



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΜΑΓΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΑΘΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	i
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
ABSTRACT	viii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	1
1.2 Σεισμική δράση στην κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα	4
1.3 Ανάλυση σεισμικής έντασης και αντισεισμικός σχεδιασμός	9
1.3.1 Ικανοτικός σχεδιασμός.....	10
1.4 Ελαστικό φάσμα απόκρισης και σχεδιασμού	10
1.5 Συντελεστής συμπεριφοράς και ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού	11
1.6 Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας.....	13
1.7 Συντελεστής σπουδαιότητας	15
1.8 Προσδιορισμός κατηγορίας εδάφους	15
1.9 Κατηγορίες Πλαστιμότητας	16
1.10 Κριτήρια Κανονικότητας.....	18
2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ, ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	20
2.1 Σεισμική επικινδυνότητα.....	20
2.2 Σεισμική διακινδύνευση	27
2.3 Καμπύλες τρωτότητας.....	33
2.3.1 Εισαγωγή.....	33
2.3.2 Προσαυξητική δυναμική ανάλυση	33
2.3.3 Ανάλυση με τη μέθοδο πολλαπλών “λωρίδων” (Multiple stripe analysis, MSA). 36	
2.3.4 Σχεδιασμός Καμπυλών Τρωτότητας	37

3	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	40
3.1	Μέθοδοι προσεισμικών ελέγχων	40
3.2	Πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος.....	40
3.3	Δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος	43
3.3.1	Κατάταξη κτιρίου σε σεισμική κατηγορία δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου	48
3.4	Τριτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος.....	49
3.4.1	Βήματα υπερωθητικής ανάλυσης.....	51
4	ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	54
4.1	Παθολογία κατασκευών	54
4.2	Βλάβες σε υποστυλώματα	57
4.3	Βλάβες σε τοιχώματα	60
4.4	Βλάβες σε οριζόντια δομικά μέλη (δοκοί)	62
4.5	Βλάβες σε κόμβους δοκών- υποστυλωμάτων	63
4.6	Μέθοδοι ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	66
4.6.1	Γενικά.....	66
4.6.2	Ενίσχυση υποστυλώματος με μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ο/Σ)	68
4.6.3	Ενίσχυση υποστυλώματος μέσω περίσφιγξης.....	70
4.6.4	Ενίσχυση υφιστάμενης κατασκευής με προσθήκη νέων στοιχείων	73
4.6.5	Σεισμική μόνωση των κατασκευών.....	74
4.6.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σεισμικής μόνωσης	77
4.7	Είδη συστημάτων σεισμικής μόνωσης.....	78
4.7.1	Γενικά.....	78
4.7.2	Συστήματα μείωσης της δυσκαμψίας.....	79
4.7.3	Συστήματα αύξησης της απόσβεσης	80
4.7.4	Συστήματα ταυτόχρονης αύξησης απόσβεσης και μείωσης της δυσκαμψίας.....	80
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Διάφορες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. (1) (2).	1
Εικόνα 1.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σκυροδέματος σε εφελκυσμό και σε θλίψη. (3)....	2
Εικόνα 1.3: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης χάλυβα σε εφελκυσμό και σε θλίψη. (4).....	3
Εικόνα 1.4: Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα ύστερα από πυρκαγιά. (1).....	4
Εικόνα 1.5: Κτίρια τα οποία έχουν αστοχήσει από σεισμό. (5)	5
Εικόνα 1.6: Πλαίσιο το οποίο αποτελείται από δύο υποστυλώματα και μία δοκό. (6).....	7
Εικόνα 1.7: Φόρτιση του πλαισίου κατά την οριζόντια διεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά κατά την διάρκεια ενός σεισμού. (6).....	7
Εικόνα 1.8: Φόρτιση του ίδιο πλαισίου κατά την οριζόντια διεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά κατά την διάρκεια ενός σεισμού. (6)	8
Εικόνα 1.9: Ορισμός συντελεστή συμπεριφοράς η	11
Εικόνα 1.10: Φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (7).....	12
Εικόνα 1.11: Ελαστικό φάσμα Ευρωκώδικα 8 στην οριζόντια διεύθυνση για απόσβεση 5%(Fardis 2009a).	13
Εικόνα 1.12: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα.....	14
Εικόνα 1.13: Εποπτικά κριτήρια κανονικότητας σε όψη.	19
Εικόνα 2.1: Παράδειγμα κατανομής μεγέθους-συχρότητας (10).	21
Εικόνα 2.2: Διάφορα μοντέλα κίνησης εδάφους που δείχνουν κλιμάκωση της διάμεσης PGA με μέγεθος (M_w) και εξασθένηση με απόσταση (απόσταση Joyner-Boore, RJB). (10).....	21
Εικόνα 2.3: Βασικά βήματα της αιτιοκρατικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας. (8)	23
Εικόνα 2.4: Απλοποιημένο σκίτσο της αιτιοκρατικής μεθόδου εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας (11).	23
Εικόνα 2.5: Τα βασικά βήματα της πιθανοτικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας (8)	25
Εικόνα 2.6: Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας που έχουν υπολογιστεί με βάση μια συγκεκριμένη εμπειρική σχέση υπολογισμού της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), αλλά με διαφορές τιμές για την τυπική απόκλιση, σ , της σχέσης. (8)	26
Εικόνα 2.7: α) Δείγμα μοντελοποίησης σεισμικών πηγών για τα Βόρεια Βαλκάνια, β) Χάρτης σεισμικού κινδύνου που προέρχεται από το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην α. (11)	26
Εικόνα 2.8: Καμπύλες τρωτότητας για δύο στάθμες βλάβης. (9)	27
Εικόνα 2.9: Καμπύλες τρωτότητας. (10).....	28
Εικόνα 2.10: Μέσες οικονομικές απώλειες σε εκατομμύρια ευρώ για διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Τουρκίας. (10)	30
Εικόνα 2.11: Λόγος μέσων οικονομικών απωλειών για διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Τουρκίας. (10)	30
Εικόνα 2.12: Μέσες απώλειες ζωής για διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Τουρκίας. (10)	31
Εικόνα 2.13: Καμπύλες απωλειών που δείχνουν τις περιόδους επιστροφής της συνολικής οικονομικής ζημίας (σε Δισ. ευρώ) για κάθε χώρα. (10).....	32
Εικόνα 2.14: Μέσες οικονομικές απώλειες για διάφορες χώρες της Ευρώπης. (10)	31
Εικόνα 2.15: Καμπύλες προσαυξητικής ανάλυσης (μέτρο έντασης - μέτρο βλάβης) (15).....	35
Εικόνα 2.16: Κατανομή περιπτώσεων αστοχίας ή μη για διαφορετικά μέτρα έντασης (16).....	36

Εικόνα 2.17: Καμπύλη τρωτότητας η οποία υποδεικνύει την πιθανότητα αστοχίας συγκριτικά με το μέτρο έντασης (16).	39
Εικόνα 3.1: Δελτίο Πρωτοβάθμιου Προσεισμικού Ελέγχου. (18).....	42
Εικόνα 3.2: α) Φυτευτό τοίχωμα σε πλάκα, β) Φυτευτό υποστύλωμα σε πλάκα, γ) Φυτευτό υποστύλωμα έκκεντρα στηριζόμενο σε δοκό. (19)	47
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα υπερωθητικής καμπύλης. (20)	50
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροπής- στροφής χορδής. (20)	52
Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικά διαγράμματα ροπών- καμπυλοτήτων. (20)	52
Εικόνα 4.1: Δημιουργία μηχανισμού μαλακού ορόφου λόγω ανομοιομορφίας δυσκαμψίας... 54	
Εικόνα 4.2: Δημιουργία μαλακού ορόφου σε κτίριο με παρουσία πυλωτής.....	55
Εικόνα 4.3: Κατάρρευση κτιρίου έπειτα από το σεισμό του 1999 λόγω ανάπτυξης μαλακού ορόφου.....	55
Εικόνα 4.4: Περιπτώσεις ευμενών και δυσμενών καθ' ύψος κατανομών μάζας (21).	56
Εικόνα 4.5: Κατανομή τοιχωμάτων στην κάτοψη κτιρίων (21).....	56
Εικόνα 4.6: Δημιουργία κοντών υποστυλωμάτων λόγω επιρροής της τοιχοπλήρωσης σε μερικό ποσοστό του ύψους του υποστυλώματος (22).....	56
Εικόνα 4.7: Βλάβες υποστυλωμάτων λόγω ροπής και εναλλασσόμενης τάσης (αριστερά) και σε ισχυρή τέμνουσα και θλιπτική αξονική δύναμη (δεξιά) (21).	58
Εικόνα 4.8: Βλάβη υποστυλωμάτων λόγω μονόπλευρων τοιχοπληρώσεων (21).....	58
Εικόνα 4.9: Κατηγοριοποίηση βαθμών βλάβης σε κατακόρυφα στοιχεία (18).	59
Εικόνα 4.10: Διατμητική αστοχία λόγω ύπαρξης κοντών υποστυλωμάτων (22).	60
Εικόνα 4.11: Διατμητική βλάβη σε τοίχωμα (21).....	60
Εικόνα 4.12: Καμπτική βλάβη τοιχωμάτων (22).	61
Εικόνα 4.13: Βλάβη τοιχώματος στην περιοχή του αρμού διακοπής εργασίας (22).	61
Εικόνα 4.14: Καμπτικές ρωγμές δοκού στην περιοχή του ανοίγματος (α) και στην περιοχή της στήριξης (β) (21).....	62
Εικόνα 4.15: Διατμητικές ρωγμές στην στήριξη δοκού.	63
Εικόνα 4.16: Διατμητική αστοχία λόγω συγκεντρωμένου φορτίου (21).....	63
Εικόνα 4.17: Βλάβες σε κόμβους πλαισίων (21).....	64
Εικόνα 4.18: Διατμητική αστοχία διαγώνιου κόμβου στο σεισμό του Αιγίου (22).....	65
Εικόνα 4.19: Βλάβες σε ακραίους κόμβους (πάνω) και σε ενδιάμεσους (κάτω) (22).....	65
Εικόνα 4.20: Αστοχία (διατμητική) ακραίου κόμβου στο σεισμό της Αθήνας.	66
Εικόνα 4.21: Καμπύλες σεισμικής ικανότητας και ασφαλούς σχεδιασμού ανάλογα με τις στρατηγικές ενίσχυσης (21).	68
Εικόνα 4.22: Ενίσχυση υποστυλώματος με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος (22).	69
Εικόνα 4.23: Ενίσχυση εσωτερικού μεμονωμένου υποστυλώματος (αριστερά) και περιμετρικού σε επαφή με τοίχωμα (δεξιά) (22).	69
Εικόνα 4.24: Εφαρμογή μεταλλικού κλωβού με εξωτερική περίσφιγξη (21).....	70
Εικόνα 4.25: Συνδυασμός μανδυών οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικών κλωβών με σκοπό την ενίσχυση σε αντοχή, δυσκαμψία και πλαστιμότητα (21).	71
Εικόνα 4.26: Καταστατικός νόμος τάσεων - παραμορφώσεων για απερίσφικτο και περισφιγμένο σκυρόδεμα (7).	72
Εικόνα 4.27: Εφαρμογή ενίσχυσης μέσω τοιχωμάτων ή συνδέσμων δυσκαμψίας με σκοπό την ενίσχυση της δυσκαμψίας της υφιστάμενης κατασκευής.	73

Εικόνα 4.28: Αρχή λειτουργίας της σεισμικής μόνωσης (22).	74
Εικόνα 4.29: Αύξηση ιδιοπεριόδου κατασκευής μέσω σεισμικής μόνωσης (22).....	75
Εικόνα 4.30: Τυπική μόνωση συστήματος σεισμικής μόνωσης σε κτιριακή κατασκευή (22)...	76
Εικόνα 4.31: Ελαστομερές εφέδρανο χαμηλής απόσβεσης και εφαρμογή του (22).	79
Εικόνα 4.32: Εφέδρανο ολίσθησης (Αριστερά) και εφέδρανο με επάλληλες διεπιφάνειες ολίσθησης (22).	80
Εικόνα 4.33: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου (αριστερά) και ελαστομεταλλικό εφέδρανο υψηλής απόσβεσης (δεξιά) (22).	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Κατηγορίες κτιρίων και συντελεστής σπουδαιότητας.	15
Πίνακας 1-2: Πίνακας κατηγορίας εδαφών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.....	16
Πίνακας 3-1: Σεισμικές κατηγορίες κτιρίων. (19).....	49

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο “Εκτίμηση σεισμικής τρωτότητας και αποτίμησης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και μέθοδοι ενίσχυσης” εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024. Η υλοποίηση της πτυχιακής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς τη διαρκή υποστήριξη και καθοδήγηση του επιβλέποντος καθηγητή κ. Σταθά Νικόλαου, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα άκρως ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος της σεισμικής τρωτότητας κατασκευών αλλά και της αποτίμησης και της ενίσχυσής τους έπειτα από έντονες σεισμικές φορτίσεις. Η πτυχιακή εργασία αναπτύσσεται σε 5 επιμέρους κεφάλαια όπου σε κάθε ένα από αυτά γίνεται εκτενής ανασκόπηση των προς διερεύνηση ζητημάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε γενικές πληροφορίες σχετικά με τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και γίνεται ανάλυση του φαινομένου της σεισμικής φόρτισης και των επιπτώσεων του στις υφιστάμενες κατασκευές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της σεισμικής επικινδυνότητας των κατασκευών αλλά και της σεισμικής τρωτότητας, δηλαδή της πιθανότητας υπέρβασης αποδεκτών ορίων βλάβης κατά τη σεισμική φόρτιση.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις μεθόδους αποτίμησης υφιστάμενων κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στους προσεισμικούς ελέγχους που έχουν θεσπιστεί σύμφωνα με τους Κανονισμούς και αναλύει τις βασικές παραδοχές που έχουν ληφθεί υπόψη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες αστοχίες στα δομικά στοιχεία που αποτελούν την κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα. Γίνεται εκτενής αναφορά και κατηγοριοποίηση των βλαβών ως προς το είδος τους και την επίδρασή τους στο σύνολο της υφιστάμενης κατασκευής. Επιπρόσθετα, στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των διαφορετικών εναλλακτικών μεθόδων ενίσχυσης μιας υφιστάμενης κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ο τρόπος επιλογής της κατάλληλης μεθόδου ενίσχυσης με σκοπό την αύξηση ιδιοτήτων όπως πλαστιμότητα, αντοχή και δυσκαμψία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα πιο σημαντικά σημεία και εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα έπειτα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που διενεργήθηκε.

ABSTRACT

This thesis constitutes a literature review on the topic of seismic vulnerability of structures, as well as their assessment and strengthening after severe seismic loads. The thesis is categorized into five distinct chapters, each of which provides an extensive review of the issues under investigation.

At the first chapter, general information regarding reinforced concrete structures is presented, along with an analysis of the phenomenon of seismic loading and its impact on existing structures.

The second chapter delves into the concept of seismic risk of structures and seismic vulnerability, which refers to the probability of exceeding acceptable damage thresholds during seismic loading.

The third chapter discusses the methods for assessing existing structures. Specifically, the chapter focuses on pre-seismic inspections established according to the Regulations and analyzes the basic assumptions taken into account.

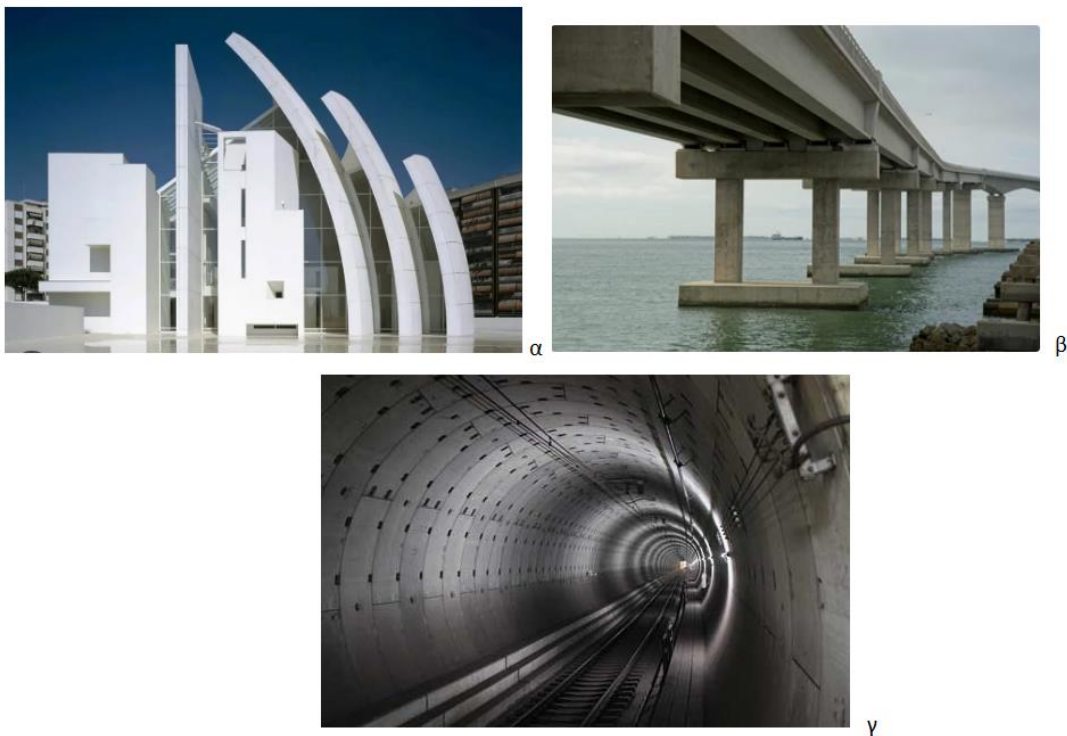
The fourth chapter presents the main failures in the structural elements of reinforced concrete construction. It provides a detailed discussion and categorization of the damages by type and their impact on the overall existing structure. Additionally, this chapter analyzes different alternative methods for strengthening an existing structure. In particular, it is presented the selection process for the appropriate strengthening method aimed at enhancing properties such as ductility, strength, and stiffness.

In the fifth chapter, the most significant points are summarized, and some conclusions are drawn following the literature review conducted.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

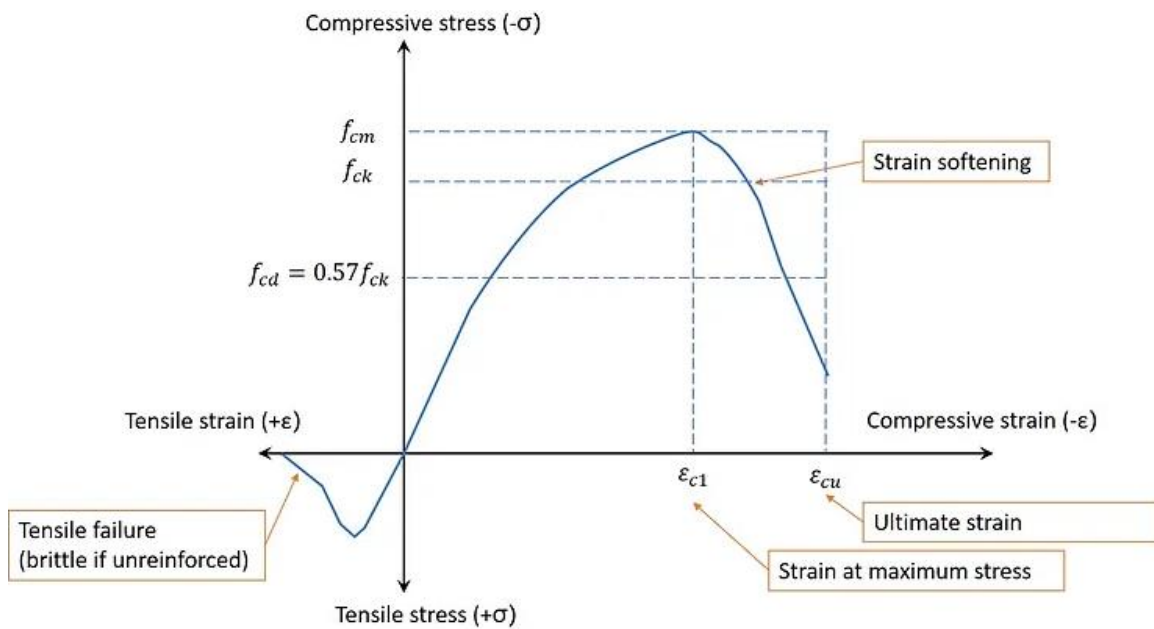
1.1 Κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένας συνδυασμός σκυροδέματος το οποίο έχει ενισχυθεί από χαλύβδινες ράβδους. Με αυτόν τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε την μεγάλη αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος και την αντοχή σε εφελκυσμό του χάλυβα (το σκυρόδεμα δεν έχει καλές εφελκυστικές ιδιότητες). Αυτή η ενίσχυση έχει σαν αποτέλεσμα οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα να έχουν την δυνατότητα να αντιστέκονται σε πολλούς τύπους φόρτισης. Η παρασκευή του οπλισμένου σκυροδέματος πρέπει να είναι προσεκτική. Εάν δεν είναι αρκετά ενισχυμένο, το σκυρόδεμα μπορεί να μην παρουσιάσει τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες κάτι που θα οδηγήσει στην αστοχία της κατασκευής. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα δημοφιλές δομικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή κτηρίων, στην κατασκευή γεφυρών φραγμάτων κ.α. (Εικόνα 1.1).

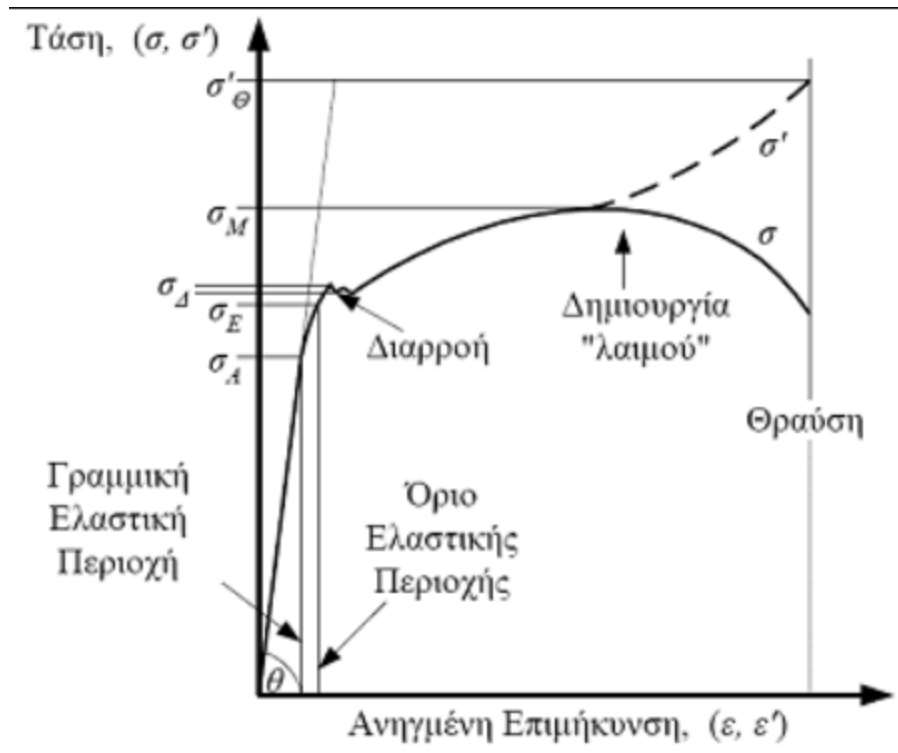


Εικόνα 1.1: Διάφορες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. (1) (2).

Το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει μία σειρά από πλεονεκτήματα (1). Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματά του είναι η υψηλή αντοχή τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το σκυρόδεμα παρουσιάζει καλές θλιπτικές ιδιότητες αλλά όχι καλές εφελκυστικές ενώ παράλληλα είναι και ένα ψαθυρό υλικό (**Error! Reference source not found.**). Στον αντίποδα ο χάλυβας παρουσιάζει καλές ιδιότητες σε εφελκυσμό ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει όλκιμη συμπεριφορά (**Error! Reference source not found.**). Επομένως με την χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος εκμεταλλευόμαστε τις ιδιότητες του χάλυβα για να αντιμετωπίσουμε τις αδυναμίες του σκυροδέματος.



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σκυροδέματος σε εφελκυσμό και σε θλίψη. (3)



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης χάλυβα σε εφελκυσμό.. (4)

Επίσης ένα άλλο πλεονέκτημα του οπλισμένου σκυροδέματος είναι ότι πρόκειται για ένα αρκετά οικονομικό δομικό υλικό. Τα συστατικά του σκυροδέματος είναι ευρέως διαθέσιμα παγκοσμίως και έχουν χαμηλό κόστος. Ομοίως, το κόστος παραγωγής του σκυροδέματος είναι πολύ χαμηλό. Η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος σαν δομικό υλικό οδηγεί σε μία γενικότερη μείωση του κόστους της κατασκευής σε όλη τη διάρκεια ζωής της επειδή το κόστος συντήρησής είναι χαμηλό. Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικές εάν σχεδιαστούν σωστά. Το υλικό δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες όπως οι βροχοπτώσεις και το χιόνι επομένως οι κατασκευές μπορούν να έχουν διάρκεια ζωής έως και 100 χρόνια. Λόγω της χαμηλής διαπερατότητας, το σκυρόδεμα μπορεί να αντισταθεί σε χημικές ουσίες οι οποίες είναι διαλυμένες στο νερό όπως θειικά άλατα, διοξείδιο του άνθρακα κ.α. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ιδανικό για υποβρύχιες κατασκευές, αγωγούς, φράγματα, κανάλια κ.α. Επίσης το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στη φωτιά. Η φύση του σκυροδέματος δεν του επιτρέπει να πιάσει φωτιά ή να καεί. Μπορεί να αντέξει τα υψηλά φορτία θερμότητας για 2 έως 6 ώρες δίνοντας επαρκή χρόνο για επιχειρήσεις διάσωσης σε περίπτωση πυρκαγιάς (Εικόνα 1.4). Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πιο ανθεκτικά στη φωτιά από άλλα συνήθως χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά όπως ο χάλυβας και το ξύλο. Επίσης με το σκυρόδεμα είναι δυνατό να γίνουν κατασκευές διαφόρων σχημάτων δηλαδή παρέχει μία ευελιξία στην κατασκευή καθώς το σκυρόδεμα βρίσκεται σε υγρή μορφή και μπορούμε να το τοποθετήσουμε σε καλούπια.

Άλλα πλεονεκτήματα του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η καλή αντίσταση στα σεισμικά φορτία καθώς και η δυνατότητα ανακύκλωσης.



Εικόνα 1.4: Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα ύστερα από πυρκαγιά. (1)

Ωστόσο παρόλα τα πλεονεκτήματα, το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα κάποια από τα οποία είναι τα εξής (1):

- 1) Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πιο βαριές σε σχέση με κατασκευές οι οποίες είναι από άλλα υλικά όπως οι ξύλινες, οι μεταλλικές κλπ.
- 2) Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτούν την κατασκευή ξυλοτύπων.
- 3) Απαιτείται χρόνος έτσι ώστε το οπλισμένο σκυρόδεμα να αποκτήσει την μέγιστη αντοχή του.
- 4) Λόγω της ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων στο σκυρόδεμα έχουμε τη δημιουργία ρηγματώσεων.

1.2 Σεισμική δράση στην κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα

Ο σεισμός αποτελεί τον μεγαλύτερο εχθρό των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο μη επαρκής σχεδιασμός για την αντιμετώπιση των σεισμικών δονήσεων ή σεισμών τους οποίους το μέγεθος ξεπερνάει τα όρια αντοχής του σχεδιασμού μας μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση της κατασκευής και την απώλεια ανθρώπινων ζώων (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Κτίρια τα οποία έχουν αστοχήσει από σεισμό. (5)

Μία κατασκευή η οποία στηρίζεται στο έδαφος ακολουθεί την κίνησή του κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Κατά τη διάρκεια του σεισμού ένα κτίριο εκτελεί μία ταλάντωση της οποίας χαρακτηριστικά μεγέθη όπως το πλάτος, η συχνότητα και η διάρκεια εξαρτώνται αφενός από τα χαρακτηριστικά του εδάφους το οποίο δονείται καθώς και από τις δυναμικές ιδιότητες της ίδιας της κατασκευής. Η βάση της κατασκευής εκτελεί τις τρεις μεταφορικές και τις τρεις περιστροφικές κινήσεις του εδάφους στο οποίο στηρίζεται. Ωστόσο συνήθως, για ένα τυπικό κτίριο από σκυρόδεμα, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δύο μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας παράλληλα στις δύο κύριες πλευρές της κάτοψης του υπό μελέτη κτιρίου. Γενικά η φιλοσοφία σχεδιασμού ενάντια σε έναν σεισμό πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

Απαιτήσεις σε αντοχή

Τα μέλη σε μία κατασκευή πρέπει να παρουσιάζουν επαρκή αντοχή για να μεταφέρουν με ασφάλεια τις φορτίσεις.

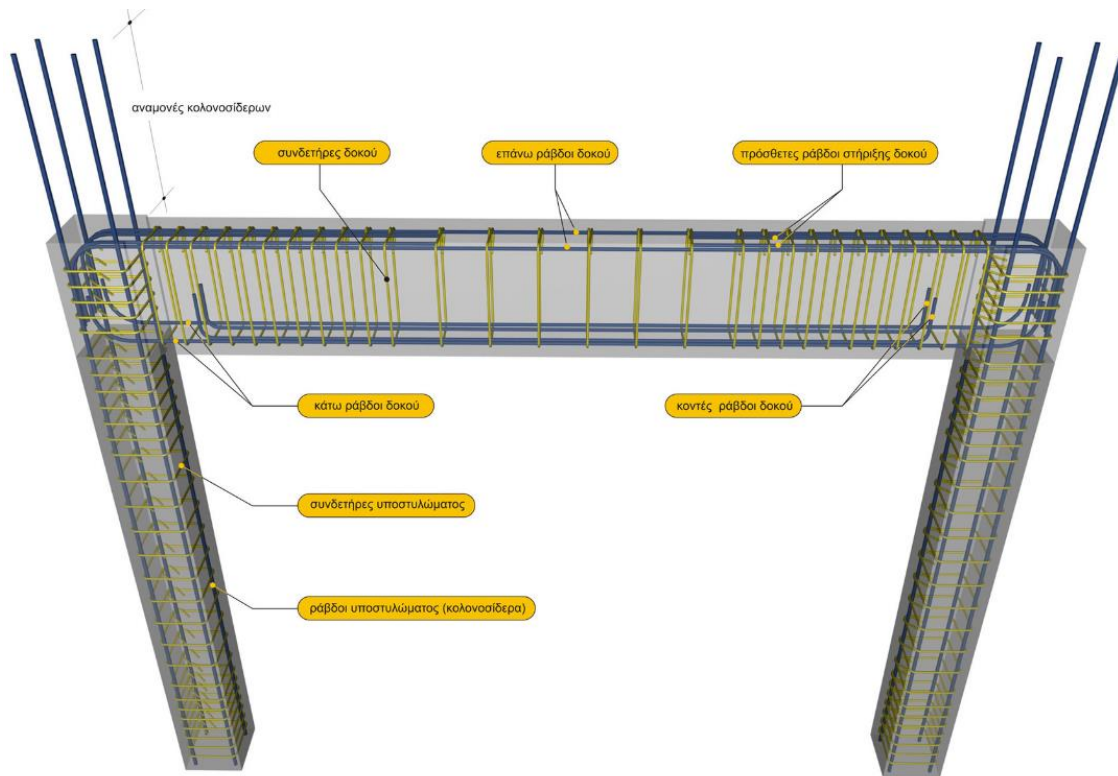
Απαιτήσεις πλαστιμότητας

Γενικά δεν είναι οικονομικό να σχεδιάζουμε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα έχοντας σαν κύριο κριτήριο η απόκρισή τους να παραμένει ελαστική κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου σεισμού. Έχει αποδειχθεί ότι κατασκευές σχεδιασμένες για οριζόντια φορτία μπορούν να επιβιώσουν σε δυνατούς σεισμούς μόνο εάν μπορούν να έχουν την ικανότητα να διαχέουν σημαντική ποσότητα ενέργειας. Αυτό γίνεται μέσω των πλαστικών αρθρώσεων. Η διασπορά ενέργειας μέσω ανελαστικών παραμορφώσεων απαιτεί από τα μέλη της κατασκευής και τις συνδέσεις τους να διαθέτουν επαρκή πλαστιμότητα. Η πλαστιμότητα είναι η ικανότητα να απορροφάται σημαντική ποσότητα ενέργειας μέσω ανελαστικής δράσης κάτω από παραμορφώσεις μεγάλου πλάτους, χωρίς ουσιαστική μείωση της αντοχής.

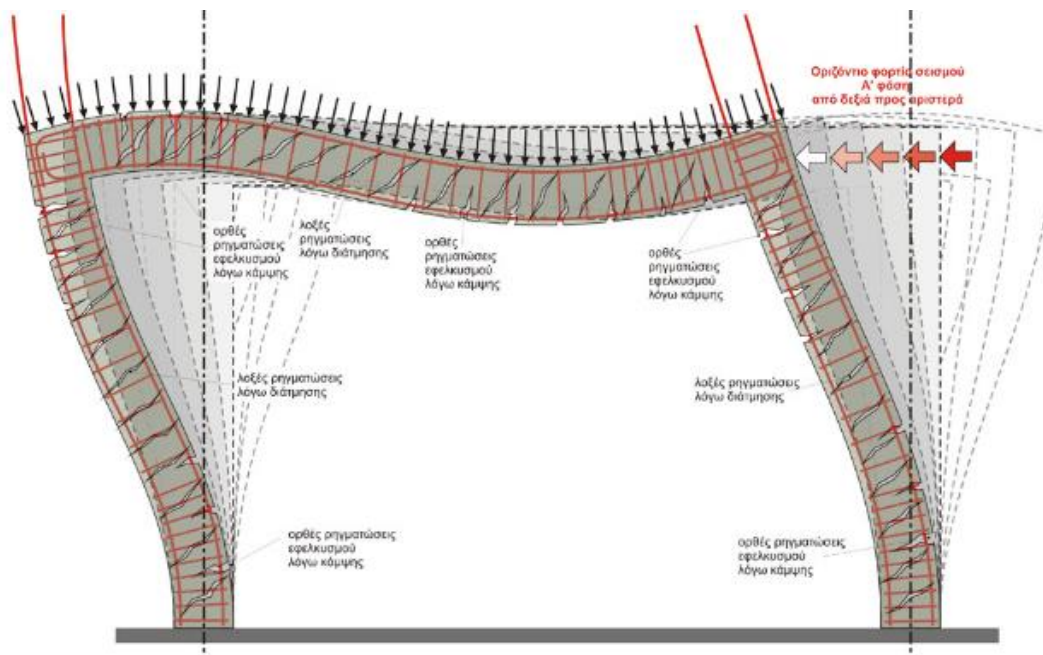
Απαιτήσεις σε δυσκαμψία

Στο σεισμικό σχεδιασμό, ένα μέγεθος που λαμβάνεται υπόψη είναι ο λόγος της σχετικής μετατόπισης των ορόφων ως προς το ύψος του κτιρίου. Η υπερβολική μετατόπιση των ορόφων οδηγεί σε σημαντικές ζημιές σε μη δομικά στοιχεία. Σε πολλές περιπτώσεις το κόστος αντικατάστασης ή επισκευής τέτοιων στοιχείων είναι πολύ υψηλό.

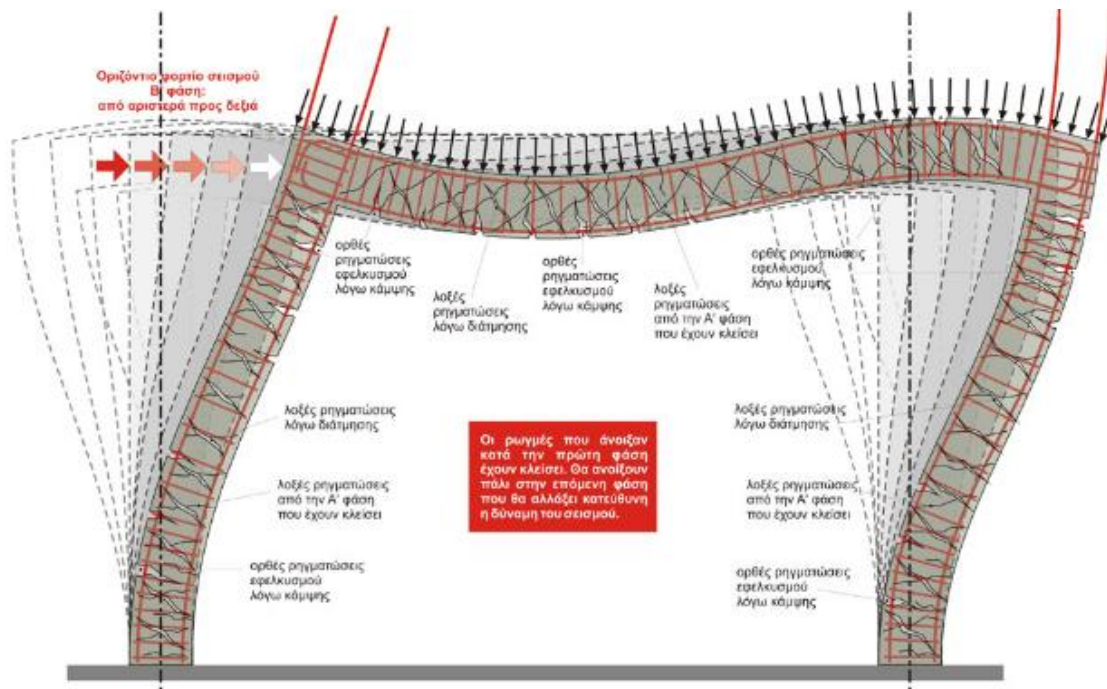
Στην Εικόνα 1.6 παρουσιάζεται ένα πλαίσιο το οποίο αποτελείται από δύο υποστυλώματα και μία δοκό και καταπονείται μόνο από τα φορτία λόγω βάρους. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού όπως προαναφέρθηκε προκαλούνται κυρίως οριζόντιες μετακινήσεις, οι οποίες προκαλούν οριζόντιες δυνάμεις, λόγω της απότομης αλλαγής της κινηματικής κατάστασης του σώματος. Αυτές οι δυνάμεις αλλάζουν συνεχώς κατεύθυνση, επομένως και οι εφελκυστικές τάσεις καθώς και οι ρηγματώσεις που αυτές προκαλούν αλλάζουν θέση και κατεύθυνση, κάτι που κάνει δύσκολο τη διαστασιολόγηση του φέροντα οργανισμού. (Εικόνα 1.7, Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.6: Πλαίσιο το οποίο αποτελείται από δύο υποστυλώματα και μία δοκό. (6)



Εικόνα 1.7: Φόρτιση του πλαισίου κατά την οριζόντια διεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. (6)



Εικόνα 1.8: Φόρτιση του ίδιο πλαισίου κατά την οριζόντια διεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. (6)

Για την αντιμετώπιση των σεισμικών φορτίσεων υπάρχουν κάποιοι βασικοί κανόνες όπλισης, οι οποίοι είναι οι εξής (6): Όσον αφορά τα υποστυλώματα πρέπει λόγω της αλλαγής φοράς των εφελκυστικών τάσεων οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού να τοποθετούνται συμμετρικά στην περίμετρό τους. Επίσης, απαιτείται ισχυρός εγκάρσιος οπλισμός από ισχυρούς και καλά κλειστούς συνδετήρες διότι έτσι θωρακίζεται η κατασκευή από τις λοξές ρηγματώσεις εναλλασσόμενης φοράς οι οποίες είναι αποτέλεσμα της διάτμησης. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των δοκών οι κάτω και οι πάνω διαμήκεις ράβδοι πρέπει να αγκυρώνονται αποτελεσματικά, λόγω της αλλαγής της διεύθυνσης των εφελκυστικών τάσεων καθώς και των ρηγματώσεων που αυτές προκαλούν. Επίσης και εδώ απαιτείται για τον ίδιο λόγο όπως και στα υποστυλώματα ισχυρός εγκάρσιος οπλισμός με πυκνούς και καλά κλειστούς συνδετήρες.

Πέρα από τα παραπάνω, τα δομικά στοιχεία πρέπει να παρουσιάζουν πλαστιμότητα. Η πλαστιμότητα αποτελεί μία πολύ σημαντική ιδιότητα την οποία έχει ένα στοιχείο κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και του δίνει τη δυνατότητα να συνεχίζει να παραμορφώνεται και όταν τα φορτία ξεπεράσουν το όριο αντοχής του χωρίς το ίδιο να καταρρέει. Αυτός είναι και ένας από τους βασικότερους λόγους όπου στις περιοχές των στηρίξεων τόσο στις δοκούς όσο και στα υποστυλώματα κρίνεται απαραίτητη η πυκνή τοποθέτηση συνδετήρων. Επομένως, εάν ένα στοιχείο της κατασκευής συμπεριφέρεται πλάστιμα, τότε αυτό θα συνεχίσει να φέρει φορτία (6). Εάν όλα τα στοιχεία μίας κατασκευής παρουσιάζουν πλαστιμότητα τότε η αντοχή της κατασκευής θα εξαρτάται από την αντοχή του συνόλου των στοιχείων και όχι μόνο του πιο ευάλωτου όπως θα συνέβαινε στην αντίθετη περίπτωση.

Εκτός από την πλαστιμότητα υπάρχει και η ανάγκη ικανοτικής αντοχής των υποστυλωμάτων. Μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού διασφαλίζεται ότι οι συντρέχουσες στο υποστύλωμα δοκοί θα έχουν μικρότερη αντοχή από το υποστύλωμα επομένως θα αστοχήσουν και πρώτες σε περίπτωση σεισμού. Με την αστοχία των δοκών αλλάζει η ιδιοσυχνότητα του κτιρίου με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται το φαινόμενο του συντονισμού, ενώ παράλληλα απορροφάται ενέργεια που εκτονώνει τον σεισμό. Τέλος, η αστοχία των δοκών δεν οδηγεί σε κατάρρευση του κτιρίου.

1.3 Ανάλυση σεισμικής έντασης και αντισεισμικός σχεδιασμός

Ο υπολογισμός της έντασης που δέχεται η κατασκευή από την σεισμική φόρτιση αποτελεί έναν από τους κρίσιμότερους παράγοντες σχεδιασμού ειδικά σε περιοχές όπως η Ελλάδα όπου χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμική δραστηριότητα. Για αυτόν τον λόγο έχουν θεσπιστεί αντισεισμικοί κανονισμοί (Ευρωκώδικας 8, FEMA κλπ.) οι οποίοι επιβάλλουν ορισμένες διατάξεις ώστε να εξασφαλίζεται ασφαλής σχεδιασμός έναντι ενός σεισμού σχεδιασμού. Η ανάλυση ενός κτιρίου έναντι σεισμικής φόρτισης μπορεί να είναι ελαστική (στατική ή φασματική δυναμική ή ανάλυση χρονοϊστορίας) είτε ανελαστική μη γραμμική (στατική ή δυναμική). Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των βασικών παραμέτρων που θα πρέπει να λάβει ο μηχανικός υπόψη κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η μεθοδολογία που υιοθετείται από τους περισσότερους σύγχρονους κανονισμούς (EC 8, Ν.Ε.Α.Κ – Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός) είναι γνωστή ως μέθοδος των δυνάμεων (Force Based Design Method – FBD), γιατί χρησιμοποιεί ως βασική παράμετρο σχεδιασμού τις ισοδύναμες σεισμικές δυνάμεις που ασκούνται στην κατασκευή. Η μέθοδος αυτή στοχεύει στη διαστασιολόγηση της κατασκευής με βάση το κριτήριο απαιτούμενης αντοχής, έτσι ώστε να περιοριστούν οι πλαστικές παραμορφώσεις σε επίπεδα που διασφαλίζουν την προστασία της ανθρώπινης ζωής για την κύρια σεισμική δράση σχεδιασμού. Για την ακρίβεια στον Ευρωπαϊκό Αντισεισμικό Κανονισμό (EC 8) τα επίπεδα επιθυμητής συμπεριφοράς της κατασκευής είναι δύο:

1. Αφορά τον απαιτούμενο έλεγχο δυσκαμψίας με στόχο την ελαστική απόκριση των κατασκευών σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης με περίοδο επαναφοράς 95 χρόνια (σεισμική δράση περιορισμού βλαβών με 10% πιθανότητα υπέρβασης κάθε 10 χρόνια) και τον περιορισμό των βλαβών των μη φερόντων μελών της κατασκευής (Damage Limit State – DLS).
2. Προβλέπει την ανελαστική απόκριση της κατασκευής επιτυγχάνοντας την αποφυγή της κατάρρευσης σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης με μεγάλη περίοδο επαναφοράς, συγκριτικά με τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής της κατασκευής, ίση με 475 χρόνια (σεισμική δράση σχεδιασμού με 10% πιθανότητα υπέρβασης κάθε 50 χρόνια) (Ultimate Limit State – ULS). Η αποφυγή της κατάρρευσης επιβάλλεται επίσης και εμμέσως τόσο μέσω του περιορισμού των φαινομένων 2ας τάξεως όσο και μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού των μελών της κατασκευής. Επίσης η μέθοδος χρησιμοποιεί το

συντελεστή συμπεριφοράς, ο οποίος αναπαριστά προσεγγιστικά την ικανότητα πλαστικοποίησης της κατασκευής και χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό για τη μείωση των ελαστικών σεισμικών δυνάμεων. Γι' αυτόν το συντελεστή, ο οποίος ουσιαστικά χρησιμοποιείται για να εξισορροπήσει την αντοχή με την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής, γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή στη συνέχεια.

1.3.1 Ικανοτικός σχεδιασμός

Ο Ικανοτικός Σχεδιασμός είναι το εργαλείο με το οποίο ο μελετητής μηχανικός κατευθύνει τη συνολική απαίτηση παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας σε εκείνα τα μέλη που θεωρεί σκοπιμότερο. Κριτήρια της επιλογής αυτών των μελών είναι τα παρακάτω:

- Η ικανότητα των μελών να παραμορφώνονται ανελαστικά και να απορροφούν ενέργεια χωρίς απομείωση της αντοχής τους.
- Η σημασία τους και η θέση τους στον φέροντα οργανισμό. Για παράδειγμα, προτιμάται σύμφωνα με τις αρχές του Ικανοτικού Σχεδιασμού να δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των δοκών και όχι των υποστυλωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο ικανοποιείται η αρχή «Ισχυρά υποστυλώματα – ασθενή ζυγώματα» με βάση την οποία εξασφαλίζεται πλάστιμος τρόπος αστοχίας.

Η αρχή του Ικανοτικού Σχεδιασμού για κόμβο δοκών υποστυλωμάτων ορίζεται από την σχέση:

$$\Sigma M_{RC} \geq 1.3 \Sigma M_{Rb},$$

όπου ΣM_{RC} ονομάζεται το άθροισμα των ροπών αντοχής των υποστυλωμάτων που συντρέχουν σε έναν κόμβο και ΣM_{Rb} ονομάζεται το άθροισμα των ροπών αντοχής των δοκών που συντρέχουν στον κόμβο. Με αυτόν τον σχεδιασμό, αποφεύγεται η δημιουργία μαλακού ορόφου (πριν την αστοχία δοκών). Ως μαλακός όροφος ορίζεται η εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των υποστυλωμάτων ενός ορόφου το οποίο οδηγεί και σε κατάρρευση.

1.4 Ελαστικό φάσμα απόκρισης και σχεδιασμού

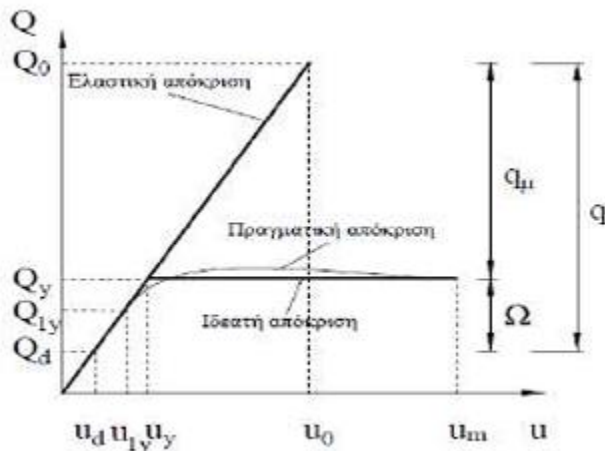
Το φάσμα απόκρισης είναι μια θεμελιώδης έννοια στη σεισμική μηχανική και παρέχει τη δυνατότητα να συνοψίσει κανείς σε ένα γράφημα τη μέγιστη απόκριση όλων των πιθανών γραμμικών μονοβάθμιων συστημάτων σε συγκεκριμένη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Μέσω του φάσματος απόκρισης επιτυγχάνεται η γραφική απεικόνιση της μέγιστης τιμής ενός μεγέθους απόκρισης ως συνάρτηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_n του συστήματος, και τροποποιείται για διαφορετικές τιμές του λόγου απόσβεσης ζ . Η ανάγκη δημιουργίας ενός φάσματος πάνω στο οποίο θα βασιστεί ο σχεδιασμός των κατασκευών, οδήγησε στη στατιστική μελέτη των φασμάτων απόκρισης

και την κατασκευή ενός ελαστικού φάσματος σχεδιασμού, που είναι αντιπροσωπευτικό των σεισμικών καταγραφών μιας περιοχής. Αυτό αποτελείται από ομαλές καμπύλες και ευθείες γραμμές ανάλογα με την κάθε τιμή της απόσβεσης, σε αντίθεση με το φάσμα απόκρισης που είναι σχετικά ακανόνιστο. Το φάσμα αυτό για μια περιοχή βασίζεται σε στατιστική ανάλυση των φασμάτων απόκρισης για το σύνολο των εδαφικών κινήσεων, ενώ πολλές φορές αποτελεί την περιβάλλουσα δύο διαφορετικών τύπων ελαστικών φασμάτων. Το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού κατά τον EC 8 παρουσιάζει τις επιταχύνσεις σχεδιασμού του συστήματος συναρτήσει της ιδιοπεριόδου. Υπάρχει εξάρτηση από το είδος του εδάφους, το διορθωτικό συντελεστή απόσβεσης και τις προκαθορισμένες ιδιοπεριόδους που διαχωρίζουν τις περιοχές σταθερής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης επηρεάζοντας το σχήμα του φάσματος. Επίσης, δίνονται δυο τύποι φάσματος (Type 1 και Type 2) όπου ο πρώτος αναφέρεται σε διεγέρσεις με $M_s > 6.5$ (Surface Wave Magnitude) και καταγραφές μακρινών αποστάσεων από το σεισμικό ρήγμα, ενώ ο δεύτερος αναφέρεται σε διεγέρσεις με τιμές M_s έως 5,5.

1.5 Συντελεστής συμπεριφοράς και ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού

Συντελεστής συμπεριφοράς q , ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ελαστικής δύναμης που θα είχε το σύστημα αν παρέμενε ελαστικό Q_0 προς τη δύναμη σχεδιασμού του πραγματικού ελαστοπλαστικού συστήματος Q_d , δηλαδή:

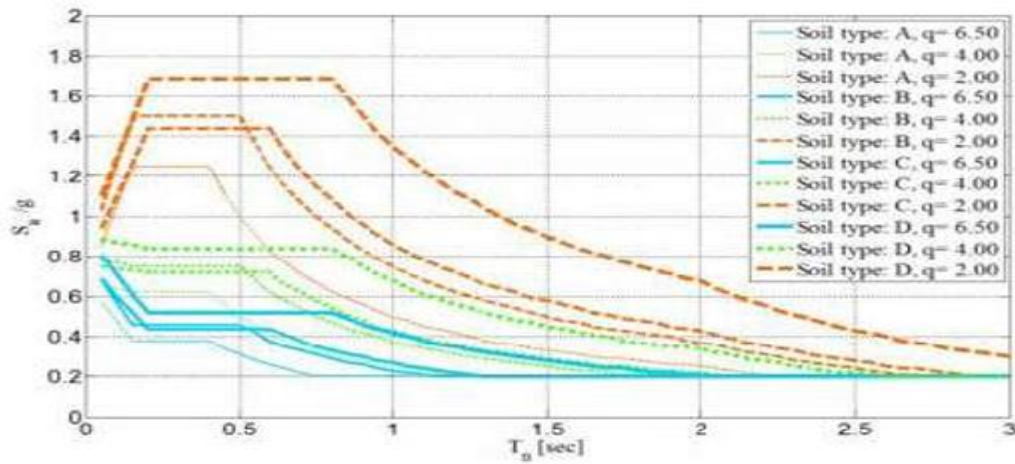
$$q = Q_0 / Q_d$$



Εικόνα 1.9: Ορισμός συντελεστή συμπεριφοράς q .

Ο συντελεστής q εξαρτάται από το δομικό υλικό, την τυπολογία της κατασκευής και το επιθυμητό επίπεδο πλαστιμότητας. Μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο δύο επιμέρους συντελεστών συμπεριφοράς, όπου ο ένας εκφράζει την απαίτηση

πλαστιμότητας και ο άλλος την υπεραντοχή της κατασκευής. Η υπεραντοχή εκφράζει την ικανότητα μοιράσματος των παραμορφώσεων σε προκαθορισμένες θέσεις ανάπτυξης ανελαστικότητας, ενώ μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί σαν το περιθώριο αντοχής από την πρώτη διαρροή μέχρι τη δημιουργία καθολικού μηχανισμού κατάρρευσης. Το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό, είναι το προηγούμενο ελαστικό, έχοντας μειωμένες τιμές και δυνάμεις κατά q φορές. Παρουσιάζεται ακολούθως το τελικό φάσμα σχεδιασμού που δίνει ο EC8 για διάφορα είδη εδάφους και τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς.



Εικόνα 1.10: Φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (7).

Στις περιοχές σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης, το φάσμα σχεδιασμού προκύπτει από το ελαστικό με απόσβεση 5% με διαίρεση με το συντελεστή συμπεριφοράς q . Κατ' εξαίρεση, ο ανερχόμενος κλάδος για ιδιοπεριόδους T μέχρι $T \leq T_B$ προκύπτει από γραμμική παρεμβολή μεταξύ: (α) της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης S_{ag} , δια συντελεστή ίσου με 1.5 για $T=0$ και (β) της σταθερής επιτάχυνσης σχεδιασμού $2.5a_g/q$ για $T=T_B$. Επιπλέον, τίθεται ένα κάτω όριο στη φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού, ίσο με 20% της μέγιστης επιτάχυνσης στο βράχο, a_g (Fardis, 2009a). Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις οι οποίες περιγράφουν το φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού (EC8 § 3.2.2.5(4)) :

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = \alpha_g S \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = \alpha_g S \frac{2.5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = \alpha_g S \frac{2.5 T_C}{q T} \geq \beta * \alpha_g$$

$$T_D \leq T: \alpha_g S \frac{2.5 T_C T_D}{q T^2} \geq \beta * \alpha_g$$

Όπου:

- $S_d(T)$, το φάσμα σχεδιασμού
- T , η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού μονοβάθμιου συστήματος
- a_g , η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του εδάφους σε εδάφη τύπου A ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$)
- γ_I , ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου
- T_B , το κάτω όριο της περιόδου του σταθερού κλάδου του φάσματος επιταχύνσεων
- T_C , το άνω όριο της περιόδου του σταθερού κλάδου του φάσματος επιταχύνσεων
- T_D , η τιμή που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής μετακίνησης
- S , ο συντελεστής εδάφους
- H , ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης με τιμή αναφοράς $\eta=1$ για ποσοστό ιξώδους απόσβεσης 5%
- q , ο συντελεστής συμπεριφοράς
- β , το κάτω όριο για τη σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού (προτείνεται η τιμή $\beta=0.2$)

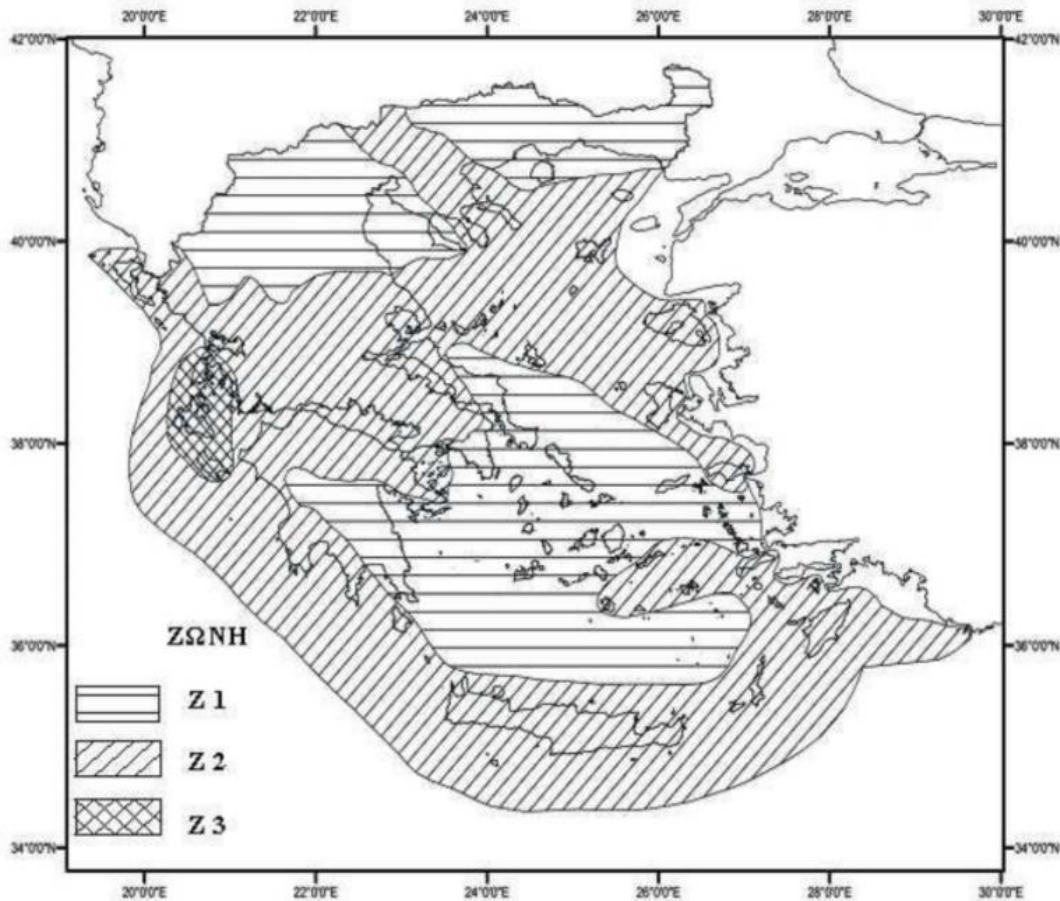


Εικόνα 1.11: Ελαστικό φάσμα Ευρωκώδικα 8 στην οριζόντια διεύθυνση για απόσβεση 5% (Fardis 2009a).

1.6 Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας

Η ένταση των σεισμικών δονήσεων προσδιορίζεται συμβατικά με μια μόνη παράμετρο που καλείται μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού A , ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας που βρίσκεται το έργο. Η χώρα μας

χωρίζεται σε τρεις σεισμικές ζώνες επικινδυνότητας οι οποίες καθορίζονται σύμφωνα με τον ΕΑΚ2000. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου η περιοχή στην οποία θα γίνει το έργο είναι η πόλη της Πάτρας, η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας είναι ΙΙ. Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μια τιμή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους A , η οποία σύμφωνα με τα σεισμολογικά δεδομένα έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια, δηλαδή περίοδο επαναφοράς $T=475$ χρόνια.



Εικόνα 1.12: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα.

Η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ορίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$A = \alpha_g \cdot g$$

όπου α_g η εδαφική επιτάχυνση, με τιμές:

$$\alpha_g = 0.16 \text{ για Ζώνη I}$$

$$\alpha_g = 0.24 \text{ για Ζώνη II}$$

$$\alpha_g = 0.36 \text{ για Ζώνη III}$$

1.7 Συντελεστής σπουδαιότητας

Η εδαφική επιτάχυνση κλιμακώνεται περαιτέρω μέσα στην ίδια ζώνη ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας των έργων. Για την κλιμάκωση αυτή εισήχθη ο συντελεστής σπουδαιότητας γ_I , ο οποίος κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 0.85 και 1.30 και εκφράζει μεγαλύτερες ή μικρότερες απαιτήσεις απόκρισης. Τα κτίρια διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας ανάλογα με τις κοινωνικοοικονομικές συνέπειες που θα έχει η κατάρρευση ή η διακοπή λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, κτίρια γραφείων τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των συνήθων κτιρίων δηλαδή κατηγορία II αντιστοιχεί συντελεστής σπουδαιότητας $\gamma_I=1.0$.

Κατηγορία σπουδαιότητας	Κτίρια
I	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
II	Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
III	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
IV	Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κλπ.

Κατηγορία Σπουδαιότητας	I	II	III	IV
Συντελεστής Σπουδαιότητας γ_I	0,80	1,00	1,20	1,40

Πίνακας 1-1: Κατηγορίες κτιρίων και συντελεστής σπουδαιότητας.

1.8 Προσδιορισμός κατηγορίας εδάφους

Σύμφωνα με την σεισμική επικινδυνότητα, τα εδάφη χωρίζονται σε 5 κατηγορίες A,B,C,D,E και δύο ειδικές κατηγορίες S1,S2.

Κατηγορία Εδάφους	Περιγραφή στρωματογραφίας
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός, που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού.
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων.
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά.
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα υλός με τιμές v_s κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5m και 20m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $v_s > 800$ m/s.
S_1	Αποθέσεις που αποτελούνται, ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας ($PI > 40$) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.
S_2	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή S_1

Πίνακας 1-2: Πίνακας κατηγορίας εδαφών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.

1.9 Κατηγορίες Πλαστιμότητας

Ο Ευρωκώδικας 8 στοχεύει στην εξασφάλιση της προστασίας ζωής σε μεγάλους σεισμούς ταυτόχρονα με τον περιορισμό των βλαβών από τους συχνούς σεισμούς. Αν και ο κανονισμός επιτρέπει την παραλαβή των σεισμικών δυνάμεων είτε με απόσβεση ενέργειας (πλάστιμη συμπεριφορά) είτε χωρίς απόσβεση ενέργειας (ουσιαστικά ελαστική συμπεριφορά), διακρίνεται μια προτίμηση προς την πρώτη προσέγγιση. Ως πλαστιμότητα ορίζεται η ικανότητα της κατασκευής ή μέλους της κατασκευής να υπόκειται σε μεγάλες παραμορφώσεις πέρα από το σημείο διαρροής (συχνά για πολλούς κύκλους) χωρίς θραύση. Στην εφαρμοσμένη αντισεισμική μηχανική, η πλαστιμότητα εκφράζεται σε όρους απαίτησης και διαθεσιμότητας. Η απαίτηση πλαστιμότητας είναι το μέγιστο επίπεδο πλαστιμότητας που πρέπει να φτάσει η κατασκευή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η οποία είναι συνάρτηση αμφότερων της κατασκευής και του σεισμού. Η διαθέσιμη πλαστιμότητα είναι η μέγιστη πλαστιμότητα που μπορεί η κατασκευή να διατηρήσει χωρίς θραύση, και αποτελεί καθαρά ιδιότητα της κατασκευής.

Με αυτό τον τρόπο, μεγάλο μέρος του κανονισμού αποσκοπεί στην εξασφάλιση σταθερού και αξιόπιστου μηχανισμού απορρόφησης ενέργειας σε προκαθορισμένες κρίσιμες περιοχές, οι οποίες περιορίζουν τις αδρανειακές φορτίσεις που εμφανίζονται στις υπόλοιπες περιοχές της κατασκευής. Οι γεωμετρικοί κανόνες και οι κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης επιτυγχάνουν την επιδιωκόμενη πλαστιμότητα σε αυτές τις κρίσιμες περιοχές (Elghazouli, 2009). Στην περίπτωση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τέτοια συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη διασφάλιση σταθερής πλαστικής συμπεριφοράς τέτοιων κρίσιμων ζωνών που δεν υπονομεύεται από ψαθυρούς τρόπους αστοχίας όπως διάτμηση ή σύνθλιψη στο σκυρόδεμα ή κάμψη του οπλισμού. Με αυτά τα δεδομένα, υιοθετούνται τρία επίπεδα απορρόφησης ενέργειας:

- Χαμηλό επίπεδο πλαστιμότητας (DCL, Ductility Class Low) στο οποίο δεν επιδιώκεται υστερητική πλαστιμότητα και η αντίσταση στη σεισμική φόρτιση επιτυγχάνεται μέσω της αντοχής της κατασκευής παρά της πλαστιμότητας της ($q=1.5$).
- Μέσο (DCM, Ductility Class Medium) και Υψηλό (DCH) επίπεδο πλαστιμότητας, τα οποία αναφέρονται σε κατασκευές με ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ορίζονται από πιο αυστηρές διατάξεις σύμφωνα με τους κανονισμούς. Οι δυο αυτές κατηγορίες εκτός από διαφορετικούς συντελεστές συμπεριφοράς, διαφοροποιούνται και στους γεωμετρικούς περιορισμούς και στα υλικά (ολκιμότητα χάλυβα), στα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού, στους κανόνες ικανοτικού σχεδιασμού και τοπικής πλαστιμότητας (διαμόρφωσης λεπτομερειών).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, μπορεί να διαφέρει στις διαφορετικές οριζόντιες διευθύνσεις της κατασκευής, ενώ η κατηγορία πλαστιμότητας είναι προφανώς η ίδια σε όλες τις διευθύνσεις. Οι δυο αυτές κατηγορίες θεωρούνται ισοδύναμες σε ότι αφορά την επίδοση των κατασκευών υπό το σεισμό σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός με την DCM μπορεί να παρέχει καλύτερη απόδοση σε μεσαίου μεγέθους σεισμούς. Ο σχεδιασμός με την DCH δείχνει να παρέχει μεγαλύτερα περιθώρια ασφάλειας από την DCM έναντι τοπικής ή καθολικής κατάρρευσης υπό σεισμούς μεγαλύτερους από το σεισμό σχεδιασμού. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι ο EC8 δεν συνδέει την επιλογή μεταξύ των δυο υψηλότερων κατηγοριών πλαστιμότητας με τη σεισμικότητα της περιοχής ή τη σπουδαιότητα του έργου, ούτε θέτει κάποιο όριο στην εφαρμογή του. Εξαρτάται από τα κράτη να επιλέξουν για τις διάφορες περιοχές και για τα διάφορα είδη κατασκευών ή ακόμα καλύτερα να αφήσουν την επιλογή αυτή στο μελετητή. Στην Ελλάδα, δεν επιτρέπεται ο σχεδιασμός με DCM σε κτίρια σπουδαιότητας III ή IV στις σεισμικές ζώνες Z2 ή Z3, με εξαίρεση τα προκατασκευασμένα κτίρια με τοιχώματα ή κυψελωτούς φορείς (Fardis, 2009a).

1.10 Κριτήρια Κανονικότητας

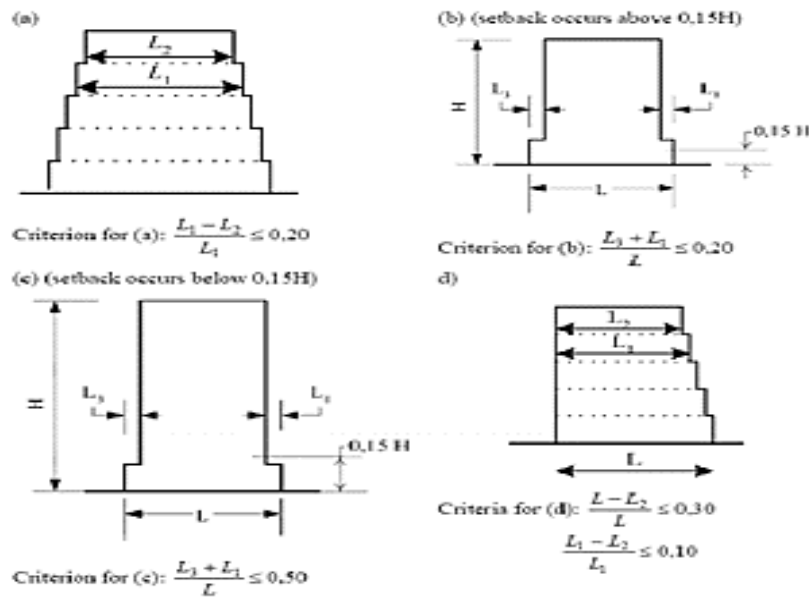
Προκειμένου να εφαρμοστούν σωστά οι κανόνες του αντισεισμικού σχεδιασμού και να ακολουθηθεί η κατάλληλη μέθοδος ανάλυσης και σχεδιασμού θα πρέπει να ελεγχθεί εάν το κτίριο θεωρείται κανονικό σε κάτοψη και καθ' ύψος. Συνοπτικά, παρουσιάζονται τα κριτήρια τα οποία καθορίζουν την κανονικότητα των κατασκευών:

- Κριτήριο Κανονικότητας σε Κάτοψη: Ως κανονικά σε κάτοψη θεωρούνται από τον Ευρωκώδικα 8 (§4.2.3.2) τα κτίρια που πληρούν όλες τις παρακάτω συνθήκες. Συγκεκριμένα, ένα κτίριο θεωρείται κανονικό σε κάτοψη εφόσον:
 - ✓ η κατανομή της δυσκαμψίας και της μάζας και ως προς τους δυο ορθογωνικούς οριζόντιους άξονες της κάτοψης είναι περίπου συμμετρική
 - ✓ η κάτοψη παρουσιάζει λόγο πλευρών περιγεγραμμένου ορθογωνίου που δεν υπερβαίνει το 4, ενώ οι εσοχές της περιμέτρου της ως προς το κυρτό πολυγωνικό της περίγραμμα δεν ξεπερνούν το 5% της επιφάνειας κάτοψης.
 - ✓ οι πλάκες θεωρούνται πρακτικώς απαραμόρφωτες στο επίπεδό τους.
 - ✓ η εκκεντρότητα του κέντρου μάζας κάθε ορόφου ως προς το αντίστοιχο κέντρο δυσκαμψίας δεν ξεπερνά, σε καμία από τις δυο οριζόντιες διευθύνσεις το 30% της αντίστοιχης ακτίνας δυστρεψίας των στοιχείων δυσκαμψίας δηλαδή (EC8 § 4.2.3.2(6)) $0.3r_x \geq e_x$ και $0.3r_y \geq e_y$
 - ✓ το δομικό σύστημα δεν είναι στρεπτικά ευαίσθητο σε κανέναν όροφο (η ελάχιστη ακτίνα δυστρεψίας ορόφου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα αδράνειας της μάζας του σε κάτοψη) δηλαδή (EC8 § 4.2.3.2(6)): $r_x, r_y \geq I_s$
- Κριτήριο Κανονικότητας καθ' Ύψος: Ως κανονικά καθ' ύψος θεωρεί ο EC8 (§4.2.3.3) τα κτίρια που πληρούν όλες τις παρακάτω συνθήκες:
 - ✓ τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία (τοιχώματα και πλαίσια) πρέπει να συνεχίζονται χωρίς διακοπή μέχρι την κορυφή του αντίστοιχου τμήματος της κάτοψης.
 - ✓ η μάζα των ορόφων και η δυσκαμψία των δομικών στοιχείων τους πρέπει να είναι η ίδια σ' όλους τους ορόφους ή να μειώνεται ομαλά από τη βάση προς την κορυφή.
 - ✓ σε πλαισιακά δομικά συστήματα, δεν επιτρέπεται να υπάρχει έντονη ανομοιομορφία της υπεραντοχής έναντι οριζοντίων δράσεων (λόγος αντοχής προς σεισμική τέμνουσα ορόφου υπό το σεισμό σχεδιασμού) μεταξύ διαδοχικών ορόφων.

- ✓ κάθε εσοχή ορόφου από τον αμέσως κατώτερο δεν επιτρέπεται να ξεπερνά το 10% της παράλληλης ολικής διάστασης του αμέσως κατωτέρου ορόφου.
- ✓ αν οι εσοχές στις δυο απέναντι πλευρές του κτιρίου στην υπόψη διεύθυνση δεν είναι συμμετρικές, η συνολική εσοχή του τελευταίου ορόφου ως προς τη βάση του κτιρίου δεν επιτρέπεται να ξεπερνά το 30% της παράλληλης διάστασης της κάτοψης στη βάση.
- ✓ αν οι εσοχές αφορούν μια μόνο στάθμη στο κάτω 15% του ύψους του κτιρίου, αυτές δεν επιτρέπεται να ξεπερνούν συνολικά (και προς τις δυο πλευρές του κτιρίου) το 50% της κάτοψης στη βάση.

Η μη ύπαρξη κανονικότητας καθ' ύψος αναμένεται γενικώς να έχει πιο σοβαρές επιπτώσεις σε επίπεδο σχεδιασμού αλλά και στην τελική σεισμική απόκριση ενός κτιρίου σε σχέση με την έλλειψη κανονικότητας σε κάτοψη. Για το λόγο αυτό, η στατική ανάλυση με (ισοδύναμα) οριζόντια σεισμικά φορτία επιτρέπεται να εφαρμόζεται μόνο σε κτίρια κανονικά καθ' ύψος, των οποίων η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος ικανοποιεί και στις δυο κύριες οριζόντιες διευθύνσεις τις σχέσεις: $T \leq 2 \text{ sec}$ και $T \leq 4T_C$.

Σε μη-κανονικά καθ' ύψος κτίρια μειώνεται κατά 20% ο συντελεστής συμπεριφοράς q σε σχέση με αυτόν που ισχύει σε κτίρια κανονικά καθ' ύψος. Κατά συνέπεια, η μη-κανονικότητα καθ' ύψος διαφοροποιεί, όχι μόνον την επιτρεπόμενη μέθοδο ελαστικής ανάλυσης, καθώς απαιτεί την χρήση ιδιομορφικής ανάλυσης, αλλά και το φάσμα σχεδιασμού στο οποίο αυτή βασίζεται (αφού μειώνεται ο συντελεστής συμπεριφοράς). Σημειώνεται ότι τα κριτήρια κανονικότητας καθ' ύψος στον Ευρωκώδικα 8 είναι ποιοτικά, ώστε να μπορούν να ελέγχονται εποπτικά και εύκολα χωρίς αναλυτικούς υπολογισμούς.



Εικόνα 1.13: Εποπτικά κριτήρια κανονικότητας σε όψη.

2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ, ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 Σεισμική επικινδυνότητα

Η σεισμική επικινδυνότητα περιγράφει το επίπεδο της δόνησης του εδάφους στην επιφάνεια της γης που αναμένεται λόγω πιθανής μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Βασίζεται στη γνώση των προηγούμενων σεισμών, της γεωλογίας και της τεκτονικής και λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ισχύ της σεισμικής δόνησης σε οποιαδήποτε τοποθεσία. Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας δεν ποσοτικοποιεί την πιθανή απειλή για την ανθρώπινη κοινωνία λόγω σεισμών, δηλαδή τα αποτελέσματα της εκτίμησης κινδύνου δεν επηρεάζονται από το ποιός ζει ή τί είναι χτισμένο σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (8). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική επικινδυνότητα μίας περιοχής είναι οι εξής (8), (9) :

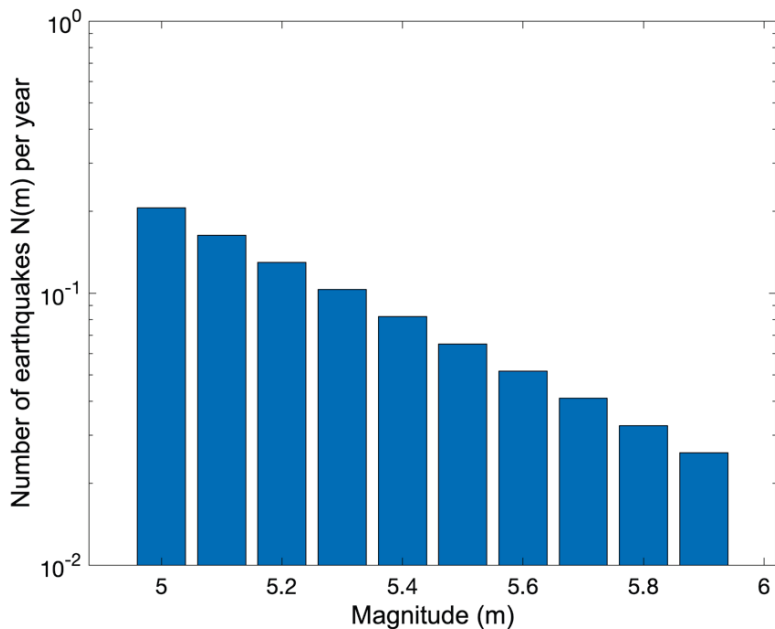
- Η σεισμικότητα της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε σεισμογόνου χώρου.
- Το μέσο διάδοσης και η επικεντρική απόσταση.
- Η γεωλογία και οι εδαφικές συνθήκες της περιοχής.

Οι σεισμοί καθώς και τα πιθανά συνεπακόλουθα φαινόμενα (π.χ. τσουνάμι) δεν μπορούν να προβλεφθούν. Η σωστή αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου αποτελεί την βάση που επιτρέπει σε σεισμολόγους, γεωλόγους και μηχανικούς να αναπτύξουν κατευθυντήριες γραμμές και μοντέλα, που επιτρέπουν σε μια κοινωνία να αναπτύξει κατάλληλα μέτρα για τη μείωση των επιπτώσεων των σεισμών.

Τα μοντέλα εκτίμησης σεισμικού κινδύνου αποτελούνται από δύο βασικά στοιχεία:

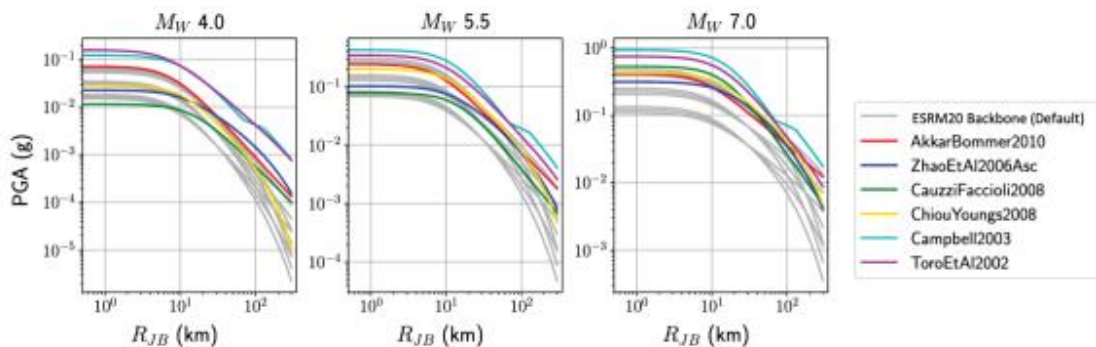
1. τα μοντέλα σεισμικών πηγών, και
2. τα μοντέλα κίνησης εδάφους (10).

Τα μοντέλα σεισμικών πηγών περιγράφουν τη χωρική και χρονική κατανομή της σεισμικότητας, συνήθως μέσω ενός από τους διαφορετικούς τύπους πηγών. Οι διαφορετικοί τύποι πηγών παρέχουν ευελιξία στη μοντελοποίηση της γεωγραφικής θέσης, του βάθους κ.α. και των χαρακτηριστικών της σεισμικής δόνησης η οποία μπορεί να συμβεί μετά από μια δεδομένη κατανομή μεγέθους-συχνότητας. Αυτή η κατανομή περιγράφει τον ετήσιο ρυθμό σεισμών διαφορετικών μεγεθών, οι οποίοι στην συνέχεια ομαδοποιούνται.



Εικόνα 2.1: Παράδειγμα κατανομής μεγέθους-συχνότητας (10).

Τα μοντέλα κίνησης εδάφους περιγράφουν τη διάμεση και τη λογαριθμική τυπική απόκλιση ενός εύρους επιπέδων μέτρησης της έντασης του εδάφους (π.χ. μέγιστη επιτάχυνση εδάφους) βάση ορισμένων μεταβλητών πρόβλεψης, που είναι συνήθως η τοποθεσία, το μέγεθος ροπής) και παραμέτρους απόστασης (π.χ. υποκεντρική απόσταση) (10). Η Εικόνα 2.2 δείχνει ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο η διάμεσος PGA σε διάφορα μοντέλα κίνησης εδάφους κλιμακώνεται με το μέγεθος της ροπής (M_w) και εξασθενεί με την απόσταση (στην περίπτωση αυτή είναι η λεγόμενη απόσταση Joyner-Boore).



Εικόνα 2.2: Διάφορα μοντέλα κίνησης εδάφους που δείχνουν κλιμάκωση της διάμεσης PGA με μέγεθος (M_w) και εξασθένιση με απόσταση (απόσταση Joyner-Boore, RJB). (10)

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου: η αιτιοκρατική και η πιθανοτική εκτίμηση (10), (8), (9) - και οι δύο αυτές προσεγγίσεις βασίζονται σε γεωλογικά και σεισμολογικά δεδομένα, ωστόσο διαφέρει η έννοια της σεισμικής επικινδυνότητας. Στην αιτιοκρατική προσέγγιση μελετώνται συγκεκριμένα σενάρια σεισμών τα οποία θεωρούνται πιθανά ή αντιπροσωπευτικά για μία συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. ένας μεγάλος ιστορικός σεισμός) (8), (9). Στόχος αυτής της μεθόδου είναι η μελέτη σεναρίων σημαντικών σεισμών για μία περιοχή που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες και απώλειες. Τα σενάρια αυτά είναι λίγα σε αριθμό επομένως δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν λεπτομερώς. Στην πιθανοτική μέθοδο χρησιμοποιούνται μαθηματικά εργαλεία ώστε να συμπεριληφθούν οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με το μέγεθος, τη θέση και το χρόνο εκδήλωσης του σεισμού (8), (9).

Στην αιτιοκρατική μέθοδο υπάρχουν τέσσερα στάδια (8), (9):

1. Προσδιορισμός των σεισμικών πηγών

Σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται η λεπτομερής περιγραφή των σεισμικών πηγών στην υπό μελέτη περιοχή. Αυτή η περιγραφή βασίζεται σε διαθέσιμα δεδομένα (π.χ. γεωλογικά, μορφολογικά) και περιλαμβάνει στοιχεία των ενεργών σεισμικών πηγών που αφορούν την γεωμετρία τους αλλά και το σεισμικό δυναμικό τους. Το σεισμικό δυναμικό αποτελεί το κριτήριο βάση του οποίου επιλέγονται οι σεισμικές πηγές οι οποίες όχι μόνο έχουν επαρκές σεισμικό δυναμικό αλλά και βρίσκονται σε τέτοια απόσταση ώστε να μπορούν να προκαλέσουν ισχυρή κίνηση του εδάφους στην περιοχή μελέτης.

2. Επιλογή του σεισμού βάση του οποίου γίνεται ο σχεδιασμός

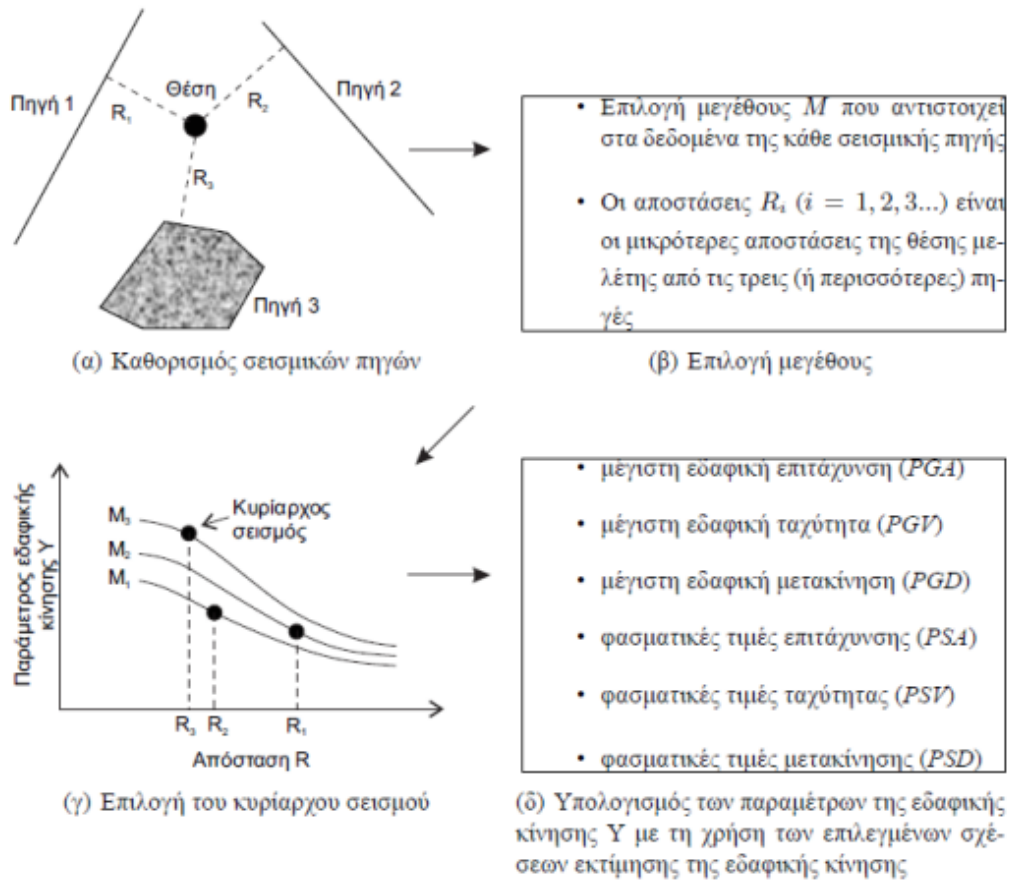
Στόχος αυτού του σταδίου είναι η επιλογή του σεισμού ο οποίος με βάση τα δεδομένα, αναμένεται να προκαλέσει τον ισχυρότερο εδαφικό κραδασμό. Σε αυτό το στάδιο πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν οι εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

3. Επιλογή των παραμέτρων του εδαφικού κραδασμού

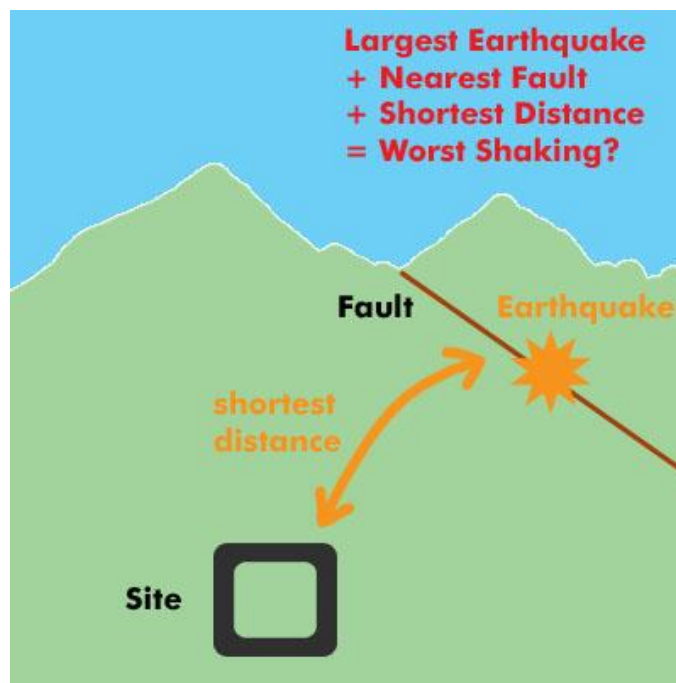
Στο στάδιο επιλογής των παραμέτρων του εδαφικού κραδασμού πραγματοποιείται η περιγραφή της εδαφικής κίνησης βασιζόμενη σε διάφορες παραμέτρους της εδαφικής κίνησης όπως η μακροσεισμική ένταση, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα και μετακίνηση κ.α.

4. Υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας

Πραγματοποιείται ο υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας δηλαδή ο υπολογισμός των διαφόρων παραμέτρων της εδαφικής ταλάντωσης με βάση τις κατάλληλες σχέσεις εξασθένισης για τον σεισμό σχεδιασμού.



Εικόνα 2.3: Βασικά βήματα της αιτιοκρατικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας. (8)



Εικόνα 2.4: Απλοποιημένο σκίτσο της αιτιοκρατικής μεθόδου εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας (11).

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι μία εύκολη σχετικά μέθοδος και δίνει συντηρητικά αποτελέσματα δηλαδή αποτελέσματα τα οποία μεγιστοποιούν την ασφάλεια. Από την άλλη πλευρά αυτή η μέθοδος παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, για παράδειγμα το γεγονός ότι συχνά δεν είναι γνωστό το πού βρίσκονται τα ενεργά ρήγματα ενώ κάποιες φορές τα αποτελέσματα μπορεί να είναι υπερβολικά συντηρητικά (11).

Ωστόσο έχουν γίνει προσπάθειες για τη βελτίωση αυτής της μεθόδου. Για παράδειγμα αντί να μοντελοποιηθεί ο μέγιστος δυνατός σεισμός, να μοντελοποιηθεί ο πιο αναμενόμενος σεισμός ο οποίος μπορεί να εμφανιστεί κατά την διάρκεια ζωής μίας κατασκευής (11). Ωστόσο ο κίνδυνος εδώ είναι ότι κάποιος μπορεί να περάσει από τον υπερβολικό συντηρητισμό στο άλλο άκρο, καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός λίγο μεγαλύτερος από αυτόν που αναμένουμε (11). Ωστόσο, η απλότητα της μεθόδου είναι ελκυστική και μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα για κατασκευές όπου οι συνέπειες της αστοχίας δεν είναι πολύ μεγάλες.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αρκετά σεισμολογικά δεδομένα τα οποία θα οδηγήσουν στη διαμόρφωση ενός ικανοποιητικού στατιστικού δείγματος η αιτιοκρατική μέθοδος είναι ίσως η μοναδική επιλογή. Αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου παγκοσμίως για έργα τα οποία η διάρκεια ζωής μπορεί να υπερβαίνει τη διάρκεια των διαθέσιμων καταλόγων σεισμικότητας. Τέτοια έργα μπορεί να είναι τα φράγματα, οι γέφυρες, οι πυρηνικοί σταθμοί κ.α. (8).

Στην αιτιοκρατική μέθοδο δεν αφαιρείται κάθε αβεβαιότητα. Ο μέγιστος έντασης σεισμός που μπορεί να συμβεί δεν είναι ποτέ απόλυτα γνωστός, μπορεί να εκτιμηθεί μόνο εντός ενός πιθανού εύρους τιμών. Επίσης δεν μπορούμε να είμαστε βέβαιοι πόσο ισχυρή θα είναι η κίνηση του εδάφους σε μια τοποθεσία, ακόμα κι αν είναι γνωστά το μέγεθος και η απόσταση (11).

Για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου με μια πιθανοτική προσέγγιση, οι επιστήμονες προσπαθούν να προβλέψουν και να μοντελοποιήσουν τότε, πού και με τι μέγεθος θα συμβούν σεισμοί και πώς μπορεί να περιγραφεί η δόνηση του εδάφους που προκαλείται από αυτούς τους σεισμούς. Αυτό γίνεται με βάση τα διαθέσιμα σύνολα δεδομένων και πληροφοριών, πρότερης επιστημονικής γνώσης καθώς και ερευνητικών αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, οι εκτιμήσεις σεισμικής επικινδυνότητας πρέπει να επανεξετάζονται και να ενημερώνονται τακτικά. Τα βήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής (8):

1. Καθορισμός των σεισμικών πηγών, της σεισμικότητάς τους και της αντίστοιχης πιθανοτικής κατανομής σε κάθε πηγή.

Οι σεισμικές πηγές περιγράφονται ως γραμμικά στοιχεία, ως συστοιχίες γραμμικών στοιχείων ή ως επιφάνειες ομοιόμορφης σεισμικότητας. Για τις επιφανειακές πηγές γίνεται η θεώρηση της ομοιόμορφα κατανεμημένης πιθανότητας, κάτι που σημαίνει ότι το κάθε σημείο της επιφανειακής πηγής έχει την ίδια πιθανότητα να δώσει έναν συγκεκριμένο σεισμό. Εδώ φαίνεται και μία διαφορά με την αιτιοκρατική μέθοδο καθώς εκείνη δέχεται πιθανότητα 100% να

συμβεί ο χαρακτηριστικός σεισμός σε κάθε πηγή και 0% σε κάθε άλλη θέση, ενώ στην πιθανοτική έχουμε μία συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας.

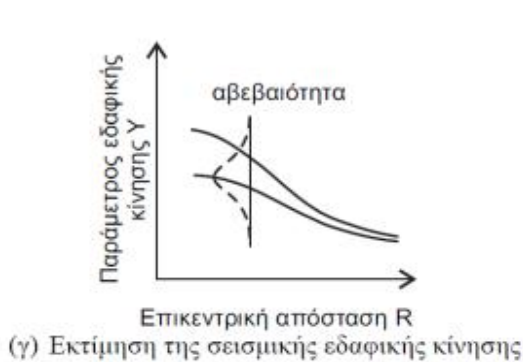
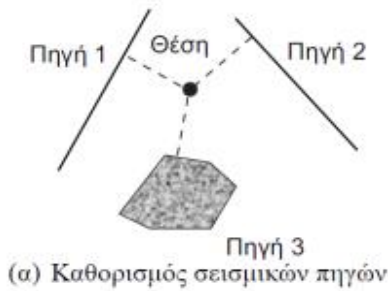
2. Καθορισμός της σεισμικότητας της κάθε πηγής

Ο καθορισμός της σεισμικότητας της κάθε πηγής μπορεί να γίνει με τη συνηθισμένη σχέση των Gutenberg-Richter, η οποία εκφράζει τον αριθμό σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου του M ως προς το αντίστοιχο μέγεθος M . Μια άλλη μέθοδος είναι η στατιστική των ακραίων τιμών. Πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτό το στάδιο παίζει η ποιότητα των δεδομένων στους διαθέσιμους καταλόγους σεισμικότητας της περιοχής που εξετάζεται. Σε αυτό το βήμα περιλαμβάνεται επίσης ο προσδιορισμός τόσο του ελάχιστου όσο και του μέγιστου μεγέθους του σεισμού που μπορεί να προκύψει από κάποια σεισμική πηγή.

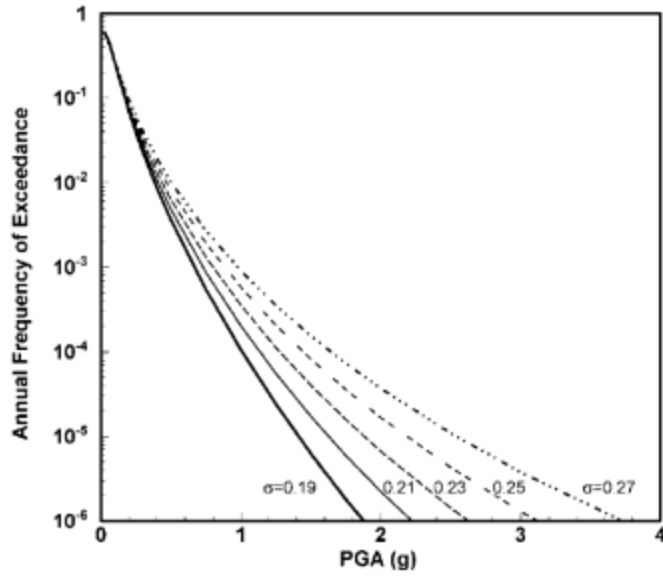
3. Εκτίμηση και επιλογή της κατάλληλης εμπειρικής σχέσης για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης

Σε αυτό το στάδιο επιλέγεται η καταλληλότερη εμπειρική σχέση από την οποία θα προκύψει και το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης σε κάθε σχέση που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι αβεβαιότητες που την χαρακτηρίζουν.

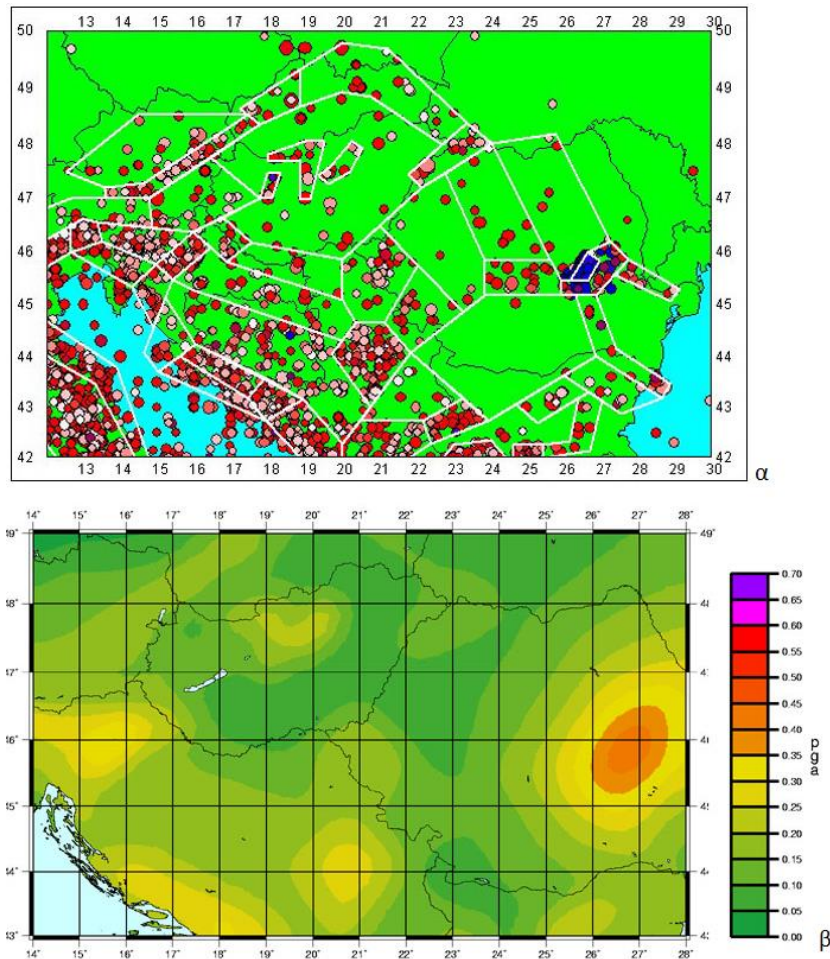
4. Εκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης μιας καθορισμένης τιμής της εξεταζόμενης εδαφικής παραμέτρου σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο



Εικόνα 2.5: Τα βασικά βήματα της πιθανοτικής μεθοδολογίας εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας (8)



Εικόνα 2.6: Καμπύλες σεισμικής επικινδυνότητας που έχουν υπολογιστεί με βάση μια συγκεκριμένη εμπειρική σχέση υπολογισμού της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), αλλά με διαφορεές τιμές για την τοπική απόκλιση σ , της σχέσης. (8)



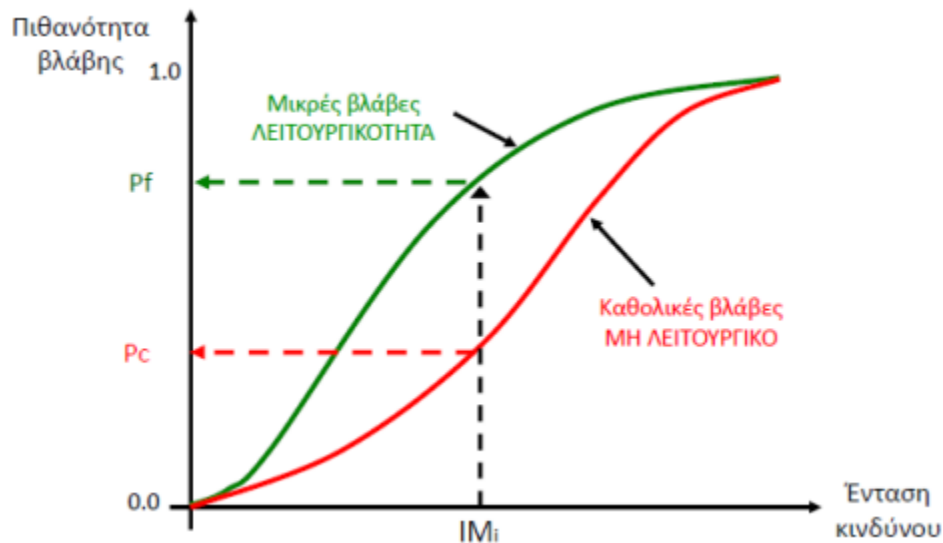
Εικόνα 2.7: α) Δείγμα μοντελοποίησης σεισμικών πηγών για τα Βόρεια Βαλκάνια, β) Χάρτης σεισμικού κινδύνου που προέρχεται από το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην α. (11)

2.2 Σεισμική διακινδύνευση

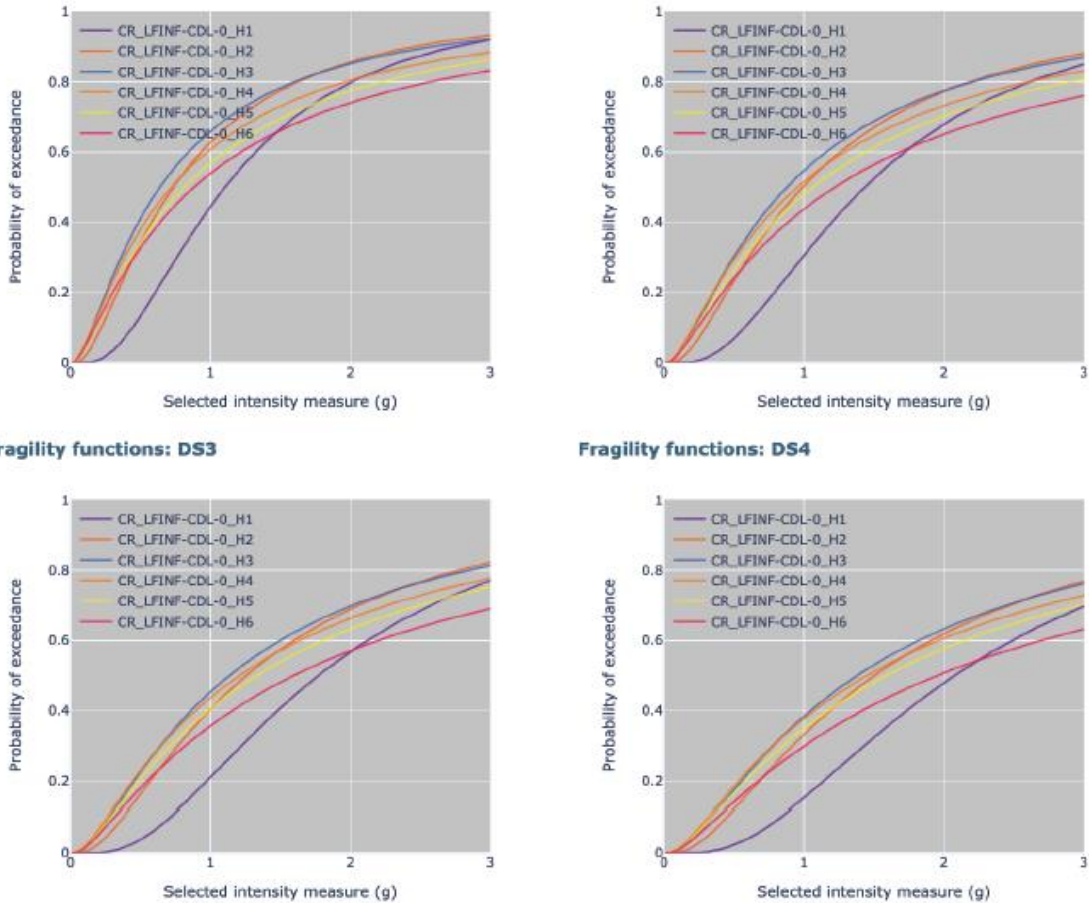
Με τον όρο σεισμική διακινδύνευση εννοούμε τον αναμενόμενο βαθμό ζημιών και απωλειών υλικών και άυλων αγαθών, ο οποίος αναμένεται σε έναν συγκεκριμένο σεισμό σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Το μέτρο της προσδιορίζεται από την απώλεια ανθρώπινων ζώων, τις διάφορες βλάβες στις τεχνικές κατασκευές καθώς και από τις συνέπειες που μπορεί να έχει το σεισμικό γεγονός στην οικονομία και στην κοινωνία μίας περιοχής. Η σεισμική διακινδύνευση γενικά περιγράφεται από την σχέση (9):

$$R=H*V$$

Όπου R είναι η σεισμική διακινδύνευση, H η σεισμική επικινδυνότητα και V η τρωτότητα. Με τον όρο τρωτότητα ορίζεται ο αναμενόμενος βαθμός άμεσων απωλειών ενός συγκεκριμένου στοιχείου, από ένα συγκεκριμένο σεισμικό συμβάν. Η τρωτότητα είναι μία έννοια η οποία μπορεί να αφορά και τις έμμεσες απώλειες (οικονομικές, κοινωνικές) λόγω ενός σεισμού. Η τρωτότητα εκφράζεται και ως η πιθανότητα εκδήλωσης ή υπέρβασης μιας οριακής κατάστασης (π.χ. μικρή βλάβη, μέτρια βλάβη, κατάρρευση), ως συνάρτηση της έντασης κινδύνου (Intensity Measure – IM) και εκφράζεται με τις καμπύλες τρωτότητας (fragility curves) σε όρους πιθανότητας.



Εικόνα 2.8: Καμπύλες τρωτότητας για δύο στάθμες βλάβης. (9)



Εικόνα 2.9: Καμπύλες τρωτότητας. (10)

Οι σεισμοί μπορεί να έχουν μια σειρά από ανεπιθύμητες συνέπειες ειδικότερα όταν είναι και μεγάλοι σε μέγεθος. Κάποιες από αυτές τις συνέπειες είναι (10):

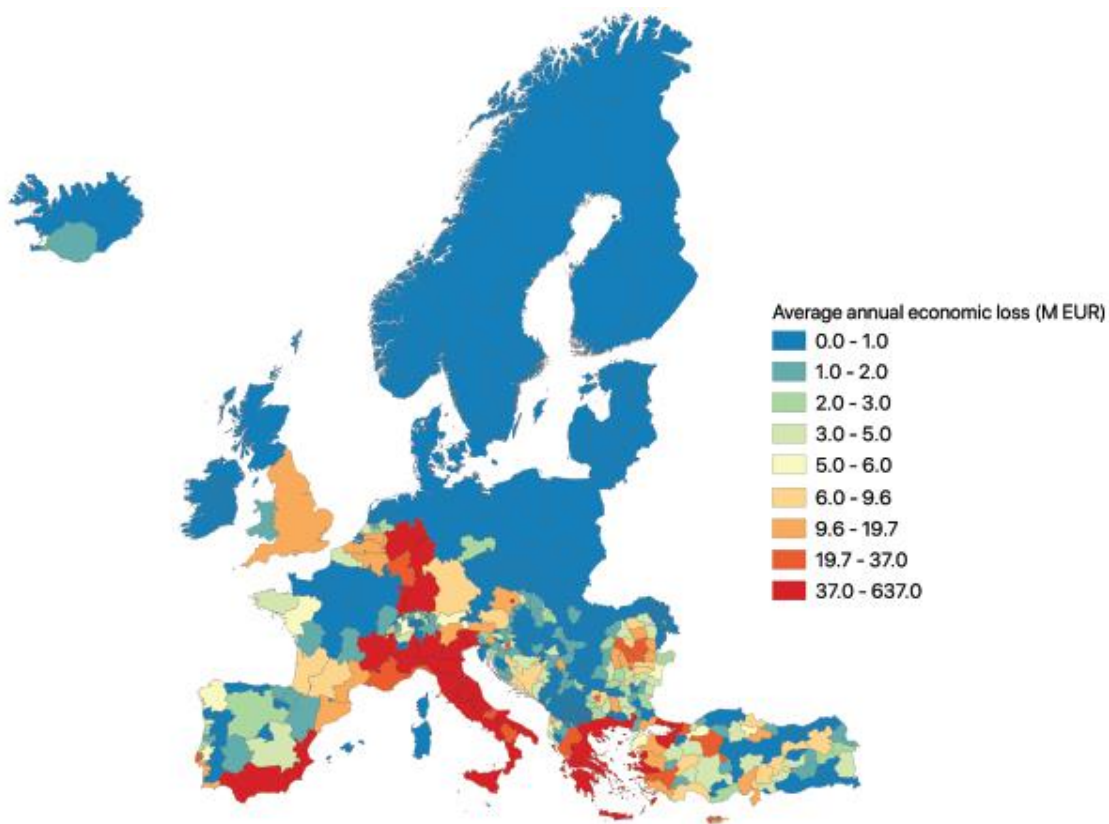
- Ενόχληση των χρηστών των κτιρίων.
- Μη δομικές ζημιές των κτιρίων που χρήζουν επισκευής.
- Δομικές βλάβες των κτιρίων που απαιτούν επισκευή ή και ανακατασκευή του κτιρίου.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Οικονομικό κόστος για την επισκευή ζημιών, ανοικοδόμηση κτιρίων καθώς και επιπλέον κόστος λόγω της μη χρήσης των κτιρίων και χρόνους διακοπής λειτουργίας (δηλαδή απώλειες που προκλήθηκαν ενώ τα κτίρια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν).
- Τραυματισμοί χρηστών και περαστικών λόγω ζημιών και κατάρρευσης κτιρίων.
- Απώλεια ζωής ενοίκων και περαστικών λόγω ζημιών και κατάρρευσης κτιρίων.

Μια εκτίμηση σεισμικού κινδύνου μπορεί συνήθως να επικεντρωθεί σε μία ή δύο από τις παραπάνω συνέπειες, ανάλογα κυρίως με το επίπεδο σεισμικού κινδύνου και τους

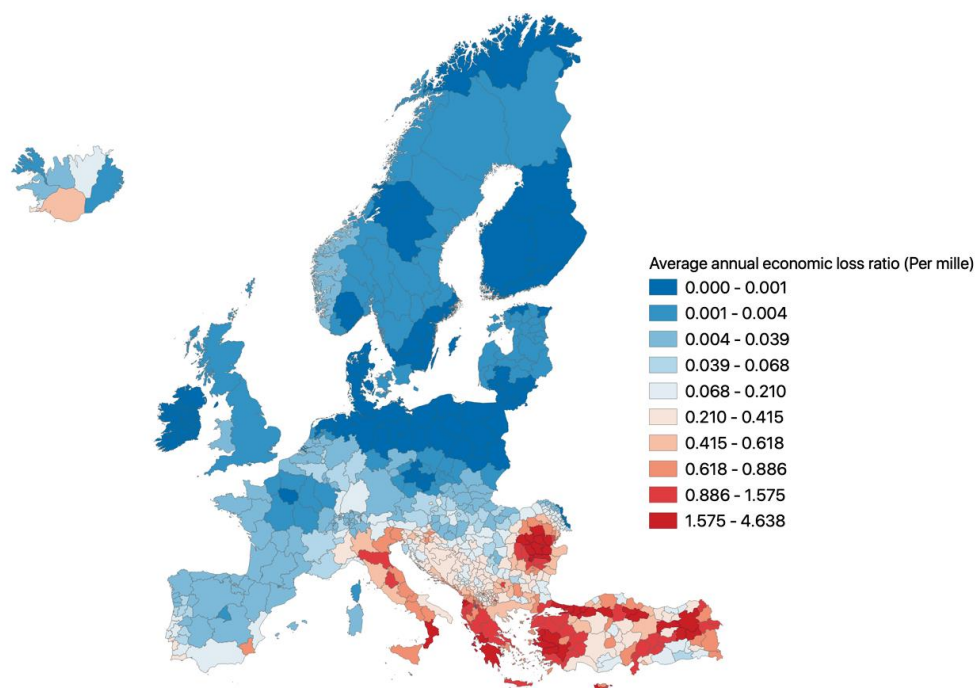
στόχους που καθορίζονται από τους βασικούς ενδιαφερόμενους. Εκτός από την επιλογή συγκεκριμένων συνεπειών στις οποίες θα πρέπει να επικεντρωθεί η αξιολόγηση κινδύνου, μια άλλη απόφαση που απαιτείται σχετίζεται με τον κίνδυνο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό αυτών των συνεπειών. Υπάρχουν τρεις κύριες επιλογές που είναι διαθέσιμες στον αναλυτή κινδύνου (10):

1. Βάσει σεισμικού σεναρίου: οι συνέπειες εκτιμώνται για ένα συγκεκριμένο σεισμό (δεδομένου μεγέθους, τοποθεσίας, βάθους, κ.λπ.) του οποίου το διάστημα επανάληψης μπορεί να ληφθεί από το μοντέλο της πηγής κινδύνου. Για διάφορους λόγους, όπως ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης, η ταχεία εκτίμηση ζημιών κ.ά., απαιτείται η εκτίμηση των ζημιών και των απωλειών που οφείλονται σε ένα μεμονωμένο σεισμικό γεγονός. Στο σενάριο πρέπει να ορίζεται το μέγεθος, η θέση, το βάθος κ.λπ. Αφού οριστούν τα παραπάνω, χρησιμοποιούνται μοντέλα κίνησης του εδάφους για την εκτίμηση του επιπέδου της δόνησης των κτιρίων. Οι προσομοιώσεις που αφορούν την κίνηση του εδάφους θα πρέπει να εκτελεστούν πολλές φορές για διάφορες κινήσεις του εδάφους και στη συνέχεια να εισάγονται στα σχετικά μοντέλα τρωτότητας.
2. Βάσει έντασης: Οι συνέπειες εκτιμώνται για ένα επίπεδο έντασης δόνησης του εδάφους που συμβαίνει σε μια δεδομένη περίοδο επιστροφής (που λαμβάνεται ως αποτέλεσμα μιας πιθανολογικής εκτίμησης σεισμικού κινδύνου). Οι αξιολογήσεις που βασίζονται στην ένταση εκτιμούν την πιθανή απόδοση των κτιρίων για μία συγκεκριμένη ένταση κίνησης του εδάφους που τυπικά αντιπροσωπεύεται από ένα φάσμα απόκρισης ελαστικής επιτάχυνσης του εδάφους.
3. Βάσει συχνότητας: οι συνέπειες εκτιμώνται λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά επίπεδα έντασης δόνησεων εδάφους και τις σχετικές συχνότητες εμφάνισής τους.

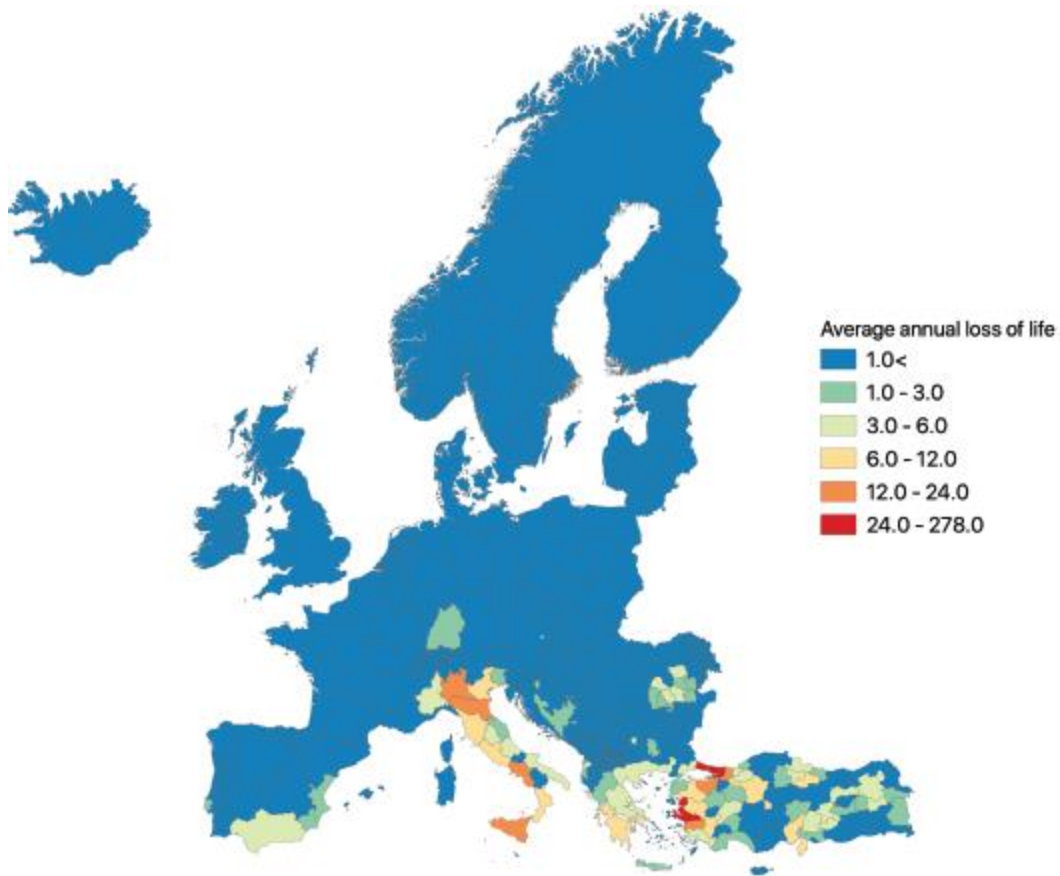
Κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα από ανάλυση σεισμικής διακινδύνευσης για τις ευρωπαϊκές χώρες σύμφωνα με το ESMR2020 (European Seismic Risk Model) φαίνονται παρακάτω. Η σεισμική διακινδύνευση εκτιμήθηκε σε αυτό το μοντέλο σε όρους ετήσιων οικονομικών απωλειών λόγω άμεσου κόστους για την επισκευή/αντικατάσταση των κτιρίων (κατοικίες, εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια) και σε όρους απώλειας ανθρώπινων ζωών λόγω των ζημιών ή της κατάρρευσης αυτών των κτιρίων. Σύμφωνα με το ESRM20, η μέση ετήσια οικονομική απώλεια στην Ευρώπη είναι περίπου 7 δισεκατομμύρια ευρώ, με σχεδόν το 70% αυτής της απώλειας να σημειώνεται στην Ιταλία, την Τουρκία και την Ελλάδα. Η μέση ετήσια απώλεια ανθρώπινων ζωών εκτιμάται ότι είναι περίπου 900 θάνατοι, με πάνω από το 75% αυτών των θανάτων μόνο στην Ιταλία και την Τουρκία. Κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με πάνελ πλήρωσης σχεδιασμένα σύμφωνα με τους παλιούς κανονισμούς σεισμικής σχεδίασης, μαζί με τα χαμηλά κτίρια από μη οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι οι δύο κατηγορίες κτιρίων που συμβάλλουν περισσότερο τόσο στις οικονομικές απώλειες όσο και στις απώλειες ζωών στην Ευρώπη.



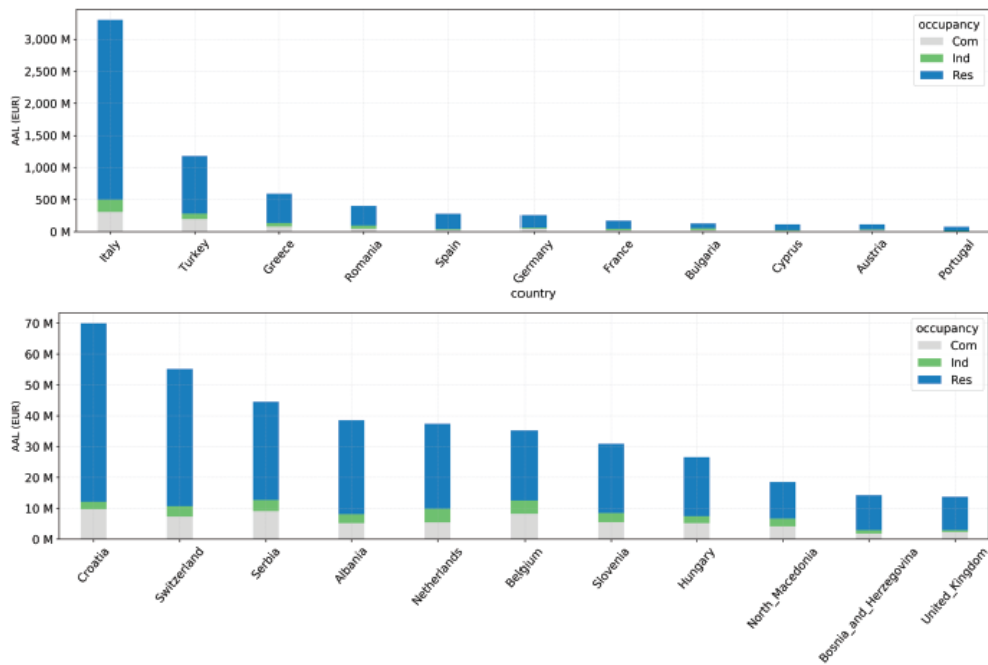
Εικόνα 2.10: Μέσες οικονομικές απώλειες σε εκατομμύρια ευρώ για διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Τουρκίας. (10)



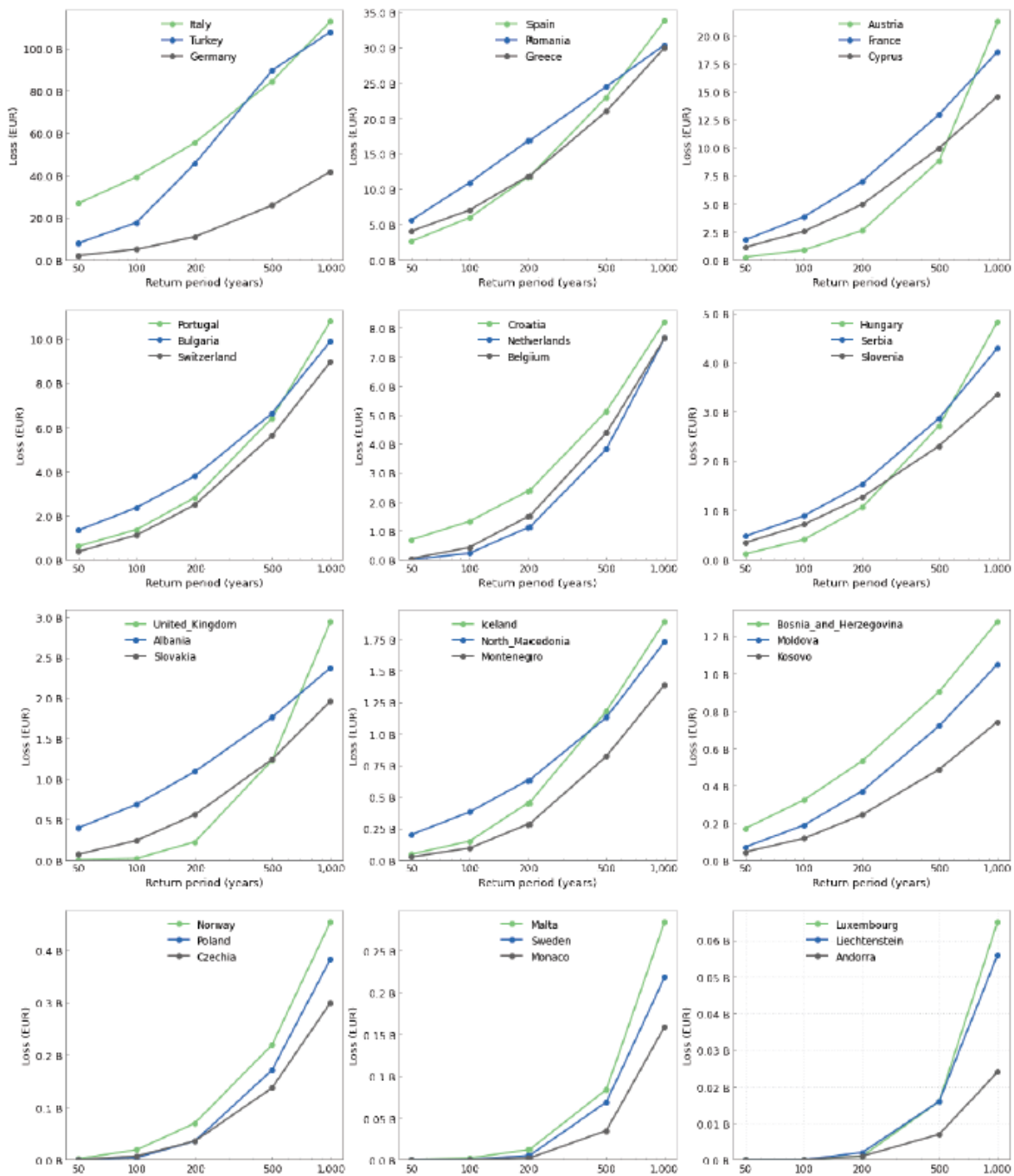
Εικόνα 2.11: Λόγος μέσων οικονομικών απωλειών για διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Τουρκίας. (10)



Εικόνα 2.12: Μέσες απώλειες ζωής για διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Τουρκίας. (10)



Εικόνα 2.13: Μέσες οικονομικές απώλειες για διάφορες χώρες της Ευρώπης. (10)



Εικόνα 2.14: Καμπύλες απωλειών που δείχνουν τις περιόδους επιστροφής της συνολικής οικονομικής ζημίας (σε Δισ. ευρώ) για κάθε χώρα. (10)

2.3 Καμπύλες τρωτότητας

2.3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ανάλυσης και εκτίμησης συμπεριφοράς των κατασκευών μέσα από την ανάπτυξη της ιδέας της έννοιας “Στάθμες Επιτελεστικότητας”, η οποία ορίζει ένα αναμενόμενο και αποδεκτό όριο βλαβών. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας έχει ως στόχο την εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής σε ποικίλα σεισμικά συμβάντα με βάση ένα αναμενόμενο αποδεκτό όριο βλαβών. Οι στάθμες επιτελεστικότητας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 αφορούν α) τον Περιορισμό Βλαβών (Damage Limitation), β) την Προστασία Ζωής ή αλλιώς στάθμη Σημαντικών Βλαβών (Severe Damage) και γ) την οιονεί κατάρρευση (Near Collapse). Πιο συγκεκριμένα, στόχος της μεθόδου είναι η εύρεση του κατάλληλου μέτρου βλάβης (Damage Measure) το οποίο θα είναι και αντιπροσωπευτικό της κατάστασης της κατασκευής σε κάθε μέτρο έντασης. Για παράδειγμα ως μέτρο βλάβης μπορεί να επιλεγεί η ανηγμένη μετακίνηση ορόφων (IDR, Interstorey drift ratio). Η συνεχόμενη ανάπτυξη της τεχνολογίας άρα και της υπολογιστικής ισχύος, οδήγησε στην ανάπτυξη μεθοδολογιών οι οποίες υλοποιούν μη γραμμική δυναμική ανάλυση και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

2.3.2 Προσαυξητική δυναμική ανάλυση

Η ιδέα της προσαυξητικής μεθόδου αναπτύχθηκε από τους Vamvatsikos and Cornell (2002) ενώ είχε διατυπωθεί ως ιδέα αρκετά νωρίτερα περί το 1977 από τον Bertero. Κύριος στόχος της μεθόδου είναι η μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής υπό κλιμακωτά αυξανόμενα σεισμικά φορτία και η εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς για κάθε μέτρο έντασης. Αντίστοιχα, μπορεί να γίνει και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη μη γραμμική στατική ανάλυση (Pushover) και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Έπειτα από την ανάλυση εξάγονται καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν την σχέση μέτρου έντασης (Intensity Measure, IM) με το μέτρο βλάβης (Damage Measure, DM).

Αρχικά, η μέθοδος προϋποθέτει την εύρεση του κατάλληλου μέτρου έντασης (IM), το οποίο είναι η παράμετρος η οποία δείχνει την ένταση της σεισμικής φόρτισης. Στη βιβλιογραφία προτείνονται αρκετές παράμετροι ως μέτρο έντασης της σεισμικής φόρτισης με επικρατέστερα τα παρακάτω (12) :

- Μέγιστη Εδαφική επιτάχυνση του σεισμού (Peak ground acceleration, PGA)
- Ελαστική φασματική επιτάχυνση στην πρώτη ιδιομορφή ($S_a(T_1, \xi)$)

Έχει παρατηρηθεί πως η επιλογή της ελαστικής φασματικής επιτάχυνσης στην πρώτη ιδιοπερίοδο επιφέρει αποτελέσματα με μικρότερη διασπορά επομένως μπορεί να

θεωρηθεί ως το καταλληλότερο μέτρο έντασης. Αντίστοιχα, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση παρουσιάζει μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων ιδιαίτερα σε κτίρια τα οποία έχουν μεγάλο ύψος, ενώ συγκλίνει ικανοποιητικά για κτίρια χαμηλού ύψους έως 4 ορόφους.

Το μέτρο βλάβης που θα επιλεγεί αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την εξαγωγή των απαραίτητων καμπυλών, καθώς αυτό είναι που θα εκφράζει την συμπεριφορά της κατασκευής κατά τη σεισμική φόρτιση. Τα κυριότερα και επικρατέστερα προτεινόμενα μέτρα βλάβης ακολουθούν παρακάτω:

- Τέμνουσα βάσης V
- Σχετική μετακίνηση διαδοχικών ορόφων (Interstorey Drift Ratio, IDR)
- Στροφές κόμβων
- Απομένουσες μετακινήσεις διαδοχικών ορόφων.

Συνήθως επιλέγεται στη βιβλιογραφία η χρήση της σχετικής μετακίνησης διαδοχικών ορόφων (IDR), ως μέτρο βλάβης καθώς εκφράζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της κατασκευής ενώ μπορεί να συγκριθεί εύκολα και άμεσα με τα μέγιστα αποδεκτά όρια που ορίζουν οι κανονισμοί. Για παράδειγμα οι Αμερικάνικοι Κανονισμοί (FEMA P58, SEAOC) ορίζουν μέγιστα όρια ανηγμένης σχετικής μετακίνησης διαδοχικών ορόφων για τις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας (13).

Παρακάτω συνοψίζονται επιγραμματικά οι κυριότερες επιδιώξεις και στόχοι της προσαυξητικής μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης:

- Η εύρεση της συμπεριφοράς της κατασκευής για ποικίλα μέτρα έντασης, καθώς και η απόκριση και συμπεριφορά της σε σπάνια σεισμικά φαινόμενα.
- Η εύρεση της σεισμικής ικανότητας της κατασκευής και η απόκρισή της καθ' ύψος.
- Η απόκριση μιας κατασκευής υπό επαναλαμβανόμενες σεισμικές φορτίσεις.

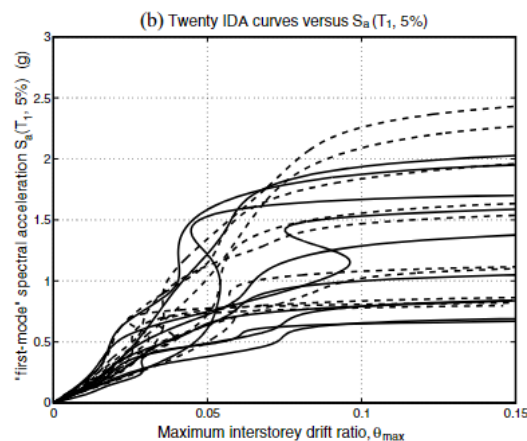
Αξίζει να σημειωθεί πως οι περισσότεροι κανονισμοί έχουν ως στόχο την αποφυγή κατάρρευσης της κατασκευής υπό έναν κύριο σεισμό σχεδιασμού. Τα τελευταία χρόνια όμως έχει παρατηρηθεί πως πολλές κατασκευές αντέχουν τον κύριο σεισμό αλλά καταρρέουν σε μετασεισμούς μικρότερης έντασης. Η προσαυξητική ανάλυση επιτρέπει την ανάλυση μιας κατασκευής υπό πολλαπλούς σεισμούς και επιτρέπει την εκτίμηση της συμπεριφοράς της και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Η προσαυξητική δυναμική ανάλυση παρουσιάζεται συνοπτικά με τα παρακάτω 8 βήματα:

1. Προσομοίωση του φέροντα οργανισμού μέσω ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων στατικής και δυναμικής ανάλυσης.
2. Επιλογή των κατάλληλων σεισμικών καταγραφών για την ανάλυση. Το πλήθος των σεισμικών καταγραφών επηρεάζει αρκετά τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης. Η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης των ΗΠΑ (FEMA P695 2009) συστήνει στις οδηγίες της την υιοθέτηση

των μέγιστων τιμών των εντατικών παραμέτρων όταν λαμβάνονται τρεις σεισμικές καταγραφές υπόψιν, ή την μέση τιμή αυτών για επτά (ή περισσότερες από επτά) σεισμικές καταγραφές. Έχει επικρατήσει το συμπέρασμα πως για κτίρια μέσου ύψους (5 έως 10 όροφοι) αρκούν 10 έως 20 σεισμικές καταγραφές.

3. Στατική επίλυση της κατασκευής με τα φορτία βαρύτητας, η οποία και θα αποτελέσει τις αρχικές συνθήκες για τη μη γραμμική δυναμική προσαυξητική ανάλυση.
4. Καθορισμός κατάλληλων μέτρων έντασης και μέτρων βλάβης.
5. Κανονικοποίηση ελαστικών φασμάτων απόκρισης. Η διαδικασία της κανονικοποίησης στην περίπτωση του ελαστικού φάσματος απόκρισης στην πρώτη ιδιοπερίοδο, ορίζει τον προσδιορισμό του ελαστικού φάσματος και έπειτα τη διαίρεση των τιμών με την τιμή $S_a(T_1, \xi)$ έτσι ώστε την χρονική στιγμή T_1 να επικρατεί τιμή $1g$.
6. Εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης. Η εκτέλεση της ανάλυσης θα πρέπει να γίνει με βήμα προσαύξησης τέτοιο ώστε να μην διακυβεύεται η αξιοπιστία της μεθόδου (14). Συνήθως, η προσαύξηση γίνεται με μικρό βήμα ώστε να μη χαθεί η ακρίβεια ως προς το σημείο όπου διαπιστώνεται η κατάρρευση. Ένα καλό βήμα προσαύξησης είναι το $0,05g$ ή $0.1g$. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν πλέον και άλλες μέθοδοι με τις οποίες μειώνεται το υπολογιστικό κόστος όσον αφορά το χρόνο ανάλυσης.
7. Εξαγωγή κατάλληλων καμπυλών. Οι καμπύλες που προκύπτουν συσχετίζουν το μέτρο έντασης με το μέτρο βλάβης και επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς τη συμπεριφορά της κατασκευής στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας αλλά και στην κατάρρευση.
8. Σχεδίαση καμπυλών τρωτότητας. Η διαδικασία κατά την οποία θα προκύψουν οι καμπύλες τρωτότητας περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

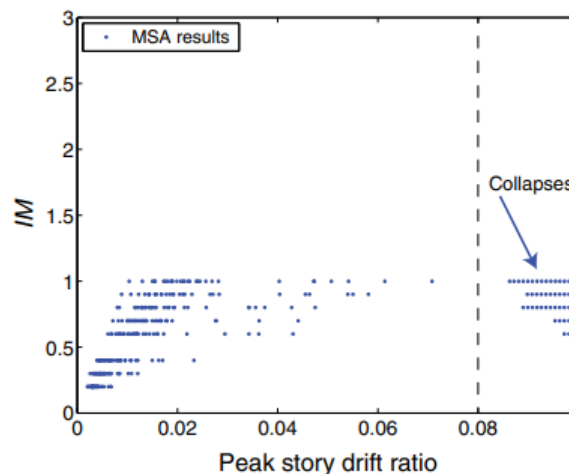


Εικόνα 2.15: Καμπύλες προσαυξητικής ανάλυσης (έτρο έντασης - μέτρο βλάβης) (15).

2.3.3 Ανάλυση με τη μέθοδο πολλαπλών “λωρίδων” (Multiple stripe analysis, MSA)

Ενώ η προσαυξητική μέθοδος αποτελεί καινοτόμο τρόπο και αποτυπώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τη συμπεριφορά της κατασκευής σε διάφορα μέτρα έντασης, μπορεί ωστόσο να οδηγήσει σε αρκετά μεγάλα μέτρα έντασης μέχρι την αστοχία τα οποία δεν είναι ρεαλιστικά και αυξάνεται δραματικά το υπολογιστικό κόστος. Για αυτόν τον λόγο, προτάθηκε από τον Baker 2015 (16), η μέθοδος MSA κατά την οποία γίνεται ανάλυση για διάφορα επίπεδα έντασης και παρατηρείται πόσες αστοχίες ή υπερβάσεις ορίων έχουν επιτευχθεί. Συνήθως, διενεργείται μια προσαυξητική ανάλυση ώστε να διαπιστωθεί περίπου ποιο είναι το ανώτερο σημείο έντασης για τις διάφορες σεισμικές καταγραφές το οποίο οδηγεί στην υπέρβαση του επιθυμητού ορίου.

Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται δυνατή η αποφυγή ανάλυσης σε μη ρεαλιστικές τιμές μέτρων έντασης και μειώνεται ικανοποιητικά ο υπολογιστικός χρόνος της ανάλυσης. Με αυτήν την προσέγγιση, η ανάλυση δεν χρειάζεται να πραγματοποιείται έως τις τιμές επιπέδου έντασης κίνησης όπου όλες οι κινήσεις του εδάφους προκαλούν κατάρρευση. Λόγω των διαφορετικών κινήσεων του εδάφους που χρησιμοποιούνται σε κάθε επίπεδο έντασης κίνησης, ο αναλυτής ενδέχεται να μην παρατηρήσει αυστηρά αυξανόμενα ποσοστά κατάρρευσης με την αύξηση της έντασης κίνησης, αν και αναμένεται ότι η πραγματική πιθανότητα κατάρρευσης αυξάνεται με την ένταση κίνησης. Με δεδομένα αυτού του τύπου, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις προσεγγίσεις εκτίμησης που περιγράφονται παραπάνω διότι δεν διαθέτουμε τιμές μέτρων έντασης (IMi) που συσχετίζονται με την έναρξη της κατάρρευσης για μια συγκεκριμένη κίνηση του εδάφους. Αντ' αυτού, τα αποτελέσματα της δομικής ανάλυσης παρέχουν το ποσοστό των κινήσεων του εδάφους σε κάθε επίπεδο έντασης κίνησης που προκαλούν κατάρρευση. Η κατάλληλη τεχνική προσαρμογής για αυτόν τον τύπο δεδομένων είναι η μέγιστη πιθανότητα, όπως έχει σημειωθεί από αρκετούς συγγραφείς. Παρακάτω, παρουσιάζονται σε διάγραμμα τα δεδομένα που παρατηρούνται από την ανάλυση MSA κατά την οποία για διάφορες σεισμικές φορτίσεις και διαφορετικές τιμές μέτρων έντασης παρατηρούνται καταρρεύσεις και μη καταρρεύσεις.



Εικόνα 2.16: Κατανομή περιπτώσεων αστοχίας ή μη για διαφορετικά μέτρα έντασης (16).

2.3.4 Σχεδιασμός Καμπυλών Τρωτότητας

Οι καμπύλες τρωτότητας αποτελούν σημαντικότατο κριτήριο στην εκτίμηση της διακινδύνευσης και της συμπεριφοράς ενός κτιρίου, καθώς εκφράζουν την πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης επιτελεστικότητας για κάθε μέτρο έντασης. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει δυνατότητα με την εξαγωγή καμπυλών τρωτότητας να εκτιμηθεί η πιθανότητα υπέρβασης είτε κάποιου συγκεκριμένου ορίου στάθμης επιτελεστικότητας είτε ακόμα και κατάρρευσης της κατασκευής για ποικίλα μέτρα έντασης. Αναλυτικότερα, οι καμπύλες τρωτότητας μιας κατασκευής εκφράζουν την πιθανότητα αστοχίας ή υπέρβασης μιας στάθμης επιτελεστικότητας δίνοντας τη δυνατότητα στους μηχανικούς να εκτιμήσουν την συμπεριφορά των υπό εξέταση κτιρίων έναντι σεισμικών φορτίσεων και να θέσουν προτεραιότητες ως προς την ανάγκη ενίσχυσής τους ή και επισκευής τους έπειτα από ένα σεισμό.

Η πιθανότητα κατάρρευσης μιας κατασκευής ή υπέρβασης μιας στάθμης επιτελεστικότητας χ , μπορεί να εκφραστεί ως το πλήθος των σεισμικών επιταχύνσεων που οδηγούν σε αυτήν την υπέρβαση ή αστοχία για το δεδομένο μέτρο έντασης. Το διάγραμμα των πιθανοτήτων εκφράζεται ως λογαριθμική αθροιστική κατανομή, η οποία διέπεται από την σχέση:

$$P(X|IM = x) = \Phi((\ln(x/\theta))/\beta)$$

Παρακάτω κρίνεται αναγκαίο να γίνει επεξήγηση των ανωτέρω παραμέτρων ώστε να είναι εύκολα αντιληπτή η διαδικασία υπολογισμού καμπυλών τρωτότητας.

- $P(X|IM=x)$, ονομάζεται η πιθανότητα η εδαφική επιτάχυνση με μέτρο έντασης ίσο με $IM=x$, να προκαλέσει κατάρρευση της κατασκευής ή οποιαδήποτε υπέρβαση σε επιλεγμένες στάθμες επιτελεστικότητας.
- Φ , ονομάζεται η τυποποιημένη κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής
- θ , ονομάζεται η διάμεσος της τρωτότητας, δηλαδή το μέτρο έντασης που αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης επιτελεστικότητας.
- β , ονομάζεται η τυπική απόκλιση του λογαρίθμου του μέτρου έντασης ($\ln IM_i$)

Οι παράμετροι θ, β της παραπάνω σχέσης μπορούν να υπολογιστούν μέσω των δύο σχέσεων που παρουσιάζονται παρακάτω (16):

$$\ln \theta = (1/n) \sum \ln IM_i$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n ((\ln \left(\frac{IM_i}{\theta}\right))^2)}$$

Η υπόθεση λογαριθμικής αθροιστικής κατανομής έχει κυριαρχήσει έναντι άλλων υποθέσεων λόγω των παρακάτω παραγόντων:

- Απλότητα: Η μέθοδος προϋποθέτει την εύρεση του μέτρου έντασης στο οποίο προκαλείται η αστοχία, γεγονός που εξ ορισμού οδηγεί στην ανάγκη για εύρεση

μιας λύσης η οποία θα παίρνει αποκλειστικά θετικές τιμές. Η λογαριθμική κατανομή είναι κατάλληλη όταν πρέπει να εκτιμηθεί παράμετρος η οποία θα είναι θετική (όπως το μέτρο έντασης όπου θα επιτευχθεί κατάρρευση) χρησιμοποιώντας μόνο μια κεντρική τιμή και την αβεβαιότητά της. Με βάση τα παραπάνω, όταν μια μεταβλητή θεωρείται ότι ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή, η διάμεσός της ακολουθεί την κανονική κατανομή και η πιθανότητα να είναι αρνητική προφανώς και είναι μηδενική.

- Υπόβαθρο γνώσης: Γνωρίζοντας πληροφορίες για τη διάμεσο, την τυπική απόκλιση και το γεγονός ότι μελετάται μια μεταβλητή που αντιπροσωπεύεται μόνο με θετικές τιμές, οδήγησε στην λογαριθμική συνάρτηση ως μια συντηρητική και υπέρ της ασφαλείας υπόθεση.
- Είναι συμβατή με τα δεδομένα και τα αποτελέσματα, όπως είναι η κίνηση του εδάφους κατά τη σεισμική φόρτιση αλλά και η κατανομή αντίστασης της κατασκευής.

Η έννοια της συνάρτησης ευθραυστότητας (fragility function) στη σεισμική μηχανική χρονολογείται τουλάχιστον από τους Kennedy et al. (1980), οι οποίοι ορίζουν τη συνάρτηση ευθραυστότητας ως μια πιθανολογική σχέση μεταξύ της συχνότητας αστοχίας ενός στοιχείου ενός πυρηνικού σταθμού και της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους σε έναν σεισμό. Ευρύτερα, μπορεί κανείς να ορίσει μια συνάρτηση ευθραυστότητας ως μια μαθηματική συνάρτηση που εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί κάποιο ανεπιθύμητο συμβάν (π.χ. όταν η κατασκευή φτάσει ή υπερβεί μια οριακή κατάσταση) ως συνάρτηση κάποιου μέτρου της σεισμικής διέγερσης (π.χ. εδαφική επιτάχυνση).

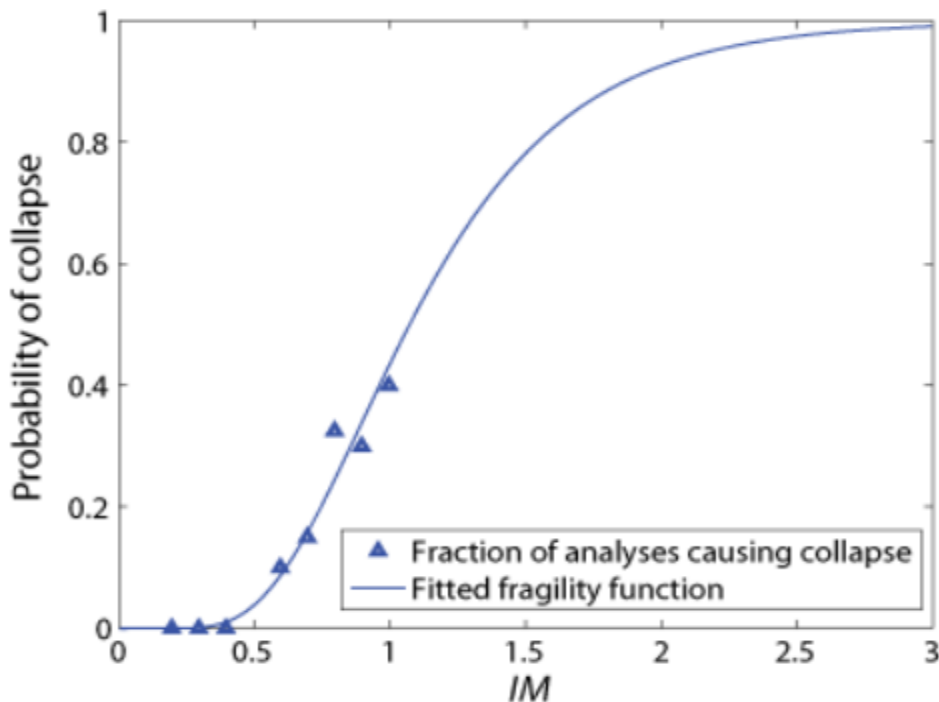
Εναλλακτικά, μπορεί να θεωρηθεί πως η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της αντίστασης μιας κατασκευής έναντι μιας διέγερσης ονομάζεται συνάρτηση ευθραυστότητας. Η ικανότητα μιας κατασκευής (capacity) ορίζεται ως ο βαθμός της διέγερσης που ο φορέας θα υπερβεί μια στάθμη επιτελεστικότητας, εκφράζοντας έτσι την αβεβαιότητα της αντίστασης του κτιρίου έναντι σεισμικής φόρτισης. Η πιθανότητα να καταρρεύσει σε ένα δεδομένο επίπεδο εδαφικής διέγερσης είναι η ίδια με την πιθανότητα η δύναμη του να είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται για να αντισταθεί σε αυτό επίπεδο της εδαφικής διέγερσης. Όταν αναφερόμαστε σε συναρτήσεις ευθραυστότητας, ως αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function) εννοούμε την πιθανότητα να είναι μια αβέβαιη ποσότητα μικρότερη από ή ίση με μια δεδομένη τιμή, ως συνάρτηση αυτής της τιμής.

Η σεισμική ευθραυστότητα μπορεί να περιγραφεί με ικανοποιητική προσέγγιση μέσω της λογαριθμικής αθροιστικής συνάρτησης κατανομής όπως παρακάτω:

$$F_d(x) = P(D \geq d | X = x) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{x}{\theta_d}\right)}{\beta_d}\right)$$

Όπου:

- $P(A|B)$, είναι η πιθανότητα το A να είναι αληθές όταν το B είναι αληθές
- D, είναι η αβέβαιη κατάσταση βλάβης ενός δομικού στοιχείου
- d, είναι η συγκεκριμένη ντετερμινιστική τιμή της D (δηλαδή χωρίς αβεβαιότητα) και παίρνει τις τιμές (1,2,n), όπου n είναι ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων αστοχίας (damage states)
- X, είναι η αβέβαιη διέγερση (π.χ. η εδαφική επιτάχυνση) η οποία «διέγερση» καλείται και ως παράμετρος απαίτησης (demand parameter) στην ορολογία της FEMA P-58 (2012)
- x, είναι η συγκεκριμένη ντετερμινιστική τιμή της X (δηλαδή χωρίς αβεβαιότητα)
- $F_d(x)$, είναι η καμπύλη ευθραυστότητας για την κατάσταση αστοχίας d που εκτιμάται στην τιμή x
- $\Phi(s)$, είναι η τυποποιημένη κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής (standard normal cumulative distribution function) η οποία αξιολογείται στο s
- $\ln s$, είναι ο φυσικός λογάριθμος του s
- θ_d , η διάμεσος ικανότητα του δομικού στοιχείου να αντισταθεί στην κατάσταση αστοχίας d που μετράται σε ίδιες μονάδες με το X
- β_d , είναι η τυπική απόκλιση του φυσικού λογάριθμου της ικανότητας του δομικού στοιχείου να αντισταθεί στην κατάσταση αστοχίας d



Εικόνα 2.17: Καμπύλη τρωτότητας η οποία υποδεικνύει την πιθανότητα αστοχίας συγκριτικά με το μέτρο έντασης (16).

3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

3.1 Μέθοδοι προσεισμικών ελέγχων

Στόχος του προσεισμικού ελέγχου είναι η εκτίμηση της ασφάλειας που παρέχουν τα Δημόσια και κοινωφελή κτίρια έναντι των μέγιστων πιθανοτικά αναμενόμενων σεισμικών δράσεων στην περιοχή που αυτά βρίσκονται. Τέτοια κτίρια μπορεί να είναι τα νοσοκομεία, τα σχολεία, οι δημόσιες υπηρεσίες κ.α. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον προσεισμικό έλεγχο λαμβάνονται οι απαραίτητες αποφάσεις και τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία των πολιτών που βρίσκονται μέσα σε αυτά. Ο προσεισμικός έλεγχος διακρίνεται στον πρωτοβάθμιο, στον δευτεροβάθμιο και στον τριτοβάθμιο.

3.2 Πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος

Ο πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος ή ταχύς οπτικός έλεγχος (TOE) πραγματοποιείται σε όλα τα κτίρια Δημόσιας και κοινωφελούς χρήσης και έχει ως στόχο μια αρχική εκτίμηση της σεισμικής τους ικανότητας (17). Όλα τα στοιχεία που συλλέγονται κατά τον έλεγχο καταγράφονται σε ένα ειδικό δελτίο το οποίο ονομάζεται <<Δελτίο ελέγχου>>. Από την επεξεργασία τόσο των στοιχείων του Δελτίου ελέγχου, τόσο και από τις αναμενόμενες μέγιστες σεισμικές δράσεις ανά περιοχή για τα επόμενα χρόνια, θα καθοριστούν οι προτεραιότητες για τον περαιτέρω έλεγχο ή την ανάγκη λήψης άμεσων μέτρων. Για τα κτίρια που θα ελεγχθούν και θα προκύψει μη επαρκής δείκτης σεισμικής ικανότητας, θα ενημερωθούν οι αρμόδιοι φορείς έτσι ώστε να προβούν στη δεύτερη φάση του προσεισμικού ελέγχου (18).

Από το 2001 μέχρι σήμερα με εποπτεία του ΟΑΣΠ, υλοποιείται το πρόγραμμα «Πρωτοβάθμιος Προσεισμικός έλεγχος κτιρίων Δημόσιας και Κοινωφελούς χρήσης». Στόχος του προγράμματος είναι η καταγραφή των υφιστάμενων κτιρίων δημόσιας και κοινωφελούς χρήσης έτσι ώστε να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσής τους με στόχο να καθοριστούν οι προτεραιότητες σε εθνικό επίπεδο για τον περαιτέρω έλεγχο, βασιζόμενοι στα στοιχεία που συλλέγονται και καταγράφονται σε σχετικά δελτία.

ΔΕΛΤΙΟ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΟΥ ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΤΙΡΙΩΝ (6^η Έκδοση, 2024)

ΕΝΟΤΗΤΑ Α: ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΚΤΙΡΙΟΥ

1. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:	<input checked="" type="checkbox"/>
2. ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:	<input checked="" type="checkbox"/>
3. ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ:	<input checked="" type="checkbox"/> ΤΚ: <input checked="" type="checkbox"/>
ΤΗΛ:	<input checked="" type="checkbox"/> E-mail:
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ	φ: <input type="checkbox"/> λ: <input type="checkbox"/>
4. α. ΟΝΟΜΑ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑΤΟΣ:	<input checked="" type="checkbox"/> β. ΟΝΟΜΑ ΚΤΙΡΙΟΥ:
5. α. ΧΡΗΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ:	<input checked="" type="checkbox"/>
β. ΕΙΔΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ:	<input checked="" type="checkbox"/> γ. ΕΙΔΙΚΗ ΧΡΗΣΗ:
6. ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ:	ΝΑΙ <input checked="" type="checkbox"/> ΟΧΙ <input checked="" type="checkbox"/> ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ:
7. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΡΗΣΤΗ:	<input checked="" type="checkbox"/>
8. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΔΙΟΚΤΗΤΗ:	<input type="checkbox"/>
9. ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΦΟΡΕΑΣ:	<input checked="" type="radio"/>
10. ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΩΠΩΝ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ	ΕΩΣ 10 <input checked="" type="checkbox"/> 10-100 <input checked="" type="checkbox"/> >100 <input checked="" type="checkbox"/>

ΕΝΟΤΗΤΑ Β: ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ

11. ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΡΟΦΩΝ α. ΑΝΩΔΟΜΗΣ:	<input type="checkbox"/>	β. ΥΠΟΓΕΙΩΝ:	<input type="checkbox"/>
12. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΨΗΣ ΑΝΩΔΟΜΗΣ:	<input type="checkbox"/>		
13. ΟΛΙΚΗ ΔΟΜΗΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ α. ΑΝΩΔΟΜΗΣ:	<input type="checkbox"/>	β. ΥΠΟΓΕΙΩΝ:	<input type="checkbox"/>
14. ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ/ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ:	<1959 <input checked="" type="checkbox"/>	1959-1984 <input checked="" type="checkbox"/>	1985-1994 <input checked="" type="checkbox"/> ≥1995 <input checked="" type="checkbox"/>
15. ΕΤΟΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ:	<input type="checkbox"/>		
16. ΕΙΝΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ Η ΜΕΛΕΤΗ:	ΝΑΙ <input type="checkbox"/>	ΟΧΙ <input type="checkbox"/>	
17. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ Η ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ:	ΝΑΙ <input type="checkbox"/>	ΟΧΙ <input type="checkbox"/>	
18. ΕΧΕΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΕΙ ΔΙΑΤΗΡΗΤΕΟ/ΜΝΗΜΕΙΟ:	ΝΑΙ <input type="checkbox"/>	ΟΧΙ <input type="checkbox"/>	
19. ΕΧΕΙ ΕΝΙΣΧΥΘΕΙ ΤΟ ΚΤΙΡΙΟ:	ΝΑΙ <input type="checkbox"/>	ΟΧΙ <input type="checkbox"/>	
20. ΑΝ ΝΑΙ ΓΙΑ ΠΟΙΑ ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΠΟΤΕ:	<input type="checkbox"/>		
21. ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΤΑ ΕΑΚ-2000	Σ1 <input type="checkbox"/>	Σ2 <input type="checkbox"/>	Σ3 <input type="checkbox"/> Σ4 <input type="checkbox"/>
22. ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ/ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ/ΣΧΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:	<input type="checkbox"/>		

ΕΝΟΤΗΤΑ Γ: ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

23. ΖΩΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΕΑΚ-2000 (Συμπληρώνεται αυτόματα με βάση το πεδίο 2)	I <input checked="" type="radio"/>	II <input type="radio"/>	III <input type="radio"/>
24. ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑ ΕΑΚ-2000	A <input type="checkbox"/>	B <input type="checkbox"/>	Γ <input type="checkbox"/> Δ <input type="checkbox"/> Χ <input type="checkbox"/>

ΕΝΟΤΗΤΑ Δ: ΔΟΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

25. ΔΟΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ (ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 1)			
ΟΣα <input type="checkbox"/>	ΟΣβ <input type="checkbox"/>	ΟΣγ <input type="checkbox"/>	
ΠΟΣ1 <input type="checkbox"/>	ΠΟΣ2 <input type="checkbox"/>		
ΑΤ <input type="checkbox"/>	ΔΤ <input type="checkbox"/>	ΟΤ <input type="checkbox"/>	ΕΤ <input type="checkbox"/>
ΧΛ1α <input type="checkbox"/>	ΧΛ1β <input type="checkbox"/>	ΧΛ2α <input type="checkbox"/>	ΧΛ2β <input type="checkbox"/>

ΕΝΟΤΗΤΑ Ε: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Στα παρακάτω ερωτήματα, όταν η απάντηση είναι αρνητική, σημειώνεται το πεδίο ΟΧΙ (0% ικανοποίησης του κριτηρίου). Όταν η απάντηση είναι θετική σημειώνεται το πεδίο ΝΑΙ (100% ικανοποίησης του κριτηρίου). Τα πεδία 27 έως 37, εκτός από τις επιλογές ΟΧΙ/ΝΑΙ, είναι δυνατόν να βαθμονομούνται με ένα από τα υποδεικνυόμενα ενδιάμεσα ποσοστά (%) ικανοποίησης του κριτηρίου.

26. ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)		ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
27. ΜΕΓΑΛΟ ΥΨΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
28. ΕΧΕΙ ΑΥΞΗΘΕΙ Η ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ή ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΛΟΓΩ ΑΛΛΑΓΗΣ ΧΡΗΣΗΣ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
29. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΦΕΡΟΝΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
30. ΚΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΕΛΛΙΠΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ & ΚΑΚΟΤΕΧΝΙΩΝ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
31. ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
32. ΜΑΛΑΚΟΣ ΟΡΟΦΟΣ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
33. ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΟ ΣΤΡΟΦΗΣ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
34. ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
35. ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
36. ΘΕΤΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)
37. ΚΟΝΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ	ΟΧΙ <input type="checkbox"/> (0%)	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ <input type="checkbox"/> 25% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> 75% <input type="checkbox"/>	ΝΑΙ <input type="checkbox"/> (100%)

38. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ:

A. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:

ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ:

ΤΗΛ:

E-mail:

B. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:

ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ:

ΤΗΛ:

E-mail:

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

39. ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ:

Υπόμνημα:

: Προσυμπληρώνεται αυτόματα από την απογραφή αλλά είναι επεξεργάσιμο.

: Συμπληρώνεται αυτόματα.

: Συμπληρώνεται υποχρεωτικά από τους ελεγκτές μηχανικούς.

Εικόνα 3.1: Δελτίο Πρωτοβάθμιου Προσεισμικού Ελέγχου. (18)

Τα στοιχεία του Δελτίου Πρωτοβάθμιου Προσεισμικού Ελέγχου Κτιρίων κατανέμονται στις εξής ενότητες:

- ΕΝΟΤΗΤΑ Α: ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΚΤΙΡΙΟΥ
- ΕΝΟΤΗΤΑ Β: ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ
- ΕΝΟΤΗΤΑ Γ: ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
- ΕΝΟΤΗΤΑ Δ: ΔΟΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ
- ΕΝΟΤΗΤΑ Ε: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Η συμπλήρωση όλων των παραπάνω στοιχείων είναι υποχρεωτική. Οι τιμές των πεδίων 1 έως 10 της Ενότητας Α καθώς και το πεδίο 14 «ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ/ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ» της Ενότητας Β έχουν συμπληρωθεί αυτόματα (εκτός από τη «ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ φ, λ» του πεδίου 3 της Ενότητας Α που ενδέχεται να μην είναι προσυμπληρωμένη), όπως αυτά απογράφηκαν από τους αρμόδιους φορείς στην ιστοσελίδα του (ΟΑΣΠ) στην ψηφιακή πλατφόρμα «ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΙΑ ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ». Για όλα τα πεδία τα οποία έχουν προσυμπληρωθεί υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας επομένως οι ελεγκτές μηχανικοί μπορούν να τα τροποποιήσουν. Στο πεδίο 9 δεν υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης. Το πεδίο 23 «ΖΩΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΕΑΚ-2000» της Ενότητας Γ συμπληρώνεται αυτόματα από την πλατφόρμα με βάση το πεδίο 2 «ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ».

Ο Πρωτοβάθμιος Προσεισμικός Έλεγχος διενεργείται για το σύνολο του κτιρίου και όχι μόνο για έναν όροφο που μπορεί να στεγάζεται ένας φορέας, που εμπίπτει στις διατάξεις του άρθρου 265 «Προσεισμικός έλεγχος κτηρίων» του ν.5037/2023 (Α'78) και της υπ' αριθ. ΥΠ342/3-5-2023 ΚΥΑ «Πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος κτηρίων, στα οποία στεγάζονται φορείς της παρ. 1 του άρθρου 14 του ν.4270/2014, καθώς και κρίσιμες εν γένει λειτουργίες του ιδιωτικού τομέα» (Β'2943). Το δελτίο συμπληρώνεται για κάθε στατικά ανεξάρτητο κτίριο (18) .

Τα κτίρια κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες προτεραιότητας περαιτέρω ελέγχου Α, Β, Γ. Η κατηγοριοποίηση αυτή αποτυπώνει το επίπεδο σεισμικής διακινδύνευσης από «υψηλό» (Α) σε «χαμηλό» (Γ) (18). Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική καθώς ιεραρχεί τη διενέργεια του Δευτεροβάθμιου Προσεισμικού ελέγχου σε συγκεκριμένα κτίρια με σκοπό την μελλοντική τους προσεισμική ενίσχυση.

3.3 Δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος

Τα κτίρια τα οποία δεν έλαβαν ικανή βαθμολογία στον πρωτοβάθμιο προσεισμικό έλεγχο περνάνε από το δευτεροβάθμιο. Στο δευτεροβάθμιο προσεισμικό έλεγχο γίνεται καινούργια βαθμονόμηση των κτιρίων λαμβάνοντας υπόψη αυτήν την φορά περισσότερες λεπτομέρειες. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να περιλαμβάνει οπτική αξιολόγηση

και επιτόπου ελέγχους των δομικών υλικών, σχέδια αποτύπωσης γεωμετρίας και παθολογίας κ.α.

Ο δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος περιλαμβάνει τα εξής βήματα (19):

- Εξετάζεται η παθολογία του κτιρίου
- Πραγματοποίηση προσεγγιστικών υπολογισμών
- Σύνταξη τεύχους υπολογισμών και τεχνικής έκθεσης

Στην μεθοδολογία που ακολουθείται για την πραγματοποίηση του δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου εξετάζονται 13 στοιχεία τρωτότητας τα οποία επηρεάζουν την σεισμική συμπεριφορά ενός κτιρίου και στη συνέχεια συμπληρώνεται ο συνολικός πίνακας κριτηρίων. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας σε ομάδα κτιρίων έχει ως στόχο τον υπολογισμό του Δείκτη Προτεραιότητας Ελέγχου των κτιρίων (λ). Αυτός ο δείκτης καθορίζει την προτεραιότητα κάθε κτιρίου για περαιτέρω έλεγχο, συγκριτικά με τα υπόλοιπα κτίρια της ομάδας που υπόκεινται σε όμοιο έλεγχο. Αυτός ο δείκτης λαμβάνει υπόψη μόνο τα δομικά χαρακτηριστικά του κάθε κτιρίου αφήνοντας έξω παραμέτρους όπως η μνημειακή αξία του κτιρίου, η οικονομική αξία του κτιρίου κ.α.

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό του λ περιλαμβάνει τα εξής βήματα (19):

- Προσδιορισμός Σεισμικής Απαίτησης V_{req} ($V_{req,x}$, $V_{req,y}$)
- Προσδιορισμός Σεισμικής Αντίστασης V_R ($V_{R,x}$ – $V_{R,y}$)
- Προσδιορισμός Δείκτη Προτεραιότητας Ελέγχου

Στον προσδιορισμό της σεισμικής απαίτησης προσδιορίζεται σε κάθε κύρια διεύθυνση, με βάση το φάσμα σχεδιασμού του EC8-1 (EN 1998- 1:2004), το συνολικό μέγεθος των σεισμικών φορτίων του κτιρίου.

Ο τύπος που υπολογίζει τη σεισμική απαίτηση είναι ο εξής:

$$V_{req} = M * S_d(T)$$

όπου:

- M : η μάζα της κατασκευής από τα μόνιμα G και κινητά Q φορτία, για το συνδυασμό φόρτισης $G+\psi_2Q$.
- T : ιδιοπερίοδος της κατασκευής, εκτιμάται προσεγγιστικά κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ
- $S_d(T)$: Η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού

Ο προσδιορισμός της σεισμικής αντίστασης προσδιορίζεται σε όρους τέμνουσας βάσης στην κύρια διεύθυνση εφαρμόζοντας μια προσεγγιστική διαδικασία. Η σχέση με την οποία γίνεται ο προσδιορισμός της σεισμικής αντίστασης είναι η εξής (19):

$$V_R = \beta * V_{R0}$$

όπου:

V_{R0} : είναι η τέμνουσα αντοχής στη βάση του κτιρίου, η οποία προκύπτει μέσω προσεγγιστικών υπολογισμών

β : πρόκειται για έναν μειωτικό συντελεστή επιρροής των κριτηρίων (1) έως (13) που θα εξεταστούν στη συνέχεια στην τέμνουσα αντοχής στη βάση του κτιρίου, που λαμβάνει υπόψη τον συντελεστή βαρύτητας κάθε κριτηρίου (σ_i) και το βαθμό που έλαβε κάθε κριτήριο στο υπό εξέταση κτίριο (β_i). Ο παραπάνω συντελεστής υπολογίζεται ως εξής (19):

$$\beta = \sum \frac{\sigma_i * \beta_i}{5}$$

Ο μειωτικός αυτός συντελεστής αφορά τα εξής κριτήρια:

1. Βλάβες στατικής ανεπάρκειας
2. Οξείδωση οπλισμών
3. Μέγεθος ανηγμένου αξονικού φορτίου
4. Κανονικότητα κάτοψης
5. Κατανομή δυσκαμψίας σε κάτοψη- στρέψη
6. Κανονικότητα σε τομή/ όψη
7. Κατανομή δυσκαμψίας καθ' ύψος – Μαλακός όροφος
8. Κατανομή μάζας καθ' ύψος
9. Κοντά υποστυλώματα
10. Κατακόρυφες ασυνέχειες
11. Διαδρομή και μεταφορά δυνάμεων
12. Γειτονικά κτίρια
13. Κακοτεχνίες, τραυματισμοί

Πιο αναλυτικά:

1. Βλάβες στατικής ανεπάρκειας

Εδώ εξετάζονται οι βλάβες στα διάφορα δομικά στοιχεία όπως είναι: τα υποστυλώματα, τα τοιχώματα και οι κόμβοι. Πιο συγκεκριμένα εντοπίζονται οι ρηγματώσεις στα δομικά στοιχεία που προαναφέρθηκαν και βαθμονομούνται. Οι ρηγματώσεις σε δοκούς, πλάκες και τοιχοπληρώσεις, ρωγμές στο έδαφος κ.ά. καταγράφονται και αναφέρονται στην τεχνική έκθεση που συντάσσεται.

2. Οξείδωση οπλισμών

Σε αυτό το στάδιο στο κατά πόσο έχει παρουσιαστεί οξείδωση στους διαμήκεις οπλισμούς των κατακόρυφων στοιχείων. Η οξείδωση είναι ένα φαινόμενο το οποίο πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη καθώς μειώνεται η συνάφεια του οπλισμού με το σκυρόδεμα οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο στη μείωση της αντοχής της κατασκευής. Ενδείξεις που φανερώνουν την παρουσία οξείδωσης είναι η σκουριά στην επιφάνεια του σκυροδέματος, η ύπαρξη υγρασίας, η ύπαρξη φουσκωμένων σημείων κ.α. Για την προσδιορισμό του μεγέθους της διάβρωσης είναι απαραίτητη η αποκάλυψη του οπλισμού.

3. Μέγεθος ανηγμένου αξονικού φορτίου

Στο κριτήριο αυτό εξετάζεται κατά πόσο τα υποστυλώματα και τα τοιχώματα του ισογείου μπορούν να φέρουν ισχυρά θλιπτικά φορτία κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος.

4. Κανονικότητα κάτοψης

Όσο πιο απλό είναι το σχήμα της κάτοψης τόσο πιο καλή είναι η συμπεριφορά ενός κτιρίου στον σεισμό. Επομένως, κτίρια με πιο περίπλοκες κατόψεις όπως οι «Γ», «Τ» κ.α., καθώς και κτίρια στα οποία υπάρχουν μεγάλα κενά (π.χ. αίθρια) εξετάζονται σε αυτό το κριτήριο.

5. Κατανομή δυσκαμψίας σε κάτοψη- Στρέψη

Η μη συμμετρική κατανομή των κατακόρυφων στοιχείων τα οποία είναι υπεύθυνα για την πλευρική δυσκαμψία του φορέα καθώς και στην παραλαβή των σεισμικών φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε μία στρεπτική απόκριση του κτιρίου κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μη ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων καθώς μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των υποστυλωμάτων και των διαφραγμάτων.

6. Κανονικότητα σε τομή/ όψη

Εδώ γίνεται έλεγχος στις επιπτώσεις που ενδέχεται να έχουν στην αντισεισμική συμπεριφορά της κατασκευής η αλλαγή των διαστάσεων του φέροντος οργανισμού από όροφο σε όροφο (π.χ. ρετιρέ). Τέτοιες αλλαγές είναι υπεύθυνες για συγκεντρώσεις σεισμικής έντασης και επιρροή ανώτερων ιδιομορφών.

7. Κατανομή δυσκαμψίας καθ' ύψος –Μαλακός όροφος

Σε ένα κτίριο, η δυσκαμψία των στοιχείων τα οποία παραλαμβάνουν τα σεισμικά φορτία πρέπει να είναι σταθερή. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που αυτό δεν συμβαίνει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι περιπτώσεις στις οποίες έχουμε ειδικές απαιτήσεις χρήσεις ενός ορόφου (π.χ. pilotis). Εάν η μείωση της δυσκαμψίας είναι μεγάλη τότε έχουμε μεγάλη καταπόνηση σε αυτόν τον όροφο (ο οποίος αποκαλείται και "μαλακός" όροφος). Σε αυτό το κριτήριο γίνεται σύγκριση της δυσκαμψίας αυτών των ορόφων με τους γειτονικούς.

8. Κατανομή μάζας καθ' ύψος

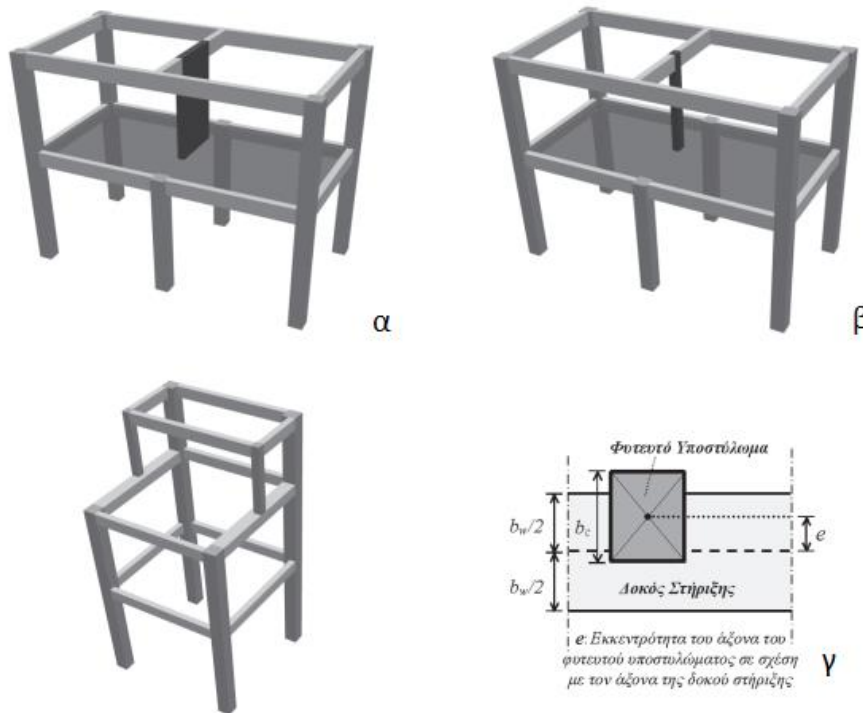
Σε αυτό το στάδιο ελέγχεται η μάζα καθ' ύψος του κτιρίου. Αυτός ο έλεγχος στην ουσία συγκρίνει τη διαφορά στη μάζα που έχουν οι γειτονικοί όροφοι μεταξύ τους. Όσο πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη είναι η μάζα ενός κτιρίου τόσο καλύτερη είναι και η απόκρισή του στα σεισμικά φορτία. Στην περίπτωση μεγάλης ανομοιομορφίας στην μάζα πρέπει να γίνει πρώτα έλεγχος στατικής επάρκειας.

9. Κοντά υποστυλώματα

Με τον όρο κοντό υποστύλωμα χαρακτηρίζεται το υποστύλωμα στο οποίο ο λόγος του καθαρού ελεύθερου ύψους προς την διάσταση της διατομής η οποία είναι παράλληλη στην διεύθυνση του σεισμού είναι μικρότερη του πέντε. Τα συγκεκριμένα υποστυλώματα είναι ευάλωτα σε ψαθυρή αστοχία.

10. Κατακόρυφες ασυνέχειες

Σε αυτό το κριτήριο γίνεται έλεγχος ο οποίος αφορά την ύπαρξη έντονων κατακόρυφων ασυνεχειών σε υποστυλώματα και τοιχώματα. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν η ύπαρξη φυτευτού τοιχώματος ή υποστυλώματος σε πλάκα, η ύπαρξη φυτευτού τοιχώματος σε δοκό, το φυτευτό υποστύλωμα το οποίο στηρίζεται έκκεντρα σε δοκό, η παρουσία φυτευτού υποστυλώματος στηριζόμενο σε δοκό με άμεση ή έμμεση στήριξη, τα κεκλιμένα υποστυλώματα ή τοιχώματα και η ύπαρξη εκκεντρότητας καθ' ύψος των υποστυλωμάτων και των τοιχωμάτων.



Εικόνα 3.2: α) Φυτευτό τοίχωμα σε πλάκα, β) Φυτευτό υποστύλωμα σε πλάκα, γ) Φυτευτό υποστύλωμα έκκεντρα στηριζόμενο σε δοκό. (19)

11. Διαδρομή και μεταφορά δυνάμεων

Με βάση αυτό το κριτήριο, γίνεται η αξιολόγηση επιπλέον παραμέτρων σε σχέση με αυτές που αναφέρει το κριτήριο «κατακόρυφες ασυνέχειες» οι οποίες επηρεάζουν τη διαδρομή και την μεταφορά των δυνάμεων στον φορέα. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους που μπορεί να εξετάζονται είναι η αλληλεπίδραση των τοιχωμάτων και του διαφράγματος, η ύπαρξη επιπέδων πλαισιακής λειτουργίας κ.α.

12. Γειτονικά κτίρια

Σε αυτό το κριτήριο εξετάζεται το ενδεχόμενο σύγκρουσης ενός κτιρίου με τα γειτονικά κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Τέτοιες επικίνδυνες περιπτώσεις αποτελούν γειτονικά κτίρια τα οποία δεν έχουν το ίδιο ύψος και αυτό διότι η τελευταία πλάκα ενός χαμηλότερου σε ύψος αλλά αρκετά ογκώδους κτιρίου μπορεί να συγκρουστεί με το ψηλότερο κτίριο και να προκαλέσει βλάβες σε υποστυλώματα ή ακόμα και κατάρρευση. Σε αυτό το κριτήριο γίνεται έλεγχος της επάρκειας του αρμού ανάμεσα σε γειτονικά κτίρια, η πιθανότητα εμβολισμού των υποστυλωμάτων κ.α.

13. Κακοτεχνίες, τραυματισμοί

Σε αυτό το στάδιο γίνεται έλεγχος στο κατά πόσο έχει εφαρμοστεί η μελέτη, η ορθή εφαρμογή των διάφορων κανόνων και οδηγιών καθώς και η γενικότερη κατάσταση του κτιρίου.

Όσον αφορά τον δείκτη προτεραιότητας ελέγχου λ της κατασκευής αυτός υπολογίζεται από:

$$\lambda_x = \frac{V_{req,x} + 0,30 * V_{req,y}}{V_{R,x} + 0,30 * V_{R,y}} \text{ για τη } x \text{ διεύθυνση και}$$

$$\lambda_y = \frac{V_{req,y} + 0,30 * V_{req,x}}{V_{R,y} + 0,30 * V_{R,x}} \text{ για την } y \text{ διεύθυνση}$$

Ο τελικός δείκτης προσδιορίζεται από την σχέση: $\lambda = 100 * \max(\lambda_x, \lambda_y)$

3.3.1 Κατάταξη κτιρίου σε σεισμική κατηγορία δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου

Η κατάταξη ενός κτιρίου σε σεισμική κατηγορία (K) δευτεροβαθμίου προσεισμικού ελέγχου γίνεται με βάση την αποτίμηση που μπορεί να έχει ένα κτίριο για στάθμη επιτελεστικότητας B («Σημαντικές Βλάβες» κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ). Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται με βάση τον συντελεστή δ ο οποίος υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\delta = \min \left\{ \frac{1}{\lambda_x}, \frac{1}{\lambda_y} \right\}$$

Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3-1: Σεισμικές κατηγορίες κτιρίων. (19)

Περίοδος Επαναφοράς (έτη)	Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	δ	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ (Κ)
2475	2%	$1.80 \leq \delta$	K0
975	5%	$1.30 \leq \delta < 1.80$	K1 ⁺
475	10%	$1.00 \leq \delta < 1.30$	K1
225	20%	$0.75 \leq \delta < 1.00$	K2 ⁺
135	30%	$0.60 \leq \delta < 0.75$	K2
70	50%	$0.45 \leq \delta < 0.60$	K3 ⁺
40	70%	$0.35 \leq \delta < 0.45$	K3
20	90%	$0.25 \leq \delta < 0.35$	K4 ⁺
<20	>90%	$\delta < 0.25$	K4

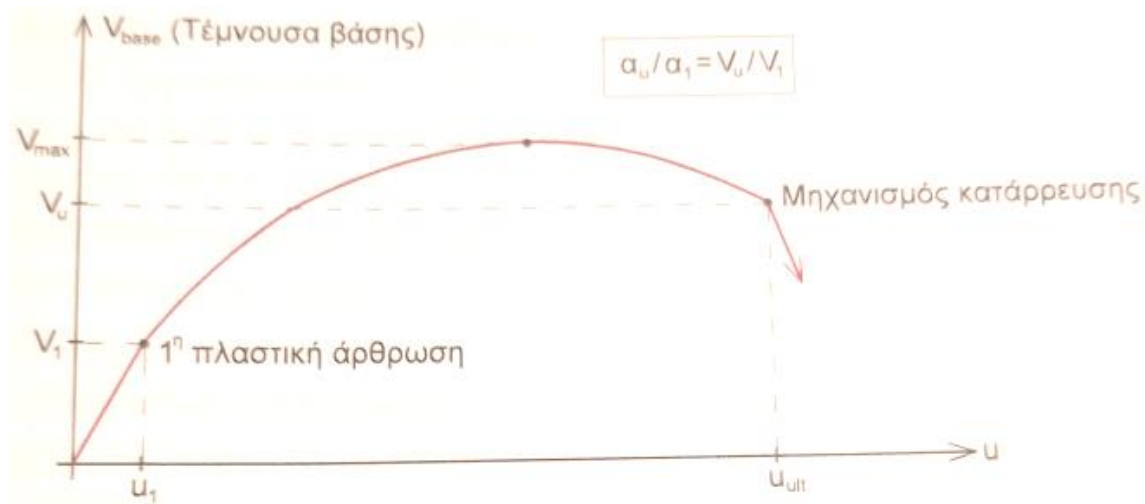
3.4 Τριτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος

Ο τριτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος επικεντρώνεται ξεχωριστά σε κάθε κτίριο και πραγματοποιείται με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το δευτεροβάθμιο προσεισμικό έλεγχο. Σε αυτόν τον έλεγχο γίνεται η πλήρης αποτίμηση της ικανότητας ενός κτιρίου να φέρει τα σεισμικά φορτία. Αυτή η αποτίμηση πραγματοποιείται σύμφωνα με τις μεθόδους της σεισμικής μηχανικής βασιζόμενη στα αντίστοιχα κανονιστικά εγχειρίδια (EC8 - 3 / ΚΑΝΕΠΕ- 3η Αναθεώρηση ΦΕΚ 3197, Τεύχος Β/21-06-2022/ ΚΑΔΕΤ Σχέδιο - Σεπτέμβριος 2022) (20). Από τα αποτελέσματα της μελέτης προκύπτει αν το κτίριο δύναται ή όχι να φέρει επαρκώς τα σεισμικά φορτία, ούτως ώστε σε περίπτωση αδυναμίας να εφαρμοστούν μέτρα ενίσχυσης του φέροντα οργανισμού.

Στον τριτοβάθμιο προσεισμικό έλεγχο πραγματοποιείται η «στατική υπερωθητική ανάλυση» (20). Η «στατική υπερωθητική ανάλυση» είναι μία μη γραμμική ανάλυση για μονότονη και σταδιακά αυξανόμενη στατική φόρτιση μέχρι την τελική κατάρρευση του κτιρίου το οποίο εξετάζεται. Οι θεμελιώδεις έννοιες στις οποίες βασίζεται η παραπάνω ανάλυση είναι η απαίτηση, η ικανότητα και η συμπεριφορά. Με άλλα λόγια θα πρέπει η κατασκευή να έχει την ικανότητα να παρουσιάζει αντίσταση στην απαίτηση που επιβάλλεται από τη σεισμική διέγερση έτσι ώστε η συμπεριφορά της να παρουσιάζει συμβατότητα με τους στόχους που έχουν τεθεί για τον ανασχεδιασμό της.

Όπως προαναφέρθηκε, οι θεμελιώδεις έννοιες της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης είναι η ικανότητα, η απαίτηση και η συμπεριφορά. Η συνολική ικανότητα μίας

κατασκευής προκύπτει από τα επιμέρους στοιχεία που την αποτελούν. Για τον προσδιορισμό της ικανότητας είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της υπερωθητικής καμπύλης και αποτελεί τη γραφική παράσταση της σχέσης που συνδέει την τέμνουσα βάσης μιας κατασκευής με την μετακίνηση σε ένα προκαθορισμένο σημείο το οποίο συνήθως είναι η κορυφή της. Με τον όρο απαίτηση μίας κατασκευής σε μία συγκεκριμένη σεισμική διέγερση εννοείται η εκτίμηση της μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Τέλος, με τον έλεγχο της συμπεριφοράς μίας κατασκευής εξασφαλίζεται ότι τόσο τα φέροντα όσο και τα μη φέροντα στοιχεία μίας κατασκευής δεν έχουν παρουσιάσει βλάβες πέρα από τα επιτρεπτά όρια.



Εικόνα 3.3: Παράδειγμα υπερωθητικής καμπύλης. (20)

Η υπερωθητική ανάλυση παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα καθώς και κάποια πλεονεκτήματα. Κάποια από τα μειονεκτήματά της είναι τα εξής (20):

- Στην ανελαστική ανάλυση γίνεται η παραδοχή ότι η απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σχετίζεται με την απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Αυτή η παραδοχή δεν έχει καθολική ισχύ εκτός από κάποια συστήματα στα οποία η θεμελιώδης ιδιομορφή είναι η κυρίαρχη στην απόκριση. Επίσης λόγω της πλαστικοποίησης διαφόρων σημείων ενός φορέα η θεμελιώδης ιδιομορφή μεταβάλλεται συνεχώς.
- Η υπερωθητική ανάλυση λαμβάνει υπόψη μόνο την πρώτη ιδιομορφή της ταλάντωσης για την κατανομή σεισμικών φορτίων στατικού τύπου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα εμφάνισης σημαντικών αποκλίσεων.
- Η υπερωθητική ανάλυση έχει ως βάση τη θεώρηση επίπεδων φορέων και η εφαρμογή της σε χωρικά συστήματα αποτελεί αντικείμενο έρευνας.
- Στην υπερωθητική ανάλυση δεν αντιμετωπίζεται το φαινόμενο της προοδευτικής μείωσης της δυσκαμψίας λόγω της ανακυκλιζόμενης φύσης του σεισμού ενώ ο

στατικός χαρακτήρας της ανάλυσης λαμβάνει υπόψη μόνο την απορρόφηση ενέργειας από την κατασκευή λόγω των παραμορφώσεων και όχι λόγω της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής.

- Λαμβάνεται υπόψη μόνο η οριζόντια συνιστώσα ενώ η κατακόρυφη, η οποία μπορεί σε ειδικές περιπτώσεις να έχει σημαντική επιρροή, αμελείται.
- Στην υπερωθητική ανάλυση διαχωρίζεται η ικανότητα (στάδιο στο οποίο γίνεται ο σχεδιασμός της υπερωθητικής καμπύλης) από την απαίτηση (στάδιο στο οποίο πραγματοποιείται ο υπολογισμός της μετακίνησης που έχει τεθεί σαν στόχος η οποία επιβάλλεται από το σεισμό) κάτι που δεν είναι ακριβές αφού ικανότητα και απαίτηση σχετίζονται.

Ωστόσο, παρά τα παραπάνω μειονεκτήματα που παρουσιάστηκαν, η υπερωθητική ανάλυση παρουσιάζει και μία σειρά από πλεονεκτήματα κάποια από τα οποία είναι τα εξής (20):

- Προσφέρει μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση κατανομής της έντασης σε μία κατασκευή, αφού σε αντίθεση με τις ελαστικές μεθόδους ανάλυσης λαμβάνει υπόψη και την ανελαστική περιοχή.
- Κάνει εκτίμηση των απαιτούμενων παραμορφώσεων των καμπτικών στοιχείων.
- Εξετάζει τη συνολική μεταβολή του συστήματος που προκαλείται από την μείωση της αντοχής αλλά και της αστοχίας μεμονωμένων δομικών στοιχείων.
- Βοηθά στον εντοπισμό των κρίσιμων περιοχών των κατασκευών στις οποίες αναμένεται αυξημένη απαίτηση για την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων.
- Αποτελεί ένα εργαλείο το οποίο έχει την ικανότητα να βοηθά στον εντοπισμό των ασθενών ορόφων ή τμημάτων της κατασκευής.
- Έχει τη δυνατότητα ελέγχου του επιπέδου των βλαβών σε μη φέροντα στοιχεία αλλά και στο κατά πόσο σοβαρή ή όχι είναι η επιρροή των φαινομένων P-δ.
- Ελέγχει την επάρκεια των φερόντων δομικών στοιχείων για την ασφαλή μεταφορά των φορτίων τους στη θεμελίωση.

3.4.1 Βήματα υπερωθητικής ανάλυσης

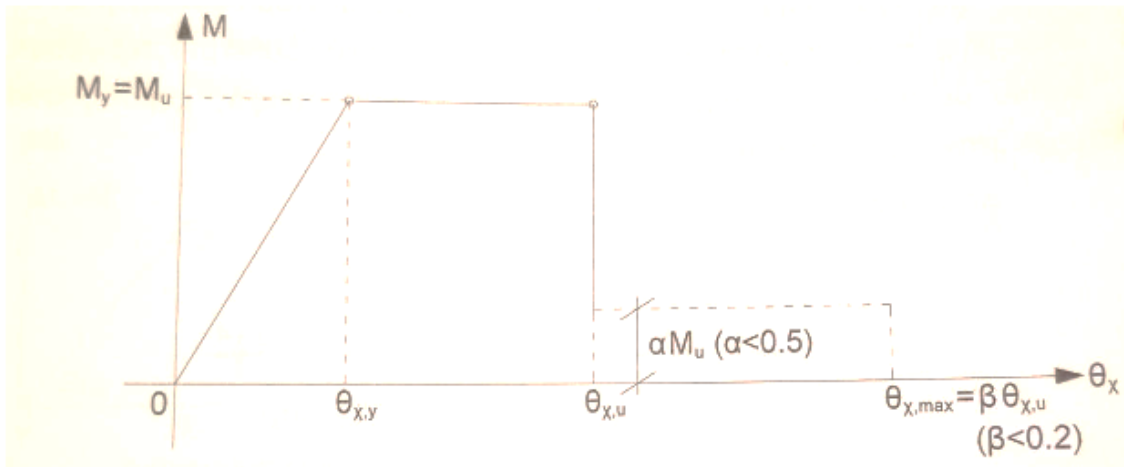
Τα βήματα που περιλαμβάνει η υπερωθητική ανάλυση είναι τα εξής (20):

1. **Ελαστική και αδρανειακή διακριτοποίηση:** Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται η διαμόρφωση του χωρικού προσομοιώματος της κατασκευής, ο υπολογισμός των φορτίων του και των μαζών του. Επίσης θα πρέπει να προσομοιώνεται και η θεμελίωση και η ενδοσιμότητα του εδάφους.

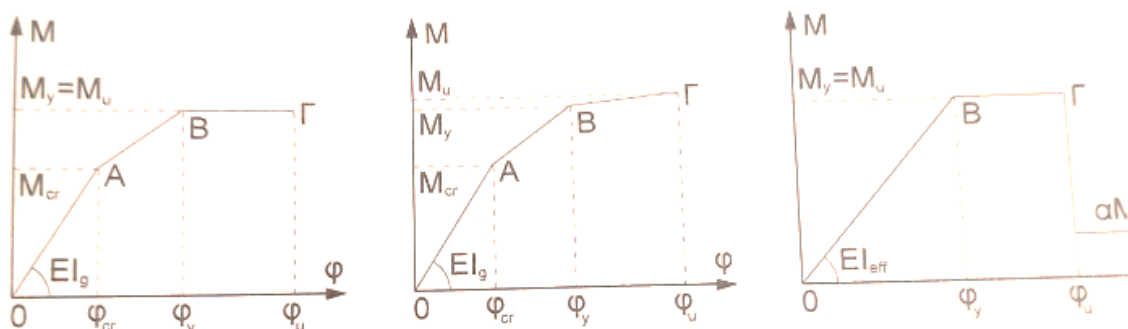
2. **Προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων της κατασκευής:** Σε αυτό το βήμα μελετάται η απόδοση του προσομοιώματος όταν οι κρίσιμες διατομές έχουν ξεπεράσει τη διαρροή. Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται ο σχεδιασμός των διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων ή ροπών – γωνιών στροφής χορδής των πλαστικών αρθρώσεων δομικών στοιχείων. Επίσης πραγματοποιείται και ο υπολογισμός της ενεργού δυσκαμψίας των δομικών στοιχείων του οπλισμένου σκυροδέματος. Με τον όρο «ενεργός δυσκαμψία» εννοείται η δυσκαμψία η οποία απαιτείται να δοθεί στα δομικά στοιχεία της κατασκευής έτσι ώστε να ξεκινήσει η υπερωθητική ανάλυση. Η ενεργός δυσκαμψία ορίζεται σύμφωνα με την παράγραφο 7.2.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. από τη σχέση :

$$K_{\text{eff}} = (M_y * L_s) / (3\theta_y)$$

Όπου, M_y είναι η ροπή διαρροής της διατομής και θ_y η στροφή της στη διαρροή. Αξίζει να σημειωθεί πως ο όρος L_s εξαρτάται από το είδος του μέλους και λαμβάνεται ως το μισό του ανοίγματος για τις δοκούς και το μισό του καθαρού ύψους για τα υποστυλώματα.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροπής- στροφής χορδής. (20).



Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικά διαγράμματα ροπών- καμπυλοτήτων. (20)

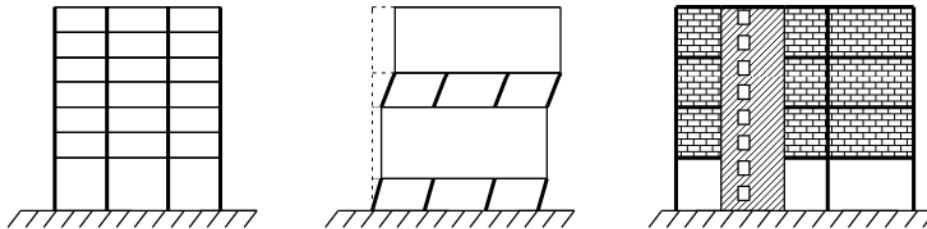
3. **Επιλογή της καθ' ύψος κατανομής των οριζοντίων στατικών δυνάμεων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις της στατικής διέγερσης:** Εδώ γίνεται η επιλογή της καθ' ύψος κατανομής των φορτίων που θα χρησιμοποιηθούν στην επαυξητική διαδικασία. Οι καθ' ύψος κατανομές των φορτίων είναι η ομοιόμορφη και η ιδιομορφική. Η ομοιόμορφη βασίζεται σε δυνάμεις οι οποίες είναι ανάλογες με την μάζα ενώ η ιδιομορφική είναι μία κατανομή η οποία είναι ανάλογη με οριζόντιες δυνάμεις οι οποίες έχουν τριγωνική κατανομή καθ' ύψος του κτιρίου.
4. **Προοδευτική εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων και σγείαση της υπερωθητικής καμπύλης:** Σε αυτό το βήμα γίνεται η κατασκευή της υπερωθητικής καμπύλης δηλαδή του διαγράμματος της τέμνουσας βάσης και της μετακίνησης σε επιλεγμένο σημείο. Το σημείο όπου επιλέγεται να μελετηθεί η μετακίνηση ονομάζεται κόμβος ελέγχου και συνήθως επιλέγεται το κέντρο μάζας της ανώτερης στάθμης του κτιρίου. Η καμπύλη ικανότητας αποτελεί διάγραμμα το οποίο εκφράζει την τέμνουσα βάσης (αντίσταση του κτιρίου) έναντι της μετακίνησης του κόμβου ελέγχου. Αξίζει να σημειωθεί πως στην καμπύλη ικανότητας μπορούν να ορισθούν τα όρια των σταθμών επιτελεστικότητας και να εξαχθούν συμπεράσματα για την επάρκεια ή μη της κατασκευής για κάθε στάθμη.
5. **Προσδιορισμός της απαίτησης και υπολογισμός της μετακίνησης στόχου:** Σε αυτό το στάδιο τίθεται ο προσδιορισμός της απαίτησης που θέτει ο σεισμός με βάση τον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός. Αυτή η απαίτηση υπολογίζεται με τη μετακίνηση του σημείου ελέγχου το οποίο έχει επιλεγεί για τον σχεδιασμό της υπερωθητικής καμπύλης. Για τον παραπάνω υπολογισμό υπάρχουν διάφορες μέθοδοι όπως αναφέρονται στους EN-1998-1, ΚΑΝ.ΕΠΕ κ.α.
6. **Αποτίμηση της συμπεριφοράς της κατασκευής:** Σε αυτό το βήμα γίνεται ο υπολογισμός των μεγεθών απόκρισης για την αποτίμηση καθώς και ο έλεγχος επιτελεστικότητας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ο απαιτούμενος έλεγχος για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα τις δύο οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής διέγερσης και τα κατακόρυφα φορτία του κτιρίου. Επίσης σε αυτό το βήμα καθορίζεται και η συμπεριφορά του κτιρίου με τις στάθμες επιτελεστικότητας οι οποίες αποτελούν στην ουσία οριακές καταστάσεις για τις οποίες πρέπει να διερευνήσουμε αν τις υπερβαίνει η κατασκευή ή όχι.

4 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

4.1 Παθολογία κατασκευών

Η δημιουργία και η ύπαρξη βλαβών σε κατασκευές αποτελούν αναπόφευκτο γεγονός ακόμα και αν ο σχεδιασμός έχει γίνει με τους νεότερους Αντισεισμικούς Κανονισμούς. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη φιλοσοφία που διέπει τους Κανονισμούς, η οποία ορίζει ότι κατά τη δράση του σεισμού σχεδιασμού θα δημιουργηθούν βλάβες έως ορισμένα επιτρεπτά όρια τα οποία θα καθιστούν τις βλάβες επιδιορθώσιμες και μη σημαντικές ως προς τη συνολική φέρουσα ικανότητα του κτιρίου (Ο.Α.Σ.Π, 1999). Πιο συγκεκριμένα, αξίζει να σημειωθεί πως αρκετά μεγάλο ποσοστό των κατασκευών στον ελληνικό χώρο έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με παλαιότερους κανονισμούς και φιλοσοφίες. Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα κατασκευών όπου εμφανίζουν παθολογίες ως προς τη συμπεριφορά τους έναντι σεισμικής φόρτισης.

- Κτίρια με μη ομοιόμορφη καθ' ύψος κατανομή της δυσκαμψίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα κτίρια με παρουσία Pilotis, τα οποία είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε σεισμική καταπόνηση και σε εμφάνιση “μαλακού ορόφου”. Αυτό οφείλεται στην ανομοιομορφία της δυσκαμψίας καθώς στο ισόγειο απουσιάζουν τοιχοπληρώσεις, οι οποίες συνεισφέρουν αρκετά στην δυσκαμψία παρόλο που τις αγνοούμε πολλές φορές όσον αφορά την αντοχή τους.



Εικόνα 4.1: Δημιουργία μηχανισμού μαλακού ορόφου λόγω ανομοιομορφίας δυσκαμψίας.

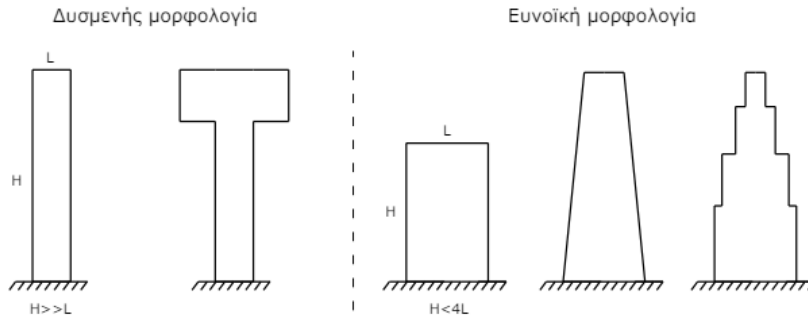


Εικόνα 4.2: Δημιουργία μαλακού ορόφου σε κτίριο με παρουσία pilotis.

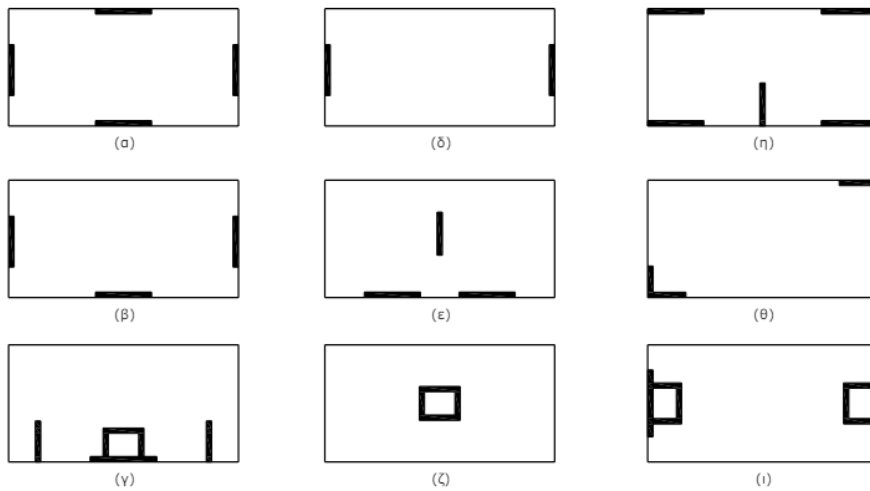


Εικόνα 4.3: Κατάρρευση κτιρίου έπειτα από το σεισμό του 1999 λόγω ανάπτυξης μαλακού ορόφου.

- Κτίρια με ασύμμετρες κατόψεις δημιουργούν έντονες εκκεντρότητες με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη στρεπτική καταπόνηση του κτιρίου, καθώς διαφέρει σημαντικά το κέντρο μάζας με το κέντρο δυσκαμψίας του κτιρίου. Επίσης, τα τοιχώματα συνίσταται να τοποθετούνται συμμετρικά καθώς προσθέτουν μεγάλη δυσκαμψία και η ασύμμετρη τοποθέτησή τους μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία εκκεντρότητας.

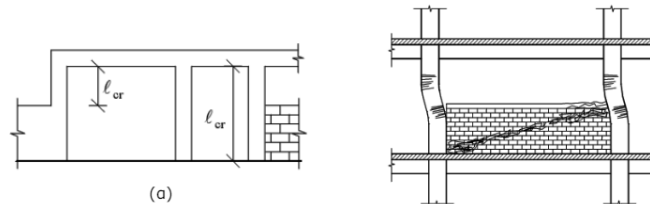


Εικόνα 4.4: Περιπτώσεις ευμενών και δυσμενών καθ' ύψος κατανομών μάζας (21).



Εικόνα 4.5: Κατανομή τοιχωμάτων στην κάτοψη κτιρίων (21).

- Η ύπαρξη κοντών υποστυλωμάτων αποτελεί μια από τις συνηθέστερες περιπτώσεις αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το φαινόμενο συναντάται όταν η τοιχοποιία δεν είναι κατασκευασμένη σε ολόκληρο το ύψος του υποστυλώματος, επομένως δημιουργείται ένα μικρό μήκος υποστυλώματος το οποίο δρα ανεξάρτητα και αστοχεί με διατμητικό (ψαθυρό) τρόπο. Κοντά υποστυλώματα συναντώνται κυρίως σε περιμετρικά κατακόρυφα στοιχεία ημιπογείων ή σε βιομηχανικούς χώρους για τη δημιουργία φεγγιτών.



Εικόνα 4.6: Δημιουργία κοντών υποστυλωμάτων λόγω επιρροής της τοιχοπλήρωσης σε μερικό ποσοστό του ύψους του υποστυλώματος (22).

- Μια ακόμα περίπτωση που οδηγεί σε αστοχία είναι αυτή των “φυτευτών υποστυλωμάτων”. Πιο συγκεκριμένα, κάθε υποστύλωμα θα πρέπει να συνεχίζει μέχρι τη θεμελίωση. Αντίθετα, τα φυτευτά υποστυλώματα συνήθως καταλήγουν σε μια δοκό η οποία δέχεται στο συγκεκριμένο σημείο έντονο συγκεντρωμένο φορτίο και αστοχεί ψαθυρά.
- Η μη τήρηση του Ικανοτικού Σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αστοχίες στους κόμβους Δοκών-Υποστυλωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει ως ικανοτικό σχεδιασμό την έννοια “Ισχυρά Υποστυλώματα - Ασθενή Ζυγώματα”, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\Sigma M_{RC} \geq 1,3 \Sigma M_{RB},$$

Όπου, ΣM_{RC} ονομάζεται το άθροισμα της ροπής αντοχής των υποστυλωμάτων σε έναν κόμβο και ΣM_{RB} είναι το άθροισμα της ροπής αντοχής των δοκών που συντρέχουν σε έναν κόμβο. Με άλλα λόγια, τα υποστυλώματα θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον 1,3 φορές περισσότερη ροπή αντοχής από τις δοκούς ώστε η εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων να προηγηθεί στα δοκάρια.

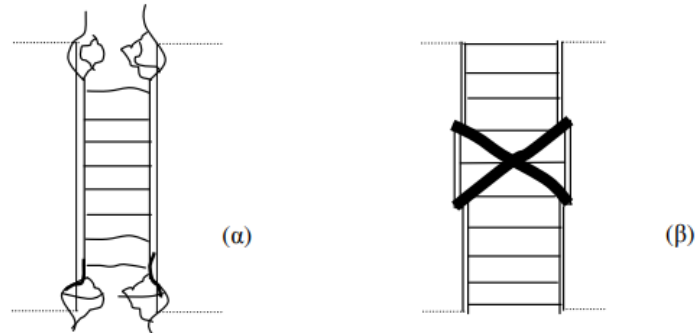
4.2 Βλάβες σε υποστυλώματα

Οι βλάβες συνήθως κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το δομικό στοιχείο στο οποίο λαμβάνουν χώρα. Αρχικά θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των βλαβών που δημιουργούνται στα υποστυλώματα αλλά και γενικότερα στα κατακόρυφα στοιχεία, οι οποίες αποτελούν και τις δυσμενέστερες περιπτώσεις.

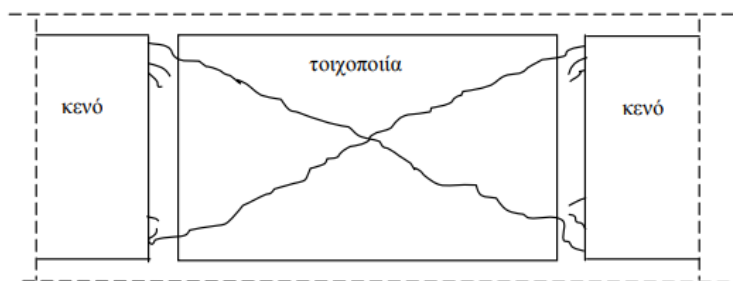
Οι βλάβες σε κατακόρυφα δομικά στοιχεία (υποστυλώματα, τοιχώματα) είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς αποτελούν ενδείξεις και παραμέτρους για την ανάδειξη του κτιρίου ως κατάλληλου ή μη για χρήση έπειτα από μια σεισμική καταπόνηση. Οι βλάβες σε κατακόρυφα δομικά στοιχεία χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

- **Καμπτικές βλάβες:** Η συγκεκριμένη κατηγορία βλαβών παρουσιάζεται συνήθως στα άκρα των δομικών στοιχείων καθώς εκεί παρατηρείται η κρισιμότερη τιμή καμπτικής ροπής. Σε περιπτώσεις μικρών θλιπτικά αξονικών φορτίων, οι βλάβες παρατηρούνται μέσω οριζοντίων ρωγμών ή αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις ισχυρής αξονικά θλιπτικής καταπόνησης, η καμπτική βλάβη αποκτά πιο ψαθυρό χαρακτήρα καθώς υπάρχει συνύπαρξη διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών με μεγάλα αξονικά φορτία. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται σύνθλιψη της θλιβόμενης ζώνης και εγκάρσια διόγκωση της διατομής ή λυγισμός των διαμήκων ράβδων. Οι συγκεκριμένες μορφές αστοχίας προκύπτουν σε κόμβους όπου δεν ικανοποιείται ο Ικανοτικός

- Σχεδιασμός ή σε διατομές μικρότερες του απαιτούμενου ή με ανεπαρκή περίσφιγξη από εγκάρσιο οπλισμό.
- **Διατμητικές βλάβες:** Οι βλάβες διατμητικής φύσεως συναντώνται σε διάφορες περιοχές του μέλους ειδικά όταν ο λόγος διάτμησης είναι μικρός. Τα κοντά υποστρώματα αποτελούν ένα συχνό παράδειγμα διατμητικής βλάβης όπου παρατηρείται ψαθυρή αστοχία με ρωγμές υπό 45 μοίρες ή χιαστί μορφής λόγω της ανακυκλιζόμενης σεισμικής φόρτισης.



Εικόνα 4.7: Βλάβες υποστρωμάτων λόγω ροπής και εναλλασσόμενης τάσης (αριστερά) και σε ισχυρή τέμνουσα και θλιπτική αξονική δύναμη (δεξιά) (21).



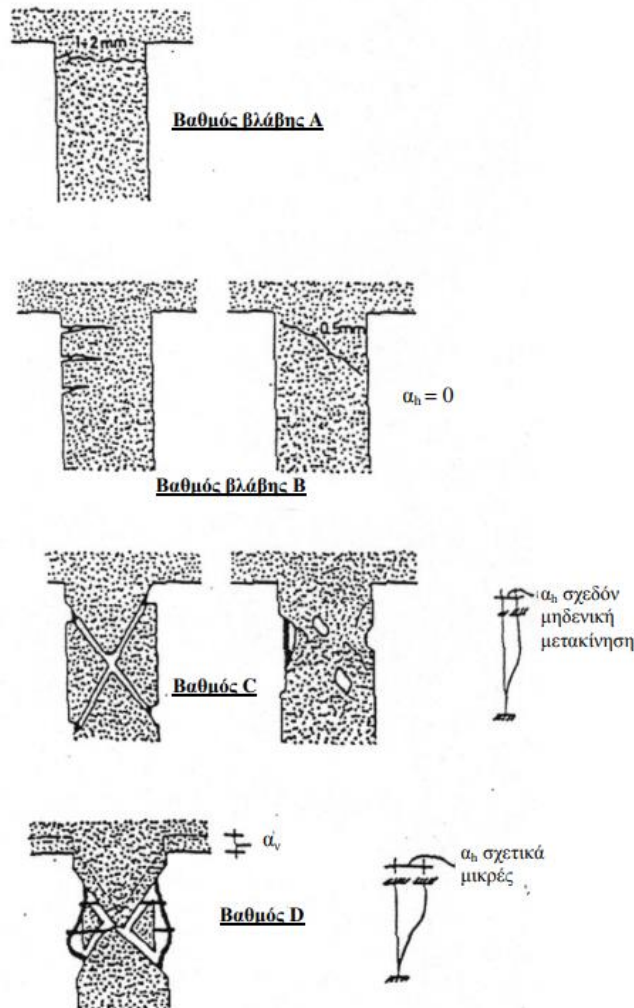
Εικόνα 4.8: Βλάβη υποστρωμάτων λόγω μονόπλευρων τοιχοπληρώσεων (21).

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (Μέρος 1.4 , 1995), οι βλάβες σε κατακόρυφα δομικά μέλη κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα τη σημαντικότητα και το είδος τους ώστε να είναι εφικτό για τον μηχανικό να εντοπίσει την κατάλληλη μέθοδο ενίσχυσης του φορέα.

- **Βαθμός Βλάβης Α:** Ρωγμές μικρού μεγέθους (τυπικά, εύρους 1 - 2 χιλιοστά) όπου έχει αποδειχθεί πως δεν οφείλονται σε καμπτική ανεπάρκεια της διατομής αλλά σε τοπικές αστοχίες όπως λανθασμένη αγκύρωση οπλισμών ή έλλειψη αρμών διακοπής εργασίας.
- **Βαθμός βλάβης Β:** Καμπτικές ρωγμές σημαντικού μεγέθους με ταυτόχρονη ύπαρξη ορισμένων διατμητικών ρωγμών μικρού μεγέθους (0,5mm), χωρίς ύπαρξη παραμενουσών μετακινήσεων.

- Βαθμός βλάβης C: Λοξές ρωγμές διατμητικού τύπου και σύνθλιψη σκυροδέματος σε τοπική κλίμακα, χωρίς παρουσία παραμενουσών μετακινήσεων.
- Βαθμός Βλάβης D: Εκτεταμένη σύνθλιψη σκυροδέματος και λυγισμός διαμήκων ράβδων με ή χωρίς θραύση των συνδετήρων χωρίς όμως κατάρρευση του δομικού μέλους. Η ύπαρξη παραμενουσών μετατοπίσεων υπάρχει σε μικρό βαθμό.
- Βαθμός βλάβης E: Ολοκληρωτική αστοχία και κατάρρευση του υποστυλώματος.

Αξίζει να σημειωθεί πως για ύπαρξη μεγάλων παραμενουσών μετακινήσεων, υιοθετείται μια δυσμενέστερη κατηγορία από αυτήν που προκύπτει από τον οπτικό έλεγχο. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές βλάβης και η κατάταξή τους σύμφωνα με τα προηγούμενα που αναφέρθηκαν.



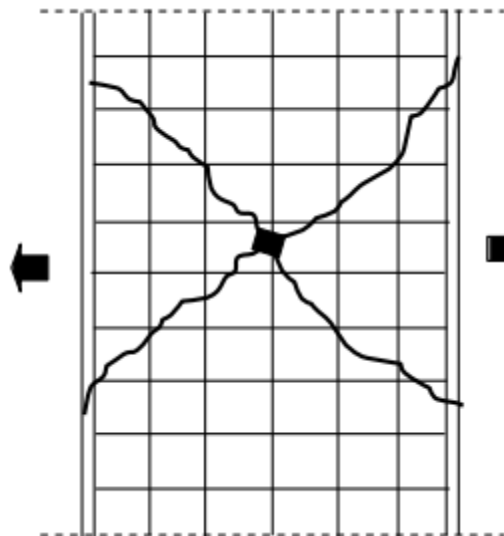
Εικόνα 4.9: Κατηγοριοποίηση βαθμών βλάβης σε κατακόρυφα στοιχεία (18).



Εικόνα 4.10: Διατμητική αστοχία λόγω ύπαρξης κοντών υποστυλωμάτων (22).

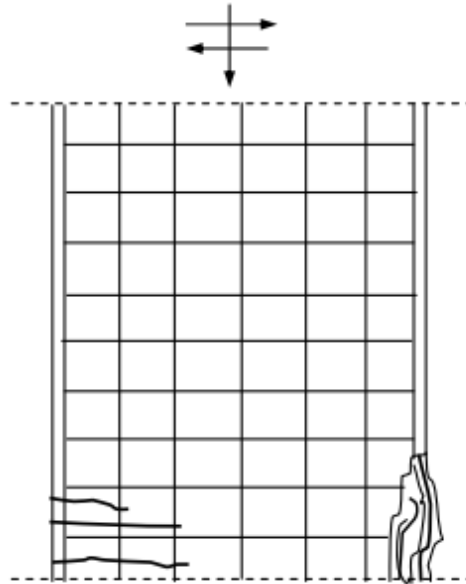
4.3 Βλάβες σε τοιχώματα

Τα τοιχώματα αποτελούν κατακόρυφα στοιχεία τα οποία λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας τους, δέχονται το μεγαλύτερο ποσοστό σεισμικής έντασης. Οι βλάβες είναι και εδώ διατμητικού ή καμπτικού τύπου, με σημαντικότερες και δυσμενέστερες τις αστοχίες λόγω διάτμησης, οι οποίες εμφανίζονται με χιαστί λοξές ρωγμές λόγω της εναλλασσόμενης φοράς του σεισμού. Η ψαθυρή αυτή μορφή αστοχίας κρίνεται ως εξαιρετικά κρίσιμη καθώς τα επιμέρους τμήματα των τοιχωμάτων ολισθαίνουν μεταξύ τους και αδυνατούν να παραλάβουν τα κατακόρυφα φορτία. Ο αντισεισμικός κανονισμός επιβάλλει τη δημιουργία ακραίων ενισχυμένων περιοχών ή “κρυφών υποστυλωμάτων”, τα οποία αναλαμβάνουν τη μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων προς τη θεμελίωση και μειώνουν αυτού του τύπου τις αστοχίες.



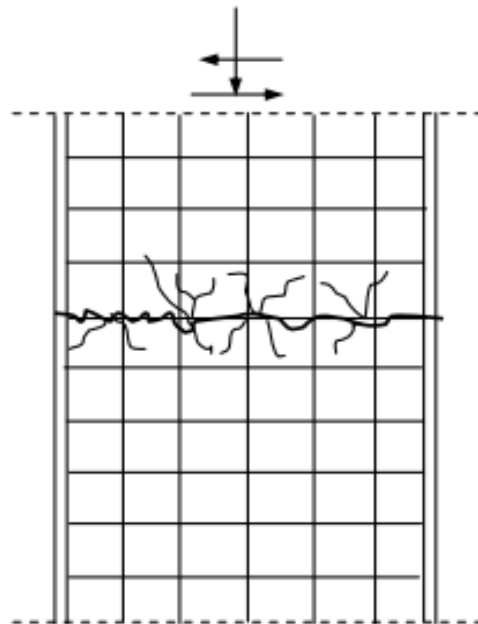
Εικόνα 4.11: Διατμητική βλάβη σε τοίχωμα (21).

Η αστοχία λόγω βλαβών καμπτικού τύπου είναι πιο σπάνιες σε τοιχώματα και εντοπίζονται στη βάση τους κυρίως όταν έχει σχεδιαστεί ισχυρή θεμελίωση.



Εικόνα 4.12: Καμπτική βλάβη τοιχωμάτων (22).

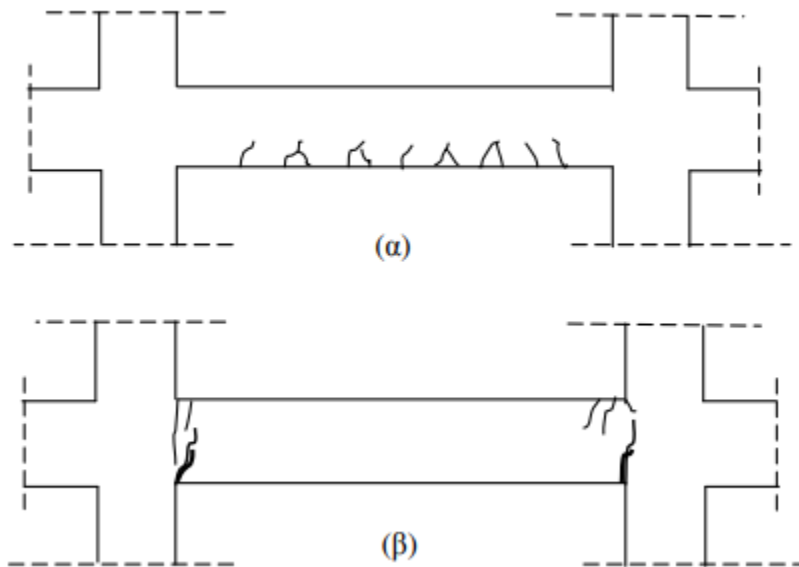
Η ρηγμάτωση αρμών διακοπής εργασίας αποτελεί αρκετά συχνό περιστατικό βλάβης σε τοιχώματα, ειδικά σε περιπτώσεις όπου δεν έχει γίνει κατάλληλη προεργασία του παλαιού σκυροδέματος ή έχει εφαρμοστεί ανεπαρκής αγκύρωση. Τέτοιου τύπου αστοχίες δεν επηρεάζουν τη συνολική δυσκαμψία του φορέα αλλά ούτε την ικανότητα του μέλους να παραλάβει τα κατακόρυφα φορτία και να τα μεταφέρει στη θεμελίωση.



Εικόνα 4.13: Βλάβη τοιχώματος στην περιοχή του αρμού διακοπής εργασίας (22).

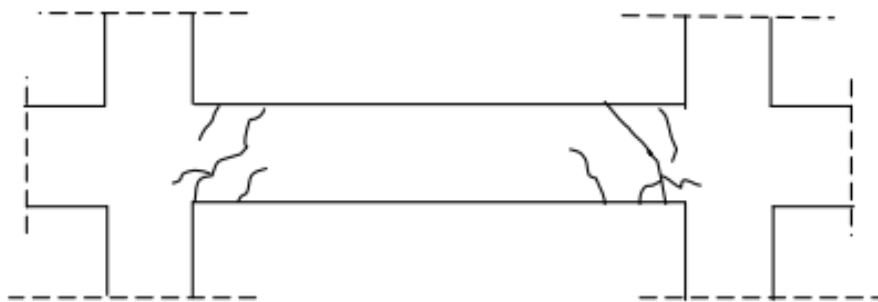
4.4 Βλάβες σε οριζόντια δομικά μέλη (δοκοί)

Οι βλάβες και γενικότερα η αστοχία σε δομικά στοιχεία δοκών αποτελούν συνήθεις περιπτώσεις είτε λόγω σεισμικής φόρτισης είτε λόγω των κατακόρυφων φορτίων. Σύμφωνα με το σύγχρονο αντισεισμικό σχεδιασμό είναι επιθυμητό να προηγούνται βλάβες σε δοκούς από τα υποστυλώματα καθώς αυτό δεν αποτελεί τόσο άμεση απειλή για τη φέρουσα ικανότητα του φορέα στο σύνολό του. Η εμφάνιση καμπτικών ρωγμών συναντάται τόσο στο άνοιγμα των δοκών (κάτω πέλμα), όσο και στις στηρίξεις.

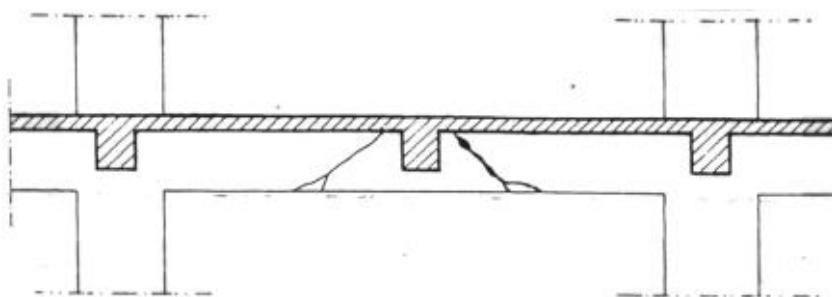


Εικόνα 4.14: Καμπτικές ρωγμές δοκού στην περιοχή του ανοίγματος (α) και στην περιοχή της στήριξης (β) (21).

Η διατμητική αστοχία δοκών εντοπίζεται κυρίως στις στηρίξεις με λοξές ρωγμές οι οποίες οφείλονται σε πρόωρη υπέρβαση της αντοχής σε τέμνουσα. Προς αποφυγή αυτού του φαινομένου, ο Ικανοτικός Σχεδιασμός προβλέπει τον σχεδιασμό των δοκών για την ικανοτική τέμνουσα η οποία λαμβάνει υπόψη την τέμνουσα βάσης λόγω των ροπών αντοχής στα άκρα της δοκού. Η διατμητική αστοχία συναντάται και σε μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία τα οποία συνήθως δημιουργούνται λόγω φυτευτών υποστυλωμάτων.



Εικόνα 4.15: Διατμητικές ρωγμές στις στηρίξεις δοκού.



Εικόνα 4.16: Διατμητική αστοχία λόγω συγκεντρωμένου φορτίου (21).

4.5 Βλάβες σε κόμβους δοκών- υποστυλωμάτων

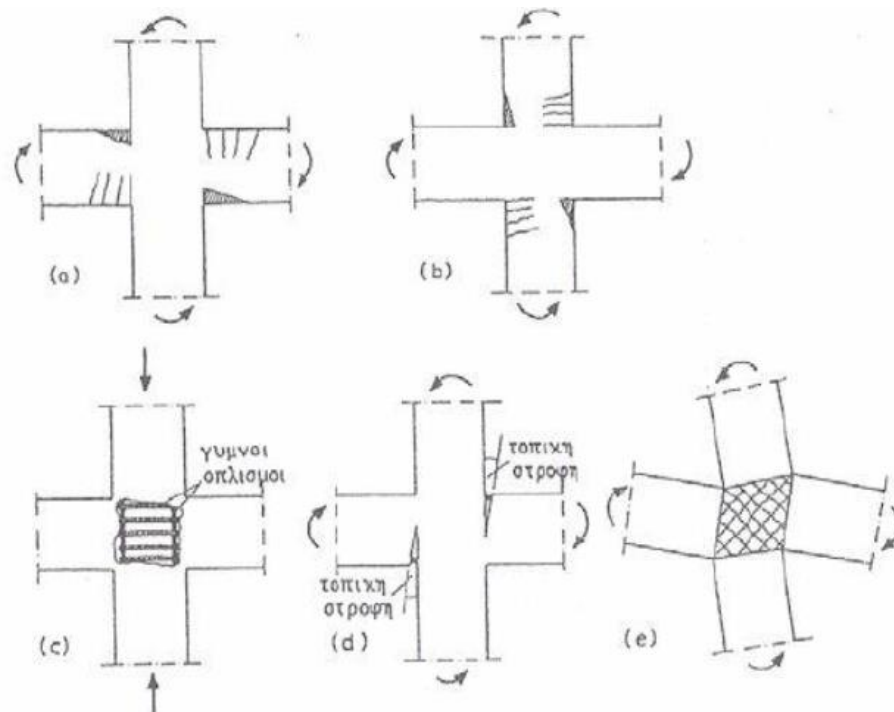
Οι κόμβοι δοκών - υποστυλωμάτων αποτελούν από τα κρισιμότερα σημεία μιας κατασκευής και αποτελούν σημεία συγκέντρωσης αστοχιών, οι οποίες επηρεάζουν την αντοχή και συνολική φέρουσα ικανότητα του φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η εμφάνιση ρηγματώσεων (ακόμα και πολύ μικρού μεγέθους) αποτελεί σημαντικότερη βλάβη για την κατασκευή και κατατάσσεται κατά μια κατηγορία δυσμενέστερα σε σχέση με τις βλάβες των υποστυλωμάτων. Η εμφάνιση ρηγματώσεων αλλά και αστοχιών σε κόμβους, οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες (21):

- Η διατμητική δύναμη έχει μεγάλη ένταση στις περιοχές των κόμβων, τις οποίες και καθιστά ευαίσθητες σε ψαθυρή αστοχία.
- Η συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας οπλισμών αλλά και μικρής επιφάνειας, δημιουργούν συνθήκες κακής ποιότητας σκυροδέτησης.
- Η περιοχή των κόμβων δεν διαστασιολογείται ξεχωριστά, επομένως υπάρχει τοπικά έλλειψη περίσφιξης.

- Κτίρια σχεδιασμένα με τον παλαιό αντισεισμικό κανονισμό πάσχουν από την ιδέα του Ικανοτικού Σχεδιασμού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αστοχίες στον κόμβο και να μην εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των δοκών, οι οποίες και θα αποτελούσαν ζώνες απορρόφησης ενέργειας.

Οι πιθανές μορφές αστοχίας στις περιοχές των κόμβων συνοψίζονται στις παρακάτω περιπτώσεις (23):

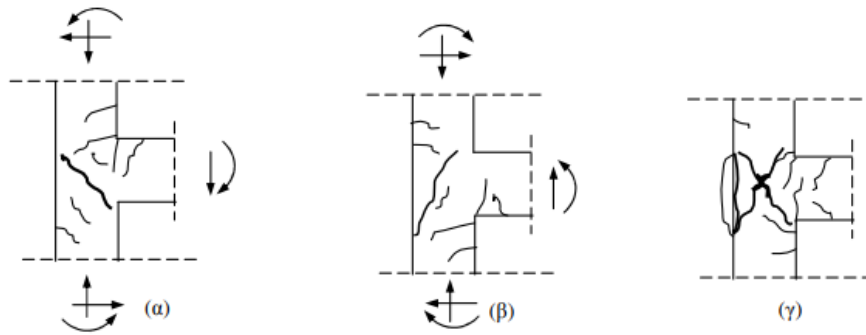
- Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών. Αυτή η μορφή αστοχίας είναι και η πλέον επιθυμητή καθώς με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η αστοχία κατακόρυφων μελών τα οποία και είναι δυσμενέστερα.
- Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των υποστυλωμάτων. Αυτή η μορφή αστοχίας είναι και η πλέον πιο ανεπιθύμητη, καθώς οδηγεί σε ανάπτυξη “μαλακού” ορόφου και κατάρρευση της κατασκευής.
- Αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης με συνέπεια τη μείωση φέρουσας ικανότητας των υποστυλωμάτων.
- Αστοχία κόμβου σε διάτμηση, η οποία επιφέρει μείωση δυσκαμψίας και φέρουσας ικανότητας κατασκευής.
- Αναποτελεσματική αγκύρωση διαμήκων ράβδων της δοκού εντός του κόμβου επιφέρει μεγάλες στροφές των στοιχείων.



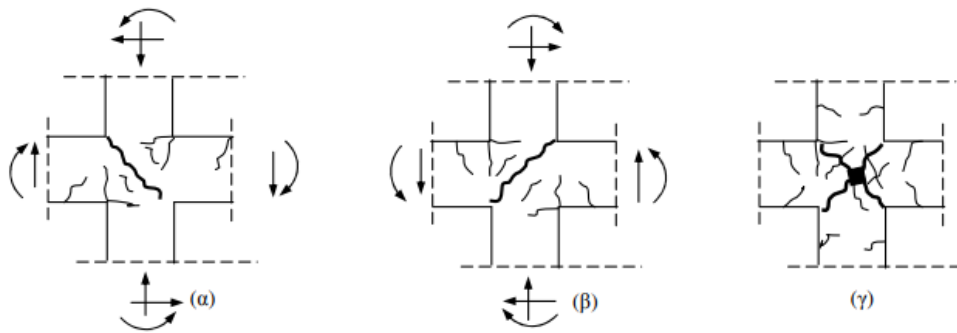
Εικόνα 4.17: Βλάβες σε κόμβους πλαισίων Ο.Σ. (21).



Εικόνα 4.18: Διατμητική αστοχία διαγώνιου κόμβου στο σεισμό του Αιγίου, 1995 (22).



βλάβες σε ακραίους κόμβους



Εικόνα 4.19: Βλάβες σε ακραίους κόμβους (πάνω) και σε ενδιάμεσους (κάτω) (22).



Αθήνα, περιοχή Θρακομακεδόνων.
Σεισμός της 7ης Σεπτεμβρίου 1999.
Διόρση κατοικία. Αστοχία ακραίου κόμβου και ψαθυρή (διαμητική) αστοχία κεφαλής υποστυλώματος. Παρατηρείται αστοχία αγκυρώσεων των διαμήκων οπλισμών των στοιχείων που συντρέχουν στον κόμβο και έλλειψη συνδετήρων.

Εικόνα 4.20: Αστοχία (διαμητική) ακραίου κόμβου στο σεισμό της Αθήνας, 1999.

4.6 Μέθοδοι ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

4.6.1 Γενικά

Η στρατηγική με την οποία ο μηχανικός θα κάνει την αποτίμηση της κατασκευής αλλά και την επισκευή ή ενίσχυσή της αποτελεί κρίσιμο παράγοντα και απαιτεί μεγάλη εμπειρία. Η στρατηγική που ακολουθεί ο μηχανικός χωρίζεται στα παρακάτω βασικά στάδια (22):

- Το πρώτο στάδιο αποτελείται από τη συνολική μόρφωση του υφιστάμενου φορέα και τη συλλογή των απαραίτητων παραμέτρων για την υλοποίηση της αποτίμησης.
- Το δεύτερο στάδιο αφορά τη διαδικασία της λήψης απόφασης, η οποία έπεται της αποτίμησης. Οι επιλογές του μηχανικού είναι ανάμεσα στην επισκευή των βλαβών (εάν πρόκειται για μικρού μεγέθους και επισκευάσιμες βλάβες), την ενίσχυσή της κατασκευής ή την κατεδάφισή της.
- Εάν έχει επιλεγεί η επιλογή της ενίσχυσης του φορέα, τότε ακολουθεί ένα τρίτο στάδιο κατά το οποίο επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος ενίσχυσης και υπολογίζονται τα προστιθέμενα μέλη και η αντοχή και δυσκαμψία της ενισχυμένης κατασκευής.

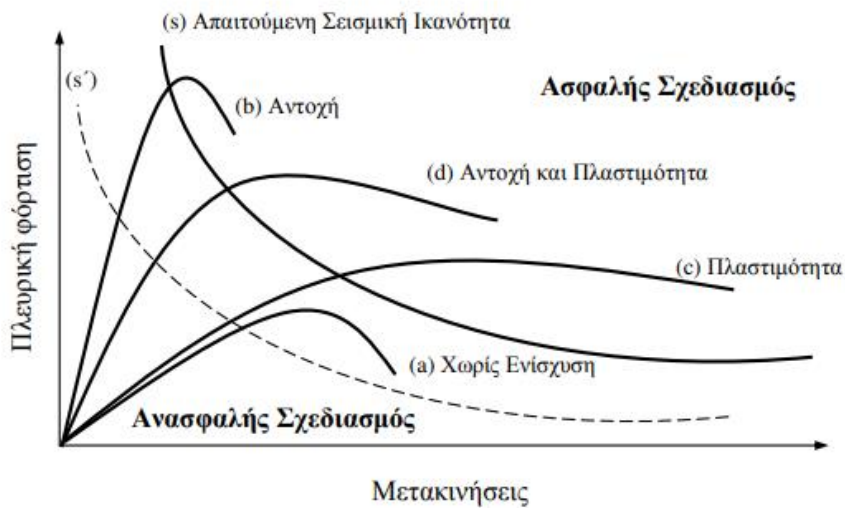
Ακολουθούν οι ορισμοί που έχουν δοθεί για τους όρους επισκευή και ενίσχυση:

- Ως **επισκευή** ορίζεται η διαδικασία επέμβασης σε μια κατασκευή που έχει υποστεί βλάβες, η οποία επαναφέρει τα δομικά στοιχεία στην αρχική τους κατάσταση και τους αποφέρει τις αρχικές τους ιδιότητες.
- Ως **ενίσχυση** ονομάζεται η διαδικασία επέμβασης σε μια κατασκευή με ή χωρίς βλάβες, η οποία προσδίδει στην κατασκευή μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα ή δυσκαμψία συγκριτικά με την αρχική της κατάσταση.

Η ενίσχυση της κατασκευής στο σύνολό της μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους ώστε να βελτιωθούν σημαντικά οι ιδιότητές της έναντι σεισμικής καταπόνησης. Συγκεκριμένα, η ενίσχυση μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα επιδιώκει τα παρακάτω αποτελέσματα (21):

- Αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής της κατασκευής.
- Αύξηση πλαστιμότητας της κατασκευής.
- Αύξηση ταυτόχρονα της δυσκαμψίας, της αντοχής και της πλαστιμότητας της κατασκευής.
- Μείωση καταπόνησης κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης μέσω σεισμικής μόνωσης της βάσης του φορέα.

Για να προσδιοριστεί με ακρίβεια και σαφήνεια η μέθοδος ενίσχυσης θα πρέπει να διαπιστωθεί εάν οι νέες ιδιότητες που προσδίδει στην κατασκευή έχουν βελτιώσει τη φέρουσα ικανότητα στο σύνολο. Πρακτικά, η σεισμική φόρτιση αποτελεί επιβαλλόμενη δυναμική μετατόπιση για την κατασκευή με αποτέλεσμα να της εισάγει κινητική ενέργεια. Η ταλάντωση του φορέα προκαλεί ενέργεια παραμόρφωσης στο φορέα η οποία και αποτελεί μέτρο σεισμικής αντίστασης. Η καμπύλη “S” είναι συνάρτηση της πλευρικής φόρτισης και των μετακινήσεων που δέχεται ο φορέας και αποτελεί το όριο της ασφαλούς περιοχής και ορίζει τη σεισμική ικανότητα της κατασκευής. Η περιοχή όπου χαρακτηρίζεται ασφαλής ορίζεται πάνω από την καμπύλη ενώ η περιοχή κάτω από την καμπύλη αποτελεί δυσμενή περίπτωση όπου αναμένεται αστοχία. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι καμπύλες για τις διάφορες στρατηγικές ενίσχυσης σε ένα διάγραμμα Πλευρικού φορτίου - Μετακινήσεων.



Εικόνα 4.21: Καμπύλες σεισμικής ικανότητας και ασφαλούς σχεδιασμού ανάλογα με τις στρατηγικές ενίσχυσης (21).

- Η καμπύλη (α) αναπαριστά την αρχική κατάσταση (χωρίς ενίσχυση) της κατασκευής. Παρατηρείται ότι βρισκόμαστε στην περιοχή κινδύνου δηλαδή είχε γίνει μη ασφαλής σχεδιασμός
- Η καμπύλη (b) αναπαριστά μέθοδο ενίσχυσης η οποία οδήγησε σε αύξηση της αντοχής και επέφερε ασφαλή σχεδιασμό.
- Η καμπύλη (c) αναπαριστά ενίσχυση σε αντοχή και πλαστιμότητα και επαναφορά του φορέα στην ασφαλή περιοχή. Παρατηρείται πως με τον συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης παρουσιάζεται και μεγάλο περιθώριο παραμορφωσιμότητας του φορέα το οποίο τον καθιστά πλάστιμο.
- Η καμπύλη S αποτελεί τη σεισμική ικανότητα που απαιτείται να έχει ο φορέας.
- Η καμπύλη S' αναπαριστά τη νέα σεισμική ικανότητα που απαιτείται να έχει ο φορέας όταν ενισχυθεί μέσω σεισμικής μόνωσης στη βάση, όπου και επιτυγχάνεται η μείωση της έντασης από τον σεισμό.

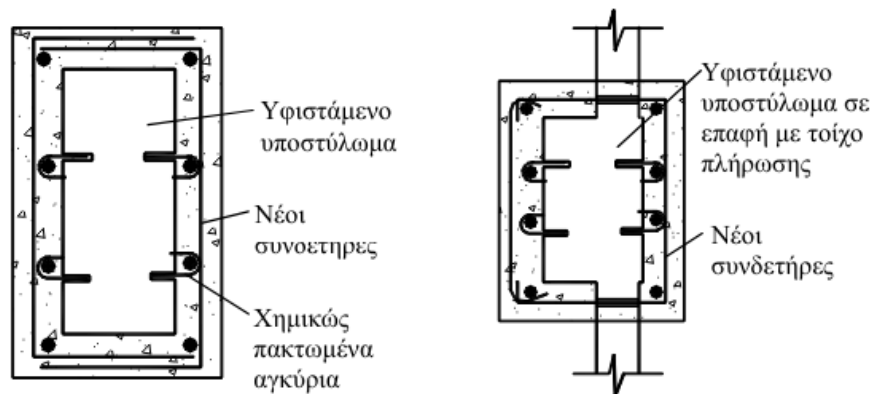
4.6.2 Ενίσχυση υποστύλωματος με μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ο/Σ)

Η ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί μέθοδο κατά την οποία επιτυγχάνεται αύξηση της διατομής επομένως και της δυσκαμψίας του μέλους αλλά και της κατασκευής στο σύνολό της. Επιπρόσθετα, η ενίσχυση με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ίσως την αποτελεσματικότερη μέθοδο ως προς την αύξηση τόσο της δυσκαμψίας όσο και της αντοχής και πλαστιμότητας ενός μέλους. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με την αύξηση της διατομής του υποστύλωματος μέσω εφαρμογής νέου σκυροδέματος όσο και διαμήκους αλλά και

εγκάρσιου οπλισμού, περιμετρικά της παλιάς διατομής του υποστυλώματος. Η εφαρμογή του μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα συνηθίζεται να είναι από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, από έγχυτο σκυρόδεμα ή από σκυροτσιμεντόπηγμα. Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα.



Εικόνα 4.22: Ενίσχυση υποστυλώματος με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος (22).



Εικόνα 4.23: Ενίσχυση εσωτερικού μεμονωμένου υποστυλώματος (αριστερά) και περιμετρικού σε επαφή με τοίχωμα (δεξιά) (22).

Η διαδικασία κατά την οποία κατασκευάζονται και εφαρμόζονται οι μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος συνοψίζονται στα παρακάτω βήματα:

- Ως πρώτο στάδιο ορίζεται η υποστύλωση δοκών και πλακών που συντρέχουν στο προς ενίσχυση υποστύλωμα με ταυτόχρονη απομάκρυνση του αποδιοργανωμένου σκυροδέματος ή ατελειών της επιφάνειας ώστε να λειανθεί η εξωτερική επιφάνεια σε βάθος 6mm.

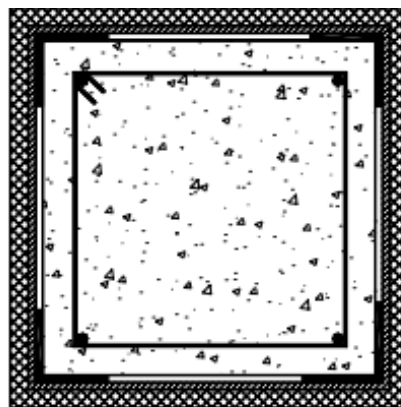
- Καθαρίζεται με μεγάλη επιμέλεια η περιοχή με αέρα υπό πίεση.
- Αγκυρώνεται ο νέος διαμήκης οπλισμός και τοποθετούνται βλήτρα ή αγκύρια για εξασφάλιση συνάφειας παλαιάς και νέας στρώσης σκυροδέματος.
- Τοποθετούνται συνδετήρες για να εξασφαλιστεί η περίσφιγξη του υποστρώματος.

Η μέθοδος ενίσχυσης με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος έχει κυρίως δύο μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

1. Η ενίσχυση αφορά μόνο τα επιπρόσθετα φορτία. Επομένως, δεν είναι κατάλληλη ενίσχυση εάν έχει περάσει το μέλος τη φέρουσα ικανότητά του ή σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να προηγηθεί αποφόρτιση του υποστρώματος.
2. Η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης επιβάλλει απόλυτη διακοπή στη χρήση του κτιρίου καθώς απαιτεί μεγάλο όγκο εργασιών και όχληση.

4.6.3 Ενίσχυση υποστρώματος μέσω περίσφιγξης

Η ενίσχυση υποστρώματος χωρίς αύξηση διατομής επιτυγχάνεται μέσω επικόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων, με πιο διαδεδομένο τρόπο τη δημιουργία μεταλλικού κλωβού. Η ενίσχυση παρέχει αύξηση της πλαστιμότητας της κατασκευής και υλοποιείται μέσω επικόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων στις γωνίες της διατομής (χρησιμοποιούνται ειδικά χημικά αγκύρια) και ακολουθεί η σύσφιγξή τους με ειδικά κλειδιά. Με βάση πειραματικά αποτελέσματα η διατομή των γωνιακών πρέπει να είναι τουλάχιστον L50x5. Το πάχος των οριζόντιων μεταλλικών ελασμάτων είναι συνήθως ίσο με το πάχος των γωνιακών, ενώ το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 25 και 60 mm. Η απόσταση μεταξύ τους δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μικρότερη τιμή από το ήμισυ της μικρότερης διάστασης της διατομής και τα 15 cm.



Εικόνα 4.24: Εφαρμογή μεταλλικού κλωβού με εξωτερική περίσφιγξη (21).

Αξίζει να σημειωθεί πως συχνά επιλέγεται συνδυασμός μανδύων Ο/Σ και μεταλλικών κλωβών όπως στην παρακάτω εικόνα (Αίγιο, 1995).



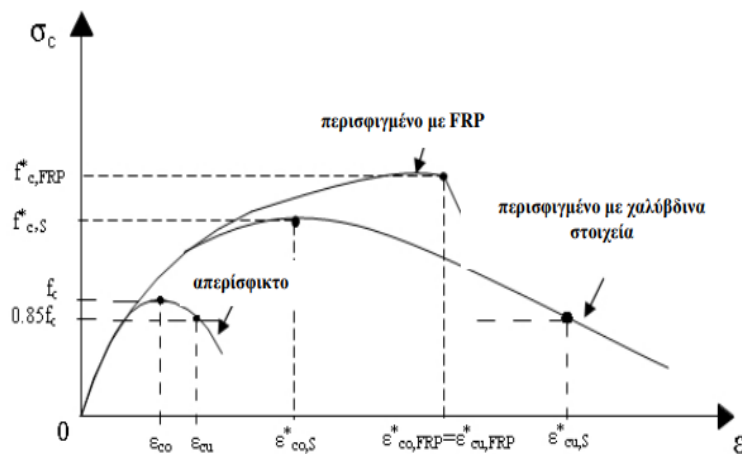
Εικόνα 4.25: Συνδυασμός μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικών κλωβών με σκοπό την ενίσχυση σε αντοχή, δυσκαμψία και πλαστιμότητα (21).

Ένας άλλος τρόπος ενίσχυσης δομικών στοιχείων μέσω περίσφιξης είναι η επικόλληση μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) (24). Η πρόοδος της τεχνολογίας καθώς και η ανάγκη για νέες τεχνικές που θα καλύπτουν τις ανάγκες για ασφαλείς κατασκευές έχουν οδηγήσει στη δημιουργία και εφαρμογή νέων τεχνικών που δίνουν λύση σε δυσκολίες που αντιμετωπίζει ένας πολιτικός μηχανικός. Μία από αυτές χρησιμοποιεί τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ – Fiber Reinforced Polymer Composites – FRPC), τα οποία αποτελούνται από “υφάσματα” από ινώδη οπλισμένα πολυμερή, εμποτισμένα με εποξικές ρητίνες. Τα ελάσματα ΙΟΠ συνδέονται εξωτερικά στα δομικά μέλη με χρήση συγκολλητικών ουσιών (π.χ. εποξειδικής κόλλας,) αυξάνοντας τη φέρουσα ικανότητα του μέλους. Όπως σε κάθε εξωτερικά συνδεδεμένο σύστημα, ο δεσμός μεταξύ των σύνθετων υλικών και του ήδη υπάρχοντος σκυροδέματος είναι κρίσιμος, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά του σύνθετου με το υπάρχον μέλος. Συνεπώς η κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας του μέλους είναι μια απαραίτητη διαδικασία με στόχο την απομάκρυνση αδύναμων και ενανθρακωμένων στρώσεων ή σκόνης από την επιφάνεια του σκυροδέματος, καθώς και η εξομάλυνσή της,

για να έχουμε μια επιτυχημένη συγκόλληση που θα ενισχύσει την κατασκευή. Η συγκεκριμένη τεχνική χαρακτηρίζεται ως άκρως φιλική προς το περιβάλλον λόγω έλλειψης αποβλήτων καθώς και γενικότερα ρύπων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα ελάσματα ΙΟΠ στην εφαρμογή τους ως εξωτερικά επικολλούμενος οπλισμός στοιχείων σκυροδέματος είναι η πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή (όσο και των ισχυρότερων χαλύβων προέντασης), η αντοχή στη διάβρωση, η διάθεση σε πολύ μεγάλα μήκη και η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε μέλη κατασκευής που έχουν δύσκολη πρόσβαση. Επιπροσθέτως, το χαμηλό κόστος εφαρμογής (ανάλογο των παραδοσιακών μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης), το γεγονός ότι απαιτούν ελάχιστο ή και καθόλου βαρύ εξοπλισμό για την τοποθέτηση τους καθώς έχουν πολύ απλή εφαρμογή και το πολύ μικρό ίδιο βάρος που σε συνδυασμό με τη μεγάλη ευκαμψία καθιστά πολύ εύκολη τη μεταφορά και διευκολύνει την εφαρμογή. Ακόμα, οι διαστάσεις του ενισχυόμενου δομικού υλικού παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες, λόγω του μικρού πάχους του σύνθετου υλικού και μπορούν επίσης, να επιχριστούν και να χρωματιστούν, διατηρώντας έτσι την αισθητική και την αρχιτεκτονική της υπάρχουσας κατασκευής.

Μέσω της συγκεκριμένης ενίσχυσης, επιτυγχάνεται αύξηση της πλαστιμότητας και αντοχής του στοιχείου αλλά και ενίσχυση έναντι διάτμησης. Τα φύλλα ινοπλισμένων πολυμερών εφαρμόζονται οριζόντια συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην βελτίωση των ιδιοτήτων της διατομής. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο καταστατικός νόμος του σκυροδέματος για διατομή χωρίς περίσφιγξη και με διατομή όπου έχει εφαρμοστεί περίσφιγξη με χαλύβδινα ελάσματα ή φύλλα ινοπλισμένων πολυμερών. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η σημασία της περίσφιγξης είναι καίρια για την πλαστιμότητα και αντοχή των στοιχείων από σκυρόδεμα ενώ διαφαίνεται πως η περίσφιγξη με ινοπλισμένα πολυμερή έχει καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά την αντοχή ενώ τα χαλύβδινα ελάσματα προσδίδουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα. Ο καθοδικός κλάδος απουσιάζει στην περίπτωση των ινοπλισμένων πολυμερών καθώς λειτουργούν ελαστικά και δεν παρουσιάζουν όλκιμη συμπεριφορά.

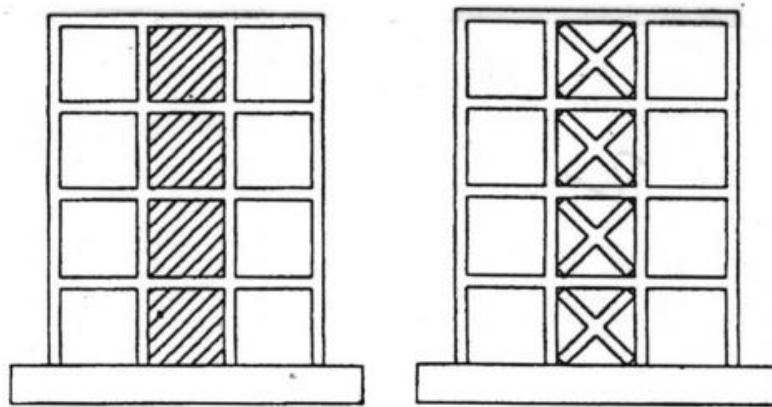


Εικόνα 4.26: Καταστατικός νόμος τάσεων - παραμορφώσεων για απερίσφικτο και περισφισμένο σκυρόδεμα (7).

4.6.4 Ενίσχυση υφιστάμενης κατασκευής με προσθήκη νέων στοιχείων

Η επιλογή ενίσχυσης μιας υφιστάμενης κατασκευής εμπεριέχει διάφορες περιπτώσεις οι οποίες κρίνονται και επιλέγονται με βάση την κρίση του μηχανικού και την επιδιωκόμενη νέα κατάσταση που θα πρέπει να ορίζει την κατασκευή. Μια αρκετά σημαντική μέθοδος ενίσχυσης η οποία όμως επηρεάζει καθολικά τον υφιστάμενο φορέα είναι η προσθήκη νέων στοιχείων (τοιχώματα, μεταλλικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας κ.α.). Η προσθήκη των νέων στοιχείων οδηγεί σε εκτεταμένες επεμβάσεις σε διάφορες θέσεις του αρχικού φορέα και πρέπει να γίνει από έμπειρους μηχανικούς ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των φορτίων από τον παλιό στο νέο ενισχυμένο φορέα. Η ενίσχυση με προσθήκη νέων στοιχείων αφορά κυρίως τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Κατασκευή τοιχωμάτων εντός των ήδη υφιστάμενων πλαισίων της κατασκευής, με σκοπό την αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας της κατασκευής. Τα τοιχώματα αποτελούν διατομές με μεγάλη δυσκαμψία και αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής έντασης.
- Κατασκευή χαλύβδινων συνδέσμων δυσκαμψίας εντός των πλαισίων με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής σε μικρό ποσοστό, αλλά κυρίως αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας της κατασκευής.



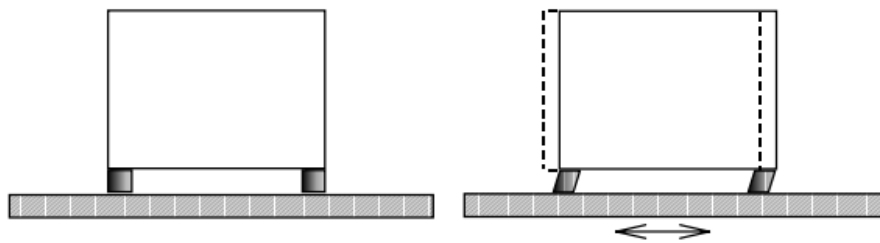
Εικόνα 4.27: Εφαρμογή ενίσχυσης μέσω τοιχωμάτων ή συνδέσμων δυσκαμψίας με σκοπό την ενίσχυση της δυσκαμψίας της υφιστάμενης κατασκευής.

Ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης αλλάζει ριζικά το στατικό σύστημα της κατασκευής αλλά και τις ιδιότητές της όπως μάζα και δυσκαμψία, οι οποίες είναι παράμετροι που επηρεάζουν την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, βασική παράμετρος για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

4.6.5 Σεισμική μόνωση των κατασκευών

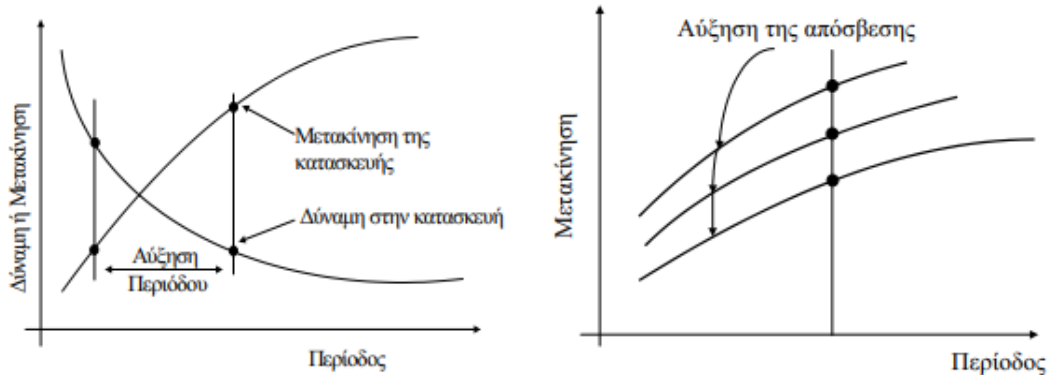
Η σεισμική μόνωση αποτελεί φιλοσοφία τόσο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό νέας κατασκευής όσο και ως τρόπος ενίσχυσης υφιστάμενης κατασκευής μέσω μείωσης της έντασης του σεισμού που δέχεται ο φορέας και χωρίς επίδραση στις ιδιότητές του ή στην αντοχή του. Η σεισμική μόνωση τοποθετείται στη διεπιφάνεια υποστυλωμάτων - θεμελίωσης και πλέον ο φορέας λειτουργεί ελαστικά, καθώς το τμήμα της ανωδομής είναι ανεξάρτητο από το σύστημα θεμελίωσης το οποίο κινείται όπως το έδαφος λόγω του σεισμού. Η σεισμική μόνωση έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σεισμικής έντασης έως και 10 φορές με αποτέλεσμα την εξασφάλιση της αποτροπής κατάρρευσης ή ακόμα και τη μείωση των βλαβών ώστε να μην απαιτούνται εκτεταμένες ενέργειες για επισκευή. Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης προϋποθέτει την ταυτόχρονη ικανοποίηση των παρακάτω κριτηρίων:

- Το κτίριο θα πρέπει να μετακινείται μέσα σε ανεκτά όρια που ορίζονται από τους κανονισμούς ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργικότητά του και η φέρουσα ικανότητά του.
- Το σύστημα σεισμικής μόνωσης θα πρέπει να παρέχει ευκαμψία στην κατασκευή ώστε να μετακινείται ανεξάρτητα, αλλά να είναι ταυτόχρονα άκαμπτο για τα πλευρικά φορτία της ανεμοπίεσης.
- Θα πρέπει να εξασφαλίζεται η επαναφορά του φορέα ανωδομής στην αρχική θέση του – αυτό εξασφαλίζει και την ελαστική συμπεριφορά του κτιρίου.
- Το έδαφος όπου θα γίνει η θεμελίωση δεν θα πρέπει να είναι “σκληρό”, δηλαδή να μην επιτρέπει δονήσεις σε μεγάλες ιδιοπεριόδους.
- Το κτίριο θα πρέπει να είναι δύσκαμπτο με ιδιοπεριόδους μέχρι 1,5 έως 2 sec, όρια που καλύπτουν και ορισμένες εύκαμπτες κατασκευές.
- Η μετακίνηση λόγω των κατακόρυφων φορτίων θα πρέπει να είναι αμελητέα.
- Το μέγεθος των πλευρικών φορτίων δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 10% του ίδιου βάρους του φορέα (22).



Εικόνα 4.28: Αρχή λειτουργίας της σεισμικής μόνωσης (22).

Η εφαρμογή σεισμικής μόνωσης σε έναν φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα αποσκοπεί στην αύξηση της ιδιοπεριόδου του άρα και των μετακινήσεων που θα δεχθεί η κατασκευή, οι οποίες όμως θα είναι εντός επιτρεπόμενων ορίων. Με την αύξηση της ιδιοπεριόδου μειώνεται πρακτικά η διαδιδόμενη από το σεισμό δύναμη, ενώ για τη διατήρηση των μετακινήσεων σε επιτρεπτά επίπεδα, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αποσβεστήρες.



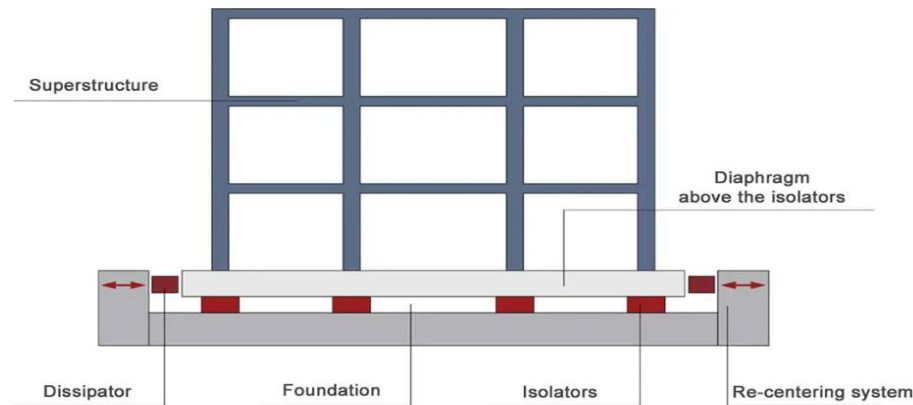
Εικόνα 4.29: Αύξηση ιδιοπεριόδου κατασκευής μέσω σεισμικής μόνωσης (22).

Όταν χρησιμοποιείται για τη σεισμική αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, η σεισμική μόνωση εφαρμόζεται συνήθως στους στύλους και στα τοιχώματα ακριβώς πάνω από το επίπεδο των θεμελίων. Εάν το κτίριο έχει υπόγειο, οι επιλογές είναι να τοποθετηθούν οι μονωτές στην κορυφή, στον πυθμένα ή στο μέσο ύψος των στύλων και των τοιχωμάτων του υπογείου. Στην πιο κοινή διαμόρφωση, ένα διάφραγμα κατασκευάζεται αμέσως πάνω από το σύστημα μόνωσης (απομονωτές), ώστε να συνδέσει τους στύλους και να αποτρέψει την ανεξάρτητη δόνησή τους κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου σεισμικού γεγονότος. Συχνά, ένα παρόμοιο διάφραγμα κατασκευάζεται και στο επίπεδο των θεμελίων, ακριβώς κάτω από σύστημα μόνωσης.

Για την εγκατάσταση του εφεδράνου, εγκαθίστανται υδραυλικοί γρύλοι σε συμμετρική θέση σε ολόκληρη την έκταση του κτιρίου, ή γύρω από κάθε στύλο ξεχωριστά. Η υπερκατασκευή ανυψώνεται με τους γρύλους κατά 1-2 χιλιοστά, προκειμένου να επιτραπεί η αποσυμπίεση του στύλου, ο οποίος στη συνέχεια κόβεται με συμβατικές μεθόδους. Τα εφεδράνα εγκαθίστανται και το κενό μεταξύ του σκυροδέματος και του εφεδράνου γεμίζει με μη συρρικνούμενο κονίαμα ή εποξειδική ρητίνη.

Συνήθως, ένας μεγάλος τοίχος κατασκευάζεται επίσης στην περίμετρο του κτιρίου στο επίπεδο του συστήματος μόνωσης, ώστε να αποτρέψει μετατοπίσεις μεγαλύτερες από την ικανότητα παραμόρφωσης του συστήματος. Επίσης σημειώνεται ότι επιτρέποντας μεγάλες σχετικές κινήσεις του κτιρίου σε σχέση με το έδαφος σημαίνει ότι ακόμη και τα μη δομικά στοιχεία (π.χ. διαχωριστικοί τοίχοι), καθώς και τα στοιχεία του ηλεκτρικού και μηχανολογικού συστήματος εγκαταστάσεων (π.χ. καλώδια, σωλήνες) που διασχίζουν το επίπεδο όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα μόνωσης πρέπει να τροποποιηθούν, ώστε να μπορούν να αντέξουν τις σεισμικές κινήσεις χωρίς διακοπή της

λειτουργίας τους. Μια τυπική διαμόρφωση σεισμικής μόνωσης δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.30: Τυπική μόνωση συστήματος σεισμικής μόνωσης σε κτιριακή κατασκευή (22).

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι η περιορισμένη ακαμψία στο επίπεδο του συστήματος, η οποία οδηγεί σε σημαντική επιμήκυνση της περιόδου της κατασκευής σε θεμελιώδεις περιόδους έως και 2,5 δευτερόλεπτα ή και περισσότερο. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της επιτάχυνσης που μεταφέρεται στην ανωδομή, των δυνάμεων αδράνειας και της σεισμικής απαίτησης. Ως αποτέλεσμα, οι πλευρικές παραμορφώσεις και οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων είναι σημαντικά μικρότερες, οδηγώντας σε ελαφρές ή πολύ ελαφρές βλάβες στα δομικά και μη δομικά στοιχεία ακόμη και σε πολύ μεγάλα σεισμικά γεγονότα.

Η κύρια ιδέα πίσω από τη χρήση της σεισμικής μόνωσης για αναβάθμιση είναι ότι, αντί να ενισχύονται τα δομικά μέλη για να αντέξουν τη σεισμική δράση (όπως γίνεται με όλες τις άλλες μεθόδους), η σεισμική μόνωση ακολουθεί την αντίθετη προσέγγιση, δηλαδή τη μείωση της σεισμικής απαίτησης αντί για την αύξηση της αντοχής. Δεδομένου ότι είναι αδύνατος ο έλεγχος της εδαφικής κίνησης που επιβάλλεται στην κατασκευή, η προστασία της κατασκευής γίνεται με τη μεταβολή της απαίτησης, μειώνοντας τις κινήσεις που μεταφέρονται στην κατασκευή από το επίπεδο των θεμελίων.

Η θεμελιώδης αρχή είναι να τροποποιηθεί η απόκριση του κτιρίου, ώστε το έδαφος να μπορεί να δονείται χωρίς να μεταδίδει σημαντική κίνηση και δυνάμεις αδράνειας στην ανωδομή. Μια πλήρης μόνωση θα ήταν δυνατή μόνο σε ένα ιδανικό, πλήρως ευέλικτο σύστημα και καμία επιτάχυνση δεν θα μεταφερόταν στην κατασκευή. Ωστόσο, στις εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύστημα που να μπορεί να μεταφέρει τα κατακόρυφα φορτία στη βάση, καθώς και να αντέχει τις μικρές πλευρικές δυνάμεις που προκαλούνται από τον άνεμο και μικρά σεισμικά γεγονότα.

Με τη σεισμική μόνωση η επιτευχθείσα μείωση της σεισμικής απαίτησης είναι συνήθως πολύ μεγάλη, επομένως δεν απαιτείται άλλη παρέμβαση στην κατασκευή, ακόμα και αν αυτή έχει κατασκευαστεί χωρίς σύγχρονα αντισεισμικά πρότυπα, επαρκή ενίσχυση ή καλή λεπτομέρεια. Ανάλογα με την κατάσταση του φορέα ανωδομής, ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει ώστε να δέχεται περιορισμένες ανελαστικές παραμορφώσεις, ή να παραμένει πλήρως ελαστικός. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο χώρος του κτιρίου πρέπει να επιτρέπει οριζόντιες μετατοπίσεις στη βάση της τάξης των 200 χιλιοστών ή περισσότερων προς κάθε κατεύθυνση. Συνεπώς, η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για κτίρια που δεν είναι ανοιχτά σε όλες τις πλευρές στην περιμέτρώ τους.

Η σεισμική μόνωση εισήχθη αρχικά για το σχεδιασμό και την κατασκευή νέων κτιρίων, ωστόσο σήμερα κερδίζει σταδιακά έδαφος για την προστασία των υφιστάμενων κατασκευών από σεισμικά φορτία. Με τη ραγδαία μείωση του κόστους των συστημάτων σεισμικής μόνωσης, η τεχνική αλλάζει σταδιακά από μια "εξωτική" μέθοδο κατάλληλη μόνο για ειδικές εφαρμογές, σε μία από τις βασικές μεθόδους για την αναβάθμιση σεισμικής αντοχής.

Σήμερα η σεισμική μόνωση θεωρείται μία από τις προτιμώμενες μεθόδους για αναβάθμιση στις περιπτώσεις διατήρησης ιστορικών κτιρίων που απαιτούν ελάχιστες τροποποιήσεις, και για την προστασία του περιεχομένου, δηλαδή όταν η αξία (οικονομική, πολιτιστική ή αρχιτεκτονική) του περιεχομένου ενός κτιρίου είναι μεγαλύτερη από την αξία του ίδιου του κτιρίου, όπως για παράδειγμα σε μουσεία. Επιπλέον, αποτελεί μία ανταγωνιστική μέθοδο ακόμα και σε καθαρά οικονομικούς όρους για κτίρια μεσαίου έως μεγάλου ύψους, ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψη ότι όλες οι εργασίες αναβάθμισης πραγματοποιούνται σε ένα μόνο επίπεδο (συνήθως στο επίπεδο των θεμελίων ή του εδάφους), που σημαίνει ότι η διατάραξη των λειτουργιών του κτιρίου και το κόστος της διακοπής της επιχειρηματικής δραστηριότητας είναι περιορισμένα και σημαντικά μικρότερα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

4.6.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της σεισμικής μόνωσης

Ακολουθώντας μια διαφορετική προσέγγιση από όλες τις άλλες μεθόδους ενίσχυσης, η σεισμική μόνωση οδηγεί σε σημαντική μείωση των σεισμικών δυνάμεων που εφαρμόζονται στην κατασκευή και είναι μία από τις ασφαλέστερες μεθόδους για την αναβάθμιση σεισμικής αντοχής. Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου:

Πλεονεκτήματα:

- Βασικό πλεονέκτημα της σεισμικής μόνωσης ως μεθόδου ενίσχυσης αποτελεί το γεγονός ότι οι εργασίες γίνονται αποκλειστικά στη θεμελίωση με αποτέλεσμα να μην υπάρχει όχληση στους χρήστες του κτιρίου.
- Η βλάβη η οποία προκαλείται σε κτίριο με σεισμική μόνωση είναι σημαντικά μικρότερη συγκριτικά με τον αρχικό φορέα. Με αυτόν τον τρόπο δεν υπάρχουν

παραμένουσες μετακινήσεις το οποίο είναι επιθυμητό ειδικά σε κτίρια με μεγάλη σημασία όπως νοσοκομεία ή σχολεία.

Μειονεκτήματα:

- Η μέθοδος της σεισμικής μόνωσης του κτιρίου απαιτεί σημαντικό οικονομικό κόστος κατά την εφαρμογή της και δεν συνίσταται σε κατασκευές μικρού συνολικού ύψους (κτίρια μικρότερα των 10 ορόφων).
- Ένα άλλο πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε διαμόρφωση κατασκευής. Απαιτείται το υπό εξέταση κτίριο να είναι ελεύθερο να κινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση στην περίμετρό του, και αυτό δεν είναι δυνατό όταν το κτίριο είναι σε επαφή με άλλες ιδιοκτησίες σε οποιαδήποτε από τις πλευρές του. Επομένως, η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο ποσοστό του κτιριακού αποθέματος, όπως τα κτίρια στα κέντρα των πόλεων και άλλες πυκνοκατοικημένες περιοχές.
- Τέλος, η σεισμική μόνωση είναι μια μέθοδος που διαφέρει σημαντικά στη φιλοσοφία και τις λεπτομέρειές της σε σχέση με τις άλλες υπάρχουσες μεθόδους αναβάθμισης. Απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και τεχνογνωσία τόσο στο επίπεδο σχεδιασμού όσο και στο επίπεδο κατασκευής. Επειδή ο αριθμός των έργων που έχουν υλοποιηθεί μέχρι στιγμής χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική είναι σχετικά μικρός και περιορίζεται σε μεγαλύτερα, πιο εξέχοντα κτίρια και μνημεία, αυτή η τεχνογνωσία είναι προς το παρόν περιορισμένη και κατέχεται μόνο από μεγάλες εταιρείες σχεδιασμού ή κατασκευής.

4.7 Είδη συστημάτων σεισμικής μόνωσης

4.7.1 Γενικά

Τα συστήματα σεισμικής μόνωσης μπορούν να διακριτοποιηθούν στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Συστήματα μείωσης της δυσκαμψίας.
- Συστήματα αύξησης της απόσβεσης.
- Συστήματα συνδυαστικής μείωσης της δυσκαμψίας και αύξησης της απόσβεσης.

4.7.2 Συστήματα μείωσης της δυσκαμψίας

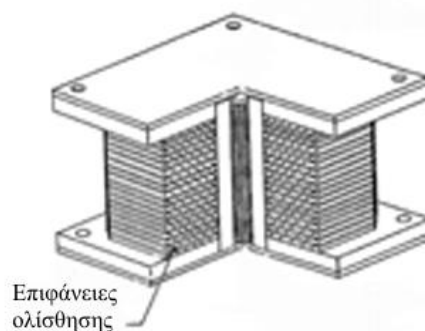
Τα συστήματα μείωσης της δυσκαμψίας χωρίζονται σε ελαστομεταλλικά εφέδρανα και εφέδρανα ολίσθησης.

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα τα οποία αποτελούνται από ελαστομερή χαμηλής απόσβεσης, αποτελούν ίσως και την πιο διαδεδομένη εφαρμογή σεισμικής μόνωσης. Η σύνθεσή τους βασίζεται στον συνδυασμό ελαστομερούς υλικού και μεταλλικών φύλλων τα οποία προσδίδουν σημαντική δυσκαμψία στην κατακόρυφη διεύθυνση, μειώνοντας τον κίνδυνο ανατροπής τους λόγω των οριζόντιων σεισμικών φορτίων. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα έχουν γραμμική συμπεριφορά και η απόσβεσή τους κυμαίνεται περί τα 5%, ενώ παρουσιάζουν σημαντική ανθεκτικότητα σε γήρανση.



Εικόνα 4.31: Ελαστομερές εφέδρανο χαμηλής απόσβεσης και εφαρμογή του (22).

Τα συστήματα εφεδράνων ολίσθησης στηρίζονται στη δράση τριβής και εκκρεμούς, με αποτέλεσμα η κίνηση να γίνεται επί μιας σφαιρικής επιφάνειας και να γίνεται εφικτή η επαναφορά στην αρχική θέση έπειτα από το πέρας του σεισμού. Επιπρόσθετα γίνεται εφαρμογή συστημάτων με επίπεδες επιφάνειες με ή χωρίς λίπανση. Η αρχή λειτουργίας των εφεδράνων με επάλληλες επιφάνειες ολίσθησης βασίζεται στην ανάπτυξη δυνάμεων τριβής μεταξύ των μεταλλικών φύλλων με αποτέλεσμα την απορρόφηση των σεισμικών φορτίων.



Εικόνα 4.32: Εφέδρανο ολίσθησης (Αριστερά) και εφέδρανο με επάλληλες διεπιφάνειες ολίσθησης (22).

4.7.3 Συστήματα αύξησης της απόσβεσης

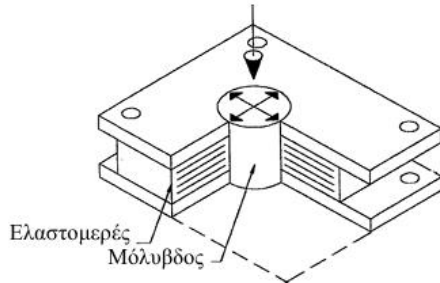
Οι αποσβεστήρες αποτελούν συστήματα αύξησης της κρίσιμης απόσβεσης σε ποσοστό 10-20% και χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Οι χαλύβδινοι αποσβεστήρες απορροφούν τη σεισμική ενέργεια μέσω της ανελαστικής τους παραμόρφωσης και συμβάλλουν στην αύξηση της παραμένουσας μετατόπισης της κατασκευής. Οι χαλύβδινοι αποσβεστήρες αυξάνουν την δυσκαμψία της κατασκευής και παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή ως προς τα πλευρικά φορτία ανέμων και σεισμού. Αξίζει να σημειωθεί πως το βασικό τους μειονέκτημα είναι η μικρή αντοχή σε κόπωση συγκριτικά με άλλα συστήματα απόσβεσης, το οποίο έχει όμως αντιμετωπιστεί καθώς έχουν δημιουργηθεί καινοτόμοι χαλύβδινοι αποσβεστήρες με υψηλή αντοχή σε κόπωση και διάρκεια ζωής πολλών κύκλων.
- Αποσβεστήρες τριβής ονομάζονται τα συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ δυο σωμάτων καθώς ολισθαίνουν μεταξύ τους.
- Οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες εφαρμόστηκαν αρχικά στις ΗΠΑ για παραλαβή οριζόντιων φορτίων ανέμου και αργότερα για σεισμική φόρτιση. Η απόσβεση της σεισμικής ενέργειας γίνεται μέσω διατμητικής παραμόρφωσης.

4.7.4 Συστήματα ταυτόχρονης αύξησης απόσβεσης και μείωσης της δυσκαμψίας

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται συνήθως είτε από ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου είτε ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης. Τα συστήματα απόσβεσης με προσθήκη στοιχείων μολύβδου επιλέγονται λόγω της διγραμμικής συμπεριφοράς τους και την υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από την ανακυκλιζόμενη φόρτιση του σεισμού. Πρέπει να σημειωθεί πως με την εισαγωγή του πυρήνα μολύβδου το εφέδρανο χάνει την ικανότητα της αυτόματης επαναφοράς στην αρχική του θέση, γεγονός το οποίο όμως δεν αποτελεί μειονέκτημα δεδομένου ότι,

πρώτον, οι παραμένουσες παραμορφώσεις είναι μικρές και, δεύτερον, σε επάλληλα σεισμικά γεγονότα, οι συνολικές μετακινήσεις δεν αθροίζονται. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης αναλαμβάνουν μεγάλα κατακόρυφα φορτία ενώ έχουν μικρή δυσκαμψία όσον αφορά τις οριζόντιες φορτίσεις και χαρακτηρίζονται από μεγάλη ιξώδη απόσβεση. Τα συστήματα αυτά είναι αρκετά ευαίσθητα σε εφελκυστικές τάσεις επομένως πρέπει να προβλέπεται κατάλληλος σχεδιασμός ώστε η καταπόνησή τους να είναι υπό θλιπτικά φορτία.



Εικόνα 4.33: Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου (αριστερά) και ελαστομεταλλικό εφέδρανο υψηλής απόσβεσης (δεξιά) (22).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί το πιο σύνηθες υλικό δόμησης λόγω της αυξημένης αντοχής σε θλίψη που παρουσιάζει μαζί με ικανοποιητική ικανότητα παραμορφωσιμότητας λόγω της παρουσίας χάλυβα. Στην Ελλάδα οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν την πλειονότητα των κατασκευών. Έπειτα από ορισμένους καταστροφικούς σεισμούς, προέκυψε η ανάγκη για ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών ώστε να αποφευχθούν νεότερες καταρρεύσεις κατασκευών αλλά και να ενισχυθούν γενικά οι παλαιότερες και όχι, μόνο κατασκευές.

Η ιδέα της ενίσχυσης των κατασκευών προϋποθέτει την κατανόηση της συμπεριφοράς του φορέα κατά τη σεισμική φόρτιση και την αξιολόγηση της παραμορφωμένης εικόνας. Μια κατασκευή μπορεί να φέρει πολλών ειδών βλάβες (διατμητικές, καμπτικές, βλάβες σε κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων) οι οποίες οφείλονται σε διαφορετικούς λόγους. Η αξιολόγηση των βλαβών βοήθησε στην κατανόηση της παραμόρφωσης του κτιρίου κατά τη σεισμική φόρτιση και θεσπίστηκαν τα όρια σταθμών επιτελεστικότητας. Οι Στάθμες Επιτελεστικότητας αποτελούν όρια τα οποία καθορίζουν τις ανώτατες επιτρεπτές τιμές βλαβών σε ένα κτίριο ανάλογα με την απαίτηση που υπάρχει είτε για άμεση χρήση, είτε προστασίας ζωής ή και ακόμα και οιονεί κατάρρευσης.

Η μελέτη της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης επιτελεστικότητας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας αλλά και της τρωτότητας (fragility) μιας κατασκευής. Η συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς οδήγησε στην ικανότητα εφαρμογής μη γραμμικών ανελαστικών αναλύσεων, οι οποίες εκτιμούν τη συμπεριφορά του κτιρίου ως προς μια μεμονωμένη ή σειρά σεισμικών φορτίσεων. Πλέον, στο σύγχρονο σχεδιασμό υπάρχει και η ανάπτυξη της ιδέας του σχεδιασμού με εκτιμώμενη συμπεριφορά της κατασκευής (Performance Based Design), η οποία έχει ως στόχο το σχεδιασμό του φορέα ώστε να αναπτύξει μια συγκεκριμένη παραμόρφωση.

Στον ελληνικό κανονισμό έχουν θεσπιστεί διατάξεις σχετικές με την αξιολόγηση και αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών. Αρχικά, ο πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος αποτελεί έναν οπτικό έλεγχο και χονδροειδή υπολογισμό προτεραιότητας μελέτης μιας υφιστάμενης κατασκευής, δίχως να συμπεριλαμβάνονται αναλυτικοί υπολογισμοί. Ο Δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος αποτελεί μια προσεγγιστική αναλυτική διαδικασία υπολογισμών, μέσα από τους οποίους προσδιορίζεται η ανεπάρκεια του υφιστάμενου φορέα και καθορίζεται η προτεραιότητα ενίσχυσής του ή επισκευής του. Κατά τους υπολογισμούς του δευτεροβάθμιου προσεισμικού ελέγχου (ακριβέστερος του πρωτοβάθμιου), λαμβάνονται υπόψη κριτήρια με βασικότερα τα παρακάτω:

- Κανονικότητα κτιρίου καθ' ύψος και σε κάτοψη.
- Διαμόρφωση διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών σε διατομές υποστυλωμάτων και δοκών.
- Επιρροή φαινομένου διάβρωσης.
- Ύπαρξη δυσμενών χαρακτηριστικών όπως κοντά υποστυλώματα ή φυτευτά υποστυλώματα.
- Συμμετρική ή μη κατανομή δυσκαμψίας.
- Βαθμός τοιχοματοποίησης κτιρίου.
- Ευμενή ή δυσμενή επιρροή τοιχοπλήρωσης στην αντοχή και δυσκαμψία στο συνολικό φορέα.

Έπειτα από τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του κτιρίου, γίνεται ο υπολογισμός της έντασης της σεισμικής φόρτισης και ο λόγος της έντασης προς την αντοχή ονομάζεται λόγος ανεπάρκειας.

Η ακριβέστερη μέθοδος από τους προσεισμικούς ελέγχους είναι ο τριτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος κατά τον οποίο διεξάγονται ανελαστικές αναλύσεις με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται μη γραμμική ανελαστική στατική ή δυναμική ανάλυση η οποία εκτιμά με ακρίβεια την ανεπάρκεια του φορέα σε καθολικό και τοπικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση η οποία θα γίνει σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝΕΠΕ και του Ευρωκώδικα 8 Μέρος 3 (23), εξάγει την καμπύλη ικανότητας του κτιρίου ή τις μετακινήσεις των κόμβων ανά όροφο και με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται οι μετακινήσεις οι οποίες αποτελούν τα ανώτερα επιτρεπτά όρια. Αξίζει να σημειωθεί πως η τοπική αστοχία διαφέρει της καθολικής καθώς ο φορέας εξακολουθεί να αναλαμβάνει σημαντικά φορτία έπειτα από την εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών αλλά χάνει σημαντικό μέρος της αντοχής του μόλις αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα υποστυλωμάτων.

Η επιλογή της μεθόδου ενίσχυσης ενός υφιστάμενου φορέα αποτελεί μεταγενέστερο στάδιο της αποτίμησης. Αρχικά ορίζονται οι επιθυμητές ιδιότητες που θα πρέπει να καθορίζουν τον νέο ενισχυμένο φορέα. Οι διαθέσιμες μέθοδοι ενισχύσεις προσφέρουν αύξηση δυσκαμψίας, αντοχής ή και πλαστιμότητας. Επομένως, μια ακριβής αποτίμηση του φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα θα οδηγήσει σε επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου ενίσχυσης.

Συμπερασματικά, η έντονη σεισμική δραστηριότητα του ελλαδικού χώρου απαιτεί την εφαρμογή ενισχύσεων σε υφιστάμενες κατασκευές σχεδιασμένες προ των σύγχρονων αντισεισμικών κατασκευών, αλλά και την εξοικείωση με μη γραμμικές ανελαστικές μεθόδους ανάλυσης οι οποίες περιγράφουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά ενός φορέα. Τέλος, κρίνεται αναγκαίο να επισημανθεί ότι οι προσεισμικοί έλεγχοι αποτελούν εργαλεία με τα οποία ο μηχανικός εκτιμά την κατάσταση των υφιστάμενων

κατασκευών και θέτει προτεραιότητες ελέγχου και επισκευής ή ενίσχυσης, ενώ με την ανάπτυξη μοντέλων για τη δημιουργία καμπυλών τρωτότητας υπάρχει πλέον η δυνατότητα για εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής για διάφορες σεισμικές φορτίσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. What is reinforced concrete? Uses, benefits and advantages. The Constructor. [Online] <https://theconstructor.org/concrete/reinforced-concrete-uses-benefits-advantages/35976/>.
2. Concrete tunnel. Vanseo design . [Online] <https://vanseodesign.com/concrete-tunnel/>.
3. Shen, Si-. The Si-Eng. [Online] 2019. <https://www.si-eng.org/post/a-step-by-step-anatomy-of-concrete-stress-strain-curve-1>.
4. Hosamo H., Sarwari P. Experimental and finite element analysis of the shear behaviour of UHPC beams. Master Thesis . [Online] 2019. https://www.researchgate.net/publication/333380239_Experimental_and_finite_element_analysis_of_the_shear_behaviour_of_UHPC_beams.
5. Effects of earthquakes on concrete buildings. [Online] Τμήμα Πολιτικών μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών. https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1516/Chapter%202_seismic%20design%20of%20rc%20buildings%20to%20ec8%20Notes%20MNFardis.pdf.
6. Κτιριακά. Λειτουργία και σπλισμός πλακών. [Online] <https://www.ktiriaka.gr/default.aspx?ch=15>.
7. Ευρωκώδικας 8- Μέρος 1ο .
8. Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας. [Online] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΣ Ο.Τ.Μ. Α.Ε., ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ Α.Ε.
9. Γεωργουσάκη Αικατερίνη. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία. [Online] 2019.
10. European Seismic Risk Model (ESRM20). [Online] ETH Zurich.
11. Survey, British Geological. A guide to seismic hazard. [Online] https://www.earthquakes.bgs.ac.uk/hazard/haz_guide/psha.html.
12. Incremental dynamic analysis. D. Vamvatsikos, C.A. Cornell. 31, s.l. : Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, Vol. 3. pp.491-514.
13. Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations,. Ibarra, L. F., and Krawinkler, H. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford, CA, 324 : s.n., 2005.
14. Tracing and post-processing of IDA curves: Theory and software implementation. Vamvatsikos, D., and Cornell, C. A.,. s.l. : Report No. RMS-44, RMS Program, Stanford University, Stanford, CA, 2002b.
15. Applied incremental dynamic analysis. D. Vamvatsikos, C.A. Cornell. 2, s.l. : Earthquake Spectra, 2004, Vol. 20. pp.523-553.

16. Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. Baker, J. W. 31, s.l. : Earthquake Spectra, 2015, Vol. 1. pp.579-599.
17. ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜ. ΕΡΓΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ,. ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΟΣ ΠΡΟΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΦΕΛΟΥΣ ΧΡΗΣΗΣ.
18. Ο.Α.Σ.Π. ΚΑΝ. ΕΠΕ. - Κανονισμός επεμβάσεων. s.l. : 3η Αναθεώρηση, 2022.
19. Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης κα Πολιτικής Προστασίας- Οργανισμός Αντισεισμικού σχεδιασμού και προστασίας,. Δευτεροβάθμιος προσεισμικός έλεγχος κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αθήνα : 1η Αναθεώρηση, 2022.
20. ΡΑΦ. Στατικές μελέτες κτιρίων.
21. Στ., Δρίτσος. Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πάτρα : s.n., 2005. 3η έκδοση Αναθεωρημένη.
22. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία. Αθήνα : s.n., 2004.
23. Ευρωκώδικας 8- Μέρος 3ο .
24. Α., Τριανταφύλλου. Ενισχύσεις Κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά. 2004.