

Αποτίμηση Απωλειών σε Ζωές από τη Σεισμική Καταπόνηση Πολυώροφων Μεταλλικών Κτιρίων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ακριβή Χατζηδάκη

Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δημήτριος

Αθήνα, Ιούλιος 2016 ΕΜΚ ΔΕ 2016/12

Χατζηδάκη Α. (2016). Αποτίμηση απωλειών σε ζωές από τη σεισμική καταπόνηση πολυώροφων μεταλλικών κτηρίων Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016/12 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Chatzidaki A. (2016). Assessment of casualties for multistory steel buildings subject to seismic loads Diploma Thesis EMK ΔE 2016/12 Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη1
Abstract
Ευχαριστίες
 Εισαγωγή
 2 Βιβλιογραφική επισκόπηση
3 Αναπτυσσόμενη μεθοδολογία 23 3.1 Εισαγωγή 23 3.2 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA) 25 3.3 Εκτίμηση απωλειών 26 3.3.1 Πριν την κατάρρευση 26 3.3.2 Μετά την κατάρρευση ενός ορόφου 29
 4 Εφαρμογή μεθοδολογίας σε μεταλλικά κτήρια
5 Συμπεράσματα
6 Βιβλιογραφία

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΚ ΔΕ 2016/12

Αποτίμηση απωλειών σε ζωές από τη σεισμική καταπόνηση πολυώροφων μεταλλικών κτιρίων

Χατζηδάκη Α. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

Περίληψη

Προτείνεται απλοποιημένο προσομοίωμα για την εκτίμηση των συνεπειών τοπικής κατάρρευσης ορόφου στο σύνολο του κτιρίου με έμφαση στις απώλειες ζωών. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύστημα μαζών, μία για κάθε όροφο, και κατάλληλων ελατηρίων που προσομοιώνουν την αξονική αντοχή των υποστυλωμάτων κάθε ορόφου συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης. Από δυναμική ανάλυση του μοντέλου υπολογίζεται η δύναμη πρόσκρουσης του ορόφου που καταρρέει και εξετάζεται η πιθανότητα εμφάνισης προοδευτικής κατάρρευσης στο κτίριο. Τα αποτελέσματα ενσωματώνονται στο γενικότερο πιθανοτικό πλαίσιο εκτίμησης επιτελεστικότητας του PEER Center για την εκτίμηση των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές για δεδομένες τιμές σεισμικής έντασης.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε τέσσερα μεταλλικά κτίρια με περιμετρικά πλαίσια ανάληψης οριζοντίων δυνάμεων, για δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στην περίπτωση που η υπεραντοχή που διαθέτουν τα υποστυλώματα είναι μικρή, η κατάρρευση ενός ορόφου οδηγεί στην προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου, άρα και σε μεγάλο αριθμό τραυματισμών και θανάτων. Στην περίπτωση που η υπεραντοχή των υποστυλωμάτων είναι μεγαλύτερη, η κατάρρευση περιορίζεται σε λίγους ορόφους με αποτέλεσμα οι απώλειες να είναι σαφώς μικρότερες.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS FACULTY OF CIVIL ENGINEERING INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS EMK ΔE 2016/12

Assessment of casualties for multistory steel buildings subject to seismic loads

Chatzidaki A. (supervised by Vamvatsikos D.)

Abstract

A simplified model is proposed for the assessment of the consequences of a local story collapse to the entire building, with emphasis on fatalities. The model consists of a system of masses, one for each storey of the building, and appropriate springs that capture the axial capacity of the critical columns of each storey in terms of the axial deformation. Through dynamic analysis of the model, the impact force of the collapsing storey is calculated and the probability of occurrence of progressive collapse of the building is evaluated. The results are incorporated in the general performance assessment framework adopted by the PEER Center to assess the number of human casualties at any given level of seismic intensity.

The proposed method is applied in four steel perimeter moment resisting frame buildings. Results indicate that when the overstrength factor of the gravity columns is low, local collapse of one storey results in the progressive collapse of the building and conversely in a large number of injuries and casualties. In contrast, when the ovestrength factor is high, local collapse of one storey does not progress to other stories, thus human losses are reduced.

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Δημήτριο Βαμβάτσικο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Αρχικά για τη ανάθεση της παρούσας εργασίας και τη ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον, και συγχρόνως πρωτότυπο θέμα. Επιπρόσθετα, για τη διαρκή καθοδήγηση και το αμέριστο ενδιαφέρον που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Δεν υπήρξε στιγμή που να απευθύνθηκα σε αυτόν, έχοντας κάποια απορία ή ζητώντας τη συμβουλή του, και εκείνος να μην ήταν πρόθυμος να με βοηθήσει. Του είμαι πραγματικά ευγνώμων.

Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να πω τους φίλους και συμφοιτητές μου από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών για την κατανόηση και τη στήριξή τους το τελευταίο αυτό διάστημα εντατικής ενασχόλησής μου με τη διπλωματική εργασία και ολοκλήρωσης των σπουδών μου.

Τέλος, μου είναι αδύνατο να μη δώσω τις πιο θερμές ευχαριστίες στους γονείς μου, Στέλιο και Βούλα, και στην αδερφή μου, Νατάσα, για την αγάπη, την ηθική και υλική συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια και για τα εφόδια που μου έχουν προσφέρει ώστε να καταφέρνω να αντιμετωπίζω τις δυσκολίες που παρουσιάζονται. Τους ευχαριστώ πραγματικά για όλα.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η εκτίμηση των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές που προκαλούνται από τη σεισμική καταπόνηση των κτιρίων είναι ένα πεδίο το οποίο απασχολεί ιδιαίτερα την κοινότητα των μηχανικών. Η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων για το σκοπό αυτό μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά, μεταξύ άλλων, στον προγραμματισμό επιχειρήσεων έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση σεισμού καθώς και στην τροποποίηση και βελτίωση υπαρχόντων κανονισμών με σκοπό τη μείωση των απωλειών. Δεδομένου ότι τα ποσοστά των ανθρώπων που τραυματίζονται ή πεθαίνουν διαφέρουν σημαντικά από σεισμό σε σεισμό, αφού εξαρτώνται από την ώρα εμφάνισης του σεισμού, τα χαρακτηριστικά των καθίσταται δύσκολη και εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα.

Οι μελέτες των Coburn and Spence [4] και Marano et al. [14] υποδεικνύουν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των θανάτων και τραυματισμών κατά τους σεισμούς οφείλονται στη δομική αστοχία και κυρίως στην κατάρρευση των κατασκευών. Οι Marano et al. μελετώντας τα αποτελέσματα από σεισμούς που συνέβησαν από το Σεπτέμβρη του 1968 έως και τον Ιούλιο του 2008, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι 77.7% των συνολικών θανάτων οφειλόταν στην καταστροφή των κτιρίων. Εάν μάλιστα ληφθεί υπόψη και ο σεισμός στην Ηaiti το 2010, από τον οποίο προκλήθηκαν 316000 θάνατοι, τότε το προηγούμενο ποσοστό αυξάνεται στο 80% [20]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σεισμού στην Ελλάδα, στον οποίον το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών προκλήθηκε από την κατάρρευση ενός κτιρίου, αποτελεί ο σεισμός της Θεσσαλονίκης το 1978. Το 60% των θανάτων, δηλαδή οι 29 από το σύνολο των 49 νεκρών, οφειλόταν στην κατάρρευση οκταώροφης οικοδομής στην πλατεία Ιπποδρομίου [1]. Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαίο τα μοντέλα εκτίμησης των απωλειών να λαμβάνουν υπόψη το ενδεχόμενο κατάρρευσης της κατασκευής.

Τα τελευταία χρόνια, σημαντική έρευνα στο πεδίο αυτό έχει γίνει από το Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, διαμορφώνοντας ένα πλαίσιο αξιολόγησης της σεισμικής συμπεριφοράς και ποσοτικοποίησής της με κατάλληλους δείκτες, χρήσιμους στους αρμόδιους φορείς για τη λήψη αποφάσεων. Η μεθοδολογία του PEER ακολουθεί μία πιθανοτική προσέγγιση για την εκτίμηση των βλαβών στα κτίρια και των αντίστοιχων απωλειών που αυτές συνεπάγονται, βασιζόμενη στην σεισμική επικινδυνότητα και τη συνεπαγόμενη απόκριση του κτιρίου.

1.2 Στόχος εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου για την εκτίμηση των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές που προκύπτουν κατά τη σεισμική καταπόνηση πολυώροφων μεταλλικών κτιρίων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περίπτωση όπου ένας όροφος του κτιρίου χάνει την αντοχή του να φέρει τα κατακόρυφα φορτία και καταρρέει. Μέσω ενός απλοποιημένου μοντέλου μαζών – ελατηρίων εξετάζεται η επίδραση της τοπικής αυτής κατάρρευσης στο σύνολο της κατασκευής, ώστε να διαπιστωθεί εάν περιορίζεται στο συγκεκριμένο όροφο ή αντίθετα εάν επιφέρει την προοδευτική κατάρρευση ολόκληρης της κατασκευής.

1.3 Οργάνωση περιεχομένων

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται, μέσω βιβλιογραφικής επισκόπησης, το υπόβαθρο της αποτίμησης σεισμικών απωλειών καθώς και της εκτίμησης της πιθανότητας εμφάνισης προοδευτικής κατάρρευσης της κατασκευής. Παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία HAZUS για την εκτίμηση των θανάτων και τραυματισμών καθώς και η μέθοδος των Minami and Yamazaki για εξέταση της επίδρασης της τοπικής κατάρρευσης ορόφου στο σύνολο της κατασκευής. Στις μεθόδους αυτές βασίστηκε το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό του αριθμού των θανάτων και τραυματισμών που αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα κτίριο, για δεδομένη σεισμική ένταση. Περιγράφεται επίσης το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την εξέταση της προοδευτικής κατάρρευσης της κατασκευής, η οποία ενδέχεται να εμφανιστεί όταν ένας όροφος του κτιρίου καταρρεύσει.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε τέσσερα μεταλλικά κτίρια. Οι απώλειες υπολογίστηκαν για 44 καταγραφές εδαφικής κίνησης και εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων του κτιρίου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που πρόκυψαν κατά την ανάπτυξη και την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Μεθοδολογίες αποτίμησης σεισμικών απωλειών σε ζωές

Η εκτίμηση των απωλειών σε ζωές που προκύπτουν από τη σεισμική καταπόνηση των κτιρίων έχει αποτελέσει δημοφιλές πεδίο για πολλούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια, με τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί να ανήκουν σε τρείς κατηγορίες: τα εμπειρικά, τα αναλυτικά και τα υβριδικά ή ημι-εμπειρικά μοντέλα.

Στα εμπειρικά μοντέλα, αξιοποιούνται αποτελέσματα αναλύσεων από ιστορικά στοιχεία προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός των θανάτων που αναμένεται να προκληθούν λόγω της εδαφικής κίνησης. Οι Jaiswal et al. [12], έχοντας μελετήσει τα ποσοστά θανάτων σε πολλούς σεισμούς παγκοσμίως, ανέπτυξαν ένα εμπειρικό μοντέλο στο οποίο το ποσοστό θνησιμότητας καθορίζεται συναρτήσει της έντασης της εδαφικής κίνησης, όπως αυτή προσδιορίζεται με βάση την τροποποιημένη κλίμακα Mercalli. Το ποσοστό αυτό, ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με τις παραμέτρους που την καθορίζουν να διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί μόνο για χώρες στις οποίες έχουν εμφανιστεί περισσότεροι από τέσσερεις σεισμοί που οδήγησαν σε απώλειες ζωών. Οι Samardjieva and Bedal [18] βασιζόμενοι στα αποτελέσματα από αυσχετίζει την ένταση της εδαφικής κίνησης με τον εκτιμώμενο αριθμό θανάτων και τραυματισμών, λαμβάνοντας υπόψη και την πυκνότητα του πληθυσμού στις περιοχές που επηρεάζονται από το σεισμό.

Στα ημι-εμπειρικά μοντέλα υπολογίζεται το ποσοστό των ανθρώπων που αναμένεται να πεθάνουν εξαιτίας της κατάρρευσης διαφόρων τύπων κτιρίων για δεδομένη εδαφική κίνηση. Για την εκτίμηση της πιθανότητας κατάρρευσης, χρησιμοποιούνται ελάχιστες παράμετροι που αφορούν τα κτίρια με αποτέλεσμα οι αναπτυσσόμενες μεθοδολογίες να μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλες περιοχές. Οι So and Spence [19] ανέπτυξαν ένα ημιεμπειρικό μοντέλο στο οποίο τα κτίρια της περιοχής που εξετάζεται ταξινομούνται σε ομάδες τρωτότητας, ακολουθώντας τους νόμους που διέπουν τη διωνυμική κατανομή. Για κάθε ομάδα τρωτότητας, χρησιμοποιούνται εμπειρικά στοιχεία για τον προσδιορισμό της κατανομής του πληθυσμού εντός της ομάδας. Το ποσοστό των κτιρίων που αναμένεται να καταρρεύσει ή να υποστεί μεγάλη ζημιά για κάθε τιμή της εδαφικής κίνησης, με βάση την τροποποιημένη κλίμακα Mercalli, λαμβάνεται σύμφωνα με εμπειρικά στοιχεία. Για κάθε ομάδα κτιρίων τα ποσοστά θανάτων και τραυματισμών λαμβάνονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης LessLoss, όπως προσδιορίστηκαν από το Spence [20].

Τα αναλυτικά μοντέλα, τέλος, περιλαμβάνουν περισσότερο περίπλοκες διαδικασίες και στο πλαίσιο αυτών αξιοποιούνται παράμετροι που αφορούν τα χαρακτηριστικά κάθε κτιρίου. Στις οδηγίες που εκδόθηκαν το 2012 από το ATC (Applied Technology Council) σε συνεργασία με τη FEMA (Federal Emergency Management Agency) υπό τον τίτλο FEMA P-58 ([9], [10]), περιγράφεται μία μέθοδος υπολογισμού των απωλειών σε ζωές εξαιτίας της εδαφικής κίνησης για συγκεκριμένο κτίριο. Για δεδομένο αριθμό ανθρώπων που βρίσκονται σε αυτό την ώρα του σεισμού, οι απώλειες υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς μηχανισμούς κατάρρευσης καθώς και την πιθανότητα εμφάνισης καθενός από αυτούς. Για κάθε μηχανισμό, προσδιορίζεται η εκτιμώμενη επιφάνεια κάθε αναμένεται να καλυφθεί από ερείπια σε κάθε όροφο και το ποσοστό των ανθρώπων που βρίσκονται σε αυτή και ενδέχεται να τραυματιστούν ή να πεθάνουν. Αν μάλιστα ληφθούν υπόψη και τα μεμονωμένα στοιχεία μέσα στο κτίριο, η αστοχία των οποίων μπορεί να οδηγήσει σε πτώση συντριμμιών, τότε πρέπει να προσδιοριστεί και η επίπεδη επιφάνεια στην οποία αναμένεται να πέσουν αυτά. Με βάση το βάρος και τη θέση κάθε στοιχείου καθορίζεται και η πιθανότητα εμφάνισης τραυματισμών ή θανάτων από αυτό ([9], [10]).Οι παραπάνω πιθανότητες πρέπει να επιλέγονται με προσοχή, έχοντας λάβει υπόψη τους διάφορους τύπους ερειπίων που αναμένεται να προκύψουν, δεδομένου του τύπου κατασκευής του κάθε κτιρίου. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται ορισμένοι από τους μηχανισμούς κατάρρευσης που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα διώροφο κτίριο.



Σχήμα 2.1: Παραδείγματά μηχανισμών κατάρρευσης διώροφου κτιρίου, [9].

2.1.1 Μεθοδολογία Hazus

2.1.1.1 Γενικά

Η μεθοδολογία HAZUS αποσκοπεί στην ανάπτυξη μεθόδου για την εκτίμηση των ζημιών και απωλειών που προκαλούνται στις κατασκευές, για δεδομένο επίπεδο σεισμικής έντασης. Στη μέθοδο αυτή, τα κτίρια ταξινομούνται σε ομάδες με παρόμοια χαρακτηριστικά ζημιών/απωλειών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Οι ομάδες αυτές, βασίζονται στην κατηγοριοποίηση που εφαρμόζεται στο FEMA-178, [5], με επιπλέον υποδιαίρεσή τους ανάλογα και με το ύψος του κτιρίου, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή των ιδιοπεριόδων καθώς και άλλων χαρακτηριστικών που επηρεάζονται από αυτό.

2.1.1.2 Επίπεδα βλάβης

Η έκταση της ζημιάς που μπορεί να υποστεί ένα κτίριο κυμαίνεται από καθόλου βλάβη έως πλήρη κατάρρευση. Επειδή όμως δεν είναι πρακτικό το επίπεδο βλάβης να προσδιορίζεται ως μία συνεχής συνάρτηση της παραμόρφωσής του κτιρίου, χρησιμοποιούνται γενικευμένα εύρη τιμών για τον προσδιορισμό του. Έτσι, η έκταση και η σοβαρότητα της ζημιάς στα δομικά στοιχεία περιγράφεται από ένα από τα ακόλουθα πέντε εύρη επιπέδων βλάβης (Damage States ή DS): Καθόλου (DS0), Ελαφρές (DS1), Μέτριες (DS2), Εκτεταμένες (DS3) και Πλήρεις βλάβες (DS4). Η κατάρρευση θεωρείται υποστύνολο της πλήρους βλάβης. Έτσι για παράδειγμα, θεωρούμε ότι μία κατασκευή έχει υποστεί Μέτριες βλάβες εάν βρίσκεται μεταξύ των ορίων της Μέτριας και της Εκτεταμένης βλάβης. Η φυσική σημασία των επιπέδων βλάβης για κάθε ομάδα κτιρίων αναλύεται στο HAZUS MH 2.1, ([7], [8]).

			Ύψος			
α/α	Σήμανση	Περιγραφή	Εύ	οος	Τυπ	πκό
			Ονομα	Όροφοι	Όροφοι	Πόδια
1	W1	\pm υλο, ελαφρύς Φ/Ο		1-2	1	14
		(≤3,000 sq.ft.)				
2	WD	Δυλύ, Εμπορικό και		Ω^{1}	2	24
2	vv Z	Bιομηχανικο (>5,000 sa. Ft.)		Onu	2	24
		Μεταλλική				
3	S1L	κατασκευή.	Χαμηλά	1-3	2	24
4	S1M	πλαισιακό δομικό	Μεσαία	4-7	5	60
5	SIH	σύστημα	Υψηλά 8+ 13		13	156
6	501	Μεταλλική	Vaumlá	1.2	n	24
7	S2L S2M	κατασκευή,	Λυμηλά Μεσαία	1-5	2 5	24 60
8	S2M S2H	ενισχυμένο δομικό	Νιεουιά Συμαλά	4-7 8-	13	156
0	5211	σύστημα	τψηλά	07	1.5	150
9	\$3	Μεταλλική ελαφρά		Όλα	1	15
L	55	κατασκευή			1	10
		Μεταλλική				
10	S4L	κατασκευή με επί	Χαμηλά	1-3	2	24
11	S4M	τοπου συνδεόμενα	Μεσαία	4-7	5	60
12	S4H	τοιχωματα	Υψηλά	8+	13	156
		οπλισμένου				
13	\$51	Μεταλλική	Χαμηλά	1-3	2	24
14	S5M	κατασκευή με άοπλη	Μεσαία	4_7	5	60 60
15	S5H	τοιγοπλήοωση	Υψηλά	8+	13	156
16	C1L	Οπλισμένο	Χαμηλά	1-3	2	20
17	CIM	σκυρόδεμα	Μεσαία	4-7	5	50
18	C1H	πλαισιακό σύστημα	Υψηλά	8+	12	120
19	C2L	Οπλισμένο	Χαμηλά	1-3	2	20
20	C2M	σκυρόδεμα, μικτό	Μεσαία	4-7	5	50
21	C2H	σύστημα (τοιχία)	Υψηλά	8+	12	120
22	C3I	Οπλισμένο	Χαμηλά	13	13	20
$\frac{22}{23}$	C3M	σκυρόδεμα,	Μεσαία	1-3 4_7	1-5 4_7	50
23	СЗИ	πλαισιακό σύστημα	Υικηλά	+-/ 8+	4 -7 8+	120
	0.511	με τοιχοπληρώσεις	1 4 1 1 100		01	120
		Προκατασκευή από				
25	DGI	οπλισμένο				1.5
25	PCI	σκυροδεμα με επί		Ολα	1	15
		τοπου συνδεομενα				
26	PC 2I	Πορκατασκευή από	Χαμηλά	1 3	2	20
20	PC2M	οπλισμένα πλαίσια	Μεσαία	1-3 4_7	2 5	20 50
28	PC2H	σκυροδέματος	Υικηλά	+-/ 8+	12	120
20	1 0211	Οπλισμένη φέρουσα	τψιμ	01	12	120
29	RM1L	τοιγοποιία με ξύλινα	Χαμηλά	1-3	2	20
30	RM1M	ή μεταλλικά	Μεσαία	4+	5	50
		διαφράγματα			2	
		Οπλισμένη φέρουσα				
31	RM2L	τοιχοποιία με	Χαμηλά	1-3	2	20
32	RM2M	προκατασκευασμένα	Μεσαία	4-7	5	50
33	RM2H	διαφράγματα από	Υψηλά	8+	12	120
		σκυρόδεμα				
34	URML	Άοπλη φέρουσα	Χαμηλά	1-2	1	15
35	URMM	τοιχοποιία	Μεσαία	3+	3	35
36	MH	Λυόμενες κατοικίες		Όλα	1	10

Πίνακας 2.1: Δομικοί τύποι κτιρίων μεθοδολογίας Hazus

2.1.1.3 Καμπύλες τρωτότητας

Η αθροιστική πιθανότητα μία κατασκευή να βρίσκεται ή να έχει υπερβεί ένα επίπεδο βλάβης για δεδομένο μέτρο σεισμικής έντασης, υπολογίζεται από τις καμπύλες τρωτότητας (fragility curves). Οι καμπύλες αυτές, έχουν συνήθως μορφή λογαριθμοκανονικής αθροιστικής κατανομής, με διάμεσο θ, τυπική απόκλιση (διασπορά) β και περιγράφονται από την μαθηματική σχέση που φαίνεται στην Εξίσωση (2.1):

$$Fi(D) = \Phi\left(\frac{\ln(D/\theta_i)}{\beta_i}\right),\tag{2.1}$$

όπου $F_i(D)$ είναι η δεσμευμένη πιθανότητα η κατασκευή να βρεθεί στη στάθμη βλάβης iγια δεδομένο μέτρο απόκρισης D_i , Φ η τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση, θ_i η διάμεσος της πιθανοτικής κατανομής που αντιστοιχεί στο όριο κάθε ενός από τα επίπεδα βλάβης και β_i η λογαριθμική τυπική απόκλιση που σχετίζεται με αυτό. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα καμπυλών τρωτότητας για τα τέσσερα επίπεδα βλάβης της μεθοδολογίας.



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα καμπύλων τρωτότητας για στάθμες βλάβης μεθοδολογίας Hazus, [8].

Η δεσμευμένη πιθανότητα η κατασκευή να βρίσκεται ή να έχει υπερβεί ένα επίπεδο βλάβης, ds, δεδομένης της φασματικής μετατόπισης (ή άλλης παραμέτρου όπως η επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$P[ds|S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}}\ln\left(\frac{S_d}{\overline{S}_{d,ds}}\right)\right],\tag{2.2}$$

όπου $S_{d,ds}$ είναι η μέση τιμή της φασματικής μετατόπισης στην οποία το κτίριο φτάνει στο όριο του επιπέδου βλάβης ds, β_{ds} είναι η λογαριθμική τυπική απόκλιση του επιπέδου ds και Φ είναι η τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση. Το άθροισμα των επιμέρους πιθανοτήτων για κάθε επίπεδο βλάβης πρέπει πάντα να ισούται με 100%.

Οι καμπύλες τρωτότητας για το δομικό σύστημα των κτιρίων καθορίζονται από τη μέση τιμή της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης που αντιστοιχεί στο όριο κάθε επιπέδου βλάβης. Σε γενικές γραμμές, οι τιμές αυτές είναι διαφορετικές για κάθε ομάδα κτιρίων (συμπεριλαμβανομένου και του ύψους) και για κάθε επίπεδο αντισεισμικού σχεδιασμού, αφού τα κτίρια έχουν διαφορετική ποιότητα κατασκευής, με αποτέλεσμα να αναμένεται να συμπεριφερθούν διαφορετικά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Στη μεθοδολογία Hazus παρέχονται πληροφορίες για τρία επίπεδα αντισεισμικού σχεδιασμού, τα οποία αναφέρονται ως Υψηλός, Μέτριος και Χαμηλός σχεδιασμός.

Η συνολική αβεβαιότητα κάθε επιπέδου βλάβης, β_{ds}, καθορίζεται από το συνδυασμό των ακόλουθων τριών παραμέτρων:

- από την αβεβαιότητα που προκύπτει κατά τον υπολογισμό του ορίου πάνω από το οποίο η κατασκευή υπερβαίνει κάποιο επίπεδο βλάβης (β_{M(Sds)}=0.4 για κάθε επίπεδο βλάβης σε όλες τις ομάδες κτιρίων)
- από την αβεβαιότητα που υπάρχει κατά την εκτίμηση της απόκρισης κάθε ομάδας κτιρίων (β_c=0.30 για τα κτίρια που έχουν σχεδιαστεί πριν τον κανονισμό και 0.25 για τα υπόλοιπα), και
- από την αβεβαιότητα που αφορά στην απόκριση εξαιτίας της χωρικής μεταβλητότητας των απαιτήσεων που προκύπτουν από την εδαφική κίνηση, β_D.

Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους αυτές θεωρείται πως ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή.

2.1.1.4 Απώλειες σε ζωές

Στη μεθοδολογία Hazus υπολογίζονται μόνο οι τραυματισμοί και θάνατοι που οφείλονται στη δομική αστοχία των κτιρίων. Σε ορισμένες κατασκευές, η μη δομική αστοχία μπορεί να προηγηθεί της δομικής, ή ακόμα να προκληθούν θύματα από μη δομικά στοιχεία ή εξοπλισμό. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, κυρίαρχη αιτία απωλειών είναι η αστοχία του δομικού συστήματος, ιδίως όταν υπάρχει σημαντική πιθανότητα αυτό να βρεθεί στο στάδιο της πλήρους κατάρρευσης. Στη μεθοδολογία δεν υπολογίζονται τραυματισμοί και θάνατοι που προκαλούνται από πυρκαγιά, ηλεκτροπληξία, καρδιακές προσβολές και από την ελεύθερη πτώση υλικών καθώς, αυτές δεν είναι κυρίαρχες αιτίες θυμάτων κατά τους σεισμούς.

Η εκτίμηση των απωλειών γίνεται για τέσσερεις ομάδες σοβαρότητας ατυχημάτων. Παρόλο που υπάρχουν και άλλες, περισσότερο λεπτομερείς κατηγοριοποιήσεις των θυμάτων, η συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί μία μέση λύση που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ιατρικής κοινότητας, προκειμένου να προγραμματιστεί η απόκρισή της σε περίπτωση σεισμού, λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα των μηχανικών να παρέχουν τα απαιτούμενα στοιχεία. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι κατηγορίες σοβαρότητας των θυμάτων που ορίζονται στη μέθοδο HAZUS.

Κατηγορία Σοβαρότητας	Περιγραφή
1	Τραυματισμοί που απαιτούν ιατρική περίθαλψη, χωρίς τη νοσηλεία σε νοσοκομείο (θεραπεία και απομάκρυνση)
2	Τραυματισμοί που απαιτούν ιατροφαρμακευτική περίθαλψη και νοσηλεία σε νοσοκομείο αλλά χωρίς να θεωρούνται επικίνδυνοι για τη ζωή
3	Θύματα που εγκλωβίζονται και απαιτούν άμεση διάσωση ώστε να αποφύγουν το θάνατο
4	Άμεσος θάνατος

Π_{i}	Ζαπηγιορίος	σοβαρόση	σας Ουμάτων	ອອງອາເວັນ	Dosol original	\mathbf{U}_{0}
$11100KU \leq 2.2.1$		oopapori		3μ 00 μ 0130		nazus. Tot.

Το διάγραμμα ροής για την εκτίμηση απωλειών σε ζωές στο εσωτερικό ενός κτιρίου, για δεδομένο σεισμικό σενάριο, παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 2.3. Χάριν

απλότητας απεικονίζονται μόνο οι θάνατοι (κατηγορία σοβαρότητας 4). Οι υπόλοιπες κατηγορίες υπολογίζονται με ανάλογο τρόπο. Εάν θεωρηθούν γνωστές οι επιμέρους τιμές, τότε η πιθανότητα να πεθάνει ένας κάτοικος (*P*_{killed}) υπολογίζεται από την σχέση (2.3):

$$P_{killed} = P_A * P_E + P_B * P_F + P_C * P_G + P_D * (P_H * P_J + P_I * P_K),$$
(2.3)

όπου P_A , P_B , P_C και P_D είναι οι πιθανότητες το κτίριο να βρεθεί στο επίπεδο των Χαμηλών, Μέτριων, Εκτεταμένων και Πλήρων βλαβών, αντίστοιχα. P_H και P_I είναι οι πιθανότητες το κτίριο να μην καταρρεύσει και να καταρρεύσει, αντίστοιχα, δεδομένου ότι βρίσκεται στη στάθμη των Πλήρων βλαβών και P_E , P_F , P_G , P_J και P_K οι πιθανότητες οι άνθρωποι να πεθάνουν, δεδομένου ότι έχει εμφανιστεί το αντίστοιχο επίπεδο βλάβης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας Hazus για την εκτίμηση των θανάτων από το σεισμό.

Εάν θεωρήσουμε ότι ισχύουν οι σχέσεις (2.4) και (2.5), τότε η Εξίσωση (2.3) τροποποιείται όπως φαίνεται στη σχέση (2.6).

$$P_{killed} | collapse = P_D * P_I * P_K, \qquad (2.4)$$

$$P_{killed} | no - collapse = P_A * P_E + P_B * P_F + P_C * P_G + P_D * P_H * P_J,$$
(2.5)

$$P_{killed} = P_{killed} \left| collapse + P_{killed} \right| no - collapse, \tag{2.6}$$

όπου *P_{killed}/collapse* αφορά τους θανάτους που σχετίζονται με την κατάρρευση του κτιρίου, και *P_{killed}/no-collapse* αφορά τους θανάτους που προκαλούνται από το σεισμό, χωρίς όμως το κτίριο να έχει καταρρεύσει. Τα δεδομένα από παλαιότερους σεισμούς υποδεικνύουν ότι το όριο πάνω από το οποίο οι απώλειες περιγράφονται κυρίως από τον πρώτο όρο της εξίσωσης (2.6) διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή.

Ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων (EN_{occupants killed}) προκύπτει από τον αριθμό των ανθρώπων που βρίσκονται στο κτίριο κατά τη διάρκεια του σεισμού (N_{occupants}) και από την πιθανότητα ένας άνθρωπος να πεθάνει (P_{killed}), όπως φαίνεται στην Εξίσωση (2.7).

$$EN_{occupants killed} = N_{occupants} * P_{killed}, \qquad (2.7)$$

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα περισσότερο λεπτομερές διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των θυμάτων που βρίσκονται στο εσωτερικό των κτιρίων κατά τη σεισμική τους καταπόνηση. Οι επιμέρους πιθανότητες παραλείπονται προκειμένου το διάγραμμα να είναι περισσότερο κατανοητό. Το σύμβολο «<» υποδεικνύει ότι το επόμενο βήμα του συγκεκριμένου κόμβου είναι ίδιο με αυτό των άλλων κόμβων της ίδιας κατηγορίας, με τις αντίστοιχες πιθανότητες προφανώς να διαφέρουν.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής θυμάτων εντός των κτιρίων μεθοδολογίας Hazus.

Οι επιμέρους τιμές των ποσοστών απωλειών ανάλογα με την κατηγορία σοβαρότητας και το επίπεδο αντισεισμικού σχεδιασμού δίνονται στο Hazus, [8]. Στους Πίνακες 2.3 έως και 2.7 παρουσιάζονται τα ποσοστά αυτά για κάθε επίπεδο βλάβης. Τονίζεται ότι μόνο ένα ποσοστό της επιφάνειας του κτιρίου που βρίσκεται στο στάδιο των Πλήρων βλαβών θεωρείται πως έχει καταρρεύσει. Στον Πίνακα 2.8 φαίνεται το εκτιμώμενο αυτό ποσοστό, για όλες της κατηγορίες των κτιρίων, δεδομένης της Πλήρους βλάβης.

Τα ποσοστά απωλειών δεδομένης της κατάρρευσης, $P[S_i/COL]$, εφαρμόζονται μόνο στο τμήμα του κτιρίου που θεωρείται πως έχει καταρρεύσει. Στις περισσότερες περιπτώσεις, εκτιμάται ότι μόνο 10 στους 100 ανθρώπους που βρίσκονται στο τμήμα του κτιρίου που έχει καταρρεύσει, θα πεθάνουν ακαριαία (κατηγορία σοβαρότητας 4) και άλλοι 5 στους 100 θα παγιδευτούν και θα χρειάζονται διάσωση (κατηγορία σοβαρότητας 3). Οι τιμές αυτές βασίζονται στην εκτίμηση ότι ακόμα και αν το κτίριο καταρρεύσει, η πλειοψηφία των ανθρώπων θα μπορέσει να βγει έξω από αυτό. Στις περιπτώσεις που η αστοχία αναμένεται να οδηγήσει σε ερείπια μεγάλου βάρους (για παράδειγμα στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος), τα ποσοστά απωλειών για τις κατηγορίες σοβαρότητας 3 και 4 θα πρέπει να τροποποιηθούν με ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 2, για περιπτώσεις τοπικής κατάρρευσης, έως 5 για την περίπτωση πλήρους κατάρρευσης όλων των ορόφων (pancake collapse). Τονίζεται ότι το άθροισμα των ποσοστών για όλες τις κατηγορίες σοβαρότητας – λαμβάνοντας υπόψη και το ποσοστό αυτών που δεν αναμένεται να πάθουν κάτι – πρέπει να ισούται με 100%.

		Κατηγορία σοβαρότητας θυμάτων					
<u></u>	Ομάδα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα		
a/a	Κτιρίων	1	2	3	4		
		(%)	(%)	(%)	(%)		
1	W1	0.05	0	0	0		
2	W2	0.05	0	0	0		
3	S1L	0.05	0	0	0		
4	S1M	0.05	0	0	0		
5	S1H	0.05	0	0	0		
6	S2L	0.05	0	0	0		
7	S2M	0.05	0	0	0		
8	S2H	0.05	0	0	0		
9	S 3	0.05	0	0	0		
10	S4L	0.05	0	0	0		
11	S4M	0.05	0	0	0		
12	S4H	0.05	0	0	0		
13	S5L	0.05	0	0	0		
14	S5M	0.05	0	0	0		
15	S5H	0.05	0	0	0		
16	C1L	0.05	0	0	0		
17	C1M	0.05	0	0	0		
18	C1H	0.05	0	0	0		
19	C2L	0.05	0	0	0		
20	C2M	0.05	0	0	0		
21	C2H	0.05	0	0	0		
22	C3L	0.05	0	0	0		
23	C3M	0.05	0	0	0		
24	C3H	0.05	0	0	0		
25	PC1	0.05	0	0	0		
26	PC2L	0.05	0	0	0		
27	PC2M	0.05	0	0	0		
28	PC2H	0.05	0	0	0		
29	RM1L	0.05	0	0	0		
30	RM1H	0.05	0	0	0		
31	RM2L	0.05	0	0	0		
32	RM2M	0.05	0	0	0		
33	RM2H	0.05	0	0	0		
34	URML	0.05	0	0	0		
35	URMM	0.05	0	0	0		
36	MH	0.05	0	0	0		

Πίνακας 2.3: Ποσοστό θυμάτων στο εσωτερικό των κτιρίων για το επίπεδο Χαμηλών βλαβών.

a/a	Ομάδα	Κατηγορία σοβαρότητας θυμάτων				
	Κτιρίων	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	
		1	2	3	4	
		(%)	(%)	(%)	(%)	
1	W1	0.25	0.030	0	0	
2	W2	0.20	0.025	0	0	
3	S1L	0.20	0.025	0	0	
4	S1M	0.20	0.025	0	0	
5	S1H	0.20	0.025	0	0	
6	S2L	0.20	0.025	0	0	
7	S2M	0.20	0.025	0	0	
8	S2H	0.20	0.025	0	0	
9	S 3	0.20	0.025	0	0	
10	S4L	0.25	0.030	0	0	
11	S4M	0.25	0.030	0	0	
12	S4H	0.25	0.030	0	0	
13	S5L	0.20	0.025	0	0	
14	S5M	0.20	0.025	0	0	
15	S5H	0.20	0.025	0	0	
16	C1L	0.25	0.030	0	0	
17	C1M	0.25	0.030	0	0	
18	C1H	0.25	0.030	0	0	
19	C2L	0.25	0.030	0	0	
20	C2M	0.25	0.030	0	0	
21	C2H	0.25	0.030	0	0	
22	C3L	0.20	0.025	0	0	
23	C3M	0.20	0.025	0	0	
24	C3H	0.20	0.025	0	0	
25	PC1	0.25	0.030	0	0	
26	PC2L	0.25	0.030	0	0	
27	PC2M	0.25	0.030	0	0	
28	PC2H	0.25	0.030	0	0	
29	RM1L	0.20	0.025	0	0	
30	RM1H	0.20	0.025	0	0	
31	RM2L	0.20	0.025	0	0	
32	RM2M	0.20	0.025	0	0	
33	RM2H	0.20	0.025	0	0	
34	URML	0.35	0.400	0.001	0.001	
35	URMM	0.35	0.400	0.001	0.001	
36	MH	0.25	0.030	0	0	

Πίνακας 2.4: Ποσοστό θυμάτων στο εσωτερικό των κτιρίων για το επίπεδο των Μέτριων βλαβών.

α/α	Ομάδα	Κατηγορία σοβαρότητας θυμάτων				
	Κτιρίων	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	
		1	2	3	4	
		(%)	(%)	(%)	(%)	
1	W1	1	0.1	0.001	0.001	
2	W2	1	0.1	0.001	0.001	
3	S1L	1	0.1	0.001	0.001	
4	S1M	1	0.1	0.001	0.001	
5	S1H	1	0.1	0.001	0.001	
6	S2L	1	0.1	0.001	0.001	
7	S2M	1	0.1	0.001	0.001	
8	S2H	1	0.1	0.001	0.001	
9	S 3	1	0.1	0.001	0.001	
10	S4L	1	0.1	0.001	0.001	
11	S4M	1	0.1	0.001	0.001	
12	S4H	1	0.1	0.001	0.001	
13	S5L	1	0.1	0.001	0.001	
14	S5M	1	0.1	0.001	0.001	
15	S5H	1	0.1	0.001	0.001	
16	C1L	1	0.1	0.001	0.001	
17	C1M	1	0.1	0.001	0.001	
18	C1H	1	0.1	0.001	0.001	
19	C2L	1	0.1	0.001	0.001	
20	C2M	1	0.1	0.001	0.001	
21	C2H	1	0.1	0.001	0.001	
22	C3L	1	0.1	0.001	0.001	
23	C3M	1	0.1	0.001	0.001	
24	C3H	1	0.1	0.001	0.001	
25	PC1	1	0.1	0.001	0.001	
26	PC2L	1	0.1	0.001	0.001	
27	PC2M	1	0.1	0.001	0.001	
28	PC2H	1	0.1	0.001	0.001	
29	RM1L	1	0.1	0.001	0.001	
30	RM1H	1	0.1	0.001	0.001	
31	RM2L	1	0.1	0.001	0.001	
32	RM2M	1	0.1	0.001	0.001	
33	RM2H	1	0.1	0.001	0.001	
34	URML	1	0.2	0.002	0.002	
35	URMM	1	0.2	0.002	0.002	
36	MH	1	0.1	0.001	0.001	

Πίνακας 2.5: Ποσοστό θυμάτων στο εσωτερικό των κτιρίων για το επίπεδο των Εκτεταμένων βλαβών.

	α/α	Ομάδα	Κατηγορία σοβαρότητας θυμάτων			
		Κτιρίων	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα
			1	2	3	4
			(%)	(%)	(%)	(%)
ſ	1	W1	5	1	0.01	0.01
	2	W2	5	1	0.01	0.01
	3	S1L	5	1	0.01	0.01
	4	S1M	5	1	0.01	0.01
	5	S1H	5	1	0.01	0.01
	6	S2L	5	1	0.01	0.01
	7	S2M	5	1	0.01	0.01
	8	S2H	5	1	0.01	0.01
	9	S 3	5	1	0.01	0.01
	10	S4L	5	1	0.01	0.01
	11	S4M	5	1	0.01	0.01
	12	S4H	5	1	0.01	0.01
	13	S5L	5	1	0.01	0.01
	14	S5M	5	1	0.01	0.01
	15	S5H	5	1	0.01	0.01
	16	C1L	5	1	0.01	0.01
	17	C1M	5	1	0.01	0.01
	18	C1H	5	1	0.01	0.01
	19	C2L	5	1	0.01	0.01
	20	C2M	5	1	0.01	0.01
	21	C2H	5	1	0.01	0.01
	22	C3L	5	1	0.01	0.01
	23	C3M	5	1	0.01	0.01
	24	C3H	5	1	0.01	0.01
	25	PC1	5	1	0.01	0.01
	26	PC2L	5	1	0.01	0.01
	27	PC2M	5	1	0.01	0.01
	28	PC2H	5	1	0.01	0.01
	29	RM1L	5	1	0.01	0.01
	30	RM1H	5	1	0.01	0.01
	31	RM2L	5	1	0.01	0.01
	32	RM2M	5	1	0.01	0.01
	33	RM2H	5	1	0.01	0.01
	34	URML	5	2	0.02	0.02
	35	URMM	5	2	0.02	0.02
	36	MH	5	1	0.01	0.01

Πίνακας 2.6: Ποσοστό θυμάτων στο εσωτερικό των κτιρίων για το επίπεδο των Πλήρων βλαβών (Χωρίς κατάρρευση).

α/α	Ομάδα	Κατηγορία σοβαρότητας θυμάτων				
	Κτιρίων	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	Σοβαρότητα	
		1	2	3	4	
		(%)	(%)	(%)	(%)	
1	W1	40	20	3	5	
2	W2	40	20	5	10	
3	S1L	40	20	5	10	
4	S1M	40	20	5	10	
5	S1H	40	20	5	10	
6	S2L	40	20	5	10	
7	S2M	40	20	5	10	
8	S2H	40	20	5	10	
9	S 3	40	20	3	5	
10	S4L	40	20	5	10	
11	S4M	40	20	5	10	
12	S4H	40	20	5	10	
13	S5L	40	20	5	10	
14	S5M	40	20	5	10	
15	S5H	40	20	5	10	
16	C1L	40	20	5	10	
17	C1M	40	20	5	10	
18	C1H	40	20	5	10	
19	C2L	40	20	5	10	
20	C2M	40	20	5	10	
21	C2H	40	20	5	10	
22	C3L	40	20	5	10	
23	C3M	40	20	5	10	
24	C3H	40	20	5	10	
25	PC1	40	20	5	10	
26	PC2L	40	20	5	10	
27	PC2M	40	20	5	10	
28	PC2H	40	20	5	10	
29	RM1L	40	20	5	10	
30	RM1H	40	20	5	10	
31	RM2L	40	20	5	10	
32	RM2M	40	20	5	10	
33	RM2H	40	20	5	10	
34	URML	40	20	5	10	
35	URMM	40	20	5	10	
36	MH	40	20	3	5	

Πίνακας 2.7: Ποσοστό θυμάτων στο εσωτερικό των κτιρίων για το επίπεδο των Πλήρων βλαβών (Με κατάρρευση).

	Ουάδα	Πιθανότητα κατάρρευσης
α/α	Ομασα Κπισίων	δεδομένης της Πλήρους
	κιριων	βλάβης
1	W1	3.0%
2	W2	3.0%
3	S1L	8.0%
4	S1M	5.0%
5	S1H	3.0%
6	S2L	8.0%
7	S2M	5.0%
8	S2H	3.0%
9	S 3	3.0%
10	S4L	8.0%
11	S4M	5.0%
12	S4H	3.0%
13	S5L	8.0%
14	S5M	5.0%
15	S5H	3.0%
16	C1L	13.0%
17	C1M	10.0%
18	C1H	5.0%
19	C2L	13.0%
20	C2M	10.0%
21	C2H	5.0%
22	C3L	15.0%
23	C3M	13.0%
24	C3H	10.0%
25	PC1	15.0%
26	PC2L	15.0%
27	PC2M	13.0%
28	PC2H	10.0%
29	RM1L	13.0%
30	RM1H	10.0%
31	RM2L	13.0%
32	RM2M	10.0%
33	RM2H	5.0%
34	URML	15.0%
35	URMM	15.0%
36	MH	3.0%

Πίνακας 2.8: Ποσοστά κατάρρευσης για το στάδιο των Πλήρων βλαβών.

Η μεθοδολογία αυτή, παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την εκτίμηση των απωλειών σε μεγάλες περιοχές μελέτης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα νούμερα που προτείνονται έχουν προκύψει από την ανάλυση στατιστικών στοιχείων που αφορούν μεγάλες περιοχές. Η χρήση της μεθόδου, χωρίς τροποποίηση, σε μεμονωμένα κτίρια δεν συνίσταται καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση των απωλειών.

2.2 Επίδραση τοπικής κατάρρευσης ορόφου στο σύνολο της κατασκευής

Η προοδευτική κατάρρευση των κτιρίων (progressive collapse) αφορά την εμφάνιση δυσανάλογα μεγάλης αστοχίας, η οποία προκαλείται από μιας μικρής κλίμακας αρχική ζημιά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πρόσκρουση αεροπλάνου στο World Trade

Center το Σεπτέμβρη του 2011, που είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη κατάρρευση του κτιρίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5. Το γεγονός αυτό στάθηκε αφορμή ώστε να αρχίσει εντατική έρευνα αναφορικά με το θέμα της προοδευτικής κατάρρευσης των κατασκευών.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση κατάρρευσης Wall Trade Center [11].

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά πολυώροφων κτιρίων μετά την κατακόρυφη κατάρρευση ενός ορόφου. Όταν ένας όροφος χάνει την ικανότητά του να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, το τμήμα της κατασκευής που βρίσκεται πάνω από αυτόν πέφτει και συγκρούεται με την πλάκα του ορόφου. Η κατάρρευση είτε θα επεκταθεί ως ένα βαθμό και μετά θα σταματήσει, είτε θα οδηγήσει στην κατάρρευση όλων των ορόφων του κτιρίου (progressive pancake collapse). Δεδομένα από σεισμούς αποδεικνύουν ότι και οι δύο περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.6 και 2.7.



Σχήμα 2.6: Τοπική κατάρρευση ορόφου μεταλλικού κτιρίου (City Hall) από το σεισμό του Kobe το 1995, [20].



Σχήμα 2.7: Πλήρης κατάρρευση (pancake collapse) τριώροφου σχολείου στην Haiti, από το σεισμό 12 Ιανουαρίου 2010, [https://toursbymawiyah.wordpress.com/global-prayer-vigil-candlight-memorial-for-the-people-of-ayiti-peace-pole/].

Οι Vlassis et all [26] εξέτασαν την επίδραση της κατάρρευσης ενός ορόφου στους από κάτω του. Η ικανότητά τους να αντέξουν την πρόσκρουση θεωρήθηκε ότι εξαρτάται από το ποσοστό της κινητικής ενέργειας που μεταφέρεται κατά την κρούση. Η μεθοδολογία που ανέπτυξαν βασίζεται στη σύγκριση των απαιτήσεων πλαστιμότητας που προκύπτουν μετά την κρούση, με την πλαστιμότητα που διαθέτουν οι κόμβοι των ορόφων. Η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου σχετίζεται άμεσα με την ακρίβεια της εκτίμησης του ποσοστού της κινητικής ενέργειας που μεταφέρεται κατά την κρούση των ορόφων.

Οι Yuan W. and Tan K.H. [27] αντιμετώπισαν την κατασκευή ως ένα πλαίσιο που αποτελείται από τα ακόλουθα τρία στοιχεία: κολώνες, δοκούς και συνδέσεις δοκώνυποστυλωμάτων. Προκειμένου να μελετηθεί η προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου, η κατασκευή προσομοιώθηκε με ένα σύστημα μάζας-απόσβεσης-ελατηρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, όπου m, c και k συμβολίζουν τη μάζα, την απόσβεση και τη δυσκαμψία, αντίστοιχα, τα νούμερα 1, 2 και 3 αντιστοιχούν στις συνδέσεις στύλου-στύλου, δοκούστύλου και δοκού-δοκού, αντίστοιχα, και τα νούμερα μέσα στις παρενθέσεις υποδεικνύουν τον όροφο. Επειδή η δύναμη επαφής κατά την κρούση είναι αρκετά δύσκολο να εκτιμηθεί, αφού εξαρτάται από τη διάρκεια της κρούσης και από πολλούς άλλους παράγοντες, στο συγκεκριμένο μοντέλο υιοθετήθηκαν ορισμένες παραδοχές αναφορικά με την απόσβεση και τη δυσκαμψία του ισοδύναμου στατικού συστήματος ώστε να προσομοιωθεί η κρούση.



Σχήμα 2.8: (a) Τυπικό πλαίσιο πολυώροφου κτιρίου (β) Προσομοίωση πλαισίου με σύστημα μάζας-απόσβεσης-δυσκαμψίας

2.3 Μεθοδολογία Minami et al

Οι Minami S. and Yamazaki S. [16] προκειμένου να μελετήσουν την προοδευτική κατάρρευση των κτιρίων ανέπτυξαν ένα μοντέλο που αποτελείται από μία μάζα και ένα ελατήριο για κάθε όροφο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Η σχέση φορτίου-παραμόρφωσης των ελατηρίων προσδιορίζεται σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την κεντρική φόρτιση κυβωτιοειδών μεταλλικών διατομών Minami, [15] και φαίνονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.9: Προσομοίωση κτιρίου με σύστημα μαζών-ελατηρίων. (α) Πριν την κατάρρευση. (β) μετά την κατάρρευση του ορόφου f.

Η ενέργεια που απορροφάται από ένα υποστύλωμα εξαιτίας της κατακόρυφης μετατόπισης του υπό κατάρρευση ορόφου j, προκύπτει από την Εξίσωση (2.8). Εάν M είναι η συνολική μάζα του τμήματος της κατασκευής που βρίσκεται πάνω από τον όροφο αυτό, η ενέργεια που μπορεί να προσφερθεί δυνητικά κατά τη μετατόπιση του, x, είναι $M \cdot g \cdot x$ όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η ενέργεια που απορροφάται εξαιτίας της μετατόπισης του ορόφου, $E_r(x)$ προκύπτει από την Εξίσωση (2.9).

$$E(x) = \int_{0}^{x} P(x) dx,$$
 (2.8)

$$E_r(x) = E(x) - M \cdot g \cdot x, \qquad (2.9)$$

Για $x = H_o$ από την Εξίσωση (2.9) υπολογίζεται η τιμή του λόγου της απορροφόμενης ενέργειας όπως φαίνεται στην Εξίσωση (2.10). Εάν P_a είναι η μέση τιμή της δύναμης του υποστυλώματος για $0 \le x \le H_o$ τότε εύκολα προκύπτει η Εξίσωση (2.11).

$$a = \frac{E_{ro}}{M \cdot g \cdot H},\tag{2.10}$$

$$a = \frac{P_a}{M \cdot g} - 1, \tag{2.11}$$

Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι η παράμετρος α αποτελεί τη βασική παράμετρο ευστάθειας του συστήματος: εάν α > 1 τότε η ενέργεια που απελευθερώνεται εξαιτίας της πτώσης του υπό κατάρρευση ορόφου μπορεί να απορροφηθεί από τους υπόλοιπους και η

κατάρρευση να μην επεκταθεί. Στην περίπτωση, όμως, που $\alpha < 0$, η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι μεγάλη, οπότε υπάρχει σημαντική πιθανότητα να συμβεί προοδευτική κατάρρευση.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ανέπτυξαν, αρχικά προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων όπως φαίνεται Σχήμα 2.10 (α), και οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται θεωρώντας τη βαρύτητα ως την εξωτερική δύναμη. Στο σύστημα εισάγεται ιξώδης απόσβεση και αυτό φτάνει σε μία στατική κατάσταση ισορροπίας. Αμέσως μετά, το ελατήριο που αντιστοιχεί στον όροφο που καταρρέει αντικαθίσταται από αυτό του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα 2.10 (β) και η απόσβεση αφαιρείται. Η σύγκρουση μεταξύ των σωμάτων, στην πραγματικότητα είναι μεταξύ τέλειας πλαστικής και τέλειας ελαστικής. Στην περίπτωση της ανελαστικής κρούσης, το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται προς την κινητική ενέργεια αμέσως πριν την κρούση είναι σχετικά μικρό. Έτσι, στο συγκεκριμένο μοντέλο η κρούση θεωρείται πλήρως ελαστική υπέρ της ασφαλείας.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10 (α), στην περιοχή που βρίσκεται μεταξύ των σημείων Α και Β, τα ελατήρια αποφορτίζονται ελαστικά στην περίπτωση αρνητικής μετατόπισης. Όταν ξεπεραστεί το σημείο Β, η δύναμη και η παραμόρφωση κινούνται πάνω στην ημιευθεία CBL και στο ευθύγραμμο τμήμα OC. Από εκεί και έπειτα, το ελατήριο δεν απορροφά άλλη ενέργεια παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.10: Χαρακτηριστικά υστερητικής συμπεριφοράς ελατηρίων. (α) Ελατήριο ορόφου που δεν έχει καταρρεύσει. (β) Ελατήριο υπό κατάρρευση ορόφου.

3 Αναπτυσσόμενη μεθοδολογία

3.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναπτύσσεται η προτεινόμενη μεθοδολογία με βάση την οποία υπολογίζονται οι απώλειες που αναμένεται να προκληθούν σε ένα κτίριο για δεδομένη εδαφική κίνηση. Ουσιαστικά αξιοποιούνται οι προτεινόμενες τιμές για τα επίπεδα βλάβης και τα ποσοστά απωλειών της μεθόδου Hazus, οι οποίες ωστόσο εφαρμόζονται σε επίπεδο ορόφου. Το διάγραμμα ροής της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Αρχικά, πραγματοποιείται ικανοτική δυναμική ανάλυση του κτιρίου από την οποία προκύπτει η τιμή της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης κάθε ορόφου. Αξιοποιώντας τις τιμές που προτείνονται από τη μέθοδο HAZUS για τις καμπύλες ζημιάς καθώς και τα ποσοστά απωλειών κάθε επιπέδου βλάβης, υπολογίζεται η πιθανότητα κάθε όροφος να βρίσκεται σε κάθε μία από τις στάθμες βλάβης καθώς και οι απώλειες που αναμένεται να προκληθούν. Στην περίπτωση που ένας όροφος καταρρεύσει, μέσω ενός συστήματος μαζών και ελατηρίων εξετάζεται το ενδεγόμενο κατάρρευσης και των υπολοίπων ορόφων και υπολογίζονται οι απώλειες που θα προκύψουν. Οι επιμέρους τιμές κάθε ορόφου, αθροίζονται ώστε τελικά να προκύψει ο αριθμός των νεκρών και τραυματιών που εκτιμάται ότι θα εμφανιστούν στο εσωτερικό του κτιρίου για τη δεδομένη εδαφική κίνηση. Το σύμβολο «<» υποδεικνύει ότι το επόμενο βήμα του συγκεκριμένου κόμβου είναι ίδιο με αυτό των άλλων κόμβων της ίδιας κατηγορίας, με τις αντίστοιχες πιθανότητες προφανώς να διαφέρουν.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Οι καμπύλες ζημιάς σε επίπεδο ορόφου (damage curves) δίνουν για κάθε τιμή της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης του ορόφου, την πιθανότητα αυτός υπερβεί κάθε ένα από τα επίπεδα βλάβης. Οι καμπύλες αυτές έχουν τη μορφή λογαριθμοκανονικής αθροιστικής κατανομής με διάμεσο θ, τυπική απόκλιση (διασπορά) β και περιγράφονται από την μαθηματική σχέση που φαίνεται στην Εξίσωση (2.1):

$$Fi(\theta) = \Phi\left(\frac{\ln(D/\theta_i)}{\beta_i}\right),\tag{3.1}$$

όπου $F_i(D)$ είναι η δεσμευμένη πιθανότητα ο όροφος να υπερβεί τη στάθμη βλάβης *i* για δεδομένη τιμή της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης θ , Φ η τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση, θ_i η διάμεσος της πιθανοτικής κατανομής που αντιστοιχεί στο όριο κάθε ενός από τα επίπεδα βλάβης και β_i η λογαριθμική τυπική απόκλιση που σχετίζεται με αυτό. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα καμπυλών βλάβης σε επίπεδο ορόφου για τα τέσσερα επίπεδα βλάβης της μεθοδολογίας.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα καμπύλων βλάβης σε επίπεδο ορόφου.

Προτεινόμενη Μεθοδολογία	Κατηγορία Σοβαρότητας Hazus	Περιγραφή
	1	Τραυματισμοί που απαιτούν ιατρική περίθαλψη, χωρίς τη νοσηλεία σε νοσοκομείο (θεραπεία και απομάκρυνση)
Τραυματισμοί	2	Τραυματισμοί που απαιτούν ιατροφαρμακευτική περίθαλψη και νοσηλεία σε νοσοκομείο αλλά χωρίς να θεωρούνται επικίνδυνοι για τη ζωή
Θάνατοι	3	Θύματα που εγκλωβίζονται και απαιτούν άμεση διάσωση ώστε να αποφύγουν το θάνατο
	4	Άμεσος θάνατος

Πίνακας 3.1: Αντισ	τοιχία κατηγορ	ιών σοβαρότι	ητας Hazus και	προτεινόμενης	μεθοδολογίας.
5	<i>1</i> 0 <i>1</i> 1 <i>1</i>	, ,		1 1 12	

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, οι απώλειες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τους τραυματισμούς και τους θανάτους. Οι τραυματισμοί αντιστοιχούν στις κατηγορίες σοβαρότητας 1 και 2 της μεθόδου HAZUS και περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες απαιτείται ιατρική περίθαλψη των τραυματιών ανεξάρτητα από το εάν αυτοί θα παραμείνουν στο νοσοκομείο ή όχι. Οι θάνατοι αντιστοιχούν στις κατηγορίες σοβαρότητας 3 και 4 και σε αυτούς λαμβάνονται υπόψη και τα θύματα που εγκλωβίζονται στα ερείπια και απαιτείται η άμεση διάσωσή τους. Αυτό συμβαίνει επειδή θεωρείται ότι σε περίπτωση μεγάλου σεισμικού γεγονότος δεν θα προλάβουν να απεγκλωβιστούν πολλοί

εξ' αυτών. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η αντιστοιχία των κατηγοριών σοβαρότητας της μεθόδου HAZUS με τις κατηγορίες που εξετάζονται στην παρούσα μεθοδολογία. Τα ποσοστά απωλειών που χρησιμοποιούνται προκύπτουν αθροίζοντας τις επιμέρους τιμές που προτείνονται από τη μέθοδο Hazus, για τις αντίστοιχες κατηγορίες σοβαρότητας.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η εγγενής τυχαιότητα που υπάρχει στην εδαφική κίνηση, συνίσταται η παρούσα μεθοδολογία να εφαρμόζεται για περισσότερες από μία καταγραφές

3.2 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA)

Η ικανοτική δυναμική ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis ή IDA) αποτελεί μία μέθοδο ανάλυσης κατά την οποία το μη γραμμικό προσομοίωμα του κτιρίου υποβάλλεται σε μία σειρά επιταχυνσιογραφημάτων, καθένα από τα οποία κλιμακώνεται κατάλληλα σε διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης. Η κλιμάκωση αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός μη αρνητικού βαθμωτού συντελεστή λ (Scale Factor ή SF) με τον οποίον πολλαπλασιάζεται κάθε τιμή της χρονοϊστορίας, παράγοντας έτσι μία νέα τιμή. Για λ <1 παράγεται ένα κλιμακούμενο προς τα κάτω «ηπιότερο» επιταχυνσιογράφημα, για λ >1 παράγεται ένα κλιμακούμενο προς τα πάνω «ισχυρότερο» επιταχυνσιογράφημα ενώ για λ =1 το αρχικό επιταχυνσιογράφημα παραμένει ως έχει. Οι τιμές του συντελεστή κλιμάκωσης επιλέγονται ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος της συμπεριφοράς της κατασκευής, από την ελαστικότητα στη διαρροή και τελικά έως και τη δυναμική αστάθεια. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται, σε ένα διάγραμμα Μέτρου Απόκρισης – Μέτρου Έντασης με τη μορφή διακριτών σημείων. Τα σημεία αυτά έπειτα ενώνονται με κατάλληλη συνεχή γραμμή [23] και έτσι παράγεται η καμπύλη IDA, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης: (α) Διακριτά σημεία IDA, (β) καμπύλη IDA.

Το μέτρο έντασης (Intensity Measure ή IM) είναι ένα χαρακτηριστικό της εδαφικής κίνησης που επιλέγεται για την ποσοτικοποίηση της «έντασης» του σεισμού. Πολλά μεγέθη έχουν προταθεί για αυτό το σκοπό, όπως το μέγεθος της σεισμικής ροπής, η διάρκεια του σεισμού, η τροποποιημένη ένταση Mercalli κ.α., η χρήση των οποίων όμως καθιστά δύσκολη την προσαρμογή των εδαφικών καταγραφών στην επιθυμητή ένταση. Άλλα μεγέθη που κρίνονται καταλληλότερα όσον αφορά τη δυνατότητα προσαρμογής τους, είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration ή PGA), η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity ή PGV) και η φασματική επιτάχυνση στην πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής με απόσβεση ζ=5%, $S_a(T_1, 5\%)$. Η τελευταία αποτελεί την επικρατέστερη επιλογή, καθώς καλύπτει την ευαισθησία συνηθισμένων κατασκευών με μεγάλη συμμετοχή της πρώτης ιδιομορφής στο συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης κοντά στην ιδιοσυχνότητα τους και παρουσιάζει έτσι μικρότερη διασπορά στις αποκρίσεις, [24].

Το μέτρο απόκρισης (Engineering Demand Parameter ή EDP) είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την απόκριση της κατασκευής σε μία προκαθορισμένη σεισμική φόρτιση και προκύπτει από τη δυναμική ανάλυση του κτιρίου. Μεγέθη που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι η τέμνουσα βάσης, η στροφή ενός κόμβου, η μέγιστη πλαστιμότητα ενός ορόφου, η μέγιστη μετακίνηση της οροφής κ.ά.. Στην παρούσα μεθοδολογία επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η ανηγμένη σχετική μετακίνηση ορόφου (Interstorey Drift Ratio ή IDR) καθώς αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την ενδεχόμενη βλάβη των δομικών στοιχείων.

Η κάθε καμπύλη IDA αφορά μια συγκεκριμένη σεισμική διέγερση στην οποία υποβάλλεται το μοντέλο της κατασκευής και για αυτό δεν μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων η απόκριση της σε διαφορετικές εδαφικές κινήσεις. Έτσι, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πολλά επιταχυνσιογραφήματα και επομένως να παραχθούν πολλές καμπύλες IDA ώστε να αποδοθεί με αξιοπιστία η απόκριση της κατασκευής σε μία μελλοντική διέγερση (multi-record IDA study). Ένα τέτοιο σύνολο καμπύλων παρουσιάζεται σε διάγραμμα EDP – IM για πολλές χρονοϊστορίες και φαίνεται στο Σχήμα 3.4 (α). Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά της απόκρισης μετά την ελαστική περιοχή η οποία οφείλεται στη διαφορετικότητα των χρονοϊστοριών. Προκειμένου να γίνει μία περισσότερο εποπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των καμπυλών, συνίσταται να απεικονίζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% των καμπύλων IDA, [22], τα οποία ενδεικτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4 (β).



Σχήμα 3.4: Αποτελέσματα ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης για 44 επιταχυνσιογραφήματα: (α) Καμπύλες IDA, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.

3.3 Εκτίμηση απωλειών

3.3.1 Πριν την κατάρρευση

Ο υπολογισμός των τραυματισμών και θανάτων για κάθε κτίριο βασίζεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την IDA και αφορούν κάθε καταγραφή. Για κάθε τιμή της επιτάχυνσης $S_a(T_1,5\%)$ έχει υπολογιστεί η ανηγμένη σχετική μετακίνηση όλων των ορόφων του κτιρίου. Με βάση την τιμή κάθε ορόφου, υπολογίζεται από τις καμπύλες ζημιάς (Damage curves) η πιθανότητα αυτός να βρίσκεται σε κάθε ένα από τα πέντε επίπεδα βλάβης: Καθόλου (DS₀), Χαμηλές (DS₁), Μέτριες (DS₂), Εκτεταμένες (DS₃) και Πλήρεις βλάβες χωρίς κατάρρευση (DS₄), σύμφωνα με τις Εξισώσεις (3.2) και (3.3).

$$P(inDS_0|S_a(T_1,5\%)) = 1.0 - P(violateDS_0|S_a(T_1,5\%)),$$
(3.2)

$$P(inDS_{i}|S_{a}(T_{1},5\%)) = P(violateDS_{i-1}|S_{a}(T_{1},5\%)) - P(violateDS_{i}|S_{a}(T_{1},5\%)), \quad (3.3)$$

όπου $P(inDS_i | S_a(T_1,5\%))$ είναι η πιθανότητα ο όροφος να βρίσκεται στο επίπεδο βλάβης iγια δεδομένη τιμή της επιτάχυνσης, $P(violateDS_i | S_a(T_1))$ είναι η πιθανότητα να ξεπεραστεί το επίπεδο βλάβης i για την τιμή $S_a(T_1,5\%)$, όπως αυτή προκύπτει από τις καμπύλες τρωτότητας, και η μεταβλητή i αντιστοιχεί στα επίπεδα βλάβης που προσδιορίστηκαν προηγουμένως.

Η δεσμευμένη πιθανότητα να προκύψουν τραυματισμοί ή θάνατοι σε κάθε όροφο, υπολογίζεται από τις Εξισώσεις (3.4) και (3.5),

$$P(injured|S_a(T_1,5\%)) = \sum_i \left[P(injured|DS_i) \cdot P(inDS_i|S_a(T_1,5\%))\right],$$
(3.4)

$$P(killed|S_a(T_1,5\%)) = \sum_i \left[P(killed|DS_i) \cdot P(inDS_i|S_a(T_1,5\%))\right], \tag{3.5}$$

όπου $P(injured | S_a(T_1,5\%))$ είναι η πιθανότητα να τραυματιστεί κάποιος άνθρωπος στο συγκεκριμένο όροφο και $P(injured | DS_i)$ είναι η πιθανότητα να εμφανιστούν τραυματισμοί για το δεδομένο επίπεδο βλάβης *i* και $P(killed | S_a(T_1))$, $P(injured | DS_i)$ είναι οι αντίστοιχες τιμές για τους θανάτους. Εάν N είναι οι άνθρωποι που βρίσκονται στον όροφο k, τότε ο εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών $N(injured | S_a(T_1,5\%))$ και θανάτων $N(injured | S_a(T_1,5\%))$ υπολογίζεται σύμφωνα με τις Εξισώσεις (3.6) και (3.7). Αθροίζοντας τις τιμές αυτές για όλους τους ορόφους, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές τραυματισμών και θανάτων για όλο το κτίριο.

$$N(injured|S_a(T_1,5\%)) = P(injured|S_a(T_1,5\%)) \cdot N, \qquad (3.6)$$

$$N(killed|S_a(T_1,5\%)) = P(injured|S_a(T_1,5\%)) \cdot N, \qquad (3.7)$$

Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για τις πιθανότητες αυτές, αντιστοιχούν στις κατηγορίες σοβαρότητας 1,2 και 3,4 της μεθόδου Hazus αντίστοιχα και παρουσιάζονται ενδεικτικά για το επίπεδο των Πλήρων βλαβών χωρίς κατάρρευση της ομάδα κτιρίων S1L στον Πίνακα 3.2.

Μέθοδος	Ποσοστό απωλειών για δεδομένη κατηγορία σοβαρότητας (%)					
Hazus	Κ. Σοβαρότητας 1	Κ. Σοβαρότητας 2	Κ. Σοβαρότητας 3	Κ. Σοβαρότητας 4		
	5	1	0.01	0.01		
Προτεινόμενη	Τραυμο	ατισμοί	Θάνατοι			
	5 + 1	1 = 6	0.01 + 0.01	01 = 0.02		

Πίνακας 3.2: Ποσοστά απωλειών για Πλήρεις βλάβες χωρίς κατάρρευση της ομάδας S1L.

Οι υπολογισμοί αυτοί επαναλαμβάνονται για κάθε όροφο του κτιρίου. Τελικά, για κάθε τιμή της επιτάχυνσης προκύπτει η πιθανότητα να τραυματιστεί ή να πεθάνει κάποιος άνθρωπος που βρίσκεται στο εσωτερικό του κάθε ορόφου. Αθροίζοντας τις πιθανότητες αυτές για όλους τους ορόφους, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές που αφορούν τους κατοίκους στο εσωτερικό του κτιρίου.

Στο Σχήμα 3.5 (α) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα καμπύλης IDA για τον πρώτο όροφο διώροφου μεταλλικού κτιρίου που ανήκει στην ομάδα S1L, για δεδομένη εδαφική κίνηση.

Με βάση αυτήν και τις καμπύλες τρωτότητας του Σχήματος 3.5 (β), ακολουθεί ένας ενδεικτικός υπολογισμός της πιθανότητας ο όροφος να βρίσκεται σε κάθε ένα από τα επίπεδα βλάβης για $S_a(T_I)=0.8$ g. Για την επιτάχυνση αυτή, η ανηγμένη σχετική μετακίνηση του ορόφου έχει τιμή $\theta=0.39$. Εάν τα DS_0 , DS_1 , DS_2 , DS_3 και DS_4 αντιστοιχούν στα επίπεδα των Καθόλου, Χαμηλών, Μέτριων, Εκτεταμένων και Πλήρων βλαβών χωρίς κατάρρευση της κατασκευής, τότε η πιθανότητα ο συγκεκριμένος όροφος να υπερβεί κάθε ένα από τα επίπεδα βλάβης καθώς και οι πιθανότητες ο συγκεκριμένος όροφος να βρίσκεται σε κάθε ένα από τα επίπεδα βλάβης υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$\begin{split} &P(violateDS_0|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 1.0, \\ &P(violateDS_1|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 1.0, \\ &P(violateDS_2|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 1.0, \\ &P(violateDS_3|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 0.997, \\ &P(violateDS_4|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 0.80, \\ &P(inDS_0|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 0.0, \\ &P(inDS_1|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 1.0 - 1.0 = 0.0, \\ &P(inDS_2|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 1.0 - 0.997 = 0.003, \\ &P(inDS_3|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 0.997 - 0.80 = 0.197, \\ &P(inDS_4|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 0.80, \\ &\sum_i P(inDS_i|S_a(T_1,5\%) = 0.8g) = 1.00, \end{split}$$

όπου $P(violateDS_i|S_a(T_1,5\%))$ είναι η πιθανότητα να ξεπεραστεί το επίπεδο βλάβης *i* για τη δεδομένη τιμή της επιτάχυνσης της πρώτης ιδιομορφής που αντιστοιχεί σε απόσβεση 5%, $P(inDS_i|S_a(T_1,5\%))$ είναι η πιθανότητα ο όροφος να βρίσκεται στο επίπεδο βλάβης DS_i για τη δεδομένη τιμή $S_a(T_1,5\%)$ και το *i* υποδεικνύει το επίπεδο βλάβης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 3.5: (a) Παράδειγμα καμπύλης IDA για μεταλλικό κτίριο, (β) καμπύλες τρωτότητας για μεταλλικό κτίριο.

3.3.2 Μετά την κατάρρευση ενός ορόφου

Όταν η ανηγμένη σχετική μετακίνηση ενός ορόφου είναι αρκετά μεγάλη, τότε αυτός χάνει την ικανότητά του να φέρει τα κατακόρυφα φορτία και θεωρείται πως καταρρέει. Η κατάρρευση έχει ως αποτέλεσμα η πλάκα ενός ορόφου να συγκρούεται με την πλάκα του από κάτω ορόφου. Στην περίπτωση αυτή, εξετάζεται η επίδραση της κατάρρευσης στους υπόλοιπους ορόφους, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν καταρρέουν και εκείνοι (progressive collapse) ή όχι. Για να μελετηθεί το φαινόμενο αυτό, το κτίριο προσομοιώνεται με ένα σύστημα μαζών – ελατηρίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 για την περίπτωση που η κατάρρευση ξεκινά από τον τρίτο όροφο του κτιρίου. Κάθε όροφος αντιστοιχεί σε μία μάζα και σε ένα ελατήριο, με χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 ανάλογα με το εάν αυτός έχει καταρρεύσει ή όχι. Η μέθοδος βασίζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία για την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης προοδευτικής κατάρρευσης των Minami et al [16], η οποία παρουσιάστηκε συνοπτικά στην Παράγραφο 2.3.



Σχήμα 3.6: Προσομοίωμα μοντέλου για την εξέταση της επίδρασης τοπικής κατάρρευσης ορόφου.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίων μοντέλου: (α) για τον όροφο που ξεκινάει η κατάρρευση, (β) για τους υπόλοιπους ορόφους.

Στο Σχήμα 3.7 (β) παρουσιάζεται ο νόμος δύναμης – παραμόρφωσης που ακολουθούν τα ελατήρια τα οποία αντιπροσωπεύουν τους ορόφους που δεν έχουν καταρρεύσει. Στο διάγραμμα αυτό, το σημείο 1 αντιστοιχεί κρίσιμο φορτίο πάνω από το οποίο τα υποστυλώματα χάνουν την αντοχή τους και καταρρέουν (κλάδος 1 – 2). Αυτό συμβαίνει επειδή αυτά δεν βρίσκονται σε απαραμόρφωτη κατάσταση, αλλά έχουν υποστεί

μετακινήσεις, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται φαινόμενα όπως P-Δ, λυγισμός κ.ά.. Ουσιαστικά δεν πρόκειται για πραγματική αξονική κατάρρευση. Τα υποστυλώματα διαθέτουν εναπομείνουσα αντοχή η οποία μειώνεται σταδιακά (κλάδος 2 – 3) μέχρι το σημείο που η πλάκα του ορόφου συναντάει τον από κάτω όροφο ή τα συντρίμμια που έχουν δημιουργηθεί και αποκτά ξανά αντίσταση (σημείο 3). Οι κλίσεις των κλάδων 2 – 3 και 3 – 4 επιλέγονται έτσι ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα αριθμητικής αστάθειας στο μοντέλο.

Όσον αφορά τον όροφο που καταρρέει, ο νόμος τάσης παραμόρφωσης που διέπει τη συμπεριφορά του αντίστοιχου ελατηρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 (α). Η μεγάλη τιμή της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης του ορόφου οδηγεί σε σημαντική παραμόρφωση των υποστυλωμάτων, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σε αυτά μεγάλες ροπές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κολώνες να χάνουν την αντοχή τους να προσφέρουν αντίσταση και έτσι να καταρρέουν (κλάδος 1 – 2). Όταν η μάζα του ορόφου συναντήσει τα συντρίμμια που υπάρχουν εντός του ορόφου, τότε αποκτά αντίσταση σταδιακά (κλάδος 2 – 3), όπως συμβαίνει και με τον κλάδο 3 – 4 των ελατηρίων του Σχήματος 3.7 (β).

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι μάζες κατά την κίνησή τους δεν πραγματοποιούν ελεύθερη πτώση, αλλά υπάρχουν στοιχεία τα οποία συνθλίβονται και προσφέρουν κάποια αντίσταση, στο σύστημα εισάγεται απόσβεση Rayleigh. Το μητρώο απόσβεσης προσδιορίζεται ως ένας γραμμικός συνδυασμός των μητρώων μάζας <u>m</u> και δυσκαμψίας <u>k</u>, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (3.8),

$$\underline{c} = \alpha_0 \cdot \underline{m} + \alpha_1 \cdot \underline{k} \,, \tag{3.8}$$

όπου α_o και α₁ είναι σταθερές με μονάδες sec⁻¹ και sec, αντιστοίχως. Η ανάλογη της δυσκαμψίας απόσβεση ερμηνεύεται διαισθητικά με την προσομοίωση της απώλειας ενέργειας λόγω της παραμόρφωσης των ορόφων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 (β). Αντιθέτως, η ανάλογη της μάζας απόσβεση είναι δύσκολο να δικαιολογηθεί φυσικά, διότι αντιπροσωπεύει την απόσβεση εξαιτίας του αέρα, η οποία είναι αμελητέα για τις περισσότερες κατασκευές (Σχήμα 3.8 (α)).



Σχήμα 3.8: (α) Απόσβεση ανάλογη της μάζας, (β) απόσβεση ανάλογη της δυσκαμψίας, [3].

Η μεταβολή του λόγου απόσβεσης με την ιδιοσυχνότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Ο λόγος απόσβεσης για τη n-οστή ιδιομορφή ενός συστήματος υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.9). Οι συντελεστές α_o και α₁ θεωρείται πως έχουν τον ίδιο λόγο απόσβεσης ζ, το οποίο είναι λογικό με βάση τα πειραματικά δεδομένα που προκύπτουν κατά την ανάλυση κτιρίων, και προσδιορίζονται όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (3.10) και (3.11). Με ω_i και ω_j συμβολίζονται η i-οστή και η j-οστή ιδιομορφή, αντίστοιχα. Για ιδιομορφές με ω μεγαλύτερο από το ω_j, ο λόγος απόσβεσης αυξάνει μονοτονικά με τη συχνότητα και οι αντίστοιχες ιδιομορφικές αποκρίσεις ουσιαστικά εξαλείφονται, λόγω της μεγάλης τους απόσβεσης.

$$\zeta_n = \frac{\alpha_0}{2} \cdot \frac{1}{\omega_n} + \frac{\alpha_1}{2} \cdot \omega_n, \qquad (3.9)$$

$$\alpha_0 = \zeta \cdot \frac{2 \cdot \omega_i \cdot \omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \qquad (3.10)$$

$$\alpha_1 = \zeta \cdot \frac{2}{\omega_i + \omega_j},\tag{3.11}$$



Σχήμα 3.9: Μεταβολή των λόγων απόσβεσης με το ω: (α) απόσβεση ανάλογη της μάζας και απόσβεση ανάλογη της δυσκαμψίας, (β) απόσβεση Rayleigh

Στο μοντέλο πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση, και με βάση τις μετατοπίσεις των μαζών καθορίζονται οι όροφοι που έχουν καταρρεύσει. Σε αυτούς εφαρμόζονται οι εκτιμώμενες τιμές τραυματισμών και θανάτων, όπως δίνονται από τη μέθοδο HAZUS για το στάδιο των Πλήρων βλαβών με κατάρρευση. Για τους ορόφους που δεν έχουν καταρρεύσει, τα ποσοστά τραυματισμών και θανάτων προκύπτουν όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.3.1.

4 Εφαρμογή μεθοδολογίας σε μεταλλικά κτίρια

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται σε τέσσερα μεταλλικά κτίρια η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των θυμάτων που αναμένεται να προκληθούν στο εσωτερικό τους λόγω της σεισμική τους καταπόνησης. Τα συγκεκριμένα κτίρια διαθέτουν περιμετρικά πλαίσια ανάληψης οριζόντων δυνάμεων και εξετάζονται για δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζονται για χαμηλή υπεραντοχή ενώ στη δεύτερη για υψηλή.

4.2 Περιγραφή κτιρίων

Τα κτίρια που επιλέχθηκαν να μελετηθούν αποτελούν πρότυπα μεταλλικά κτίρια που περιγράφονται στο report NIST GCR 10-97-8 [17] του NEHR (National Earthquake Hazards Reduction Program) για το NIST (Engineering Laboratory of the National Institute of Standards and Technology). Τα κτίρια αυτά έχουν την κάτοψη που φαίνεται στο Σχήμα 4.1 και είναι σχεδιασμένα με βάση τις προδιαγραφές που ορίζονται από τους κανονισμούς AISC 341-05 και ASCE/SEI 7-05. Οι σεισμικές δράσεις παραλαμβάνονται από σύστημα πλαισίων ροπής (SMRF) στις δύο διευθύνσεις, ενώ οι συνδέσεις τύπου RBS υλοποιούνται με τις προδιαγραφές του AISC 358-05.



Σχήμα 4.1: Κάτοψη μεταλλικών κτιρίων

Η κάτοψη των κτιρίων είναι ορθογωνική με επιφάνεια 14000 sf (\approx 1300 m²) και διαστάσεις 100' x 140' (30.5 m x 42.7 m). Τα περιμετρικά πλαίσια ροπής τριών φατνωμάτων θεωρείται ότι παραλαμβάνουν όλη τη σεισμική δράση ενώ τα κατακόρυφα φορτία παραλαμβάνονται και από βαρυτικές κολώνες που υπάρχουν στο εσωτερικό των κτιρίων. Το μήκος των φατνωμάτων είναι 20 ft (6.1 m).

Στα κτίρια έχει χρησιμοποιηθεί χάλυβας ASTMA992 με όριο διαρροής fy = 50 ksi (\approx 344 MPa). Το μόνιμο φορτίο είναι 90 psf ομοιόμορφα κατανεμημένο σε κάθε όροφο, και το ωφέλιμο φορτίο είναι 50 psf στον τυπικό όροφο και 20 psf στην οροφή, τα οποία αντιστοιχούν σε 4.3, 2.4 και 0.96 kPa, αντίστοιχα. Ο σχεδιασμός του κτιρίου έχει

πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο των ισοδύναμων οριζόντιων φορτίων (Equivalent Lateral Force Method).

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι διατομές των στοιχείων των πλαισίων ροπής ενώ στον Πίνακα 4.2 δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά των κτιρίων, όπως η κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού (Seismic Design Category ή SDC), ο συντελεστής απομείωσης φασματικών επιταχύνσεων R, η ιδιοπερίοδος T βάσει κανονισμού ($T=C_uT_a$, ASCE/SEI 7-05), η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος από την ιδιομορφική ανάλυση T_1 , ο συντελεστής τέμνουσας βάσης V/W και η μέγιστη θεωρούμενη φασματική επιτάχυνση S_{MT} . Όσον αφορά την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού, η κατηγορία Dmax αντιστοιχεί περίπου σε Ζώνη 1 στην Ελλάδα ενώ όσον αφορά το Dmin αντιστοιχεί περίπου σε Ζώνη 3.

α/ α	Κτίριο	Όροφ ος	Διατομή δοκών	Διατομή εξωτερικών υποστυλωμάτων	Διατομή ε σ ωτερικών υποστυλωμάτων	Ελάσμα κορμά υποστυλι Εξωτερικ ά	τα στον ό των ωμάτων Εσωτερι κά	Υψόμετρο (in)
1 1-ELF		1	W30x148	W24x131	W24x176	7/16	1-5/16	164.65
	I-ELF	2	W16x31	W24x131	W24x176	0	0	320.65
		1	W24x103	W24x103	W24x131	1/16	5/8	166.55
2 2-ELF	2-ELF	2	W24x103	W24x103	W24x131	1/16	7/16	322.55
		3	W24x76	W24x76	W24x84	1/16	1/2	478.55
		4	W24x76	W24x76	W24x84	1/16	1/2	634.55
3 3-ELF	1	W24x76	W18x55	W18x97	3/8	7/8	168.05	
	J-ELF	2	W12x19	W18x55	W18x97	0	0	324.05
		1	W18x71	W18x86	W18x97	1/16	9/16	166.55
4 4-ELF	4 EL E	2	W18x86	W18x86	W18x97	3/16	1/2	322.55
	4-LLF	3	W18x71	W18x65	W18x86	1/16	11/16	478.55
		4	W18x71	W18x65	W18x86	1/16	11/16	634.55

Πίνακας 4.1: Διατομές δομικών μελών μεταλλικών κτιρίων.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηρισ	τικά μεν	έθη σγεδιασ	πού μεταλλ	ικών κτιρίων.
in an and the interpole of the pole of the	the pior	oul overge	pie e pie toir a	

α/α	Κτίριο	SDC	R	T (sec)	T1 (sec)	V/W	SMT(T1) (g)
1	1-ELF	Dmax	8	0.56	0.87	0.125	1.50
2	2-ELF	Dmax	8	0.95	1.30	0.079	0.95
3	3-ELF	Dmin	8	0.60	1.74	0.042	0.50
4	4-ELF	Dmin	8	1.02	1.94	0.024	0.29

Τα κτίρια αυτά ανήκουν στην κατηγορία S1 (steel moment frames) της μεθόδου HAZUS, [8]. Τα επίπεδα βλαβών για την εν λόγω κατηγορία περιγράφονται παρακάτω:

<u>Χαμηλές Βλάβες</u>: στη στάθμη αυτή παρατηρούνται μικρές παραμορφώσεις στις συνδέσεις ή επιδερμικές ρωγμές σε ορισμένες συγκολλήσεις.

<u>Μέτριες Βλάβες</u>: στη στάθμη αυτή ορισμένα μεταλλικά μέλη έχουν διαρρεύσει και οι συνδέσεις έχουν ευδιάκριτες παραμένουσες στροφές. Στις συγκολλήσεις μερικών συνδέσεων μπορεί να εμφανιστούν μεγάλες ρωγμές ενώ σε ορισμένες κοχλιωτές συνδέσεις παρατηρείται αστοχία ορισμένων κοχλιών ή οπών.

<u>Εκτεταμένες Βλάβες</u>: στη στάθμη αυτή τα περισσότερα μεταλλικά μέλη έχουν διαρρεύσει, με αποτέλεσμα η κατασκευή να υφίσταται μεγάλη πλευρική παραμόρφωση. Λόγω των μεγάλων μόνιμων στροφών των συνδέσεων, ορισμένες συνδέσεις ή μέλη ξεπερνάνε την αντοχή τους. Η μερική κατάρρευση της κατασκευής είναι πιθανή λόγω της αστοχίας συνδέσεων ή/και μελών.
<u>Πλήρης Βλάβη</u>: Το μεγαλύτερο ποσοστό των δομικών στοιχείων του κτιρίου έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής του ή ορισμένες κρίσιμες συνδέσεις ή μέλη έχουν αστοχήσει με αποτέλεσμα η κατασκευή να υφίσταται μεγάλες και επικίνδυνες πλευρικές παραμορφώσεις. Αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε μερική ή ακόμα και πλήρη κατάρρευση του κτιρίου.

Στο μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης που αναπτύχθηκε για τα κτίρια αυτά, θεωρήθηκε πως στην αξονική αντοχή του ορόφου δεν συμμετέχουν οι κολώνες των πλαισίων ροπής. Στα κτίρια με περιμετρικά πλαίσια ανάληψης οριζοντίων δυνάμεων οι βαρυτικές κολώνες σχεδιάζονται ώστε να παραλαμβάνουν μόνο τα βαρυτικά φορτία. Εάν λαμβανόταν υπόψη η αντοχή των υποτυλωμάτων που βρίσκονται στα πλαίσια, θα αυξανόταν σημαντικά το κρίσιμο φορτίο και η δυσκαμψία του ορόφου, λόγω της μεγάλης διατομής που αυτές διαθέτουν. Κάτι τέτοιο κρίθηκε κατά της ασφάλειας, καθώς αν αστοχήσουν οι εσωτερικές βαρυτικές κολώνες, θα καταρρεύσει ο όροφος αφού τα πλαίσια ροπής, λόγω της θέσης τους επί της εξωτερικής περιμέτρου του κτιρίου, δεν θα μπορέσουν να σταματήσουν την κατάρρευση.

Το κρίσιμο φορτίο των υποστυλωμάτων των ορόφων υπολογίστηκε από το συνδυασμό φόρτισης που ορίζεται στον κανονισμό ASCE/SEI 7-05, [2], για το σχεδιασμό με βάση την υπεραντοχή που θεωρήθηκε ότι διαθέτει ο κάθε όροφος. Για κάθε έναν από τους ορόφους λήφθηκε το δυσμενέστερο φορτίο από τους συνδυασμούς των Εξισώσεων (4.1) και (4.2):

$$1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L + 0.5 \cdot L_r, \tag{4.1}$$

$$1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L_r + L, \tag{4.2}$$

όπου D είναι το μόνιμο φορτίο (dead load), L είναι το κινητό φορτίο των ορόφων (live load) και L_r είναι το κινητό φορτίο της οροφής του κτιρίου (roof life load). Θεωρήθηκε ότι η μειωμένη αντοχή που διαθέτουν τα υποστυλώματα ισούται πρακτικά με το όριο της αξονικής διαρροής τους, λαμβάνοντας υπόψη προφανώς και τον συντελεστή υπεραντοχής. Η δυσκαμψία κάθε ορόφου λήφθηκε ίση με την αξονική δυσκαμψία των κολώνων βαρύτητας. Η μάζα που έχει ο κάθε όροφος την ώρα του σεισμού υπολογίστηκε σύμφωνα με τον σεισμικό συνδυασμό, ο οποίος φαίνεται στην Εξίσωση (4.3).

$$1.2 \cdot D + L, \tag{4.3}$$

Τα βαρυτικά υποστυλώματα θεωρήθηκε πως έχουν ίδια διατομή ανά δύο ορόφους, όπως συμβαίνει και με τις κολώνες που ανήκουν στα περιμετρικά πλαίσια. Για κάθε κτίριο εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις υπεραντοχής. Στην πρώτη περίπτωση, θεωρήθηκε πως τα υποστυλώματα είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν οριακά τα κατακόρυφα φορτία όπως συμβαίνει στην πράξη, με αποτέλεσμα η υπεραντοχή τους ανά δύο ορόφους να είναι μικρή. Στη δεύτερη περίπτωση, η υπεραντοχή σε όλους τους ορόφους είναι αρκετά μεγαλύτερη. Η μεγαλύτερη υπεραντοχή, όπως ήταν αναμενόμενο, επηρεάζει και τις συνέπειες της τοπικής κατάρρευσης ορόφου.

4.3 Αποτελέσματα αναλύσεων

Για την ανάλυση των κτιρίων χρησιμοποιήθηκαν τα επιταχυνσιογραφήματα 44 καταγραφών, οι οποίες αντιστοιχούν σε 22 σεισμικά γεγονότα, 2 ανά κατεύθυνση. Τα επιταχυνσιογραφήματα αυτά προέρχονται από τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στο FEMA P-695 [6]. Για τις αναλύσεις IDA και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων

χρησιμοποιήθηκε λογισμικό σε OpenSees και Matlab το οποίο είναι προσβάσιμο στο διαδίκτυο [25]. Την ώρα του σεισμού θεωρήθηκε πως υπάρχουν 50 άνθρωποι ανά όροφο του κτιρίου.

Οι καμπύλες ζημιάς ελήφθησαν ίδιες για τα διώροφα και για τα τετραώροφα κτίρια. Η μέση τιμή της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης που ορίζει κάθε επίπεδο βλάβης λήφθηκε σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές της μεθόδου Hazus. Η διασπορά θεωρήθηκε ίση με 0.3, 0.35, 0.4 και 0.5 για τα επίπεδα των Χαμηλών, Μέτριων, Εκτεταμένων και Πλήρων βλαβών αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη φυσική όσο και την επιστημονική αβεβαιότητα. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες ζημιάς σε επίπεδο ορόφου για τα διώροφα και τα τετραώροφα μεταλλικά κτίρια της κατηγορίας S1. Όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο της μεθόδου Hazus, [8], στα ψηλότερα κτίρια οι μέσες τιμές μειώνονται καθώς θεωρείται πως η παραμορφωμένη κατάσταση δεν επηρεάζει την ομοιόμορφη κατανομή των ανηγμένων μετατοπίσεων καθ' ύψος του κτιρίου. Για όλα τα επίπεδα βλάβης, οι μέσες τιμές κάθε ομάδας στα Μέτρια κτίρια (τετραώροφο κτίριο) υπολογίζονται ως το 50% και 67%, αντίστοιχα, των τιμών των Χαμηλών κτιρίων (διώροφο κτίριο), [8].



Σχήμα 4.2: Καμπύλες ζημιών σε επίπεδο ορόφου: (α) διώροφο μεταλλικό κτίριο, (β) τετραώροφο μεταλλικό κτίριο

Όταν η ανηγμένη σχετική μετακίνηση ενός ορόφου υπερβεί την τιμή 0.1 τότε θεωρείται ότι ο όροφος καταρρέει. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ώστε να αντιστοιχεί σε πραγματική κατάρρευση του ορόφου και όχι να αποτελεί μία τιμή ανηγμένης σχετικής μετακίνησης για την οποία ναι μεν έχουν προκληθεί αρκετές ζημιές στον όροφο, αλλά αυτός στέκεται. Στην περίπτωση αυτή εξετάζονται τα αποτελέσματα της κατάρρευσης στην ευστάθεια της κατασκευής. Η δυναμική ανάλυση του μοντέλου πραγματοποιείται στο λογισμικό OpenSees και στο σύστημα εισάγεται μεγάλη απόσβεση Rayleigh με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: $ω_1=20$ rad/sec, $ω_2=40$ rad/sec, $\zeta = 0.10$, a = 1 και $\beta = 1$.

Σημειώνεται ότι τα κτίρια είναι σχεδιασμένα για δύο κατηγορίες αντισεισμικού σχεδιασμού: την Dmax και την Dmin. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η Dmax αντιστοιχεί ποιοτικά σε Ζώνη 1 για την Ελλάδα και η Dmin αντιστοιχεί περίπου σε Ζώνη 3. Η σύγκριση των κατηγοριών με τις ζώνες είναι καθαρά ποιοτική και γίνεται με σκοπό να καταστεί σαφής η διαφορά των δύο κατηγοριών.

4.3.1 Διώροφο κτίριο – Dmax

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την ανάλυση του κτιρίου 1-ELF, δηλαδή του διώροφου κτιρίου που είναι σχεδιασμένο για την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού Dmax. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ικανοτική δυναμική ανάλυση του κτιρίου παρουσιάζονται παρακάτω. Στο Σχήμα 4.3 (α) φαίνονται οι καμπύλες IDA του πρώτου ορόφου για τις 44 καταγραφές, στο Σχήμα 4.3 (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον δεύτερο όροφο.



Σχήμα 4.3: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1) - IDR$ πρώτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA πρώτου ορόφου.



Σχήμα 4.4: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR δευτέρου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA δευτέρου ορόφου.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η ανηγμένη σχετική μετακίνηση κάθε ορόφου του κτιρίου αμέσως πριν από την κατάρρευση (drift profile). Παρατηρείται ότι και για τις 44 καταγραφές η κατάρρευση ξεκινάει από τον πρώτο όροφο. Ωστόσο για λόγους εποπτείας των αποτελεσμάτων, εξετάστηκαν τα αποτελέσματα τοπικής κατάρρευσης και των δύο ορόφων στο σύνολο του κτιρίου, τα οποία και παρουσιάζονται παρακάτω. Για ορισμένες καταγραφές, η ανηγμένη σχετική μετακίνηση των ορόφων πριν από την κατάρρευση είναι αρκετά μικρότερη από το 0.1. Ουσιαστικά πρόκειται για τιμές οι οποίες εξελίσσονται πολύ γρήγορα σε κατάρρευση.



Σχήμα 4.5: Ανηγμένη σχετική μετακίνηση ορόφων πριν την κατάρρευση του κτιρίου, 2όροφο κτίριο – Dmax.

4.3.1.1 Χαμηλή υπεραντοχή

Οι βαρυτικές κολώνες θεωρήθηκε ότι διαθέτουν υπεραντοχή 1.1. Η τιμή αυτή προέκυψε με τη λογική ότι αυτές έχουν σχεδιαστεί για τα φορτία σχεδιασμού, οπότε δεν διαθέτουν αρκετή επιπλέον αξονική αντοχή. Υπενθυμίζεται ότι οι κολώνες είναι σταθερές ανά δύο ορόφους, άρα η τιμή αυτή της υπεραντοχής αφορά την πρώτο όροφο. Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση τοπικής κατάρρευσης ορόφου στην ευστάθεια της κατασκευής καθώς και τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων για κάθε όροφο παρουσιάζονται παρακάτω. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, από όποιον όροφο και να ξεκινήσει η κατάρρευση, θα οδηγήσει σε προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής.

Η κατάρρευση ζεκινά από τον πρώτο όροφο

Στην περίπτωση που πρώτος καταρρέει ο πρώτος όροφος του κτιρίου, το προσομοίωμα και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6 (α) και (β), (γ), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.7 και 4.8, όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των πλακών των ορόφων και τα διαγράμματα της δύναμης κάθε ελατηρίου, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο. Παρατηρείται ότι πρώτα καταρρέει ο πρώτος όροφος και μετά ακολουθεί και ο δεύτερος.



Σχήμα 4.6: Διώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β) ,(γ) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου και δεύτερου ορόφου.



Σχήμα 4.7: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο πρώτος όροφος.



Σχήμα 4.8: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που η κατάρρευση ξεκινάει από τον πρώτο όροφο, 2όροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.8 εμφανίζονται συγχρονισμένα μέγιστα στις δυνάμεις των ελατηρίων τη στιγμή που η πλάκα ενός ορόφου συγκρουστεί με την πλάκα του από κάτω. Συγκεκριμένα, η πλάκα του πρώτου ορόφου συγκρούεται με το έδαφος περίπου τη χρονική στιγμή 1.4 sec. Τη στιγμή αυτή, αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στα ελατήρια, όπως επισημαίνεται και με τον κόκκινο κύκλο. Το ίδιο συμβαίνει και για τη χρονική στιγμή 3.9 sec, όταν δηλαδή η πλάκα του δεύτερου συγκρουστεί με αυτήν του πρώτου (μπλε κύκλος). Μετά από κάθε σύγκρουση ακολουθεί μία μικρή ταλάντωση των μαζών, η οποία όμως φθίνει πολύ γρήγορα. Τελικά, οι δυνάμεις των ελατηρίων ισορροπούν στα βαρυτικά φορτία.

<u>Η κατάρρευση ζεκινά από τον δεύτερο όροφο</u>

Στην περίπτωση που ο δεύτερος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9 (α) και (β), (γ), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.10 και 4.11, όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των ορόφων και οι δυνάμεις των ελατηρίων, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.



Σχήμα 4.9: Διώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β) και (γ) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου και δεύτερου ορόφου.



Σχήμα 4.10: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση η κατάρρευση ξεκινάει από το δεύτερο όροφο διώροφου κτιρίου με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.11: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που η κατάρρευση ξεκινάει από το δεύτερο όροφο, 2όροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου.

Η πλάκα του δευτέρου ορόφου συγκρούεται με αυτή του πρώτου περίπου τη στιγμή 1.3 sec και του πρώτου με το έδαφος τη στιγμή 3.3 sec. Τις χρονικές στιγμές αυτές εμφανίζονται τοπικά μέγιστα στις δυνάμεις των ελατηρίων, όπως επισημαίνονται με τον μπλε και κόκκινο κύκλο αντίστοιχα. Και σε αυτή την περίπτωση, μετά από κάθε σύγκρουση εμφανίζονται μικρές ταλαντώσεις μετά από τις κρούσεις οι οποίες φθίνουν γρήγορα. Στο Σχήμα 4.11 (α) παρατηρείται μία αρχική ταλάντωση που οφείλεται στο γεγονός ότι τα βαρυτικά φορτία εισάγονται δυναμικά στην αρχή της ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.12 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο Σχήμα 4.12 (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.13 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι υπάρχει μία κρίσιμη τιμή της επιτάχυνσης πάνω από την οποία αυξάνεται πολύ ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων. Ουσιαστικά αυτή αντιστοιχεί στην επιτάχυνση για την οποία προκαλείται η κατάρρευση της κατασκευής. Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, πριν από την κατάρρευση της κατασκευής προκαλούνται πρακτικά μηδενικοί θάνατοι και μικρός αριθμός τραυματισμών, ο οποίος και αυξάνεται σημαντικά όταν ένας όροφος καταρρεύσει.



Σχήμα 4.12: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmax για χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.13: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmax για χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές [0.1,2] και μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.14 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής, κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα που έχουν παρατηρηθεί από σεισμούς που συνέβησαν στο παρελθόν. Σημειώνεται ότι στα ακόλουθα διαγράμματα η κλίμακα του οριζόντιου άξονα δεν είναι η ίδια.



Σχήμα 4.14: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2], 2όροφο κτίριο – Dmax για χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

4.3.1.2 Υψηλή υπεραντοχή

Στην περίπτωση αυτή τα υποστυλώματα θεωρήθηκε πως διαθέτουν υπεραντοχή 1.6. Δεδομένου ότι σε όλο το κτίριο η διατομή των υποστυλωμάτων είναι σταθερή, η τιμή της υπεραντοχής αφορά τον πρώτο όροφο. Τα προσομοιώματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εξέταση των συνεπειών της κατάρρευσης ενός ορόφου στην ευστάθεια της κατασκευής παρουσιάζονται παρακάτω.

Η κατάρρευση ζεκινά από τον πρώτο όροφο

Στην περίπτωση που ο πρώτος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.15 (α) και (β),(γ), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.16 και 4.17, όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των ορόφων και τα διαγράμματα της δύναμης κάθε ελατηρίου, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο. Παρατηρείται ότι η κατάρρευση περιορίζεται μόνο στον πρώτο όροφο, αντίθετα με την περίπτωση που οι κολώνες έχουν χαμηλή υπεραντοχή.



Σχήμα 4.15: Διώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β) και (γ) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου και δεύτερου ορόφου.



Σχήμα 4.16: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που η κατάρρευση ξεκινά από τον πρώτο όροφο, 2όροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.17: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που η κατάρρευση ξεκινάει από το πρώτο όροφο, 2όροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου.

Η πλάκα του πρώτου ορόφου συγκρούεται με το έδαφος περίπου τη χρονική στιγμή 1.4 sec. Τότε, αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στα ελατήρια, όπως επισημαίνεται με τον

κόκκινο κύκλο. Μετά από κάθε σύγκρουση ακολουθεί μία μικρή ταλάντωση των ορόφων η οποία όμως φθίνει πολύ γρήγορα. Στο δεύτερο όροφο μάλιστα εμφανίζεται λόγω της ταλάντωσης και μικρός εφελκυσμός, ενώ μετά η δύναμη ισορροπεί στα βαρυτικά φορτία, όπως είναι και αναμενόμενο. Ο δεύτερος όροφος δεν καταρρέει, για αυτό άλλωστε δεν παρατηρείται άλλο τοπικό μέγιστο στα διαγράμματα των δυνάμεων.

Η κατάρρευση ζεκινά από τον δεύτερο όροφο

Στην περίπτωση που ο δεύτερος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για την μελέτη της σύγκρουσης είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.18 (α) και οι αντίστοιχοι νόμοι δύναμης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.18 (β), και (γ). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.19 και 4.20 όπου πσρουσιάζεται η σχετική μετατόπιση των μαζών και οι δυνάμεις των ελατηρίων, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο. Και σε αυτή την περίπτωση η κατάρρευση περιορίζεται στον πρώτο όροφο, αντίθετα με αυτό που συμβαίνει στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή.



Σχήμα 4.18: Διώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β) και (γ) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου και δεύτερου ορόφου.



Σχήμα 4.19: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο δεύτερος όροφος για διώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.20: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που η κατάρρευση ξεκινάει από το δεύτερο όροφο, 2όροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου.

Η πλάκα του δευτέρου ορόφου συγκρούεται με την πλάκα του πρώτου περίπου τη χρονική στιγμή 1.6 sec. Τότε, αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στα ελατήρια, όπως επισημαίνεται με το μπλε κύκλο. Στον πρώτο όροφο εμφανίζεται λόγω της ταλάντωσης και μικρός εφελκυσμός, ενώ μετά η δύναμη ισορροπεί στα βαρυτικά φορτία, όπως είναι και αναμενόμενο. Ο πρώτος όροφος δεν καταρρέει, για αυτό άλλωστε δεν παρατηρείται άλλο τοπικό μέγιστο στα διαγράμματα των δυνάμεων.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μεγάλη υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.21 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.22 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς.



Σχήμα 4.21: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmax με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.22: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmax με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές [0.1,2] και μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.23 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής, κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα των σεισμών αφού συνήθως θάνατοι παρατηρούνται στην περίπτωση που καταρρεύσει η κατασκευή.



Σχήμα 4.23: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2], 2όροφο κτίριο – Dmax με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζονται, για λόγους σύγκρισης, τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων στην περίπτωση που οι βαρυτικές κολώνες διαθέτουν μεγαλύτερη υπεραντοχή είναι σαφώς μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση συμβαίνει προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου, ενώ για την χαμηλότερη τιμή της υπεραντοχής η κατάρρευση περιορίζεται στον όροφο από τον οποίο και ξεκινά.



Σχήμα 4.24: Ποσοστημόριο 50% αριθμού απωλειών που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων, 2όροφο κτίριο – Dmax: (α) θάνατοι και (β) τραυματισμοί.

4.3.2 Διώροφο κτίριο – Dmin

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του διώροφου κτιρίου που είναι σχεδιασμένο για την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού Dmin. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσαυξητική δυναμική ανάλυση του κτιρίου παρουσιάζονται παρακάτω. Στο Σχήμα 4.25 (α) φαίνονται οι καμπύλες IDA του πρώτου ορόφου για τις 44 καταγραφές, και στο (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια τους 16%, 50% και 84%, ενώ στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον δεύτερο όροφο. Στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η ανηγμένη σχετική μετακίνηση κάθε ορόφου του κτιρίου αμέσως πριν από την κατάρρευση (drift profile). Παρατηρείται ότι και για τις 44 καταγραφές η κατάρρευση ξεκινάει από τον πρώτο όροφο, όπως συνέβαινε και στην περίπτωση του διώροφου κτιρίου που ήταν σχεδιασμένο για την κατηγορία Dmax.



Σχήμα 4.25: (α) Καμπύλες IDA σε όρους S_a(T₁) – IDR πρώτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA πρώτου ορόφου.



Σχήμα 4.26: (α) Καμπύλες IDA σε όρους S_a(T₁) – IDR δευτέρου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA δευτέρου ορόφου.



Σχήμα 4.27: Ανηγμένη σχετική μετακίνηση ορόφων πριν την κατάρρευση του κτιρίου, 2όροφο κτίριο – Dmin.

Επειδή ότι οι βαρυτικές κολώνες δεν σχεδιάζονται ώστε να παραλαμβάνουν σεισμικά φορτία, τα αποτελέσματα του μοντέλου της προοδευτικής κατάρρευσης είναι όμοια με αυτά για το διώροφο κτίριο που είναι σχεδιασμένο για την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού Dmax. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.15 έως και 4.20. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή, η κατάρρευση ενός ορόφου οδηγεί στην προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής ενώ αντίθετα εάν οι κολώνες διαθέτουν μεγάλη υπεραντοχή τότε η κατάρρευση που όροφο από τον οποίο ξεκινά.

4.3.2.1 Χαμηλή υπεραντοχή

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.28 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.29 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς.



Σχήμα 4.28: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmin με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.29: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmin με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%

. Λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα, όπως αυτή λαμβάνεται και στην Παράγραφο 4.3.1, προκύπτουν οι τιμές που φαίνονται στο Σχήμα 4.30.



Σχήμα 4.30: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2], 2όροφο κτίριο – Dmin με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

4.3.2.2 Υψηλή υπεραντοχή

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μεγάλη υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.31 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήμα 4.32 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς.



Σχήμα 4.31: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmin με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.32: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 2όροφο κτίριο – Dmin με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές [0.1,2] και μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.33 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής, κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα των σεισμών αφού συνήθως θάνατοι παρατηρούνται στην περίπτωση που καταρρεύσει η κατασκευή.



Σχήμα 4.33: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2], 2όροφο κτίριο – Dmin με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

Στο Σχήμα 4.34 παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων στην περίπτωση που οι βαρυτικές κολώνες διαθέτουν μικρότερη υπεραντοχή είναι σαφώς μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση συμβαίνει προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου, ενώ για την υψηλότερη τιμή της υπεραντοχής η κατάρρευση περιορίζεται σε έναν όροφο.



Σχήμα 4.34: Ποσοστημόριο 50% αριθμού απωλειών που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων, 2όρφο κτίριο – Dmin: (α) θάνατοι και (β) τραυματισμοί.

4.3.3 Τετραώροφο κτίριο – Dmax

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του τετραώροφου κτιρίου που είναι σχεδιασμένο για την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού Dmax. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ικανοτική δυναμική ανάλυση του κτιρίου παρουσιάζονται παρακάτω. Στο Σχήμα 4.35 (α) φαίνονται οι καμπύλες IDA του πρώτου ορόφου για τις 44 καταγραφές, και στο (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια τους 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.36, 4.37 και 4.38 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον δεύτερο, τρίτο και τέταρτο όροφο, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.35: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR πρώτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA πρώτου ορόφου.



Σχήμα 4.36: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR δευτέρου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA δευτέρου ορόφου.



Σχήμα 4.37: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR τρίτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA τρίτου ορόφου.



Σχήμα 4.38: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR τετάρτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA τετάρτου ορόφου.

Στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζεται η ανηγμένη σχετική μετακίνηση κάθε ορόφου του κτιρίου αμέσως πριν από την κατάρρευση (drift profile). Παρατηρείται ότι η κατάρρευση ενδέχεται να ξεκινήσει από όλους τους ορόφους, ανάλογα από τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης. Η επίδραση της τοπικής κατάρρευσης κάθε ορόφου ξεχωριστά στο σύνολο του κτιρίου παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.39: Ανηγμένη σχετική μετακίνηση ορόφων πριν την κατάρρευση του κτιρίου, 4όροφο κτίριο – Dmax.

4.3.3.1 Χαμηλή υπεραντοχή

Οι βαρυτικές κολώνες θεωρήθηκε ότι διαθέτουν υπεραντοχή 1.1. Υπενθυμίζεται ότι οι κολώνες είναι σταθερές ανά δύο ορόφους, άρα η τιμή αυτή της υπεραντοχής αφορά τον πρώτο και τον τρίτο όροφο. Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση τοπικής κατάρρευσης ορόφου στην ευστάθεια της κατασκευής καθώς και τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων για κάθε όροφο παρουσιάζονται παρακάτω. Όπως φαίνεται, από όποιον όροφο και να ξεκινήσει η κατάρρευση, θα οδηγήσει σε προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής.

<u>Η κατάρρευση ζεκινά από τον πρώτο όροφο</u>

Στην περίπτωση που πρώτος καταρρέει ο πρώτος όροφος του κτιρίου, το προσομοίωμα που εξετάζεται είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.39 (α) και οι αντίστοιχοι νόμοι

δύναμης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται Σχήμα 4.40 (β), (γ), (δ) και (ε). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.41 και 4.42 όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των μαζών και τα διαγράμματα της δύναμης κάθε ελατηρίου σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο. Παρατηρείται ότι πρώτα καταρρέει ο πρώτος όροφος και μετά ακολουθούν και οι υπόλοιποι με εξαίρεση τον τέταρτο. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη καθώς ο συγκεκριμένος όροφος καταπονείται από μικρότερο φορτίο και διαθέτει αρκετά μεγαλύτερη υπεραντοχή, αφού οι διατομές των υποστυλωμάτων σταθερές στον τρίτο και τέταρτο όροφο. Εάν η κατάρρευση ξεκινήσει από τον τέταρτο όροφο, τότε καταρρέουν και όλοι οι υπόλοιποι όροφοι του κτιρίου.



Σχήμα 4.40: Τετραώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.41: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο πρώτος όροφος τετραώροφου κτιρίου με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.42 εμφανίζονται ακρότατα στις ταλαντώσεις των ελατηρίων τη στιγμή που η πλάκα του ενός ορόφου συγκρούεται με την πλάκα του άλλου. Συγκεκριμένα, η πλάκα του πρώτου συγκρούεται με το έδαφος περίπου τη χρονική στιγμή 1.4 sec. Τη στιγμή αυτή αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στα ελατήρια, όπως επισημαίνεται με το μαύρο κύκλο. Το ίδιο συμβαίνει και για τις χρονικές στιγμές 3.1 sec και 4.5 sec, όταν δηλαδή η πλάκα του δεύτερου συγκρούεται με τον πράσινο και κόκκινο κύκλο αντίστοιχα. Μετά από κάθε σύγκρουση ακολουθεί μία μικρή ταλάντωση των μαζών η οποία όμως φθίνει πολύ γρήγορα. Στον τέταρτο όροφο μάλιστα οι ταλαντώσεις είναι τέτοιες που προκαλούν και μικρό εφελκυσμό, όπως φαίνεται στο τμήμα του διαγράμματος που επισημαίνεται με τον κύκλο. Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση καταρρέουν όλοι οι όροφοι εκτός από τον τέταρτο.



Σχήμα 4.42: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο πρώτος όροφος, 4όροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.

Η κατάρρευση ζεκινά από τον δεύτερο όροφο

Στην περίπτωση που ο δεύτερος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι δύναμης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.43 (α) και (β), (γ), (δ) και (ε) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.44 και 4.45 όπου παρουσιάζονται η σχετική

μετακίνηση των ορόφων και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα ελατήρια των ορόφων, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.



Σχήμα 4.43: Τετραώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.44: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο δεύτερος όροφος για τετραώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.

Η πλάκα του δευτέρου ορόφου συγκρούεται με το έδαφος περίπου τη χρονική στιγμή 1.3 sec. Τη στιγμή αυτή αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στα ελατήρια, όπως επισημαίνεται με τον πράσινο κύκλο. Οι πλάκες του πρώτου και του τρίτου ορόφου συγκρούονται σχεδόν ταυτόχρονα με τις από κάτω τους για αυτό δεν είναι και εύκολα διακριτά τα μέγιστα που εμφανίζονται στις δυνάμεις. Μετά από κάθε σύγκρουση ακολουθεί μία μικρή ταλάντωση των ορόφων η οποία όμως φθίνει πολύ γρήγορα. Παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσεται μικρός εφελκυσμός στο ελατήριο του τετάρτου ορόφου, όπως επισημαίνεται στο Σχήμα 4.45 (δ) με το πορτοκαλί χρώμα. Τελικά, καταρρέουν όλοι οι υπόλοιποι όροφοι του κτιρίου εκτός από τον τέταρτο.



Σχήμα 4.45: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο δεύτερος όροφος, 4όροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.

Η κατάρρευση ξεκινά από τον τρίτο όροφο

Στην περίπτωση που ο τρίτος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.46 (α) και (β), (γ), (δ), (ε), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.47 και 4.48 όπου παρουσιάζονται η σχετική μετακίνηση των ορόφων και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα ελατήρια των ορόφων, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.

Παρατηρείται, στα διαγράμματα του Σχήματος 4.48, ότι εμφανίζονται συγχρονισμένα ακρότατα στις ταλαντώσεις όταν η πλάκα ενός ορόφου συγκρούεται με την πλάκα του άλλου. Τις χρονικές στιγμές 1.4, 4.3 και 6.0 sec συγκρούονται οι πλάκες του τρίτου ορόφου με την πλάκα του δευτέρου ορόφου, του πρώτου με την πλάκα του εδάφους και του δευτέρου ορόφου με την πλάκα του πρώτου ορόφου αντίστοιχα, όπως επισημαίνεται και με τον κόκκινο, μαύρο και πράσινο κύκλο. Μετά από κάθε σύγκρουση ακολουθεί μία μικρή ταλάντωση των ορόφων η οποία όμως φθίνει πολύ γρήγορα. Παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση καταρρέουν όλοι οι όροφοι εκτός από τον τέταρτο.



Σχήμα 4.46: Τετραώροφο κτίριο με μικρή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.47: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο δεύτερος όροφος για τετραώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.48: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο πρώτος όροφος, 4όροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.

Η κατάρρευση ξεκινά από τον τέταρτο όροφο

Στην περίπτωση που ο τέταρτος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.51 (α) και (β), (γ), (δ), (ε) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.49 και 4.50 όπου παρουσιάζονται η σχετική μετακίνηση των ορόφων και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα ελατήρια των ορόφων, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, όταν η πλάκα ενός ορόφου συγκρουστεί με την πλάκα του από κάτω ορόφου, τότε εμφανίζονται τοπικά μέγιστα στις ταλαντώσεις των ελατηρίων. Συγκεκριμένα, στα διαγράμματα του Σχήματος 4.50 παρουσιάζονται τα μέγιστα που επισημαίνονται με τον μπλε, μαύρο, κόκκινο και πράσινο κύκλο τις χρονικές στιγμές που συγκρούονται οι πλάκες του τετάρτου με τον τρίτο όροφο, του τρίτου με το δεύτερο, του πρώτου με το έδαφος και του δευτέρου με την πλάκα του πρώτου ορόφου, αντίστοιχα. Και πάλι μετά από κάθε κρούση ακολουθούν μικρές ταλαντώσεις οι οποίες φθίνουν γρήγορα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η κατάρρευση του τετάρτου ορόφου οδηγεί στην κατάρρευση όλης της κατασκευής.



Σχήμα 4.49: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο δεύτερος όροφος για τετραώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.50: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο πρώτος όροφος, 4όροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.



Σχήμα 4.51: Τετραώροφο κτίριο με χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.52 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.53 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς.



Σχήμα 4.52: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης τετραώροφου κτιρίου – Dmax για χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.53: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης τετραώροφου κτιρίου – Dmax για χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (a) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.

Παρατηρείται ότι σε ορισμένες καταγραφές ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων είναι μεγαλύτερος από τις υπόλοιπες. Αυτό συμβαίνει επειδή στις καταγραφές αυτές, η κατάρρευση ξεκίνησε από τον τέταρτο όροφο με αποτέλεσμα να έχει καταρρεύσει όλη η κατασκευή, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα επιταχυνσιογραφήματα για τα οποία κατέρρευσαν όλοι οι όροφοι εκτός από τον τέταρτο.

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές [0.1,2] και μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.54 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής, κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα των σεισμών αφού συνήθως θάνατοι παρατηρούνται στην περίπτωση που καταρρεύσει η κατασκευή.



Σχήμα 4.54: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2] για 4όροφο κτίριο – Dmax και χαμηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

4.3.3.2 Υψηλή υπεραντοχή

Εξετάστηκε επιπλέον η περίπτωση που τα βαρυτικά υποστυλώματα έχουν υπεραντοχή 1.6. Δεδομένου ότι η διατομή των υποστυλωμάτων είναι σταθερή ανά δύο ορόφους, η τιμή αυτή της υπεραντοχής αφορά τον πρώτο και τον τρίτο όροφο. Τα προσομοιώματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων της κατάρρευσης ενός ορόφου στην ευστάθεια της κατασκευής παρουσιάζονται παρακάτω.

Η κατάρρευση ξεκινά από τον πρώτο όροφο

Στην περίπτωση που πρώτος καταρρέει ο πρώτος όροφος του κτιρίου, το προσομοίωμα και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.55 (α) και (β), (γ), (δ), (ε), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.56 και 4.57 όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των πλακών των ορόφων και τα διαγράμματα της δύναμης κάθε ελατηρίου σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο. Στην περίπτωση που τα βαρυτικά υποστυλώματα είναι σχεδιασμένα με μεγάλη υπεραντοχή, η κατάρρευση περιορίζεται στον όροφο από τον οποίο και ξεκινά.



Σχήμα 4.55: Τετραώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.

Παρατηρείται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.57 ότι παρουσιάζονται συγχρονισμένα μέγιστα στις ταλαντώσεις ταλαντώσεις των ελατηρίων τη χρονική στιγμή που η πλάκα του πρώτου ορόφου συγκρούεται με το έδαφος, όπως επισημαίνεται στα διαγράμματα με τον μαύρο κύκλο. Οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται φθίνουν αρκετά γρήγορα. Η κατάρρευση περιορίζεται στον πρώτο όροφο, από τον οποίον και ξεκινά.



Σχήμα 4.56: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο πρώτος όροφος τετραώροφου κτιρίου με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.57: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο πρώτος όροφος για υψηλή υπεραντοχή υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.

Η κατάρρευση ζεκινά από τον δεύτερο όροφο

Στην περίπτωση που ο δεύτερος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.58 (α) και (β), (γ), (δ), (ε), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.59 και 4.60 όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των πλακών των ορόφων και οι δυνάμεις των ελατηρίων σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.



Σχήμα 4.58: Τετραώροφο κτίριο με μικρή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.59: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο δεύτερος όροφος για τετραώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.

Και σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται μέγιστο στις ταλαντώσεις των ελατηρίων τη χρονική στιγμή περίπου 1.3 sec όταν η πλάκα του δευτέρου ορόφου συγκρουστεί με αυτή του πρώτου, όπως επισημαίνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.60 με πράσινο κύκλο. Μετά την κρούση προκαλούνται ταλαντώσεις στις μάζες, οι οποίες όμως φθίνουν αρκετά γρήγορα. Παρατηρείται ότι η κατάρρευση περιορίζεται στον δεύτερο όροφο. Σημειώνεται ότι η αρχική ταλάντωση του πρώτου ορόφου οφείλεται στο γεγονός ότι τα βαρυτικά φορτία εισάγονται δυναμικά στην αρχή της ανάλυσης. Στους υπολοίπους ορόφους δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο επειδή τα φορτία εισάγονται παράλληλα με την πτώση των πλακών.



Σχήμα 4.60: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο δεύτερος όροφος για υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.

Η κατάρρευση ξεκινά από τον τρίτο όροφο

Στην περίπτωση που ο τρίτος όροφος υπερβεί την ανηγμένη σχετική μετακίνηση 0.1, τότε το προσομοίωμα της σύγκρουσης και οι αντίστοιχοι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.63 (α) και (β), (γ), (δ), (ε), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης φαίνονται στα Σχήματα 4.61 και 4.62, όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των ορόφων και οι δυνάμεις των ελατηρίων κάθε ορόφου σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.

Παρατηρείται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.62 ότι εμφανίζονται συγχρονισμένα μέγιστα στις ταλαντώσεις των ελατηρίων τη χρονική στιγμή όταν η πλάκα του τρίτου ορόφου συγκρουστεί με την πλάκα του δευτέρου ορόφου, όπως επισημαίνεται και με τον κόκκινο κύκλο. Οι ταλαντώσεις που προκαλούνται φθίνουν αρκετά γρήγορα. Η κατάρρευση και σε αυτή την περίπτωση περιορίζεται στον όροφο από τον οποίον και ξεκινά, δηλαδή στον τρίτο.



Σχήμα 4.61: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο τρίτος όροφος για τετραώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.62: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο τρίτος όροφος για υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Ελατήριο πρώτου ορόφου, (β) Ελατήριο δευτέρου ορόφου, (γ) Ελατήριο τρίτου ορόφου, (δ) Ελατήριο τετάρτου ορόφου.



Σχήμα 4.63: Τετραώροφο κτίριο με μικρή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.

Η κατάρρευση ζεκινά από τον τέταρτο όροφο

Το προσομοίωμα της σύγκρουσης που χρησιμοποιείται ώστε να εξεταστεί η επίδραση της κατάρρευσης του τετάρτου ορόφου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.66 (α) ενώ στα (β), (γ), (δ) και (ε) φαίνονται οι νόμοι δύναμης παραμόρφωσης που ακολουθούν τα ελατήρια των ορόφων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο της προοδευτικής κατάρρευσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.64 και 4.65 όπου παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση των μαζών των ορόφων καθώς και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε ελατήριο, αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τον ψευδο – χρόνο.



Σχήμα 4.64: Σχετική μετακίνηση ορόφων στην περίπτωση που καταρρέει ο δεύτερος όροφος για τετραώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4.65: Δυνάμεις ελατηρίων στην περίπτωση που καταρρεύσει ο τέταρτος όροφος για υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) πρώτος, (β) δεύτερος, (γ) τρίτος και (δ)τέταρτος όροφος.



Σχήμα 4.66: Τετραώροφο κτίριο με υψηλή υπεραντοχή των υποστυλωμάτων: (α) Μοντέλο προοδευτικής κατάρρευσης, (β), (γ), (δ) και (ε) νόμος δύναμης – παραμόρφωσης ελατηρίου πρώτου, δεύτερου, τρίτου και τέταρτου ορόφου, αντίστοιχα.

Τη στιγμή που η πλάκα του τετάρτου ορόφου συγκρουστεί με την πλάκα του τρίτου, εμφανίζονται συγχρονισμένα μέγιστα στις δυνάμεις των ελατηρίων, όπως επισημαίνεται με το μπλε κύκλο. Οι ταλαντώσεις που ακολουθούν φθίνουν πολύ γρήγορα. Η κατάρρευση περιορίζεται μόνο στον όροφο από τον οποίο και ξεκίνησε. Σημειώνεται ότι οι ταλαντώσεις που παρουσιάζονται στην αρχή οφείλονται στο γεγονός ότι τα φορτία εισάγονται δυναμικά στην αρχή της ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.67 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο Σχήμα 4.67 (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.68 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς.



Σχήμα 4.67: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 4όροφο κτίριο – Dmax: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.68: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 4όροφο κτίριο – Dmax: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στα όρια [0.1,2] και με μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.69 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής,
κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα των σεισμών αφού συνήθως θάνατοι παρατηρούνται στην περίπτωση που καταρρεύσει η κατασκευή.



Σχήμα 4.69: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2], 4όροφο κτίριο – Dmax, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

Στο Σχήμα 4.70 παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων στην περίπτωση που οι βαρυτικές κολώνες διαθέτουν μεγαλύτερη υπεραντοχή είναι σαφώς μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση συμβαίνει προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου, ενώ για την χαμηλότερη τιμή της υπεραντοχής η κατάρρευση περιορίζεται στον όροφο από τον οποίο ξεκινά.



Σχήμα 4.70: Ποσοστημόριο 50% αριθμού απωλειών που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων του 4όροφου κτιρίου – Dmax: (α) θάνατοι και (β) τραυματισμοί.

4.3.4 Τετραώροφο κτίριο – Dmin

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του τετραώροφου κτιρίου που είναι σχεδιασμένο για την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού Dmin. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ικανοτική δυναμική ανάλυση του κτιρίου παρουσιάζονται παρακάτω. Στο Σχήμα 4.71 (α) φαίνονται οι καμπύλες IDA του πρώτου ορόφου για τις 44 καταγραφές, και στο (β) παρουσιάζονται

τα ποσοστημόρια τους 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.72, 4.73 και 4.74 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον δεύτερο, τρίτο και τέταρτο όροφο, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.71: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR πρώτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA πρώτου ορόφου.



Σχήμα 4.72: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR δευτέρου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA δευτέρου ορόφου.



Σχήμα 4.73: (α) Καμπύλες IDA σε όρους $S_a(T_1)$ – IDR τρίτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA δευτέρου ορόφου.



Σχήμα 4.74: (a) Καμπύλες IDA σε όρους S_a(T₁) – IDR τετάρτου ορόφου, (β) ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% καμπύλων IDA δευτέρου ορόφου.

. Στο Σχήμα 4.75 φαίνεται η ανηγμένη σχετική μετακίνηση κάθε ορόφου του κτιρίου αμέσως πριν από την κατάρρευση (drift profile), για τις 44 καταγραφές της εδαφικής κίνησης. Παρατηρείται ότι η κατάρρευση ενδέχεται να ξεκινήσει από τον πρώτο, τον δεύτερο ή τον τρίτο όροφο, ανάλογα από τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης.



Σχήμα 4.75: Ανηγμένη σχετική μετακίνηση ορόφων πριν την κατάρρευση του κτιρίου, 4όροφο κτίριο – Dmin.

Επειδή ότι οι βαρυτικές κολώνες δεν σχεδιάζονται ώστε να παραλαμβάνουν σεισμικά φορτία, τα αποτελέσματα του μοντέλου της προοδευτικής κατάρρευσης είναι ίδια με αυτά για το διώροφο κτίριο που είναι σχεδιασμένο για την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού Dmax. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.40 έως και 4.51 για την περίπτωση της χαμηλής και στα Σχήματα 4.55 έως και 4.65 για την περίπτωση της υψηλής υπεραντοχής. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή, η κατάρρευση ενός ορόφου οδηγεί στην προοδευτική κατάρρευση περισσότερων από ένα ορόφων ενώ αντίθετα εάν τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή, η κατάρρευση περιορίζεται στον όροφο από τον οποίο ξεκινά.

4.3.4.1 Χαμηλή υπεραντοχή

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.76 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο Σχήμα 4.76 (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήμα 4.77 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς. Παρατηρείται ότι για ορισμένες καταγραφές ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων είναι μεγαλύτερος από τις υπόλοιπες. Αυτό συμβαίνει επειδή στις καταγραφές αυτές η κατάρρευση ξεκίνησε από τον τέταρτο όροφο με αποτέλεσμα να έχει καταρρεύσει όλη η κατασκευή, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα επιταχυνσιογραφήματα για τα οποία κατέρρευσαν όλοι οι όροφοι εκτός από τον τέταρτο.



Σχήμα 4.76: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 4όροφο κτίριο – Dmin: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.



Σχήμα 4.77: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 4όροφο κτίριο – Dmin : (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στα όρια [0.1,2] και με μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.78 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής,

κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα των σεισμών, αφού συνήθως θάνατοι παρατηρούνται στην περίπτωση που καταρρεύσει η κατασκευή.



Σχήμα 4.78: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2] για το 4όροφο κτίριο – Dmin, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.

4.3.4.2 Υψηλή υπεραντοχή

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με τον αριθμό τραυματισμών και θανάτων στην περίπτωση που τα υποστυλώματα διαθέτουν υψηλή υπεραντοχή παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στο Σχήμα 4.79 (α) φαίνεται ο αριθμός των νεκρών συναρτήσει την επιτάχυνσης για κάθε μία από τις 44 καταγραφές και στο Σχήμα 4.79 (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. Στα Σχήματα 4.80 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τους τραυματισμούς.



Σχήμα 4.79: Εκτιμώμενος αριθμός θανάτων για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 4όροφο κτίριο – Dmax: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%.

Εάν θεωρηθεί ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή, με τον περιορισμό οι τιμές τους να βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές [0.1,2] και μέση τιμή 0.3, τότε τα ποσοστημόρια 16%, 50% και 64% των τραυματισμών και θανάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.81 (α) και (β) αντίστοιχα. Οι τραυματισμοί είναι σαφώς περισσότεροι από τους θανάτους και εμφανίζονται και σε μικρότερες τιμές επιτάχυνσης. Αντίθετα οι θάνατοι, παρατηρούνται για την επιτάχυνση εκείνη που οδηγεί στην κατάρρευση της κατασκευής,

κάτι που ταιριάζει με τα αποτελέσματα των σεισμών αφού συνήθως θάνατοι παρατηρούνται στην περίπτωση που καταρρεύσει η κατασκευή.



Σχήμα 4.80: Εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών για κάθε τιμή της επιτάχυνσης, 4όροφο κτίριο – Dmin: (α) για 44 επιταχυνσιογραφήματα, (β) ποσοστημόρια 16, 50 και 84%



Σχήμα 4.81: Ποσοστημόρια 16%, 50% και 84% λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ποσοστά απωλειών ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.3 και περιορισμό να ανήκουν στο διάστημα [0.1,2] για το 4όροφο κτίριο – Dmin, (α) για αριθμό θανάτων και (β) για αριθμό τραυματισμών.



Σχήμα 4.82: Ποσοστημόριο 50% αριθμού απωλειών που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής των βαρυτικών υποστυλωμάτων, 4όρωφου κτιρίου – Dmin: (α) θάνατοι και (β) τραυματισμοί.

Στο Σχήμα 4.82 παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο αριθμός των τραυματισμών και των θανάτων στην περίπτωση που οι βαρυτικές κολώνες διαθέτουν μεγαλύτερη υπεραντοχή είναι σαφώς μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση συμβαίνει προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου, ενώ για την χαμηλότερη τιμή της υπεραντοχής η κατάρρευση περιορίζεται σε έναν όροφο.

4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και αφορούν τις δύο περιπτώσεις υπεραντοχής κάθε κτιρίου. Κρίνεται όμως σκόπιμο να συγκριθούν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν τα διώροφα και τα τετραώροφα κτίρια, για κάθε ομάδα αντισεισμικού σχεδιασμού. Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση διαφορετικών κτιρίων, πρέπει να πραγματοποιηθεί αναγωγή τους στην ίδια ιδιοπερίοδο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα αποτελέσματα αυτά, βασίζονται σε αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με επιλεγμένο μέτρο έντασης την επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής του κτιρίου για απόσβεση 5%. Το S_a (T_1 , 5%) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περισσότερα από ένα κτίρια αφού εξαρτάται από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν για την επιτάχυνση $S_{agm}(T_i)$, η οποία αποτελεί το γεωμετρικό μέσο των S_a (T_i) , με τις πέντε T_i που χρησιμοποιήθηκαν να είναι οι ακόλουθες: $[T_{2m}, min\{(T_{2m}+T_{1m})/2;$ $1.5 \cdot T_{2m}$, T_{1m} , $1.5 \cdot T_{1m}$, $2 \cdot T_{1m}$], [13]. Για τα διώροφα κτίρια οι τιμές αυτές είναι $T_{i,\delta\iota\omega\rho\sigma\sigma\sigma}$ =[0.34 0.51 1.29 1.93 2.58] ενώ για τα τετραώροφα είναι $T_{i,\tau\epsilon\tau\rho\alpha\omega\rho\sigma\sigma\sigma}$ =[0.50 0.74 1.53 2.29 3.05]. Στο Σχήμα 4.83 (α) και (β) παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 50% για τους τραυματισμούς και τους θανάτους, αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα, για τα διώροφα κτίρια για την περίπτωση που οι βαρυτικές κολώνες διαθέτουν μικρή υπεραντοχή. Στο Σχήμα 4.84 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν τα τετραώροφα κτίρια και στα Σχήματα 4.85 και 4.86 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν στην περίπτωση που οι βαρυτικές κολώνες διαθέτουν μεγάλη υπεραντογή.



Σχήμα 4.83: Συγκριτικά αποτελέσματα για διώροφα κτίρια με χαμηλή υπεραντοχή των βαρυτικών υποστυλωμάτων: (a) Θάνατοι, (β) τραυματισμοί.



Σχήμα 4.84: Συγκριτικά αποτελέσματα για τετραώροφα κτίρια με υψηλή υπεραντοχή των βαρυτικών υποστυλωμάτων: (α) Θάνατοι, (β) τραυματισμοί.



Σχήμα 4.85: Συγκριτικά αποτελέσματα για διώροφα κτίρια με υψηλή υπεραντοχή των βαρυτικών υποστυλωμάτων: (a) Θάνατοι, (β) τραυματισμοί.



Σχήμα 4.86: Συγκριτικά αποτελέσματα για τετραώροφα κτίρια με υψηλή υπεραντοχή των βαρυτικών υποστυλωμάτων: (α) Θάνατοι, (β) τραυματισμοί.

Παρατηρείται ότι οι τραυματισμοί και οι θάνατοι εμφανίζονται για υψηλότερες τιμές επιταχύνσεων στα κτίρια που είναι σχεδιασμένα για την κατηγορία Dmax. Αυτό είναι και αναμενόμενο, καθώς σε αυτή την περίπτωση οι κατασκευές είναι ισχυρότερες, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν αντίστοιχες ζημιές με τα κτίρια που είναι σχεδιασμένα για την κατηγορία Dmin σε μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, επειδή

δεν λήφθηκαν υπόψη τα υποστυλώματα που ανήκουν στα περιμετρικά πλαίσια ανάληψης οριζοντίων δυνάμεων, αλλά μόνο οι βαρυτικές κολώνες, τα αποτελέσματα της κατάρρευσης ενός ορόφου στο σύνολο της κατασκευής είναι τα ίδια και για τις δύο κατηγορίες αντισεισμικού σχεδιασμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αριθμός των ανθρώπων που αναμένεται να τραυματιστούν ή να πεθάνουν να είναι ίσος και για τις δύο κατηγορίες. Στην περίπτωση του τετραώροφου κτιρίου όπου τα βαρυτικά υποστυλώματα έχουν μεγάλη υπεραντοχή, δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για το κτίριο που είναι σχεδιασμένο για Dmax, ορισμένες καταγραφές οδηγούν στην αρχική κατάρρευση του τετάρτου ορόφου, η οποία με τη σειρά της συνεπάγεται την κατάρρευση όλης της κατασκευής άρα και μεγαλύτερο αριθμό θανάτων και τραυματισμών. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην περίπτωση που η υπεραντοχή των βαρυτικών υποστυλωμάτων είναι μεγάλη, ο αριθμός των απωλειών είναι σαφώς μικρότερος αφού η κατάρρευση περιορίζεται σε έναν όροφο του κτιρίου.

5 Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας εργασίας συνίσταται στην ανάπτυξη ενός μοντέλου για την εξέταση της επίδρασης της τοπικής κατάρρευσης ορόφου στο σύνολο της κατασκευής. Στο πλαίσιο αυτό, περιγράφεται μεθοδολογία με την οποία υπολογίζεται ο αριθμός τραυματισμών και απωλειών κατά τη διάρκεια των εδαφικών μετακινήσεων λόγω σεισμικής καταπόνησης ενός κτιρίου.

Η μελέτη του σταδίου που έπεται της κατάρρευσης έχει ιδιαίτερη αξία, ωστόσο αποτελεί αντικείμενο το οποίο δεν έχει αναλυθεί επαρκώς μέχρι σήμερα, με την πλειονότητα των διαφόρων ευρέως χρησιμοποιούμενων μοντέλων, να «φτάνουν» έως το σημείο που δημιουργείται κάποιος μηχανισμός κατάρρευσης. Ως εκ τούτου, μέσω της προσέγγισης που πραγματοποιείται, μπορεί να δοθεί μια εικόνα για το τι συμβαίνει στο στάδιο που έπεται της δημιουργίας του μηχανισμού αυτού, πράγμα το οποίο αποτελεί και τη βασική συμβολή της παρούσας εργασίας. Παρά το γεγονός ότι φάνηκε πως τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, κρίνεται σκόπιμο, στην ενότητα αυτή, να επισημανθούν τα σημεία εκείνα στα οποία εντοπίζεται η κύρια πηγή αβεβαιότητας ως προς τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται και τα αποτελέσματα που υπολογίζονται.

Στο πλαίσιο αυτό, για την ανάπτυξη του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιητικό προσομοίωμα μαζών και ελατηρίων και επιλέχθηκαν, βάσει εύλογων παραδοχών, οι γενικές παράμετροι του συστήματος. Οι παραδοχές αυτές ήταν αναγκαίο να γίνουν, λόγω της μη ύπαρξης πειραματικών δεδομένων αναφορικά με τη συμπεριφορά του κτιρίου μετά από την κατάρρευση ενός ορόφου του. Αν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδείχθηκαν απολύτως συνεπή, είναι αναγκαία η διεξαγωγή πειραμάτων για την επαλήθευση αυτών και την επίτευξη αντιπροσωπευτικότερης ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου.

Κατά την τοπική κατάρρευση ορόφου, λαμβάνει χώρα κρούση ανάμεσα στις πλάκες των διαδοχικών ορόφων του κτιρίου. Στην κρούση εμφανίζονται μια σειρά από ιδιαίτερα σύνθετα και πολύπλοκα στη μελέτη τους φαινόμενα (όπως πλαστικοποιήσεις, απώλεια ενέργειας και άλλα), η ακριβής γνώση και προσομοίωση των οποίων καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, έως αδύνατη. Ως εκ τούτου, οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις που υπολογίζονται και λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται δεν μπορεί να θεωρηθούν απολύτως ακριβείς, αλλά ενδεικτικές.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να τονισθεί πως οι εκτιμώμενοι αριθμοί τραυματισμών και θανάτων που προκαλούνται από τη σεισμική καταπόνηση του κτιρίου, βασίστηκαν σε ποσοστά απωλειών τα οποία έχουν προκύψει σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία παλαιότερων σεισμών. Έτσι, είναι σαφές πως υπάρχει σχετική αβεβαιότητα για τα μεγέθη αυτά.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, αρχικά διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση που τα βαρυτικά υποστυλώματα διαθέτουν μικρή υπεραντοχή, η τοπική κατάρρευση ενός ορόφου οδηγεί στην προοδευτική κατάρρευση του κτιρίου. Αντίθετα, όταν αυτά έχουν μεγάλη υπεραντοχή, η κατάρρευση περιορίζεται στον όροφο από τον οποίο και ξεκινά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην πρώτη περίπτωση, ο αριθμός των ανθρώπων που αναμένεται να τραυματιστούν ή να πεθάνουν από το σεισμό να είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που προκύπτει στην περίπτωση της χαμηλής υπεραντοχής των

υποστυλωμάτων. Ενδεικτικά, στα διώροφα κτίρια που εφαρμόστηκε το μοντέλο προκλήθηκαν σχεδόν διπλάσιες απώλειες (15 έναντι 8 θανάτων) ενώ στα τετραώροφα σχεδόν τριπλάσιες (23 έναντι 8 θανάτων). Τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται προφανώς από τον αριθμό των ορόφων που τελικά καταρρέουν.

Στην Ελλάδα, τα σύγχρονα μεταλλικά κτίρια διαθέτουν στην πλειονότητά τους πλαίσια ροπής. Τα υποστυλώματά τους διαθέτουν υψηλή υπεραντοχή λόγω της απαίτησης που επιβάλλεται από τον ικανοτικό σχεδιασμό ώστε τα αξονικά τους φορτία να μην υπερβαίνουν το 15% της αξονικής τους αντοχής. Έτσι, τα κτίρια αυτά έχουν μεγάλο ποσοστό ασφάλειας έναντι διαδοχικής κατάρρευσης. Αντίθετα, στα παλαιότερα κτίρια που έχουν σχεδιαστεί απουσία ικανοτικού σχεδιασμού, υπάρχει σημαντική πιθανότητα σε ένα σεισμό να παρουσιαστεί ολική κατάρρευση της κατασκευής.

Τέλος, αναφορικά με την κατηγορία αντισεισμικού σχεδιασμού του κτιρίου, παρατηρήθηκε ότι η κατάρρευση, άρα και ο μεγάλος αριθμός των τραυματισμών και θανάτων, εμφανίστηκε για μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης στα κτίρια που είναι σχεδιασμένα για την κατηγορία Dmax. Συγκεκριμένα, η επιτάχυνση αυτή ήταν περίπου μίαμιση φορά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που αφορά τα κτίρια της κατηγορίας Dmin. Η τιμή αυτή προέκυψε μετά από αναγωγή των αποτελεσμάτων στην ίδια ιδιοπερίοδο κατασκευής, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, αφού τα κτίρια που είναι σχεδιασμένα για Dmax είναι ισχυρότερα με αποτέλεσμα να αναμένεται να καταρρεύσουν σε μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης.

6 Βιβλιογραφία

 Πενέλης Γ. (2008). «Σεισμός της Θεσσαλονίκης 1978: Καμπή στην αντισεισμική προστασία της χώρας.» Μνήμες και Προοπτική – 30 χρόνια μετά το σεισμό της Θεσσαλονίκης.

http://www.eng.auth.gr/fileadmin/_migrated/content_uploads/200805seismos_01.pdf

- 2. ASCE (2005). "Minimum design loads for building and other structures." ASCE 7-05. New York.
- Chopra A.K. (2010). «Δυναμική των κατασκευών, 2^η Ελληνική επανέκδοση», Εκδόσεις Μ. Γκιουρίδης, Αθήνα.
- 4. Coburn A.W., Spence R.J.S. (2002). "Earthquake Protection, 2nd Edition", Wiley, Chichester.
- 5. FEMA 178, (1992). "NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings." Developed by Building Seismic Safety Council (SBSS) for the Federal Emergency Management, BSSC, Washington, D.C.
- FEMA, (2009). "Quantification of Building Seismic Performance Factors." Report FEMA P695, prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2009.
- FEMA, (2011a). "Advanced Engineering Building Module (AEBM) User Manual" Technical report U.S. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency <u>http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/24609</u>.
- 8. FEMA, (2011b). "Earthquake Model Technical Manual." Technical report U.S. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency <u>http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/24609</u>.
- 9. FEMA, (2012a). "FEMA P-58-1: Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 - Methodology." Federal Emergency Management Agency (FEMA)
- 10. FEMA (2012b). "FEMA P-58-2: Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 2 – Implementation." Federal Emergency Management Agency (FEMA)
- 11. Giles M., (2011). "Total Progressive Collapse: Why, precisely, the towers fell". New York Magazine, <u>http://nymag.com/news/9-11/10th-anniversary/towers-collapse</u>
- Jaiswal K., Wald, D. J., & Hearne, M. (2009). "Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach." US Geological Survey Open-File Report 2009-1136.
- 13. Kazantzi A., Vamvatsikos D., Porter K., Cho I.H., (2014). "Analytical vulnerability assessment of modern highrise RC moment-resisting frame buildings in Western USA for Global Earthquake Model." In Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.
- 14. Marano K.D, Wald D.J., Allen T.I., (2009). "Global earthquake casualties due to secondary effects: a quantitative analysis for improving rapid loss analyses". Nat Hazards, 52(2), 319-328.
- 15. Minami S., Yamazaki S., (2007). "Analysis of progressive collapse in multi-storey frames based on post-buckling behavior of steel columns." Proceedings of Eight Pacific Structural Steel Conference (PSSC 2007) 2, 321-326.
- 16. Minami S., Yamazaki S., (2008). "Study on conditions for preventing progressive collapse in multistory steel frames." Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

- 17. NIST (2010). "Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors" Report No NIST GCR 10-917-8, prepared for the National Institute of Standards by the NEHRP Consultants Joint Venture, CA.
- 18. Samardjieva, E., and Badal, J. (2002). "Estimation of the expected number of casualties caused by strong earthquakes." Bulletin of the Seismological Society of America, 92(6), 2310-2322.
- 19. So E., Spence R., (2013). "Estimating shaking-induced casualties and building damage for global earthquake events: a proposed modelling approach." Bulletin of Earthquake Engineering, 11(1), 347-363.
- 20. So E., (2016). "Estimating Fatality Rates for Earthquake Loss Models." Springer International Publishing.
- 21. Spence R., (2007). "Human losses." LessLoss report 2007/07, 51-58.
- 22. Vamvatsikos D., Cornell C.A. (2002). "Incremental Dynamic Analysis." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31(3), 491–514.
- 23. Vamvatsikos D., Cornell C.A., (2002). "The Incremental Dynamic Analysis and its application to Performance-Based Earthquake Engineering." Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.
- 24. Vamvatsikos D., Cornell C.A., (2005). "Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information." Earthquake engineering & structural dynamics, 34(13), 4579-1600.
- 25. Vamvatsikos D., Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece http://users.ntua.gr/divamva/software.html
- 26. Vlassis A.G., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. (2009). "Progressive collapse of multi-storey buildings due to failed floor impact." Engineering Structures, 31(7), 1522-1534.
- 27. Yan W., Tan K.H. (2011). "Modeling of progressive collapse of a multi-storey structure using a spring-mass-damper system." Structural Engineering and Mechanics, 37(1), 79-93.