναι υψηλή (κοντά στο "γόνατο" του διαγράμματος αλληλεπίδρασης M-N), οπότε μπορεί να προκύπτει μικρότερη – δηλαδή δυσμενέστερη – τιμή της M_{Rc} για τη μέγιστη τιμή της αξονικής δύναμης για τις

εναλλακτικές φορές της σεισμικής δράσης.

Ο Ευρωκώδικας 8 απαιτεί την ικανοποίηση της εξ.(1.3) σε πλαίσιακά δομικά συστήματα, δηλαδή σε συστήματα όπου πλαίσια αναλαμβάνουν τουλάχιστον 50% της σεισμικής τέμνουσας βάσης (40% κατά τον ΕΑΚ 2000) παράλληλα στο υπόψη κατακόρυφο επίπεδο του πλαισίου (δηλαδή σ' αυτό που ανήκουν οι δοκοί και η διεύθυνση κάμψης του υποστυλώματος της εξ.(1.3)). Επιπλέον εξαιρεί από την υποχρέωση ικανοποίηση της εξ.(1.3) τους κόμβους ενός σε κάθε τέσσερα υποστυλώματα πλαισίου, καθώς και τα πλαίσια της κατώτερης από τις τρεις προβλεπόμενες κατηγορίες πλαστιμότητας (της Χαμηλής ή L, βλ. Ενότητα 1.4). Εξαιρεί επίσης (όπως και ο ΕΑΚ 2000) τους κόμβους του τελευταίου ορόφου από την ικανοποίηση της εξ.(1.3), καθότι: α) δεν παίζει κανένα ρόλο από απόψεως σχηματισμού "μηχανισμού δοκών" ή "μαλακού ορόφου", το αν η πλαστική άρθρωση θα σχηματισθεί στην κορυφή των υποστυλωμάτων ή στα άκρα των δοκών του τελευταίου ορόφου, β) λόγω της μικρής θλιπτικής αξονικής δύναμης των υποστυλωμάτων αυτών, η πλαστιμότητά τους δεν είναι εγγενώς χαμηλή, όπως ενδεχομένως στους κατώτερους ορόφους, γ) η σημασία τους για την ακεραιότητα του συνόλου είναι μικρότερη απ' αυτήν των υποστυλωμάτων κατωτέρων ορόφων, και δ) σε κόμβους του ανωτάτου ορόφου όπου συντρέχει ένα υποστυλώμα και δύο δοκοί, όπως οι εσωτερικοί κόμβοι, είναι αντιοικονομική, και ενδεχομένως πρακτικά ανέφικτη, η ικανοποίηση της εξ.(1.3). Τέλος, επειδή υποστυλώματα με χαμηλή αξονική δύναμη έχουν ικανοποιητική πλαστιμότητα, ο Ευρωκώδικας 8 (καθώς και ο ΕΑΚ 2000) εξαιρούν τα διόροφα κτίρια από την υποχρέωση ικανοποίησης της εξ.(1.3).

Οι Αμερικανικοί Κανονισμοί δεν κάνουν εξαιρέσεις στην εφαρμογή της εξ.(1.3) – ούτε καν σε τοιχωματικά κτίρια. Κατ' αυτούς, όποια υποστυλώματα δεν ικανοποιούν την εξ.(1.3) αγνοούνται ως προς τη συμβολή τους (αντοχή και δυσκαμψία) στην ανάληψη της σεισμικής δράσης και οπλίζονται σ' όλο τους το ύψος με τον οπλισμό περίσφιγξης των περιοχών πλαστικών αρθρώσεων των άκρων.

Αυτό που εξασφαλίζει η ικανοποίηση της εξ.(1.3) είναι απλώς ότι οι διατομές του υποστυλώματος πάνω και κάτω από τον κόμβο δεν θα διαρρεύσουν και οι δύο σε μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, προτού διαρρεύσουν σε ετερόσημη κάμψη και οι δύο διατομές άκρων δοκών που συντρέχουν στον υπόψη κόμβο. Επισημαίνεται, μάλιστα, ότι επειδή κατά κανόνα οι διατομές άκρων των υποστυλωμάτων πάνω και κάτω από τον κόμβο καλύπτονται από τις ίδιες κατακόρυφες ράβδους, που συνεχίζονται από τον έναν όροφο στον άλλο, οι τιμές των M_{Rc} πάνω και κάτω από τον κόμβο θα είναι

παρόμοιες (για συμμετρικές διατομές, η διαφορά τους θα οφείλεται μόνο στη διαφορά της αξονικής δύναμης), πράγμα που σημαίνει ότι η εξ.(1.3) οδηγεί σε διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων για μονοαξονική ροπή αντοχής ίση με: $M_{Rc} \approx 0.5\gamma_{Rd}\Sigma M_{Rb}$. Κατά κανόνα, όμως, κατά τη δυναμική απόκριση της κατασκευής οι ταυτόχρονες τιμές των καμπτικών ροπών κάτω και πάνω από το υποστώλωμα, M_{E1} και M_{E2} , είναι αρκετά διαφορετικές, $M_{E1} \neq M_{E2}$, με πιθανό αποτέλεσμα να φθάνει η μεγαλύτερη από τις δύο, π.χ. η M_{E1} , την αντίστοιχη ροπή αντοχής, $M_{Rc1} \approx 0.5\gamma_{Rd}\Sigma M_{Rb}$, και να έχουμε διαρροή στην αντίστοιχη διατομή του υποστυλώματος. Αν μάλιστα αυτό συμβεί ταυτόχρονα στις αντίστοιχες διατομές (δηλαδή στην διατομή κορυφής ή στη διατομή βάσης) όλων των υποστυλωμάτων του ορόφου, μπορεί να σχηματισθεί εκεί στιγμιαία μηχανισμός "μαλακού ορόφου", παρά την ικανοποίηση της εξ.(1.3). Ομως, όταν πληρούται η εξ.(1.3) ο ενδεχόμενος σχηματισμός "μαλακού ορόφου" θα είναι στιγμιαίος και είναι απίθανο να οδηγήσει σε συγκέντρωση σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων στα υποστυλώματα του ορόφου αυτού.

Για να αποτρέψει την πρόϊμη διαρροή μίας από τις διατομές $i = 1$ και 2 του υποστυλώματος πάνω και κάτω από τον κόμβο, παρά την ικανοποίηση της εξ.(1.3) από το άθροισμα των αντοχών τους, ΣM_{Rc} , ο ΕΑΚ 2000 μοιράζει το γινόμενο $\gamma_{Rd}\Sigma M_{Rb}$ (και μάλιστα με $\gamma_{Rd}=1.4$) στις διατομές αυτές κατ' αναλογία προς τις σεισμικές τους ροπές, $M_{Ec,i}$, από την ανάλυση. Συγκεκριμένα απαιτεί διαστασιολόγηση της κάθε μίας από τις διατομές αυτές ($i=1, 2$) για ροπή:

$$M_{CD,ci} = \frac{\gamma_{Rd} \Sigma M_{Rb}}{|\Sigma M_{Ec}|_i} M_{Ec,i} \quad (1.4)$$

όπου αντί του αθροίσματος των σεισμικών ροπών των υποστυλωμάτων από την ανάλυση, $|\Sigma M_{Ec}|_i$ μπορεί να χρησιμοποιείται το (περίπου) ίσο του άθροισμα για τις δοκούς, $|\Sigma M_{Eb}|$. (Στο θεωρητικό σημείο του κόμβου είναι πράγματι $\Sigma M_{Ec} = \Sigma M_{Eb}$ λόγω ισορροπίας, αλλά στις παρειές του κόμβου, όπου εφαρμόζεται γενικά η εξ.(1.4), μπορεί να υπάρχει κάποια μικρή διαφορά). Οι λόγω κατακορύφων δράσεων ροπές αγνοούνται σε σύγκριση με τις $M_{CD,ci}$. Η διαστασιολόγηση των δύο διατομών του υποστυλώματος ($i=1, 2$) για τις ροπές από την εξ.(1.4) δίνει $M_{Rc,i} \geq M_{CD,ci}$, οπότε τελικώς ικανοποιείται η εξ.(1.3). Ομως το αποτέλεσμα της διαστασιολόγησης κατά τον ΕΑΚ 2000 είναι

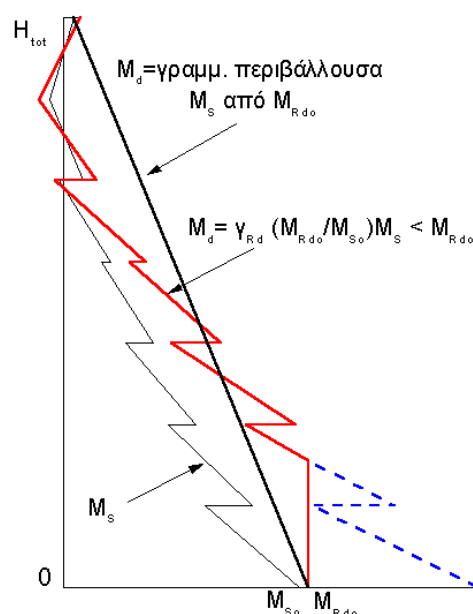
δυσμενέστερο από την απλή ικανοποίηση της εξ.(1.3), όπως απαιτεί ο Ευρωκώδικας 8 ή οι Αμερικανικοί Κανονισμοί, για δύο λόγους (πέραν της διαφοράς στην τιμή του γ_{Rd}):

- επειδή οι διατομές των υποστυλωμάτων χρειάζεται να διαστασιολογηθούν/ελεγχθούν σε διαξονική κάμψη – για τις ροπές από την εξ.(1.4) μέσα στο επίπεδο του πλαισίου, με ταυτόχρονη δράση των ροπών που προκαλεί ο σεισμός σχεδιασμού κατά την ανάλυση στην κάθετη διεύθυνση και επίπεδο, και
- επειδή οι κοινοί οπλισμοί των διατομών του υποστυλώματος πάνω και κάτω από τον κόμβο καθορίζονται από τη δυσμενέστερη από τις δύο ροπές που δίνει η εξ.(1.4) για $i=1, 2$, και όχι από το ημιάθροισμά τους.

Κλείνοντας την σύντομη παρουσίαση του ικανοτικού σχεδιασμού υποστυλωμάτων σε κάμψη, είναι σκόπιμο να επισημάνουμε ότι η εξ.(1.3), που στηρίζεται σε θεωρήσεις πλαστικής μελέτης και μάλιστα με βάση την ισορροπία και το "στατικό θεώρημα", αγνοεί την επιρροή του συμβιβαστού των παραμορφώσεων, δηλαδή των σχετικών δυσκαμψιών των μελών. Όμως η επιρροή αυτή μπορεί να είναι σημαντική στο φυσικό αποτέλεσμα της εξ. (1.3). Συγκεκριμένα, επειδή στο οπλισμένο σκυρόδεμα η ενεργός δυσκαμψία των (ρηγματωμένων) μελών είναι ανάλογη της αντοχής τους, η αύξηση των ροπών αντοχής, M_{Rc} , των υποστυλωμάτων κατά το πνεύμα της εξ.(1.3) οδηγεί και σε αύξηση της δυσκαμψίας τους, σε σύγκριση με αυτές των δοκών. Ως αποτέλεσμα, τα υποστυλώματα τείνουν να συμπεριφέρονται περισσότερο σαν τοιχώματα δυσκαμψίας (δηλαδή σαν κατακόρυφοι πρόβολοι), παρά ως κατακόρυφα μέλη πλαισιακού δομικού συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί τα υποστυλώματα να αναπτύξουν ομόσημες ροπές στις διατομές πάνω και κάτω από τον κόμβο (δηλαδή με αντίθετη φορά δράσης επί του κόμβου) και η μία από τις δύο αυτές διατομές (κατά κανόνα η πάνω από τον κόμβο) να διαρρεύσει πρώιμα, παρά την ικανοποίηση της εξ.(1.3). Βεβαίως ένα τέτοιο ενδεχόμενο δεν μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό "μαλακού ορόφου", καθότι αυτός απαιτεί την ταυτόχρονη διαρροή στην κορυφή και στη βάση (όλων) των υποστυλωμάτων του ορόφου. Όμως τέτοια ταυτόχρονη διαρροή είναι αδύνατη υπό συνθήκες ομόσημης κάμψης μέσα στον όροφο του υποστυλώματος. Έτσι η δευτερογενείς επιρροές της εξ.(1.3) στις δυσκαμψίες των μελών δεν αναιρούν την αποτελεσματικότητά της. Απλώς τείνουν να μεταβάλλουν τη λειτουργία πλαισίου σε λειτουργία τοιχώματος, για την οποία, όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω, η εξ.(1.3) δεν έχει νόημα.

1.3.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Αυτό που διακρίνει τα τοιχώματα από τα υποστυλώματα είναι η μεγάλη δυσκαμψία τους σε σχέση με τα οριζόντια δομικά στοιχεία με τα οποία συνδέονται, δηλαδή τις δοκούς. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς δυσκαμψίας τα τοιχώματα "βλέπουν" τις δοκούς περισσότερο ως οριζόντια στοιχεία που τους μεταφέρουν οριζόντιες αδρανειακές δυνάμεις (όπως δηλαδή οι πλάκες), παρά ως οριζόντια μέλη πλαισίου. Έτσι τα διαγράμματα ροπών κάμψης που αναπτύσσονται στα τοιχώματα κατά τη δυναμική απόκριση μοιάζουν περισσότερο με διαγράμματα κατακορύφων προβόλων υπό οριζόντια φορτία, παρά με τα συνήθη διαγράμματα ροπών κάμψης υποστυλωμάτων πλαισίων, τα οποία χαρακτηρίζονται από σημείο μηδενισμού κοντά στο μέσο του ύψους κάθε ορόφου.



Σχ. 1.4. Τυπικό διάγραμμα ροπών κάμψης (M_E) τοιχώματος κατά την ανάλυση και επαύξηση για το σχεδιασμό κατά τον ΕΑΚ 2000 (M_{Ed}).

Συγκεκριμένα, με ενδεχόμενη εξαίρεση το ανώτατο τμήμα του ύψους του τοιχώματος και του κτιρίου, τα διαγράμματα των σεισμικών ροπών κάμψης χαρακτηρίζονται από το ίδιο πρόσημο και από αύξηση των τιμών από την κορυφή προς τη βάση περίπου γραμμικά έως παραβολικά (βλ. καμπύλη M_s στο Σχ. 1.4). Επιπλέον, κατά κανόνα η ροπή κάμψης ακριβώς πάνω από τη στάθμη ενός ορόφου είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ακριβώς από κάτω. Έτσι, δεδομένου ότι αυτές οι δύο διατομές καλύπτονται από τις ίδιες κατακόρυφες ράβδους και ότι η επιρροή της (θλιπτικής) αξονικής δύναμης ευνοεί περισσότερο την αντοχή της κάτω διατομής, ακόμα και όταν τα τοιχώματα έχουν διαστασιολογηθεί σε κάμψη απόλυτα σύμφωνα με το διάγραμμα των ροπών M_E (ή M_s) από την ανάλυση, δεν είναι από φυσική άποψη δυνατή η ανάπτυξη (δύο) πλαστικών

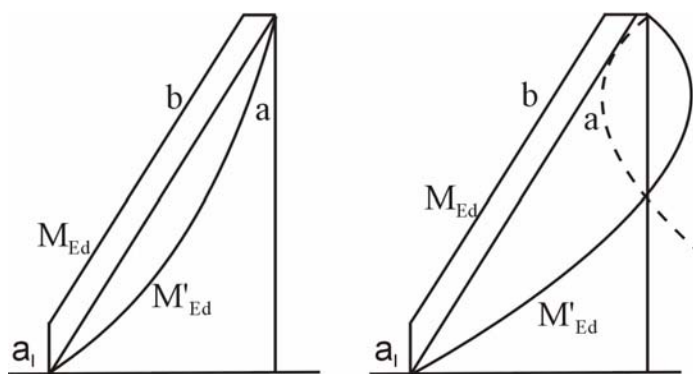
αρθρώσεων σε (δύο) διαφορετικές στάθμες του τοιχώματος σε αντίθετη κάμψη, πολύ δε περισσότερο στην κορυφή και στη βάση του ίδιου ορόφου. Το γεγονός αυτό αποκλείει το σχηματισμό "μαλακού ορόφου" σε κτίρια με τοιχώματα. Το πολύ που μπορεί να συμβεί, με την προϋπόθεση μάλιστα ότι οι κατακόρυφοι οπλισμοί των ορόφων ακολουθούν καθ' ύψος τη μεταβολή του διαγράμματος ροπών M_E κατά την ανάλυση, είναι να σχηματισθούν πλαστικές αρθρώσεις ομόσημης κάμψης σε περισσότερες από μία στάθμες ορόφων του τοιχώματος (μέχρι το πολύ μία πλαστική άρθρωση στη βάση κάθε ορόφου). Αυτό είναι πλήρως συμβατό με το σχηματισμό "μηχανισμού δοκών" σ' όλο το ύψος του κτιρίου, από τη στάθμη της κατώτατης πλαστικής άρθρωσης του τοιχώματος και πάνω και λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των λεγόμενων "ελαφρώς οπλισμένων μεγάλων τοιχωμάτων" κατά τον Ευρωκώδικα 8. Ασφαλώς, αν η κατώτατη πλαστική άρθρωση είναι στη βάση (όπου μπορεί και να πρόκειται για στροφή του στοιχείου θεμελίωσης του τοιχώματος ως προς το έδαφος), επιτυγχάνεται η ευρύτατη δυνατή διασπορά των απαιτήσεων ανελαστικών παραμορφώσεων και απορρόφησης ενέργειας σ' όλη την έκταση του δομικού συστήματος.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι, από απόψεως κατανομής των απαιτήσεων πλαστιμότητας σ' όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό θέσεων και αποφυγής σχηματισμού "μαλακού ορόφου", δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή ικανοτικού σχεδιασμού των τοιχωμάτων σε κάμψη. Εντούτοις, οι Ευρωπαϊκοί Αντισεισμικοί Κανονισμοί (Ευρωκώδικας 8, και ΕΑΚ 2000) περιλαμβάνουν κανόνες υπερδιαστασιολόγησης σε κάμψη των πλάστιμων τοιχωμάτων. Οι κανόνες αυτοί στοχεύουν στην εξασφάλιση ότι δεν θα σχηματισθεί στα τοιχώματα πλαστική άρθρωση σε καμία άλλη στάθμη εκτός από τη βάση τους (όπου μάλιστα μπορεί η πλαστική άρθρωση να αντικατασταθεί από μία ανώδυνη για το τοίχωμα στροφή του στοιχείου θεμελίωσής του ως προς το έδαφος). Αυτό επιτυγχάνεται με υπερδιαστασιολόγηση σε κάμψη όλου του τοιχώματος πλην της περιοχής της βάσης, σε σχέση με τις απαιτήσεις από την ανάλυση (δηλαδή ως προς το διάγραμμα ροπών M_S από την ανάλυση για το σεισμό σχεδιασμού).

Συγκεκριμένα:

Ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει ότι οι ροπές σχεδιασμού, M_{Ed} , πλάστιμων τοιχωμάτων με λόγο ολικού ύψους προς (οριζόντιο) μήκος διατομής, h_w/l_w , μεγαλύτερο του 2 καθορίζονται από τη γραμμική περιβάλλουσα του διαγράμματος των ροπών κάμψης, M_{Ed}' , που προκύπτει από την ανάλυση του κτιρίου για το σεισμό σχεδιασμού. Η γραμμική περιβάλλουσα των ροπών μετατίθεται επιπλέον κατακόρυφα κατά το μήκος

μετάθεσης, a_1 , η τιμή του οποίου πρέπει να είναι συμβατή με τη γωνία θλιβομένων διαγωνίων και το εσωτερικό δικτύωμα στο οποίο βασίζεται η διαστασιολόγηση του τοιχώματος σε διάτμηση (Σχ. 1.5). Επισημαίνεται ότι η γραμμική περιβάλλουσα απλώς παρέχει ένα περιθώριο καμπτικής αντοχής στις διατομές του τοιχώματος πάνω από τη βάση, για την αποτροπή διαρροής τους πριν το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στη βάση του τοιχώματος.



Σχ. 1.5. Περιβάλλουσα ροπών σχεδιασμού πλαστικού τοιχώματος κατά Ευρωκώδικα 8. Καμπύλη a: Ροπές M_{Ed} από ανάλυση για σεισμό σχεδιασμού. Καμπύλη b: Γραμμική περιβάλλουσα, μετατεθειμένη κατακόρυφα κατά μήκος μετάθεσης a_1 .

Ο ΕΑΚ 2000 επιδιώκει μεγαλύτερη υπεραντοχή σε κάμψη των διατομών του τοιχώματος πάνω από τη βάση, με πολλαπλασιασμό των ροπών από την ανάλυση, M_E , επί το λόγο $\gamma_{Rd}M_{Rd,o}/M_{Eo}$, όπου $\gamma_{Rd}=1.3$, M_{Eo} είναι η σεισμική ροπή από την ανάλυση στη διατομή βάσης του τοιχώματος, δηλαδή η τιμή της M_E στη βάση για την υπόψη φορά και διεύθυνση του σεισμού σχεδιασμού, και $M_{Rd,o}$ η καμπτική αντοχή της διατομής αυτής για την αξονική δύναμη που αντιστοιχεί στην υπόψη φορά και διεύθυνση του σεισμού σχεδιασμού. Σε όσες διατομές η μεγεθυμένη ροπή, $(1.3M_{Rd,o}/M_{Eo})M_E$, ξεπερνά την $M_{Rd,o}$, τοποθετούνται απλώς οι οπλισμοί της διατομής βάσης του τοιχώματος.

Η υπερδιαστασιολόγηση του τοιχώματος πάνω από τη διατομή βάσης του, ιδίως η εξαιρετικά δυσμενής κατά τον ΕΑΚ 2000, επιχειρεί να καλύψει και το γεγονός ότι, μετά το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στη βάση του τοιχώματος (οπότε η ροπή κάμψης εκεί δεν μπορεί να ξεπεράσει τη ροπή διαρροής) και την έναρξη της ανελαστικής απόκρισης, οι ροπές κάμψης στις άλλες στάθμες μπορεί να αυξηθούν αρκετά πέραν από τις αντίστοιχες ροπές M_E της γραμμικής-ελαστικής ανάλυσης. Πέραν απ' αυτό, οι λόγοι

που εφαρμόζεται ο ικανοτικός σχεδιασμός των τοιχωμάτων σε κάμψη είναι οι γενικοί που αναφέρθηκαν παραπάνω (βλ. 1.3.1), δηλαδή η μικρότερη πλαστιμότητά τους σε σύγκριση με τις δοκούς, η μεγάλη σημασία τους για την ακεραιότητα του συνόλου και η δυσχέρεια επισκευής βλαβών που εκτείνονται σ' όλο το ύψος τους. Ένας όμως ειδικός επιπλέον λόγος είναι ότι είναι κατασκευαστικά ευχερέστερο, και πιθανόν οικονομικότερο, να διαστασιολογηθεί το τμήμα του τοιχώματος πάνω από τη βάση για αυξημένες απαιτήσεις καμπτικής αντοχής και – αντίθετα – οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες που εξασφαλίζουν την πλαστιμότητα να εφαρμοσθούν μόνο στην περιοχή της βάσης, αντί να εφαρμοσθούν και σε άλλες στάθμες καθ' ύψος του τοιχώματος, έστω και αν κάτι τέτοιο θα επέτρεπε τη μείωση του κατακόρυφου οπλισμού εκεί.

Οι ανωτέρω διατάξεις αφορούν πλάστιμα τοιχώματα, π.χ. τοιχώματα των δύο ανωτέρων Κατηγοριών Πλαστιμότητας (M και H) του Ευρωκώδικα 8 (βλ. Ενότητα 1.4). Διαφορετική φιλοσοφία ακολουθεί ο Ευρωκώδικας 8 για τα λεγόμενα “ελαφρώς οπλισμένα μεγάλα τοιχώματα” (“large lightly reinforced walls”). Ως τέτοια ορίζονται τοιχώματα με (οριζόντιο) μήκος διατομής, l_w , τουλάχιστον 4m (ή $2/3$ του ύψους h_w του τοιχώματος, αν αυτό προκύπτει μικρότερο από 4m). Αν στην υπόψη οριζόντια διεύθυνση:

- τουλάχιστον 65% της σεισμικής τέμνουσας βάσης αναλαμβάνεται από τοιχώματα,
- το κτίριο διαθέτει τουλάχιστον δύο τοιχώματα με ελάχιστη διάσταση 4m (ή $2/3h_w$, ως άνω), τα οποία συλλογικά φέρουν τουλάχιστον 20% του ολικού βάρους του κτιρίου, και
- η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου, υπολογισμένη με θεώρηση πάκτωσης στη θεμελίωση και με δυσκαμψία ίση με το 50% της δυσκαμψίας της αρηγμάτωτης διατομής σκυροδέματος, δεν ξεπερνά τα 0.5sec,

τότε το κτίριο θεωρείται ως “σύστημα μεγάλων ελαφρά οπλισμένων τοιχωμάτων” και μπορεί να σχεδιάζεται με $q=3$ χωρίς μέριμνα για πλάστιμη συμπεριφορά των τοιχωμάτων αυτών.

Λόγω των μεγάλων διαστάσεων διατομής αυτών των τοιχωμάτων, σε σχέση με την απόσταση των πατωμάτων με τα οποία αυτά συνδέονται μονολιθικά (ύψος ορόφου), και την αδυναμία της θεμελίωσης να αποτρέψει τη στροφή στη βάση (λίκνιση) τόσο μεγάλων τοιχωμάτων, δεν μπορεί να σχηματισθεί συνήθης καμπτική πλαστική άρθρωση στη βάση τους, ούτε έχει νόημα να διαμορφωθεί εκεί το τοίχωμα για πλάστιμη συμπεριφορά μιας τέτοιας άρθρωσης. Τα τοιχώματα αυτά διαστασιολογούνται σε κάμψη ακριβώς για τη

σεισμική ροπή κάμψης, M_E , από την ανάλυση και οι κατακόρυφοι οπλισμοί τους περιορίζονται στους απολύτως απαραίτητους για την αντοχή έναντι των ροπών αυτών (δεν τοποθετούνται δηλαδή ελάχιστοι κατακόρυφοι οπλισμοί στον κορμό τους, μεταξύ των δύο άκρων της διατομής). Επειδή δε υπερδιαστασιολογούνται σε διάτμηση (ελέγχεται ότι δεν θα σχηματισθεί λοξή ρωγμή ακόμα και για τέμνουσα σχεδιασμού, V_{Ed} , διπλάσια αυτής που προκύπτει από την ανάλυση), αναμένεται να εμφανίσουν μόνον οριζόντιες ρωγμές στις στάθμες των αρμών διακοπής εργασίας (στις στάθμες των πατωμάτων). Με τέτοια ρηγμάτωση, η απόκριση κάθε τέτοιου τοιχώματος ως κατακόρυφος καμπτικός πρόβολος θα χαρακτηρίζεται από σημαντική στροφή του κάθε ορόφου του τοιχώματος ως προς το ένα άκρο της διατομής βάσης του ορόφου (εκεί όπου θα βρίσκεται και η θλιβόμενη ζώνη της διατομής). Λόγω του μεγάλου μήκους, l_w , της διατομής των τοιχωμάτων, οι στροφές αυτές θα ανυψώνουν σημαντικά το κέντρο βάρους του τμήματος του κτιρίου που στηρίζουν, μετατρέποντας παροδικά μέρος της σεισμικής ενέργειας σε διαφορά δυναμικής ενέργειας, σε όφελος της ενέργειας παραμόρφωσης του τοιχώματος (γι' αυτό και απαιτείται τα τοιχώματα κάθε διεύθυνσης να φέρουν συλλογικά τουλάχιστον το 20% του βάρους του κτιρίου).

Συνοψίζοντας, επειδή οι μεγάλες διαστάσεις διατομής των ελαφρώς οπλισμένων μεγάλων τοιχωμάτων δεν επιτρέπουν το σχηματισμό μαλακού ορόφου με αντίθετη κάμψη του τοιχώματος στο ύψος ενός ορόφου, και προσφέρονται για τη μετατροπή μέρους της ενέργειας ταλάντωσης σε δυναμική ενέργεια μέσω των επιμέρους στροφών του κάθε ορόφου του τοιχώματος ως προς το άκρο της διατομής βάσης του ορόφου, τα ελαφρώς οπλισμένα μεγάλα τοιχώματα διαστασιολογούνται για εξάντληση της καμπτικής αντοχής τους κατά το σεισμό σε κάθε όροφο, αντί μόνο στη βάση του τοιχώματος. Η επιλογή αυτή παρέχει την απαιτούμενη ασφάλεια στις στάθμες επιτελεστικότητας “προστασίας ζωής” και “οιονεί κατάρρευσης” πιθανόν κατά οικονομικότερο τρόπο από τα συνήθη πλάστιμα τοιχώματα.

1.3.5 ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Η συμπεριφορά δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση είναι πλάστιμη, μόνον αν καθοριστικός της ανελαστικότητας είναι ο εφελκόμενος χάλυβας. Αυτό συμβαίνει μόνο σε καμπτόμενα μέλη με χαμηλό ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού (οπότε αυτός διαρρέει προτού αστοχήσει το σκυρόδεμα σε θλίψη) και με θλιβόμενη ζώνη που προστατεύεται, μέσω πυκνών συνδετήρων, από

πρόωρη θλιπτική αστοχία του πυρήνα του σκυροδέματος και από λυγισμό των ράβδων (που μπορεί να οδηγήσει σε θραύση τους στον επόμενο ημικύκλο της έντασης που θα τους προκαλέσει εφελκυσμό). Επιπλέον, στα άκρα των μελών, όπου οι λόγω σεισμού ροπές είναι μέγιστες, οι μέγιστες κύριες τάσεις έχουν συγκεκριμένη διεύθυνση: παράλληλη στον άξονα. Έτσι, οι εφελκυστικές τάσεις αναλαμβάνονται εύκολα από διαμήκεις ράβδους οπλισμού (που είναι το πλάστιμο υλικό). Επιπλέον, επειδή και οι κύριες θλιπτικές τάσεις είναι εκεί παράλληλες στον άξονα, είναι σχετικά εύκολο να βελτιωθεί η πλαστιμότητα της θλιβόμενης ζώνης, είτε με τοποθέτηση διαμήκων ράβδων που θα αναλάβουν τις θλιπτικές τάσεις αντί του σκυροδέματος, είτε με περίσφιγξη του σκυροδέματος στην εγκάρσια προς τη θλίψη διεύθυνση, δηλαδή περιμετρικά της διατομής του μέλους.

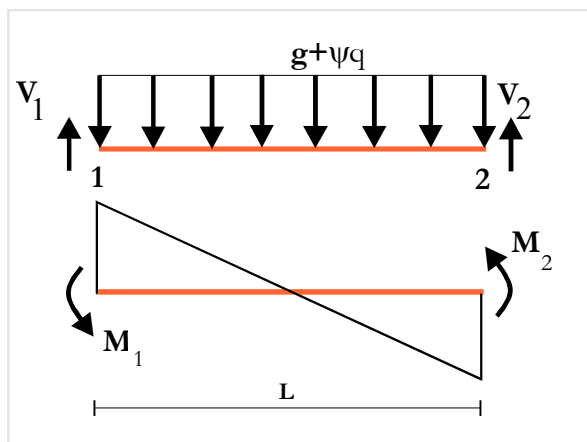
Αντίθετα η μεταφορά δυνάμεων με διάτμηση δεν προσφέρεται για πλάστιμη συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, καθότι:

- Μετά τη διαρροή των συνδετήρων, οι διατμητικές παραμορφώσεις συνοδεύονται από ολίσθηση κατά μήκος διαμπερών λοξών ρωγμών μεγάλου εύρους. Η ολίσθηση συμβαίνει χωρίς σημαντική αντίσταση και επομένως χωρίς μεγάλη απορρόφηση ενέργειας.
- Οι λοξές ρωγμές συμβαίνουν σε τυχαίες διευθύνσεις, κάθετα στις οποίες δεν διατίθεται οπλισμός για να τις συγκρατήσει. Έτσι επεκτείνονται σταδιακά προς το θλιβόμενο πέλμα, προκαλώντας τελικά αστοχία του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης από συνδυασμό λοξού εφελκυσμού και θλιπτικών τάσεων. Η αστοχία αυτή είναι εγγενώς ψαθυρή και καταστροφική.

Επειδή λοιπόν σε γραμμικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, όπως οι δοκοί και τα υποστύλωματα, η μεταφορά δυνάμεων με κάμψη και με τέμνουσα συμβαίνει εν σειρά και όχι εν παραλλήλω (δηλαδή χρειάζονται να λειτουργήσουν και οι δύο μηχανισμοί ταυτόχρονα και καθοριστικός για την αστοχία είναι ο ασθενέστερος από τους δύο), οι σύγχρονοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί υιοθετούν τον ικανοτικό σχεδιασμό σε διάτμηση, προκειμένου να επιβάλλουν τον (πλάστιμο) σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δομικών μελών, προτού το μέλος αστοχήσει (ψαθυρά) σε τέμνουσα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαστασιολόγησης των μελών αυτών σε διάτμηση για τέμνουσα δύναμη που ξεπερνά σε τιμή αυτήν που αντιστοιχεί σε ταυτόχρονο σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα δύο άκρα του μέλους υπό αντίθετη κάμψη (δηλαδή για ομόρροπες ροπές επί του μέλους στα δύο άκρα του). Η τέμνουσα αυτή είναι η μέγιστη

δυνατή που μπορεί να αναπτυχθεί στο δομικό μέλος.

Στο Σχ. 1.6 υπενθυμίζεται η βασική ιδέα του ικανοτικού σχεδιασμού μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε τέμνουσα.



Σχ. 1.6: Ικανοτικός σχεδιασμός δοκού σε διάτμηση

Θεωρώντας τη δοκό με τις εσωτερικές δυνάμεις στα άκρα της 1 και 2 και τα τυχόν εγκάρσια φορτία $g+\psi q$ στο ενδιάμεσο του μήκους της, η ισορροπία ροπών ως προς τα άκρα 2 ή 1 δίνει για τις τέμνουσες στο άλλο άκρο:

$$V_1 = V_{g+\psi q,1} + \frac{M_2 + M_1}{L_n} \quad (1.4)$$

$$V_2 = V_{g+\psi q,2} - \frac{M_1 + M_2}{L_n} \quad (1.5)$$

με τις φορές τεμνουσών και ροπών στο Σχ. 1.6 θεωρούμενες ως θετικές.

Στις εξ.(1.4) και (1.5) $V_{g+\psi q,1}$ και $V_{g+\psi q,2}$ είναι οι ροπές του ενδιάμεσου εγκάρσιου φορτίου ως προς τα άκρα 2 και 1 αντίστοιχα, διαιρεμένες δια του καθαρού μήκους L_n , δηλαδή είναι οι αντιδράσεις αμφιέριστης δοκού για το φορτίο $g+\psi q$.

Η μέγιστη τιμή της V_1 αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του M_2+M_1 , η οποία συμβαίνει όταν η M_2 και η M_1 πάρουν τη μέγιστη δυνατή θετική τιμή τους. Όταν οι M_1 και M_2 παίρνουν τη μέγιστη αρνητική τιμή τους, έχουμε τη μέγιστη τιμή της V_2 . Οι μέγιστες θετικές τιμές των M_1 και M_2 ισούνται με τις αντίστοιχες ροπές αντοχής, οι οποίες λαμβάνονται ίσες με τις ροπές αντοχής σχεδιασμού M_{Rd} , επί ένα συντελεστή υπεραντοχής γ_{Rd} με τιμή μεγαλύτερη του 1.0. Έτσι για την εξ.(1.4) λαμβάνεται $M_2 = \gamma_{Rd} M_{Rd2}^+$, $M_1 = \gamma_{Rd} M_{Rd1}^-$, ενώ για την εξ.(1.5) λαμβάνεται $M_1 = -\gamma_{Rd} M_{Rd1}^+$ και $M_2 = -\gamma_{Rd} M_{Rd2}^-$. Τελικά οι ικανοτικές τέμνουσες σχεδιασμού είναι:

$$V_{CD,1} = V_{g+\psi q,1} + \gamma_{Rd} \frac{M_{Rd1}^- + M_{Rd2}^+}{L_n} \quad (1.6)$$

$$V_{CD,2} = V_{g+\psi q,2} + \gamma_{Rd} \frac{M_{Rd1}^+ + M_{Rd2}^-}{L_n} \quad (1.7)$$

Τα ανωτέρω εφαρμόζονται και στα υποστυλώματα όπου όμως ο πρώτος όρος στο δεξιά μέλος των εξ.(1.6), (1.7), δηλαδή οι τέμνουσες λόγω ενδιάμεσου εγκάρσιου φορτίου, είναι μηδέν. Επιπλέον, οι τιμές των M_{Rd1} , M_{Rd2} πρέπει να είναι οι μέγιστες που μπορεί να αναπτυχθούν για την αναμενόμενη διακύμανση της αξονικής δύναμης του υποστυλώματος κατά το σεισμό. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπολογίζονται για τη μέγιστη αξονική δύναμη του υποστυλώματος κατά την ανάλυση για το συνδυασμό δράσεων που περιλαμβάνει το σεισμό σχεδιασμού, εκτός αν η μέγιστη αυτή τιμή ξεπερνά αυτήν που αντιστοιχεί στο γόνατο του διαγράμματος αλληλεπίδρασης M-N. Τότε θα λαμβάνεται η τιμή της M_{Rd} εκεί.

Ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει τις εξής τιμές του γ_{Rd} ανάλογα με την Κατηγορία Πλαστιμότητας (Μέση, M, ή Υψηλή, H, βλ. 1.4.3):

- Για την Κατηγορία Πλαστιμότητας M: $\gamma_{Rd}=1.0$ σε δοκούς
 $\gamma_{Rd}=1.1$ σε υποστυλώματα
- Για την Κατηγορία Πλαστιμότητας H: $\gamma_{Rd}=1.2$ σε δοκούς
 $\gamma_{Rd}=1.3$ σε υποστυλώματα

Οι Αμερικανικοί Κανονισμοί ορίζουν $\gamma_{Rd}=1$ στις εξ.(1.6), (1.7).

Ο ΕΑΚ 2000 ορίζει:

- $\gamma_{Rd}=1.2$ σε δοκούς
- $\gamma_{Rd}=1.4$ σε υποστυλώματα

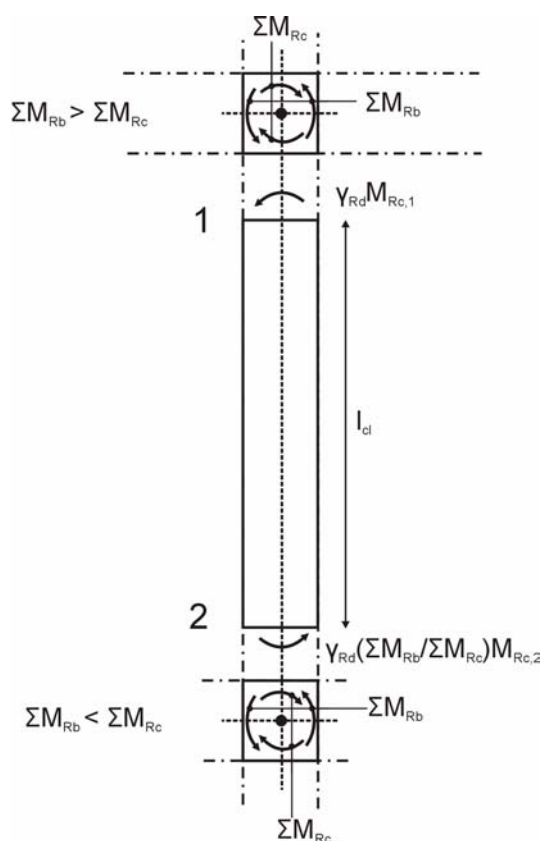
Αν τα υποστυλώματα είναι ισχυρότερα από τις δοκούς με τις οποίες συνδέονται στα άκρα τους, δηλαδή αν ικανοποιείται η εξ.(1.3) με $\gamma_{Rd}=1$, τότε οι πλαστικές αρθρώσεις δεν θα αναπτυχθούν στα άκρα των υποστυλωμάτων, αλλά σ' αυτά των δοκών με τις οποίες συνδέονται τα υποστυλώματα. Στην περίπτωση αυτή, αν χρησιμοποιηθούν στις εξ.(1.6), (1.7) οι ροπές αντοχής στα άκρα του υποστυλώματος, M_{Rd1} , και M_{Rd2} , η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να αναπτυχθεί στο υποστυλώμα υπερτιμάται. Η ανάπτυξη των ροπών $M_{Rd}=M_{Rc}$ στα άκρα του υποστυλώματος αποκλείεται από την ανάπτυξη – πριν απ' αυτές – των ροπών αντοχής των δοκών, M_{Rb} , στις παρειές τους με τους κόμβους κεφαλής και βάσης του υποστυλώματος. Είναι λοιπόν πιο κοντά στην πραγματικότητα να χρησιμοποιηθεί στις εξ.(1.6), (1.7) για το άκρο i ($i = 1, 2$) αντί της τιμής σχεδιασμού της

ροπής αντοχής του υποστυλώματος, $M_{Rd,i}=M_{Rc,i}$, η ροπή που αναπτύσσεται όταν σχηματισθούν οι πλαστικές αρθρώσεις γύρω από τον κόμβο με τον οποίο συνδέεται το υποστυλώμα στο άκρο i . Κατά τον Ευρωκώδικα 8 η τιμή που χρησιμοποιείται στις εξ.(1.6), (1.7) αντί της $M_{Rd,i}=M_{Rc,i}$ είναι η:

$$M_{i,d} = M_{Rc,i} \min\left(1, \frac{\sum M_{Rb}}{\sum M_{Rc}}\right)_i$$

(1.8)

όπου $\sum M_{Rb}$, $\sum M_{Rc}$ είναι τα αθροίσματα των (τιμών σχεδιασμού των) καμπτικών αντοχών των δοκών και των υποστυλωμάτων που συντρέχουν στον κόμβο του άκρου i , για την υπόψη φορά της σεισμικής δράσης και έντασης που δίνει τη μέγιστη τιμή της ικανοτικής τέμνουσας (Σχ. 1.7).

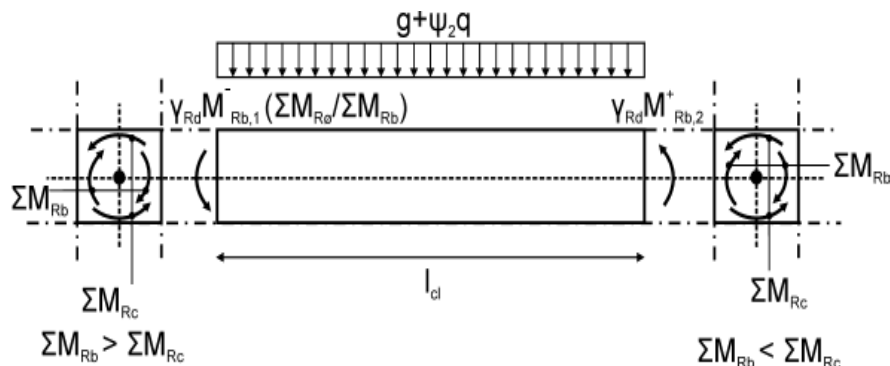


Σχ. 1.7. Ροπές άκρων υποστυλωμάτων για ικανοτικό υπολογισμό τέμνουσας δύναμης

Κατά παρόμοιο τρόπο αντιμετωπίζει ο Ευρωκώδικας 8 και την ικανοτική τέμνουσα στις δοκούς. Για να καλύψει το ενδεχόμενο σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα αντί στα άκρα των δοκών (καθότι δεν είναι υποχρεωτικό να ικανοποιείται η εξ.(1.3) σ' όλους τους κόμβους και σ' όλα τα υποστυλώματα), ο Ευρωκώδικας 8 επιτρέπει τη χρήση της τιμής $M_{i,d}$ από την εξ.(1.9), αντί της ροπών αντοχής $M_{Rd,i}$ στο

άκρο i ($i = 1, 2$) (βλ. Σχ.1.8).

$$M_{i,d} = M_{Rb,i} \min\left(1, \frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}}\right)_i \quad (1.9)$$



Σχ. 1.8. Ροπές άκρων δοκών για ικανοτικό υπολογισμό τέμνουσας δύναμης

Ο ΕΑΚ 2000 αντίθετα, παίρνει ως βάση την τιμή της σεισμικής ροπής, $M_{E,i}$ στο άκρο i του μέλους από την ανάλυση, και θεωρεί ότι η ροπή αυτή μπορεί να αυξηθεί αναλογικά έως ότου αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις γύρω από τον κόμβο. Ετσι, αντί της $M_{Rd,i}$ στο άκρο i επιτρέπει να θεωρείται ότι δρα η ροπή:

$$M_{i,d} = \frac{\min(\sum M_{Rb}, \sum M_{Rc})}{|\sum M_E|} M_{E,i} \quad (1.10)$$

όπου $\sum M_E$ είναι το άθροισμα των σεισμικών ροπών κατά την ανάλυση γύρω από τον κόμβο με τον οποίο συνδέεται το άκρο i , αντίστοιχο δηλαδή με τα $\sum M_{Rc}$ και $\sum M_{Rb}$. Η φορά δράσης των ροπών που υπεισέρχονται στο $\sum M_E$ θα είναι η ίδια με αυτή που δρα η $M_{E,i}$ στον κόμβο του άκρου i . (Αν πρόκειται για δοκό, το $\sum M_{Rb}$ έχει την ίδια φορά δράσης στον κόμβο με τα $\sum M_E$ και $M_{E,i}$, ενώ αν πρόκειται για υποστύλωμα, το $\sum M_{Rc}$ έχει την ίδια φορά με τα $\sum M_E$ και $M_{E,i}$ στον κόμβο).

Στα πλάστιμα τοιχώματα δεν είναι δυνατός ο επακριβής καθορισμός της ικανοτικής τέμνουσας με βάση την ισορροπία και τις καμπτικές αντοχές στις θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων, καθότι δημιουργείται μόνο μία πλαστική άρθρωση, συγκεκριμένα στη βάση του τοιχώματος. Με στόχο την αποφυγή διατμητικής αστοχίας πριν ή και μετά την ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης στη βάση τους, το σύνολο του ύψους πλάστιμων τοιχωμάτων υπερδιαστασιολογείται σε διάτμηση: Η τέμνουσα σχεδιασμού, V_{Ed} , προκύπτει με πολλαπλασιασμό της τέμνουσας από την ανάλυση για το σεισμό σχεδιασμού, V_{Ed}' , επί ένα συντελεστή ϵ , που εξαρτάται από την καμπτική υπεραντοχή της διατομής βάσης του τοιχώματος:

$$V_{Ed} = \varepsilon V_{Ed}' \quad (1.11)$$

Κατά τον ΕΑΚ 2000, ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής ε είναι ο ίδιος με αυτόν που εφαρμόζεται καθ' ύψος του τοιχώματος για τη μεγέθυνση των σεισμικών ροπών από την ανάλυση:

$$\varepsilon = \gamma_{Rd} M_{Rd,o} / M_{Eo} \leq q \quad (1.12)$$

με $\gamma_{Rd} = 1.3$ και $q = 3.5$.

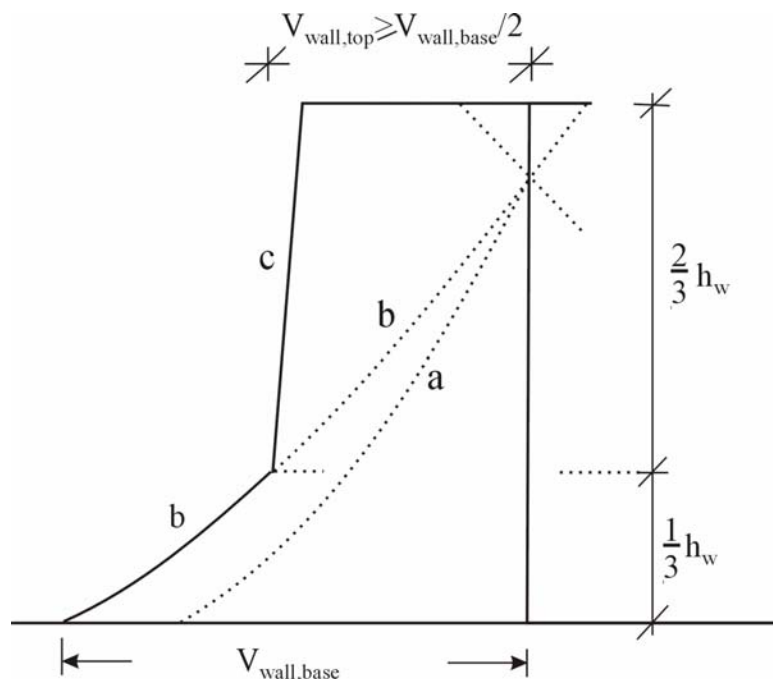
Για την Κατηγορία Πλαστιμότητας M (βλ. 1.4.3) ο Ευρωκώδικας 8 υιοθετεί $\varepsilon = 1.5$ για πλάστιμα τοιχώματα, ή $\varepsilon = (1+q)/2 = 2$ για “ελαφρώς οπλισμένα μεγάλα τοιχώματα” που ανήκουν σε δομικά συστήματα τέτοιων τοιχωμάτων. Για την Κατηγορία Πλαστιμότητας H (Υψηλή) ο Ευρωκώδικας 8 υιοθετεί την εξ.(1.12) με $\gamma_{Rd} = 1.2$ σε τοιχώματα με λόγο ύψους προς μήκος διατομής, $h_w/l_w \leq 2$, ή την πιο σύνθετη σχέση:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\gamma_{Rd} \frac{M_{Rd,o}}{M_{Eo}}\right)^2 + 0,1 \left(q \frac{S_a(T_C)}{S_a(T)}\right)^2} \leq q \quad (1.13)$$

για τοιχώματα με $h_w/l_w > 2$. Στην εξ.(1.13) τα $M_{Rd,o}$ και M_{Eo} είναι τα ίδια όπως στην εξ.(1.12), χρησιμοποιείται όμως $\gamma_{Rd} = 1.2$. Ο δεύτερος όρος στο υπόριζο αντικατοπτρίζει την αύξηση της σεισμικής τέμνουσας λόγω της συμβολής ανώτερων (της πρώτης) ιδιομορφών στην ανελαστική απόκριση του τοιχώματος, μετά το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στη βάση του. $S_a(T)$ είναι η ελαστική φασματική επιτάχυνση στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T του κτιρίου στην οριζόντια διεύθυνση της τέμνουσας V_{Ed} και $S_a(T_C)$ είναι η ελαστική φασματική επιτάχυνση στην ιδιοπερίοδο T_C που χωρίζει τις περιοχές σταθερής επιτάχυνσης (όπου είναι $S_a(T) = \text{σταθ.}$) και σταθερής ψευδοταχύτητας (όπου ισχύει $S_a(T) = S_a(T_C) T_C / T$). Άρα ο 2^{ος} όρος στο υπόριζο ισούται με $0,1(q \max(1, T/T_C))^2$.

Πέραν από την επαύξηση των τεμνουσών σχεδιασμού πλάστιμων τοιχωμάτων κατά την εξ.(1.11) με $\varepsilon = 1.5$ για την Κατηγορία Πλαστιμότητας M, ή με ε κατά την εξ.(1.13) για την H, ο Ευρωκώδικας 8 επαυξάνει τις τέμνουσες σχεδιασμού στα ανώτερα δύο τρίτα του ύψους τοιχωμάτων δυαδικών δομικών συστημάτων (δηλαδή αυτών όπου τουλάχιστον το 35% της τέμνουσας βάσης αναλαμβάνεται από πλαίσια και τουλάχιστον το 35% από τοιχώματα) κατά το Σχ.1.9, για κάλυψη των επιρροών ανωτέρων ιδιομορφών. Με τον ίδιο στόχο, ο ΕΑΚ 2000 απλώς απαιτεί η τέμνουσα σχεδιασμού να

είναι παντού τουλάχιστον το 1/3 της τιμής της στη βάση του τοιχώματος.



Σχ. 1.9. Ικανοτική μεγέθυνση τεμνουσών σε τοιχώματα δυαδικών συστημάτων κατά τον Ευρωκώδικα 8. Καμπύλη a: Τέμνουσα V_{Ed} από ανάλυση για σεισμό σχεδιασμού. Καμπύλη b: Τέμνουσες μεγεθυμένες κατά εξ.(1.11). Καμπύλη c: Περαιτέρω επαύξηση στα πάνω 2/3 του ύψους τοιχωμάτων δυαδικών συστημάτων.

1.4 ΤΟ ΔΙΛΗΜΜΑ: ΑΝΤΟΧΗ ή ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

1.4.1 Η ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΩΣ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΟ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην Ενότητα 1.2, το μέγεθος της έντασης για την οποία διαστασιολογούνται τα μέλη του δομικού συστήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q , δηλαδή περίπου αντιστρόφως ανάλογο της τιμής του δείκτη πλαστιμότητας συνολικών μετακινήσεων του, μ_s . Αυτό αποτελεί σημαντικό οικονομικό κίνητρο για την αύξηση της διαθέσιμης συνολικής πλαστιμότητας του δομικού συστήματος, μέσω, αφενός μεν του ικανοτικού σχεδιασμού, αφετέρου δε της εξασφάλισης της απαιτούμενης τοπικής πλαστιμότητας στα δομικά μέλη με κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση και λεπτομέρειες όπλισης. Επιπλέον, ο περιορισμός του μεγέθους των οριζοντίων δυνάμεων που μπορούν να αναπτυχθούν στην ανωδομή

διευκολύνει το σχεδιασμό της θεμελίωσης, καθώς περιορίζει το μέγεθος των δυνάμεων που χρειάζεται να μεταφερθούν στο έδαφος και μειώνει τον κίνδυνο σημαντικών παραμορφώσεων του εδάφους και το ενδεχόμενο μερικής αποκόλλησης της θεμελίωσης από το έδαφος και λίκνισης του δομήματος ως προς αυτό. Περαιτέρω, ένα δομικό σύστημα που είναι σχεδιασμένο να διαθέτει μεγάλη πλαστιμότητα, είναι λιγότερο ευαίσθητο στο μέγεθος και τις λεπτομέρειες της σεισμικής δράσης και, εν όψει και της τεράστιας αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τη δυσμενέστερη σεισμική δράση στη διάρκεια ζωής του έργου και την απόκρισή του σ' αυτήν, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα καλά σχεδιασμένο αντισεισμικό δομικό σύστημα. Τέλος, ο περιορισμός του μεγέθους των οριζοντίων δυνάμεων που είναι από φυσικής απόψεως δυνατό να αναπτυχθούν, μειώνει τις επιταχύνσεις της απόκρισης στις διάφορες στάθμες του δομήματος και συμβάλλει στην προστασία εξοπλισμού ή μη-φερόντων στοιχείων με αυξημένη ευαισθησία στις επιταχύνσεις (όπως, π.χ., οι τοιχοπληρώσεις κτιρίων στην εκτός επιπέδου διεύθυνση).

Επισημαίνεται ότι η προς τα πάνω οριοθέτηση των οριζοντίων σεισμικών δυνάμεων μέσω της μείωσης της αντίστοιχης αντοχής του δομικού συστήματος, δεν επηρεάζει δυσμενώς στοιχεία που είναι ευαίσθητα σε παραμορφώσεις (όπως, π.χ., οι τοιχοπληρώσεις κτιρίων στην εντός του επιπέδου τους διεύθυνση), καθότι, στην περιοχή ιδιοπεριόδων όπου βρίσκονται κατά κανόνα τα συνήθη δομήματα οπλισμένου σκυροδέματος, ισχύει ο "κανόνας ίσων μετακινήσεων" ελαστικού και ανελαστικού συστήματος. Επομένως οι επιβεβλημένες παραμορφώσεις δεν αυξάνονται με το μέγεθος και την έκταση της ανελαστικής συμπεριφοράς.

Εν κατακλείδι των ανωτέρω επιχειρημάτων υπέρ της αύξησης της πλαστιμότητας εις βάρος της αντοχής, αναφέρεται ότι οι επιφανέστεροι ειδικοί του αντισεισμικού σχεδιασμού υποστηρίζουν ότι η πέραν ορισμένων ορίων αύξηση των οριζοντίων δυνάμεων σχεδιασμού και της αντοχής ενός δομικού συστήματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, δεν βελτιώνει ουσιαδώς τη σεισμική συμπεριφορά του στη στάθμη επιτελεστικότητας "προστασίας ζωής" και "οιονεί κατάρρευσης". Αντίθετα, η σεισμική συμπεριφορά μπορεί να βελτιωθεί μόνο με αύξηση της πλαστιμότητας μέσω καλύτερων λεπτομερειών όπλισης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης.

Ως αντίλογος στα παραπάνω, υπάρχουν επίσης ισχυρά επιχειρήματα υπέρ της υψηλότερης αντοχής, αντί της αυξημένης πλαστιμότητας. Πρώτον, ενώ η υψηλή πλαστιμότητα διευκολύνει την ικανοποίηση των απαιτήσεων σεισμικής συμπεριφοράς

στις στάθμες επιτελεστικότητας “προστασία ζωής” (“life safety”) και “οιονεί κατάρρευσης” (“collapse prevention”) για τους σπάνιους έως πολύ σπάνιους σεισμούς, η αυξημένη αντοχή κάνει πιο εφικτή την ικανοποίηση των απαιτήσεων σεισμικής συμπεριφοράς στις στάθμες επιτελεστικότητας λειτουργικότητας κατά το σεισμό (“operational”), ή “άμεσης χρήσης” (“immediate occupancy”) κατά τους συχνότερους σεισμούς. Δεύτερον, είναι ευκολότερο και μερικές φορές συνολικά φθηνότερο να οπλισθούν τα μέλη για αυξημένη αντοχή παρά για μεγαλύτερη πλαστιμότητα. Τρίτον και πολύ σημαντικό, πολλές αντισεισμικές κατασκευές διαθέτουν ούτως ή άλλως υψηλή αντοχή έναντι οριζοντίων δράσεων λόγω του σχεδιασμού τους για τις λοιπές (μή-σεισμικές) δράσεις. Παραδείγματα έργων που διαθέτουν υψηλή αντοχή έναντι σεισμικών δράσεων χωρίς ενδεχομένως να έχουν σχεδιασθεί γι' αυτές, είναι τα χαμηλόροφα κτίρια σε περιοχές χαμηλής έως μέσης σεισμικότητας, στα οποία καθοριστικές του σχεδιασμού είναι οι κατακόρυφες δράσεις, όπως επίσης και οι ελαφρές κατασκευές με μεγάλη κατακόρυφη επιφάνεια προσβολής από τον άνεμο, όπως οι πύργοι ψύξης. Σε τέτοιου τύπου έργα συμφέρει να αξιοποιηθεί το σημαντικό περιθώριο αντοχής έναντι οριζοντίων δυνάμεων, προκειμένου να αποφευχθούν περίπλοκες και δαπανηρές λεπτομέρειες όπλισης για λόγους πλαστιμότητας. Τέλος, αν η δομική γεωμετρία είναι ασυνήθιστα περίπλοκη και ακανόνιστη, πέφτοντας έτσι εκτός των πλαισίων των συνήθων δομημάτων που έχουν κατά νουν οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί, ο Μελετητής Μηχανικός μπορεί να εμπιστευθεί περισσότερο τη μελέτη του, αν μειώσει την απόσταση μεταξύ των αποτελεσμάτων της γραμμικής-ελαστικής ανάλυσης στα οποία βασίζεται η διαστασιολόγηση των μελών, και της ανελαστικής απόκρισης στο σεισμό σχεδιασμού. Η απόσταση αυτή μπορεί να ελαττωθεί, αν μειωθεί η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q , μείωση που συνεπάγεται άμβλυνση των απαιτήσεων συνολικής και τοπικής πλαστιμότητας.

Η άμβλυνση των απαιτήσεων συνολικής πλαστιμότητας συνήθως περιλαμβάνει δραστική χαλάρωση ή και κατάργηση της εφαρμογής του ικανοτικού σχεδιασμού. Ένας έμμεσος στόχος του ικανοτικού σχεδιασμού είναι η αποφυγή υπεραντοχών στους πλέον πλάστιμους τρόπους συμπεριφοράς και αστοχίας, όπως π.χ. αυτός (των δοκών κυρίως) σε κάμψη, ως προς τους σχετικά ψαθυρούς, όπως αυτός όλων των μελών σε διάτμηση και των υποστλωμάτων σε κάμψη (αντί των δοκών). Τέτοιες υπεραντοχές μπορεί να προκύψουν αν η αντοχή των σχετικά πλάστιμων τρόπων αστοχίας καθορίζεται από τις κατακόρυφες δράσεις ή και τους ελάχιστους οπλισμούς, ενώ αυτή των πλέον ψαθυρών

καθορίζεται από τη σεισμική δράση. Σε κατασκευές με σχετικά χαμηλή τιμή του q η σεισμική ένταση σχεδιασμού των μελών είναι της τάξεως του 50% έως 2/3 της ελαστικής για το σεισμό σχεδιασμού. Αν η σεισμική ένταση σχεδιασμού είναι τόσο υψηλή, είναι λογικό να αναμένεται ότι αυτή θα είναι καθοριστική της διαστασιολόγησης όλων των μελών έναντι όλων των δυνατών οριακών καταστάσεων (δηλαδή τρόπων αστοχίας) και ότι έτσι δεν θα υπάρχουν ανεπιθύμητες υπεραντοχές στους πιο πλάστιμους τρόπους αστοχίας. Επιπλέον, αν η απαίτηση συνολικής πλαστιμότητας μετακινήσεων είναι χαμηλή, τότε και οι απαιτήσεις τοπικής πλαστιμότητας που τη συνοδεύουν θα είναι χαμηλές, ακόμα και αν η απαίτηση συνολικής πλαστιμότητας δεν κατανέμεται ομοιόμορφα (μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού) στο σύνολο του δομικού συστήματος. Χαμηλές απαιτήσεις τοπικής πλαστιμότητας δομικών μελών μπορούν να ικανοποιηθούν με κατασκευαστική διαμόρφωση και λεπτομέρειες όπλισης που είναι ελάχιστα αυστηρότερες αυτών που εφαρμόζονται σε μή-αντισεισμικά δομήματα.

Επισημαίνεται ότι ο ικανοτικός σχεδιασμός δυσχεραίνει σημαντικά την πορεία της διαστασιολόγησης του συνόλου του δομικού συστήματος. Επιπλέον η διαδικασία του σχεδιασμού επιβαρύνεται περαιτέρω από την εφαρμογή των κανόνων λεπτομερειών όπλισης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης για αυξημένη τοπική πλαστιμότητα. Επομένως, η επιλογή επιπέδου πλαστιμότητας (και τιμής του συντελεστή q) έχει σημαντική επίπτωση και στις απαιτήσεις που τίθενται για τη μελέτη και για τον ίδιο το Μελετητή Μηχανικό: η επιλογή υψηλότερου επιπέδου πλαστιμότητας σημαίνει ότι ο Μελετητής χρειάζεται να διαθέτει πιο προχωρημένα υπολογιστικά εργαλεία, αλλά και μεγαλύτερη εμπειρία και εξειδίκευση.

1.4.2 ΟΙ ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Οι σύγχρονοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί περιλαμβάνουν συνήθως περισσότερα από ένα συνδυασμό επιπέδων απαιτούμενης αντοχής και πλαστιμότητας. Η επιλογή μεταξύ των συνδυασμών αυτών επαφίεται συνήθως στον ίδιο το Μηχανικό. Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000) και ο Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΟΣ 2000) προβλέπουν δύο τέτοιους συνδυασμούς για τα συνήθη κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος:

- έναν "με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας" και $q=3.5$, που περιλαμβάνει πλήρη εφαρμογή των κανόνων ικανοτικού σχεδιασμού για τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία σε κάμψη, για όλα τα μέλη σε τέμνουσα και για τον έλεγχο της θεμελίωσης, καθώς

και υψηλές απαιτήσεις κατασκευαστικής διαμόρφωσης και λεπτομερειών όπλισης για τα δομικά μέλη, και

- ένα δεύτερο "χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας", που σημαίνει $q=1.5$, καμμία απαίτηση ικανοτικού σχεδιασμού και κατασκευαστική διαμόρφωση και όπλιση μελών όπως στις μή-αντισεισμικές κατασκευές.

Η επιλογή επαφίεται στο Μελετητή Μηχανικό.

1.4.3 Ο ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8

Στην τελική μορφή του, που εγκρίθηκε επίσημα το 2004 ως Ευρωπαϊκό Πρότυπο, ο Ευρωκώδικας 8 επιτρέπει την υποκατάσταση αντοχής με πλαστιμότητα μέσω της πρόβλεψης τριών εναλλακτικών "Κατηγοριών Πλαστιμότητας" (Ductility Classes - DC) για κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος. Η "Χαμηλή" κατηγορία πλαστιμότητας (DC L - Low) προτείνεται μόνο για περιοχές χαμηλής σεισμικότητας (με εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού μέχρι 0.10g, ή μέχρι 0.08g στο βράχο). Κτίρια που ανήκουν σ' αυτήν την Κατηγορία επιτρέπεται να ακολουθούν απλώς τους κανόνες του Ευρωκώδικα 2 για μή-αντισεισμικά δομήματα και να υπολογίζονται με τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$, θεωρώντας το σεισμό ως οριζόντια φόρτιση, όπως δηλαδή τον άνεμο. Οι άλλες δύο Κατηγορίες είναι η "Υψηλή" (DC H - High) και η "Μέση" (DC M - Medium).

Οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q για τις δύο ανώτερες κατηγορίες πλαστιμότητας ορίζονται κατά τον Ευρωκώδικα 8 ανάλογα με τον τύπο του δομικού συστήματος και την κανονικότητά του καθ' ύψος.

Για το σκοπό αυτό ορίζονται στον Ευρωκώδικα 8 οι εξής τύποι δομικών συστημάτων:

- Πλαισιακά δομικά συστήματα: Αυτά στα οποία τουλάχιστον 65% της σεισμικής τέμνουσας βάσης αναλαμβάνεται από πλαίσια δοκών-υποστυλωμάτων.
- Τοιχωματικά δομικά συστήματα: Αυτά στα οποία τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος αναλαμβάνουν τουλάχιστον 65% της σεισμικής τέμνουσας βάσης. Περαιτέρω, ένα τοιχωματικό δομικό σύστημα θεωρείται ως σύστημα συζευγμένων τοιχωμάτων, αν το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής αντοχής των τοιχωμάτων προέρχεται από "συζευγμένα" τοιχώματα, δηλαδή από τοιχώματα που συνδέονται – ανά δύο ή περισσότερα – μέσω πλάστιμων δοκών ("δοκών σύζευξης") η παρουσία των οποίων μειώνει το άθροισμα των σεισμικών ροπών στη βάση των συζευγμένων τοιχωμάτων κατά 25% τουλάχιστον, σε σχέση με το άθροισμα των ροπών αυτών αν δεν υπήρχαν οι δοκοί σύζευξης. (Η διαφορά μεταφράζεται σε ζεύγος αξονικών

δυνάμεων).

- Δυαδικά δομικά συστήματα: Αυτά στα οποία τα κατακόρυφα φορτία αναλαμβάνονται από πλαίσια δοκών υποστυλωμάτων, ενώ τα οριζόντια (εν προκειμένω η σεισμική δράση) αναλαμβάνεται εν μέρει από πλαίσια και εν μέρει από τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος. Από τον ορισμό των πλαισιακών και των τοιχωματικών συστημάτων προκύπτει ότι στην περίπτωση αυτή τα πλαίσια ή τα τοιχώματα του συστήματος αναλαμβάνουν μεταξύ 35% και 65% της συνολικής τέμνουσας βάσης. Αν η σεισμική τέμνουσα βάσης αναλαμβάνεται τουλάχιστον κατά 50% από πλαίσια, το σύστημα καλείται πλαισιακό δυαδικό. Διαφορετικά καλείται τοιχωματικό δυαδικό σύστημα. Όμως αυτή η διαφοροποίηση δεν έχει πρακτική επίπτωση στην τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q .
- Εύστρεπτο δομικό σύστημα: Αυτό του οποίου η ελάχιστη ακτίνα δυστρεψίας μεταξύ των δύο οριζοντίων διευθύνσεων είναι σε οποιοδήποτε όροφο μικρότερη από την ακτίνα αδράνειας της μάζας του ορόφου. Υπενθυμίζεται ότι: (α) ως ακτίνα δυστρεψίας ορίζεται η τετραγωνική ρίζα του λόγου της δυστρεψίας του δομικού συστήματος ως προς το κέντρο δυσκαμψίας, προς τη μεταφορική δυσκαμψία στην υπόψη οριζόντια διεύθυνση, και (β) ως ακτίνα αδράνειας της μάζας του ορόφου ορίζεται η πολική ροπή αδράνειας της μάζας αυτής ως προς το κέντρο μάζας, δια της ολικής μάζας του ορόφου. Σε πολύοροφα πλαισιακά ή τοιχωματικά δομικά συστήματα, το κέντρο δυσκαμψίας και η ακτίνα δυστρεψίας μπορούν να υπολογισθούν κατά προσέγγιση με βάση τις ροπές αδράνειας των κατακορύφων δομικών στοιχείων του αντίστοιχου ορόφου. Εύστρεπτα προκύπτει να είναι τα δομικά συστήματα που έχουν τα κύρια στοιχεία δυσκαμψίας (π.χ. τοιχώματα) κοντά στο κέντρο της κάτοψης, αντί κοντά στην περίμετρο. Αν τα στοιχεία δυσκαμψίας είναι περίπου ομοιόμορφα κατανομημένα στο σύνολο της κάτοψης – όπως είναι συνήθως και η μάζα των ορόφων – τότε το δομικό σύστημα δεν προκύπτει να είναι εύστρεπτο.
- Ανεστραμμένο εκκρεμές: Δομικό σύστημα που έχει το μισό τουλάχιστον της μάζας συγκεντρωμένο στα ανώτερα τρίτα του ύψους του, ή στο οποίο η ανελαστική παραμόρφωση και η απορρόφηση σεισμικής ενέργειας γίνεται στη βάση ενός και μόνον κατακορύφου στοιχείου. Μονόοροφα πλαισιακά συστήματα με δοκούς και κατά τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και με ανηγμένη αξονική δύναμη $v_d = N_d / A_c f_{cd}$ μικρότερη από 0.3 σε όλα τα υποστυλώματα, δεν θεωρούνται ως ανεστραμμένα εκκρεμή.

Ως κανονικά καθ' ύψος ορίζονται εκείνα τα δομικά συστήματα κτιρίων στα οποία ισχύουν όλες οι κατωτέρω συνθήκες:

- Τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία (τοιχώματα και πλαίσια) συνεχίζονται μέχρι την κορυφή του αντίστοιχου τμήματος της κάτοψης, χωρίς διακοπή σε ενδιάμεσο όροφο.
- Η μάζα των ορόφων και η δυσκαμψία των δομικών στοιχείων τους είναι η ίδια σ' όλους τους ορόφους ή μειώνεται ομαλά – χωρίς απότομες μεταβολές – από τη βάση προς την κορυφή.
- Σε πλαίσιακά δομικά συστήματα δεν υπάρχει έντονη ανομοιομορφία υπεραντοχής έναντι οριζοντίων δράσεων μεταξύ διαδοχικών ορόφων. Ως υπεραντοχή μπορεί να ληφθεί ο λόγος της πραγματικής αντοχής του ορόφου (άθροισμα τεμνουσών που μπορούν να αναλάβουν τα υποστυλώματα με βάση τις καμπτικές αντοχές των πλαστικών αρθρώσεων που σχηματίζονται πρώτες γύρω από τους κόμβους κορυφής και βάσης τους, συν τη διατμητική αντοχή του συνόλου των τυχόν τοιχοπληρώσεων στον όροφο) προς τη σεισμική τέμνουσα του ορόφου υπό το σεισμό σχεδιασμού.
- Οι τυχόν εσοχές ενός ορόφου από τον αμέσως κατώτερο περιορίζονται ως εξής:
 - Κάθε επιμέρους εσοχή (δηλαδή υποχώρηση της πρόσοψης προς τα μέσα) δεν ξεπερνά το 10% της παράλληλης ολικής διάστασης του αμέσως κατωτέρου ορόφου.
 - Σε περίπτωση όπου οι εσοχές στις δύο απέναντι πλευρές του κτιρίου στην υπόψη διεύθυνση δεν είναι συμμετρικές, η συνολική εσοχή του τελευταίου ορόφου ως προς τη βάση του κτιρίου δεν ξεπερνά το 30% της παράλληλης διάστασης της κάτοψης στη βάση.
 - Αν οι εσοχές αφορούν μία και μόνο στάθμη στα κατώτερα 15% του ύψους του κτιρίου, μπορούν να φθάνουν συνολικά (και προς τις δύο πλευρές του κτιρίου) το 50% της κάτοψης στη βάση (π.χ. σε κτίριο με επτά ισουψείς ορόφους, ο ισόγειος μπορεί να έχει μέχρι και διπλάσιες διαστάσεις κάτοψης από τους υπόλοιπους, χωρίς το κτίριο να θεωρείται μη-κανονικό). Ομως τότε το τμήμα του δομικού συστήματος που εμπίπτει στην περιοχή της κάτοψης όπου προβάλλονται οι ανώτεροι όροφοι, θα πρέπει να σχεδιάζεται για σεισμική τέμνουσα βάσης τουλάχιστον ίση με το 75% αυτής που θα προέκυπτε σε ισοϋψές κτίριο με διαστάσεις κάτοψης αυτές των ανωτέρων ορόφων. Με άλλα λόγια, στην οροφή της διαπλατυμένης βάσης του κτιρίου επιτρέπεται η οριζόντια μεταφορά σεισμικής τέμνουσας από το κεντρικό υψηλότερο προς το εξωτερικό χαμηλότερο

τμήμα της κάτοψης, σε μέγεθος που δεν ξεπερνά το 25% της σεισμικής τέμνουσας του κεντρικού τμήματος.

Αν σε μία οριζόντια διεύθυνση το κτίριο δεν χαρακτηρίζεται κανονικό καθ' ύψος σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, τότε ο συντελεστής συμπεριφοράς του, q , μειώνεται στο 80% της βασικής τιμής q_0 που αναφέρεται παρακάτω.

Η βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q_0 είναι η εξής:

1. Σε εύστρεπτα δομικά συστήματα:
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Μέση (M): $q_0=2$
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Υψηλή (H): $q_0=3$
2. Σε δομικά συστήματα τύπου ανεστραμμένου εκκρεμούς:
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Μέση (M): $q_0=1.5$
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Υψηλή (H): $q_0=2$
3. Σε τοιχωματικά συστήματα ασύζευκτων τοιχωμάτων που δεν εμπίπτουν στις παραπάνω περιπτώσεις 1 και 2:
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Μέση (M): $q_0=3$
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Υψηλή (H): $q_0=4\alpha_R$
4. Για όλα τα υπόλοιπα δομικά συστήματα (πλαισιακά, ή δυαδικά, ή τοιχωματικά συζευγμένων τοιχωμάτων, εφόσον δεν εμπίπτουν στις περιπτώσεις 1 και 2):
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Μέση (M): $q_0=3\alpha_R$
 - Για κατηγορία πλαστιμότητας (DC) Υψηλή (H): $q_0=4.5\alpha_R$

Ο συντελεστής α_R που αναφέρεται στις περιπτώσεις 3 και 4 είναι ο λόγος: (α) της σεισμικής δράσης (όπως αυτή ορίζεται μέσω του ελαστικού φάσματος) που μετατρέπει το δομικό σύστημα σε πλαστικό μηχανισμό, προς (β) αυτήν που προκαλεί την πρώτη διαρροή οπουδήποτε στο δομικό σύστημα. Ο συντελεστής α_R εκφράζει την υπεραντοχή του δομικού συστήματος λόγω δυνατότητας ανακατανομής της σεισμικής έντασης με τη βοήθεια της υπερστατικότητάς του. Βασίζεται στο γεγονός ότι ενώ οι θέσεις πλαστικών αρθρώσεων του δομήματος διαστασιολογούνται για την οριακή κατάσταση αστοχίας σε κάμψη (δηλαδή για διαρροή) με βάση τα αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης για το σεισμό σχεδιασμού διαιρεμένο με q , όμως, λόγω: (α) ελαχίστων οπλισμών, ή (β) κάλυψης περισσότερων διατομών (π.χ. των δύο διατομών του υποστυλώματος, ή των δοκών σε απέναντι παρειές ενός κόμβου) με τις ίδιες ράβδους οπλισμού, κ.λ.π., δεν διαρρέουν όλες οι θέσεις πλαστικών αρθρώσεων ταυτόχρονα και υπάρχει δυνατότητα ανακατανομής σεισμικής έντασης από μία θέση ή μέλος σε άλλο, σε σχέση με τις

προβλέψεις της ελαστικής ανάλυσης.

Η τιμή της σεισμικής δράσης που μετατρέπει το δόμημα σε πλαστικό μηχανισμό για τον υπολογισμό του α_R κανονικά καθορίζεται μέσω μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης (τύπου pushover), με εφαρμογή: (α) των κατακορύφων φορτίων που υπεισέρχονται στο σεισμικό συνδυασμό δράσεων και (β) σταδιακά αυξανόμενων οριζοντίων δυνάμεων ορόφων που προσομοιώνουν το σεισμό. Αντίθετα, η σεισμική δράση που προκαλεί την πρώτη διαρροή (πλαστική άρθρωση) στο δομικό σύστημα μπορεί να υπολογισθεί με βάση τα αποτελέσματα της γραμμικής-ελαστικής ανάλυσης για το σεισμό σχεδιασμού (με απλή αναλογία). Ο λόγος α_R μπορεί να υπολογισθεί ως ο λόγος των σεισμικών τεμνουσών βάσης στις δύο ανωτέρω καταστάσεις (σχηματισμός πλήρους πλαστικού μηχανισμού και πρώτη διαρροή οπουδήποτε). Σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος η τιμή του α_R δεν επιτρέπεται να ληφθεί μεγαλύτερη από 1.5. Ο Ευρωκώδικας 8 δίνει ενδεικτικές τιμές του λόγου αυτού ανάλογα με την υπερστατικότητα, οι οποίες επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν χωρίς επαλήθευση με μή-γραμμική στατική ανάλυση. Για κτίρια κανονικά σε κάτοψη οι τιμές αυτές είναι:

- Σε πλαισιακά, ή πλαισιακά-δυναδικά δομικά συστήματα:
 - Για μονόροφα κτίρια: $\alpha_R=1.1$
 - Για πολυόροφα κτίρια με ένα φάτνωμα: $\alpha_R=1.2$
 - Για πολυόροφο με περισσότερα του ενός φατνώματα: $\alpha_R=1.3$
- Σε τοιχωματικά, ή τοιχωματικά-δυναδικά δομικά συστήματα:
 - Σε τοιχωματικά συστήματα, με μόνο δύο ασύζευκτα τοιχώματα στην υπόψη διεύθυνση: $\alpha_R=1.0$
 - Σε τοιχωματικά συστήματα, με περισσότερα των δύο ασύζευκτα τοιχώματα στην υπόψη διεύθυνση: $\alpha_R=1.1$
 - Σε τοιχωματικά δυναδικά συστήματα, ή συστήματα συζευγμένων τοιχωμάτων: $\alpha_R=1.2$

Αν το κτίριο δεν είναι κανονικό σε κάτοψη, λαμβάνεται ο μέσος όρος των ανωτέρω τιμών και του 1.0.

Σημειώνεται σχετικά ότι κανονικά σε κάτοψη θεωρούνται κατά τον Ευρωκώδικα 8 τα κτίρια που πληρούν όλες τις κατωτέρω συνθήκες:

- Χαρακτηρίζονται από περίπου συμμετρική κατανομή δυσκαμψίας και μάζας και ως προς τους δύο ορθογωνικούς οριζόντιους άξονες της κάτοψης.
- Η κάτοψή τους δεν είναι πολύ επιμήκης (λόγος πλευρών περιγεγραμμένου

ορθογωνίου μέχρι 4) και δεν έχει σημαντικές εσοχές: κάθε τυχόν εσοχή της περιμέτρου της κάτοψης ως προς το κυρτό πολυγωνικό της περίγραμμα δεν ξεπερνά σε επιφάνεια το 5% της επιφάνειας της κάτοψης (που μεταφράζεται σε εσοχή περίπου 25% της μίας πλευράς επί εσοχή 20% της κάθετης της).

- Τα πατώματα τους είναι πρακτικά απαραμόρφωτα στο επίπεδό τους (που σημαίνει πατώματα σκυροδέματος χωρίς μεγάλα κενά (οπές) στο εσωτερικό της κάτοψης).
- Χαρακτηρίζονται από περιορισμένη εκκεντρότητα του κέντρου μάζας κάθε ορόφου ως προς το αντίστοιχο κέντρο δυσκαμψίας (όπως αυτό ορίσθηκε παραπάνω σε σχέση με τα εύστρεπτα δομικά συστήματα): σε κάθε μία από τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, η εκκεντρότητα δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 30% της ακτίνας δυστρεψίας των στοιχείων δυσκαμψίας που υπολογίζεται με βάση τη μεταφορική δυσκαμψία στην κάθετη προς την εκκεντρότητα διεύθυνση.
- Το δομικό σύστημα δεν είναι εύστρεπτο σε κανέναν όροφο.

Εκτός από τις μειώσεις της βασικής τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς, q_0 , λόγω έλλειψης κανονικότητας καθ' ύψος ή και σε κάτοψη, ο Ευρωκώδικας 8 επιβάλλει περαιτέρω μειώσεις σε τοιχωματικά δομικά συστήματα, τοιχωματικά δυαδικά, ή και εύστρεπτα, αν τα τοιχώματά τους έχουν χαμηλό λόγο ύψους, h_w , προς οριζόντια διάσταση, l_w , που καθιστά κυρίαρχη τη διάτμηση στη συμπεριφορά τους. Η μείωση γίνεται με πολλαπλασιασμό επί ένα συντελεστή k_w , με τιμές μεταξύ 1.5 και 1.0, που λαμβάνεται ίσος με $(1+\alpha_0)/3$, όπου $\alpha_0 = \sum h_{wi} / \sum l_{wi}$ είναι ο λόγος του αθροίσματος των υψών h_{wi} , προς το άθροισμα του μήκους l_{wi} (στην υπόψη οριζόντια διεύθυνση) όλων των τοιχωμάτων του δομικού συστήματος. Επειδή στα τοιχώματα ο λόγος διάτμησης (δηλαδή ο λόγος της ροπής στη βάση προς την τέμνουσα δια της διάστασης της διατομής) είναι μεταξύ του 50% και των 2/3 του λόγου ολικού ύψους, h_w , προς μήκος, l_w , η μείωση αφορά τοιχώματα με μέσο λόγο διάτμησης μεταξύ 1.0 και 4/3, τα οποία έχουν όντως καθαρά διατμητική συμπεριφορά στην αστοχία.

Αν η τελική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, q , μετά τις τυχόν μειώσεις λόγω έλλειψης κανονικότητας του δομικού συστήματος και/ή παρουσίας τοιχωμάτων με χαμηλό λόγο διάτμησης, προκύπτει μικρότερη του 1.5, δηλαδή της τιμής που θεωρούμε ότι χαρακτηρίζει τα κτίρια Κατηγορίας Πλαστιμότητας L (“Χαμηλή”) και οφείλεται σε υπεραντοχές των υλικών και του συστήματος, μπορεί να χρησιμοποιείται η τιμή $q=1.5$. Αυτό συνεπάγεται ότι σε κτίρια Κατηγορίας Πλαστιμότητας L η τιμή $q=1.5$ δεν μειώνεται λόγω ακανονικότητας, κ.λ.π.

Αν η καθ' ύψος κανονικότητα ή μή του κτιρίου, ή το δομικό του σύστημα, κ.λ.π., διαφέρουν στις δύο κύριες οριζόντιες διευθύνσεις στις οποίες θεωρείται ότι δρα η σεισμική δράση, μπορεί να χρησιμοποιείται διαφορετική τιμή του q στις δύο αυτές διευθύνσεις. Όμως, η Κατηγορία Πλαστιμότητας είναι μία και μοναδική για όλο το κτίριο.

Όσο υψηλότερη είναι η Κατηγορία Πλαστιμότητας, τόσο αυστηρότερες είναι οι απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8 για τις λεπτομέρειες όπλισης και την κατασκευαστική διαμόρφωση των δομικών μελών (για την εξασφάλιση τοπικής πλαστιμότητας), καθώς και για τη μέσω ικανοτικού σχεδιασμού αποφυγή διατμητικής αστοχίας των μελών. Μάλιστα, ο Ευρωκώδικας 8 περιλαμβάνει και ένα αναλυτικό τρόπο υπολογισμού της απαιτούμενης πλαστιμότητας μελών σε όρους δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, μ_{ϕ} , με βάση την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό του δομικού συστήματος. Από την τιμή του μ_{ϕ} που προκύπτει για την πλαστική άρθρωση δοκών, υποστρωμάτων ή τοιχωμάτων, προκύπτουν και οι βασικές απαιτήσεις όπλισης των περιοχών αυτών για τοπική πλαστιμότητα. Λεπτομέρειες δίνονται στο Κεφ. 4.

Αν ένα κτίριο με πλαισιακό δομικό σύστημα σχεδιασθεί για την ίδια σεισμική δράση αλλά για Κατηγορία Πλαστιμότητας M ή H , προκύπτει γενικά παρόμοια συνολική ποσότητα χάλυβα ή σκυροδέματος για τις δύο κατηγορίες και πρακτικά ισοδύναμη δυναμική συμπεριφορά στο σεισμό σχεδιασμού των 475 χρόνων (ακόμη και στον “ενδεχόμενο” σεισμό των 75 χρόνων). Απλώς η Κατηγορία H φαίνεται να έχει κάποιο ελαφρό πλεονέκτημα για υψηλόροφα κτίρια σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας (π.χ. 12-όροφα και πάνω για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση της τάξεως του 0.4g), ενώ η M φαίνεται να πλεονεκτεί κάπως για χαμηλόροφα κτίρια (π.χ. 4-όροφα) σε περιοχές μέσης σεισμικότητας (π.χ. μέγιστη επιτάχυνση εδάφους 0.2g). Ο σχεδιασμός για Κατηγορία Πλαστιμότητας L φαίνεται να δίνει εξίσου ικανοποιητική συμπεριφορά σε σύγκριση με τις δύο άλλες Κατηγορίες – με πιθανή εξαίρεση τα υψηλόροφα σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας – όμως είναι εντελώς αντιοικονομικός και τεχνικά άστοχος εκτός των περιοχών χαμηλής σεισμικότητας (ή και μέσης σεισμικότητας, αλλά για χαμηλόροφα κτίρια, π.χ. μέχρι 4-όροφα). Ορθώς δηλαδή ο Ευρωκώδικας 8 συνιστά την Κατηγορία Πλαστιμότητας L μόνο για χαμηλή σεισμικότητα (για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μέχρι 0.1g).

Το πνεύμα του Ευρωκώδικα 8 είναι ότι η επιλογή ανάμεσα στις τρεις εναλλακτικές Κατηγορίες Πλαστιμότητας επαφίεται στις αρχές των κρατών-μελών της Σύμβασης

Ευρωπαϊκής Τυποποίησης (CEN), ή και στον κύριο του έργου ή το Μελετητή Μηχανικό, εφόσον οι αρμόδιες αρχές αφήσουν ανοικτή την επιλογή αυτή. Η “Χαμηλή” Κατηγορία Πλαστιμότητας, που είναι ευκολότερη στην εφαρμογή της, είναι οπωσδήποτε καταλληλότερη για τις περιοχές χαμηλής σεισμικότητας, όπου και αναμένεται να δίνει οικονομικότερα αποτελέσματα από τις δύο άλλες. Αντίθετα η “Υψηλή” Κατηγορία προσφέρεται για τις περιοχές πολύ υψηλής σεισμικότητας, όπου το μεγάλο μέγεθος του σεισμού σχεδιασμού των 475 χρόνων καθιστά πρακτικά ανέφικτο τον αντισεισμικό σχεδιασμό χωρίς υψηλές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q . Η εφαρμογή της “Υψηλής” Κατηγορίας στις περιοχές αυτές αναμένεται να διευκολυνθεί από την επαγγελματική παράδοση και εξειδίκευση που θα υπάρχει ήδη εκεί, αφενός μεν στην Αντισεισμική Τεχνολογία και στη σύνταξη απαιτητικών μελετών αντισεισμικών κατασκευών, αφετέρου δε στην υλοποίηση κατασκευαστικά δυσχερών λεπτομερειών όπλισης.

1.4.4 ΟΙ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Στο θέμα της υποκατάστασης αντοχής με πλαστιμότητα, τα σχετικά Αμερικανικά Κανονιστικά κείμενα συνδέουν την επιλογή με τη σεισμικότητα. Οι επίσημοι Κανονισμοί επιτρέπουν στις δύο κατώτερες ζώνες σεισμικότητας των ΗΠΑ τη χρήση "κοινών" πλαισίων, ή γενικότερα δομικών συστημάτων οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία ακολουθούν τις διατάξεις για μή-αντισεισμικά έργα (αντίστοιχων με τη “Χαμηλή” Κατηγορία Πλαστιμότητας του Ευρωκώδικα 8). Στις δύο υψηλότερες ζώνες επιβάλλεται η χρήση "ειδικών" πλαισίων ή δομικών συστημάτων οπλισμένου σκυροδέματος, για τα οποία εφαρμόζεται το πλήρες φάσμα του ικανοτικού σχεδιασμού και αυστηρές λεπτομέρειες όπλισης, κ.λ.π. των μελών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται πλαστιμότητα στο σύνολο, αλλά και στις κρίσιμες περιοχές μελών του δομήματος. Τα “ειδικά” πλαίσια ή δομικά συστήματα αντιστοιχούν περίπου στην “Υψηλή” Κατηγορία Πλαστιμότητας του Ευρωκώδικα 8. Στη ζώνη ενδιάμεσης σεισμικότητας τέλος, επιτρέπεται η χρήση "ενδιαμέσων" πλαισίων ή δομικών συστημάτων, στα οποία ικανοτικός σχεδιασμός εφαρμόζεται (και μάλιστα σε χαλαρότερη μορφή) μόνο για τη διαστασιολόγηση των μελών σε διάτμηση, ενώ και οι κατασκευαστικές διατάξεις για την τοπική πλαστιμότητα των μελών είναι ενδιάμεσης αυστηρότητας. Τα “ενδιάμεσα” πλαίσια ή δομικά συστήματα μπορούν να θεωρηθούν ότι βρίσκονται μεταξύ των Κατηγοριών Πλαστιμότητας “Μέση” και “Χαμηλή” του Ευρωκώδικα 8.

Οι Οδηγίες NEHRP για κτίρια, οι οποίες παρόλο που δεν αποτελούν επίσημο Κανονισμό θεωρούνται τεχνικά πληρέστερες, υιοθετούν την ίδια κατηγοριοποίηση των δομημάτων οπλισμένου σκυροδέματος σε "κοινά", "ενδιάμεσα" ή "ειδικά", και τους αντίστοιχους κανόνες για ικανοτικό σχεδιασμό και κατασκευαστικές διατάξεις. Ομως συνδέουν την επιλογή μεταξύ των τριών κατηγοριών όχι μόνο με τη σεισμικότητα αλλά και με την επιθυμητή "Σεισμική Επιτελεστικότητα" ("Seismic Performance"), η οποία είναι αύξουσα συνάρτηση της σεισμικότητας και της "Σεισμικής Σπουδαιότητας" ή "Ευαισθησίας" του κτιρίου (που συναρτάται με τον τρόπο χρήσης και τη σπουδαιότητά του).

Οι συντελεστές "μείωσης των δυνάμεων, R , (ισοδύναμοι του Ευρωπαϊκού συντελεστή q) που ορίζουν οι Αμερικανικοί Κανονισμοί είναι διαφορετικοί για τις ανωτέρω τρεις κατηγορίες πλαισίων ή δομικών συστημάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται τιμές του R μεταξύ 8 και 8.5 για τα "ειδικά" δομικά συστήματα, μεταξύ 6 και 6.5 για τα "ενδιάμεσα" αν περιλαμβάνουν και τοιχώματα ή μεταξύ 4 και 5 αν δεν περιλαμβάνουν, και μεταξύ 2 και 3.5 για τα "κοινά" δομικά συστήματα. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά υψηλότερες των τιμών q που ορίζει ο Ευρωκώδικας 8 για παρόμοιες απαιτήσεις κατασκευαστικών λεπτομερειών και σχεδιασμού των μελών.

1.4.5 ΟΙ ΝΕΟΖΗΛΑΝΔΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Οι Κανονισμοί της Νέας Ζηλανδίας, χώρας από την οποία ουσιαστικά πηγάζει η σύγχρονη φιλοσοφία και πρακτική του αντισεισμικού σχεδιασμού για ελεγχόμενη ανελαστική απόκριση μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού και των λεπτομερειών όπλισης, επιτρέπει στον ίδιο το Μελετητή Μηχανικό να επιλέξει τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_s , μικρότερη από την τιμή 6.0 που ισχύει για "πλαίσια πλήρους πλαστιμότητας". Στην περίπτωση αυτή οι σεισμικές δυνάμεις για τον υπολογισμό του δομικού συστήματος αυξάνονται, καθώς το φάσμα σχεδιασμού δίνεται από αλγεβρική συνάρτηση του μ_s . Ως αντάλλαγμα, μερικά (ή ακόμα και όλα) τα υποστυλώματα επιτρέπεται να αναπτύξουν πλαστικές αρθρώσεις (ιδιαίτερα τα εσωτερικά, για τα οποία η ικανοποίηση της εξ.(1.3) είναι εγγενώς δυσχερέστερη), στα δε υπόλοιπα εφαρμόζεται η εξ.(1.3) με χαμηλότερες τιμές του συντελεστή υπεραντοχής γ_{Rd} . Σ' αυτά τα πλαίσια "περιορισμένης πλαστιμότητας" εφαρμόζεται δείκτης πλαστιμότητας μ_s που παίρνει τιμές μεταξύ 1.25 και 3.0, ανάλογα με το τι ποσοστό της σεισμικής τέμνουσας ορόφου αναλαμβάνεται από τα υποστυλώματα για τα οποία εφαρμόζεται η εξ.(1.3) του

ικανοτικού σχεδιασμού. Ο ικανοτικός σχεδιασμός σε διάτμηση χαλαρώνει λίγο στα πλαίσια “περιορισμένης πλαστιμότητας” ως προς την τιμή του συντελεστή υπεραντοχής γ_{Rd} στις εξ.(1.6) και (1.7), και ως προς το ότι στα υποστυλώματα αναγνωρίζεται το (ευμενέστερο για την τέμνουσα) ενδεχόμενο να σχηματισθούν πλαστικές αρθρώσεις στις δοκούς (πρβλ. εξ.(1.8)-(1.10)). Τέλος, οι απαιτήσεις λεπτομερειών όπλισης χαλαρώνουν αισθητά με τη μείωση της τιμής του μ_s , προσεγγίζοντας αυτές των μή-αντισεισμικών δομημάτων.

Η προσέγγιση του θέματος της υποκατάστασης αντοχής με πλαστιμότητα από τους Νεοζηλανδικούς Κανονισμούς φαίνεται να πλησιάζει σχεδόν την ιδανική, καθότι συνδυάζει:

- πλήρη ελευθερία επιλογής από το Μηχανικό,
- συνεχές φάσμα τιμών του μ_s και αντίστοιχων απαιτήσεων υπολογισμού και λεπτομερειών όπλισης, αντί των διακριτών επιλογών και τιμών του συντελεστή συμπεριφοράς q (ή R) που προβλέπουν άλλοι Κανονισμοί (πλην του Ευρωκώδικα 8), και
- σχετική απλότητα της εφαρμογής εναλλακτικών συνδυασμών αντοχής και πλαστιμότητας, απλότητα που διευκολύνει τη διαδικασία σχεδιασμού καθώς και την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων γι' αυτήν.

1.4.6 Ο ΙΑΠΩΝΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

Η αντιμετώπιση του θέματος της υποκατάστασης της αντοχής με πλαστιμότητα από τον Ιαπωνικό Κανονισμό χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα αντίστοιχα των δύο πρώτων του Νεοζηλανδικού, αλλά είναι αρκετά περίπλοκη και περιπτώσιολογική στην εφαρμογή της, δυσχεραίνοντας εξαιρετικά την ανάπτυξη γενικών υπολογιστικών εργαλείων για το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, προβλέπει τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες πλαστιμότητας (ή "Κατηγορίες Επιτελεστικότητας" - "Performance Rating") σε επίπεδο κτιρίου, ορόφου ή και μέλους, και επιτρέπει το συνδυασμό στον ίδιο όροφο μελών διαφορετικής κατηγορίας πλαστιμότητας, καθώς και το σχεδιασμό διαφορετικών ορόφων για διαφορετική κατηγορία πλαστιμότητας, με συνακόλουθη χρήση διαφορετικής τιμής του δείκτη q ή R . Για το σκοπό αυτό οι σεισμικές δυνάμεις ορίζονται σε επίπεδο τέμνουσας ορόφου, αντί των σεισμικών (αδρανειακών) δυνάμεων που ασκούνται στον όροφο όπως ορίζουν οι άλλοι Κανονισμοί. Αυτό δίνει τη δυνατότητα χρήσης συντελεστή q με τιμή που εξαρτάται από το ποσοστό της τέμνουσας ορόφου που αναλαμβάνεται από

τοιχώματα και από την κατηγορία πλαστιμότητας των μελών του ορόφου, ανεξάρτητα από το τι γίνεται στους ανώτερους ορόφους.

Αν συμβολίσουμε τις τέσσερις κατηγορίες πλαστιμότητας με Y (Υψηλή), M (Μεσαία), X (Χαμηλή) και O (Μηδέν), τότε η πλαστιμότητα ενός ορόφου χαρακτηρίζεται ως Y ή X, αν τουλάχιστον 50% της τέμνουσάς του αναλαμβάνεται από στοιχεία αυτής της κατηγορίας. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως M. Αν υπάρχει έστω και ένα στοιχείο κατηγορίας O, τότε ο όροφος κατατάσσεται σ' αυτήν την κατηγορία και απαιτεί ειδική μέριμνα. Κατά τον ίδιο Κανονισμό, αν 70% της τέμνουσας ορόφου αναλαμβάνεται από τοιχώματα ή πλαίσια, ο όροφος χαρακτηρίζεται ως τοιχωματικός ή πλαίσιακός αντίστοιχα, ενώ στις ενδιάμεσες περιπτώσεις θεωρείται ως μεικτός (δυναδικός).

Τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q ορίζονται μέσω του αντιστρόφου τους. Η κατώτερη τιμή του $1/q$ είναι το 0.3 και αφορά πλαίσιακούς ορόφους πλαστιμότητας Y και η υψηλότερη το 0.55, που ισχύει για τοιχωματικούς ορόφους πλαστιμότητας O. Η τιμή του $1/q$ αυξάνεται κατά 0.05, πηγαίνοντας από πλαίσιακά σε μεικτά και μετά σε τοιχωματικά συστήματα, ή κατεβαίνοντας κατά μία κατηγορία πλαστιμότητας. Προκειμένου να γίνει η σύγκριση με άλλους Κανονισμούς, οι ανωτέρω τιμές του $1/q$ χρειάζεται να πολλαπλασιασθούν επί 0.9. Τότε η υψηλότερη ισοδύναμη τιμή του q είναι το 3.8 (για πλαίσια κατηγορίας Y) και η χαμηλότερη το 2.0 (για τοιχώματα κατηγορίας O).

Ο χαρακτηρισμός της πλαστιμότητας στοιχείων ως Y, M, X ή O γίνεται ανάλογα με τον κυρίαρχο τρόπο αστοχίας (για μή-καμπτικούς τρόπους αστοχίας ο χαρακτηρισμός είναι πάντα O) και την τιμή της τέμνουσας σχεδιασμού (ανηγμένης στο bdf_{cd}). Για τα υποστυλώματα λαμβάνεται υπόψη και η τιμή του λόγου $v_d=N/A_c f_{cd}$, ο λόγος ύψους προς διάσταση διατομής (δηλαδή ο λόγος διάτμησης, πρβλ. κοντά υποστυλώματα) και το ποσοστό διαμήκους χάλυβα.

Επισημαίνεται ότι με το σύστημα αυτό ο Ιαπωνικός Κανονισμός είναι πιο προχωρημένος από οποιονδήποτε άλλον, καθότι δεν χρησιμοποιεί μία συνολική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q για το κτίριο, αλλά εισάγει ουσιαστικά την έννοια του συντελεστή q μέλους, ανάλογα με την εγγενή ή πρόσκτητη πλαστιμότητά του. Ομως, παρά την ευελιξία που προσφέρει στο Μηχανικό, το σύστημα αυτό είναι δύσχρηστο, ιδίως από υπολογιστική άποψη. Ο λόγος είναι ότι, για τον καθορισμό των οριζοντίων δυνάμεων για τις οποίες θα πρέπει να αναλυθεί το δομικό σύστημα, χρειάζονται (για τον

καθορισμό της τιμής του q) πληροφορίες για τις τέμνουσες, τις αξονικές δυνάμεις, κ.λ.π., των στοιχείων, οι οποίες κανονικά προκύπτουν από την ανάλυση, καθώς και άλλες πληροφορίες, όπως το ποσοστό οπλισμού, που προκύπτουν από τη διαστασιολόγηση. Προφανώς αυτή η προσέγγιση προσφέρεται μόνο για υπολογισμούς (ανάλυση και διαστασιολόγηση) ανά όροφο και με το χέρι, απαιτώντας ενδεχομένως χονδρικές προσεγγίσεις της κατανομής των σεισμικών τεμνουσών ορόφου στα μέλη του, ανεξάρτητα του τι συμβαίνει στους γειτονικούς ορόφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, “Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός”, ΦΕΚ 2184 Β/20-12-1999 & ΦΕΚ Β/18-6-2003.

Τ.Β. Παναγιωτάκος και Μ.Ν. Φαρδής, 2003. “Συγκριτική αξιολόγηση σεισμικής συμπεριφοράς πολυορόφων πλαισίων Ο.Σ., σχεδιασμένων με τους Ελληνικούς Κανονισμούς ή με τους Ευρωκώδικες 2003”, 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κώς, Οκτώβριος 2003, Τομ. Γ, σελ. 258-269.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 1999. “Κανονισμός για τη Μελέτη και Κατασκευή Εργων από Σκυρόδεμα”, ΦΕΚ 1329Β/6-11-2000.

ACI, 1999. "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)". American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Architectural Institute of Japan, 1992. "AIJ Standard for Structural Calculation of Reinforced Concrete Structures".

ASCE, 2000. "Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings". American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency (FEMA Report 356), Nov. 2000, Washington, D.C.

BSSC, 2000. NEHRP "Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, 2000 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary". Building Seismic Safety Council for Federal Emergency Management Agency (FEMA Reports 368 & 369), Washington, D.C.

CEN, 2004. European Standard EN 1998-1:2004 “Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1: General rules, Seismic actions and rules for buildings”, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2004.

International Conference of Building Officials. "Uniform Building Code", Whittier, CA.

New Zealand Standards Association, 1995. "Concrete Structures Standard", NZS 3101, Wellington, New Zealand.

New Zealand Standards Association, 1992. "Code of Practice for General Structural Design and Design Loadings for Buildings", NZS 4203, Wellington, New Zealand.

T.B. Panagiotakos and M.N. Fardis, 2003. "Performance of RC Frame Buildings Designed for Alternative Ductility Classes According to Eurocode 8 (Final Version, 2003)", Proc. 5th US-Japan Workshop on Performance-based Earthquake Engineering methodology for Reinforced Concrete building structures, Hakone, Japan.

T.B. Panagiotakos and M.N. Fardis, 2004. "Seismic Performance of RC Frame Buildings designed to the three Ductility Classes of EN1998 (Eurocode 8) or the Greek Codes 2000", Bulletin of Earthquake Engineering, Kluwer Academic Publishers, Vol.2, No.2.

M.N. Fardis and T.B. Panagiotakos, 1997. "Seismic Design and Response of Bare and Infilled Reinforced Concrete Buildings. Part I: Bare Structures, Journal of Earthquake Engineering", Imperial College Press, Vol.1, No. 1, Jan. 1997, pp. 219-256.

T.B. Panagiotakos and M.N. Fardis, 1998. "Effect of Column Capacity Design on Earthquake Response of Reinforced Concrete Buildings, Journal of Earthquake Engineering", Imperial College Press, Vol.2, No 1, pp. 113-145.

SEAOC, 1999. "Recommended lateral force requirements and commentary", Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, 7th Edition, Sacramento, Ca.

ΑΛΦΑΒΗΤΙΚΟ ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

Ανελαστική συμπεριφορά (inelastic behaviour, inelastic response): Αυτή που δεν χαρακτηρίζεται από αναλογία μεταξύ δυνάμεων και παραμορφώσεων/μετακινήσεων.

Γωνία στροφής χορδής (chord rotation): η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στον άξονα του μέλους στο ένα άκρο και της χορδής που ενώνει τα δύο άκρα του, στην παραμορφωμένη του κατάσταση (Σχ. 1.3).

Γωνιακή (καθ' ύψος) παραμόρφωση δομικού συστήματος (drift ratio): Ο λόγος της σχετικής οριζόντιας μετακίνησης δύο σημείων του δομικού συστήματος που βρίσκονται στην ίδια κατακόρυφο (π.χ. σε διαδοχικούς ορόφους) δια της μεταξύ τους απόστασης. Ορίζεται και για το σύνολο του δομικού συστήματος, οπότε

ισούται με τη μετακίνηση στην κορυφή διά του ύψους.

Δείκτης πλαστιμότητας (ductility factor): Ο λόγος ενός μεγέθους μετακίνησης ή παραμόρφωσης (π.χ. γωνίας στροφής χορδής, ή καμπυλότητας) προς την αντίστοιχη τιμή στη διαρροή.

Δυαδικό δομικό σύστημα (dual structural system): Δομικό σύστημα πλαισίων δοκών-υποστυλωμάτων για την ανάληψη των κατακορύφων δράσεων και 35% έως 65% της σεισμικής δράσης, σε συνδυασμό με τοιχώματα για την ανάληψη του υπολοίπου 65% έως 35% της σεισμικής δράσης.

Δομικό μέλος ή στοιχείο (structural member, structural element): Επιμέρους στοιχείο του δομικού συστήματος.

Δομικό σύστημα (structural system): Το τμήμα του δομήματος που σχεδιάζεται για να προσφέρει την αντοχή και την ασφάλεια που απαιτείται έναντι των εξωτερικών δράσεων (εν προκειμένω το σεισμό).

Δόμημα (structure): Έργο Πολιτικού Μηχανικού που διαθέτει μηχανική αντοχή έναντι εξωτερικών δράσεων.

Ικανοτικός σχεδιασμός (capacity design): Ο καθορισμός των αντοχών των μελών του δομικού συστήματος, έτσι ώστε τα πλάστιμα μέλη και τρόποι αστοχίας να φθάνουν πρώτα την αντοχή τους και τα ψαθυρά να παραμένουν ελαστικά. Επιτυγχάνεται με διαστασιολόγηση των πλάστιμων δομικών μελών και τρόπων αστοχίας ακριβώς για την ένταση από την ανάλυση για το σεισμό σχεδιασμού, και με διαστασιολόγηση κατόπιν των ψαθυρών δομικών μελών με βάση τις συνθήκες ισορροπίας, ώστε να προκύπτει κάποια υπεραντοχή έναντι της έντασης που δίνει γι' αυτά η ανάλυση.

Κατηγορία πλαστιμότητας (Ductility Class): Μία από τις (δύο ή περισσότερες) επιλογές που δίνει ο Κανονισμός στο Μηχανικό για συνδυασμό αντοχής σχεδιασμού και πλαστιμότητας του δομικού συστήματος.

Μαλακός όροφος (soft storey): Εκείνη η κατάσταση του δομικού συστήματος κτιρίου όπου όλα τα κατακόρυφα μέλη ανάμεσα σε δύο διαδοχικές οριζόντια απαραμόρφωτες στάθμες (ορόφους) αναπτύσσουν πλαστικές αρθρώσεις και στα δύο άκρα τους, επιτρέποντας την απεριόριστη σχετική οριζόντια μετακίνηση των δύο σταθμών που συνδέουν.

Μη-φέροντα στοιχεία (non-structural elements): Τα στοιχεία του δομήματος που δεν λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ως μέρος του συστήματος ανάληψης των εξωτερικών δράσεων (δηλαδή του δομικού συστήματος), ασχέτως του ότι μπορεί

στην πραγματικότητα κατά το σεισμό να συμβάλλουν σημαντικά στην αντοχή και στη δυσκαμψία.

Μήκος διάτμησης (shear span): Ο λόγος της ροπής κάμψης στο άκρο ενός μέλους, προς την αντίστοιχη τέμνουσα δύναμη.

Πλαστική άρθρωση (plastic hinge): Περιοχή ενός γραμμικού δομικού μέλους (δοκού, υποστυλώματος, τοιχώματος) που έχει φθάσει την καμπτική αντοχή της και εξακολουθεί να αναπτύσσει μεγάλες σε μέγεθος καμπτικές παραμορφώσεις (γωνίες στροφής) χωρίς ουσιαστική αύξηση της αντίστασής της.

Πλάστιμη συμπεριφορά (ductile behaviour): Αυτή που χαρακτηρίζεται για μεν μονοτονική ένταση από σχεδόν απεριόριστη αύξηση των παραμορφώσεων χωρίς ουσιαστική πτώση της αντίστασης (αντοχής), για δε ανακυκλιζόμενη ένταση από βρόχους υστέρησης δύναμης-παραμόρφωσης που είναι περίπου σταθεροί σε πλάτος και σε μέγιστη δύναμη για σταθερό εύρος των κύκλων επιβεβλημένης παραμόρφωσης.

Πλάστιμο μέλος (ductile element): Αυτό που για τον τύπο έντασης που μας ενδιαφέρει εμφανίζει πλάστιμη συμπεριφορά.

Πλαστιμότητα (ductility): Η δυνατότητα πλάστιμης συμπεριφοράς υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη ένταση.

Σεισμική δράση σχεδιασμού (design seismic action): Η σεισμική δράση για την οποία κατά κανόνα απαιτείται να μη διακινδυνεύσουν ανθρώπινες ζωές λόγω βλαβών του δομικού συστήματος. Συνήθως επιλέγεται να έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια, δηλαδή μέση περίοδο επανάληψης 475 χρόνια (“σπάνιος” σεισμός).

Στάθμη επιτελεστικότητας (performance level): Επιθυμητή σεισμική συμπεριφορά του δομήματος, εκφρασμένη σε όρους που έχουν φυσικό νόημα και σχετίζονται με το σκοπό και τη χρήση του δομήματος. Ορίζεται συνήθως για συγκεκριμένη σεισμική δράση.

Συζευγμένα τοιχώματα (coupled walls): Ένα ή περισσότερα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος, συνδεδεμένα σε κανονικά διαστήματα (συνήθως στις στάθμες των ορόφων) μέσω ειδικών πλάστιμων δοκών (δοκών σύζευξης), στα οποία το άθροισμα των σεισμικών ροπών στη βάση είναι κατά 25% τουλάχιστον του αντίστοιχου αθροίσματος αν δεν υπήρχε η σύζευξη μέσω των δοκών. (Η διαφορά των ροπών μεταφράζεται σε ζεύγη που δημιουργούν οι σεισμικές αξονικές δυνάμεις των τοιχωμάτων).

Συντελεστής συμπεριφοράς, q (behaviour factor): Συντελεστής με τον οποίο διαιρείται η ελαστική σεισμική δράση (όπως αυτή ορίζεται μέσω του ελαστικού φάσματος με συντελεστή απόσβεσης 5%) για το σχεδιασμό των δομημάτων κατά τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς. Για την ακρίβεια, συντελεστής με τον οποίο διαιρούνται οι τεταγμένες του ελαστικού φάσματος, για να προκύψει το φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιείται για την ελαστική ανάλυση του δομήματος και τη διαστασιολόγησή του).

Συνολική πλαστιμότητα (global ductility): Η πλαστιμότητα (και η πλάστιμη συμπεριφορά) του δομικού συστήματος ως σύνολο (δηλαδή σε όρους σχέσης μετακίνησης κορυφής και συνολικής οριζόντιας δύναμης).

Σχεδιασμός (design): Το πρώτο στάδιο της παραγωγής ενός δομήματος, το οποίο καταλήγει στα κατασκευαστικά σχέδια και τις πλήρεις προδιαγραφές και οδηγίες που απαιτούνται για την κατασκευή του δομήματος. Περιλαμβάνει τις φάσεις της αρχικής σύλληψης/μόρφωσης, της ανάλυσης για τις δράσεις σχεδιασμού, της διαστασιολόγησης των δομικών μελών και της σύνταξης των κατασκευαστικών σχεδίων.

Τοπική πλαστιμότητα (local ductility): Η πλαστιμότητα δομικών μελών ή περιοχών τους (όπως εκφράζεται σε όρους σχέσης τοπικής έντασης και σχετικής παραμόρφωσης).

Φορέας: Δομικό σύστημα.

Ψαθυρή συμπεριφορά (ή μέλος) (brittle behaviour or element): Το αντίθετο της πλάστιμης (-μου). Για μονοτονική ένταση χαρακτηρίζεται από απότομη πτώση της αντίστασης (και απώλεια φέρουσας ικανότητας) λίγο μετά την έξοδο από την ελαστική περιοχή της συμπεριφοράς. Για ανακυκλιζόμενη ένταση, χαρακτηρίζεται από ταχεία μείωση του πλάτους και της μέγιστης δύναμης του βρόχου δύναμης-παραμόρφωσης, υπό κύκλους επιβεβλημένης παραμόρφωσης σταθερού εύρους.