

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Μαρία Ζιμπή

Επιβλέπων: Δρ. Νικόλαος Πνευματικός

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ, με όλη μου την καρδιά, στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Δρ. Νικόλαο Πνευματικό και στον σύζυγό μου Σταύρο, για την απέραντη κατανόηση και υπομονή που επέδειξαν προς εμένα, καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Χωρίς την παρουσία τους και τη βοήθειά τους, τίποτα δεν θα είχε επιτευχθεί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η εκτίμηση κατά τη μεθοδολογία FEMA P-58 των απωλειών που αναμένεται να καταγραφούν στο εσωτερικό ενός κτηρίου το οποίο υπόκειται σε σεισμική δόνηση συγκεκριμένης έντασης. Στα πλαίσια της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας επιλέγεται και τεκμηριώνεται, βάσει του φακέλου μελέτης, ένα τυπικό πολυώροφο κτήριο χαμηλού ύψους από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με υπόγειο, pilotis, τρεις τυπικούς ορόφους και δώμα. Αρχικά, το κτήριο αναλύεται με χρήση μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (ανάλυση χρονοϊστορίας), προκειμένου να προσδιορισθούν βασικά εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη. Ακολούθως, τα εν λόγω μεγέθη, μαζί με λοιπά απαιτούμενα δεδομένα και επιλεγμένες τιμές παραμέτρων, εισάγονται στο ηλεκτρονικό εργαλείο PACT, με το οποίο διεξάγεται η ανάλυση τρωτότητας και εκτίμησης σεισμικών απωλειών, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μεθοδολογίας.

Από την ανάλυση εξάγονται αποτελέσματα που αφορούν σε εκτιμώμενες απώλειες, οι οποίες εκφράζονται σε όρους κόστους επισκευής, χρόνου επισκευής, θυμάτων (τραυματισμών και θανάτων) και επισφαλών στοιχείων. Τα εν λόγω αποτελέσματα παρουσιάζονται και σχολιάζονται, όσον αφορά στην πιθανοτική φύση τους και χαρακτηριστικές τιμές τους. Τέλος, στα πλαίσια εξέτασης ενδεχόμενης πρακτικής εφαρμογής των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: Σεισμός, τρωτότητα, εκτίμηση, απώλειες, PACT.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the estimation, according to FEMA P-58 methodology, of losses that are expected to be recorded inside a building subjected to an earthquake of specific intensity. Following the applied methodology, a typical low-rise Reinforced Concrete building with basement, pilotis, three typical floors and a roof is selected and documented, according to its study file. Initially, the building is analyzed using Nonlinear Response History Analysis, in order to define basic intensive and deformation properties. These properties, along with other required data and selected parameter values, are then entered into the PACT electronic tool, which performs vulnerability analysis and seismic loss assessment, in accordance with the specifications of the methodology.

The analysis exports results for estimated losses, which are expressed in terms of repair cost, repair time, casualties (injuries and fatalities) and unsafe placards. These results are expounded and commented on, in terms of their probabilistic nature and their characteristic values. Finally, within the framework of examining possible practical application of the expounded results, recommendations for future research are expressed.

Keywords: Earthquake, vulnerability, assessment, loss, PACT.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
I. Γενικά.....	15
II. Σκοπός και αποτελέσματα της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας	16
III. Μέθοδοι συλλογής δεδομένων και ακολουθούμενη μεθοδολογία	17
IV. Δομή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΣ.....	19
1.1. Σεισμική τρωτότητα και παράγοντες επιρροής	19
1.1.1. Χαρακτηριστικά σεισμικής δόνησης	20
1.1.2. Περιβαλλοντικοί παράγοντες.....	21
1.1.3. Ανθρωπογενείς παράγοντες	22
1.2. Αιτίες εκδήλωσης σεισμικής τρωτότητας	24
1.2.1. Εδαφική κίνηση	24
1.2.2. Επιφανειακή διάρρηξη	28
1.2.3. Τσουνάμι	30
1.3. Μέθοδοι εκτίμησης σεισμικής τρωτότητας.....	32
1.3.1. Εμπειρικές μέθοδοι.....	33
1.3.2. Αναλυτικές μέθοδοι	34
1.3.3. Μέθοδοι κατηγοριοποίησης	36
1.3.4. Μέθοδοι επιθεώρησης και εκτίμησης	36
1.4. Άμεσες συνέπειες σεισμικής τρωτότητας.....	37
1.4.1. Υφιστάμενο κτηριακό απόθεμα	39
1.4.2. Εγκαταστάσεις Εκτάκτων Αναγκών	40
1.4.3. Εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας μεγάλης κλίμακας	42
1.4.4. Εγκαταστάσεις Κοινής Ωφελείας.....	44
1.5. Έμμεσες συνέπειες σεισμικής τρωτότητας	46
1.5.1. Πυρκαγιά	46
1.5.2. Διασπορά επικίνδυνων υλικών	47
1.5.3. Πλημμύρα.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΩΛΕΙΕΣ.....	51
2.1. Ερευνητικές μέθοδοι και μοντέλα εκτίμησης απωλειών	51
2.1.1. Κτηριακές ερευνητικές εργασίες εκτίμησης απωλειών.....	51
2.1.2. Χωρικές ερευνητικές εργασίες εκτίμησης απωλειών	54
2.1.3. Μεθοδολογία HAZUS	55
2.1.4. Περιορισμοί στη διαδικασία εκτίμησης απωλειών	57

2.2.	Λογισμικά εκτίμησης απωλειών	58
2.2.1.	CAPRA (<i>Central American Probabilistic Risk Assessment</i>)	59
2.2.2.	OpenQuake.....	61
2.2.3.	SELENA (<i>Seismic Loss Estimation using a Logic Tree Approach</i>)	62
2.2.4.	ELER (<i>Earthquake Loss Estimation Routine</i>)	64
2.2.5.	HAZUS-MH	65
2.3.	Μεθοδολογία αποτίμησης συμπεριφοράς και εκτίμησης απωλειών FEMA.....	67
2.3.1.	Seismic Performance Assessment of Buildings (<i>FEMA P-58</i>)	68
2.3.2.	PACT (<i>Performance Assessment Calculation Tool</i>)	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ. 73		
3.1.	Επιλογή και περιγραφή κτηρίου	73
3.2.	Προσομοίωση κτηρίου	74
3.2.1.	Δεδομένα Έργου (<i>Project Info</i>)	75
3.2.2.	Δεδομένα Κτηρίου (<i>Building Info</i>)	76
3.2.3.	Πληθυσμιακά δεδομένα (<i>Population</i>).....	78
3.2.4.	Τρωτότητες μελών (<i>Component Fragilities</i>)	80
3.2.5.	Ομάδες απόδοσης (<i>Performance Groups</i>)	83
3.2.6.	Τρωτότητα κατάρρευσης (<i>Collapse Fragility</i>).....	84
3.2.7.	Αποτελέσματα δομικής ανάλυσης (<i>Structural Analysis Results</i>)	85
3.2.8.	Παραμένουσα μετακίνηση (<i>Residual Drift</i>).....	86
3.2.9.	Καμπύλη επικινδυνότητας (<i>Hazard Curve</i>)	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		
4.1.	Γενικές επισημάνσεις	89
4.2.	Εξέταση αποτελεσμάτων.....	89
4.2.1.	Κόστος επισκευής (<i>Repair Cost</i>)	90
4.2.2.	Χρόνος επισκευής (<i>Repair Time</i>)	93
4.2.3.	Θύματα (<i>Casualties</i>)	96
4.2.4.	Επισφαλή στοιχεία (<i>Unsafe Placards</i>)	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		
5.1.	Γενικά συμπεράσματα.....	103
5.2.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	104

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Σεισμική θνησιμότητα βάσει επιλεγμένων κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών.	23
Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση χρονικά προβλέψιμης σεισμικής συμπεριφοράς.....	26
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα νευρωνικού δικτύου.	27
Εικόνα 4: Συσχέτιση μεγέθους σεισμού με μήκος επιφανειακής διάρρηξης, για διάφορους τύπους ρηγμάτων.....	28
Εικόνα 5: Χάρτης πιθανότητας περιόδου επαναφοράς επιφανειακής διάρρηξης, για την υποθετική περιοχή.....	29
Εικόνα 6: Χάρτης ευπάθειας σε επιφανειακή διάρρηξη λόγω ρευστοποίησης, για την υποθετική περιοχή.....	29
Εικόνα 8: Δημιουργία τσουνάμι λόγω σεισμικής δραστηριότητας.	31
Εικόνα 7: Μηχανισμός δημιουργίας τσουνάμι.....	31
Εικόνα 9: Τυπολογίες κτηρίων σύμφωνα με τη μεθοδολογία HAZUS.....	56
Εικόνα 10: Κατηγορίες χρήσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία HAZUS.....	57
Εικόνα 11: Μοντέλο πιθανοτικής ανάλυσης και εφαρμογές διαχείρισης κινδύνου.....	60
Εικόνα 12: Διάγραμμα ροής ανασχεδιασμού υφιστάμενων υποδομών (ανάλυση Κόστους-Οφέλους).....	61
Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής του SELENA.....	63
Εικόνα 14: Τα 3 επίπεδα ανάλυσης του ELER.....	64
Εικόνα 15: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης σεισμικών απωλειών.....	66
Εικόνα 16: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας FEMA P-58.....	68
Εικόνα 17: Δομικά στοιχεία κατά μεθοδολογία FEMA P-58.....	69
Εικόνα 18: Κτηριακές χρήσεις κατά μεθοδολογία FEMA P-58.....	69
Εικόνα 19: Διαδικασία αποτίμησης κτηρίου κατά PACT.....	71
Εικόνα 20: Κάτοψη τυπικού ορόφου.....	73
Εικόνα 21: Τομή κατά μήκος.....	74
Εικόνα 22: Αριθμός και ύψος σταθμών κτηρίου κατά PACT.....	76
Εικόνα 23: Ωριαία κατανομή πληθυσμού ανά ημέρα (τυπικοί όροφοι).....	79
Εικόνα 24: Διάγραμμα ωριαίας κατανομής πληθυσμού ανά ημέρα (τυπικοί όροφοι).....	79
Εικόνα 25: Μηνιαία κατανομή πληθυσμού ανά έτος (τυπικοί όροφοι).....	79
Εικόνα 26: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου κόστους επισκευής.....	90
Εικόνα 27: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης κόστους επισκευής ανά φόρτιση.....	91
Εικόνα 28: Διάγραμμα κόστους ανά κύρια ομάδα απόδοσης.....	91
Εικόνα 29: Διάγραμμα κόστους ανά υποομάδα απόδοσης.....	91
Εικόνα 30: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης κόστους επισκευής.....	92

Εικόνα 31: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης κόστους επισκευής (σταθμισμένη).	92
Εικόνα 32: Κόστος επισκευής στοιχείου ανά επανάληψη.....	93
Εικόνα 33: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου χρόνου επισκευής.....	93
Εικόνα 34: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης χρόνου επισκευής ανά φόρτιση.....	94
Εικόνα 35: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης χρόνου επισκευής.	95
Εικόνα 36: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης χρόνου επισκευής (σταθμισμένη).	95
Εικόνα 37: Χρόνος επισκευής στοιχείου ανά επανάληψη.....	96
Εικόνα 38: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου αριθμού τραυματισμών.....	97
Εικόνα 39: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης αριθμού τραυματισμών ανά φόρτιση.	97
Εικόνα 40: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού τραυματισμών.	98
Εικόνα 41: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού τραυματισμών (σταθμισμένη).	98
Εικόνα 42: Αριθμός τραυματισμών ανά επανάληψη.	99
Εικόνα 43: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου αριθμού θανάτων.	99
Εικόνα 44: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης αριθμού θανάτων ανά φόρτιση.....	100
Εικόνα 45: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού θανάτων.	101
Εικόνα 46: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού θανάτων (σταθμισμένη).	101
Εικόνα 47: Αριθμός θανάτων ανά επανάληψη.....	102
Εικόνα 48: Διάγραμμα εμφάνισης επισφαλών στοιχείων ανά ομάδα απόδοσης.	102

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Ομάδες τρωτότητας μη δομικών μελών.....	82
Πίνακας 2: Ομάδες απόδοσης δομικών μελών.	83
Πίνακας 3: Ομάδες απόδοσης μη δομικών μελών.	84

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

I. Γενικά

Η καθημερινότητα σε ένα πλανήτη ζωντανό, υπό διαρκή δραστηριότητα και εξέλιξη, χαρακτηρίζεται από ποικιλία εκδήλωσης φυσικών φαινομένων, μεταξύ των οποίων και ο σεισμός. Η εμφάνιση του Εγκέλαδου λαμβάνει χώρα σε κάποιο σημείο της γης αρκετά συχνά, ενώ οι σεισμικές δονήσεις θεωρούνται από τα συχνότερα φυσικά φαινόμενα στην Ευρωπαϊκή ήπειρο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα στατιστικά στοιχεία που διατίθενται για τη χρονική περίοδο μεταξύ των ετών 1980 έως 2014, βάσει των οποίων οι σεισμοί κατατάσσονται στη δεύτερη θέση μεταξύ των φυσικών φαινομένων, όσον αφορά στην έκταση και των αριθμό των συνεπαγόμενων απωλειών. Έχοντας προκαλέσει περισσότερους από 30.000 θανάτους και με συνολικό κόστος βλαβών άνω των 60 δις., οι σεισμοί αποτελεί μία διαχρονική κοινωνική πρόκληση που καλεί σε διαρκή δράση και λήψη μέτρων προς την κατεύθυνση του μετριασμού του κινδύνου και της μείωσης των απωλειών.

Το ανωτέρω θέμα αντιμετωπίζεται σε πρώτο στάδιο ως αντικείμενο των μελετών εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, με δεύτερο στάδιο αυτό του υπολογισμού των συνεπαγόμενων απωλειών. Κεντρικό ζητούμενο των μελετών αυτών είναι η εξακρίβωση των στοιχείων που συνιστούν παράγοντες τρωτότητας σε ένα μεμονωμένο κτήριο ή σε μία περιοχή, ο προσδιορισμός του βαθμού έκθεσης δομικών μελών και ανθρώπων σε αυτά τα στοιχεία και, τέλος, η εκτίμηση της πιθανότητας πρόκλησης υλικών απωλειών και θυμάτων ως συνέπεια της τρωτότητας, σε ενδεχόμενη περίπτωση σεισμικής διέγερσης. Για τις ανάγκες ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων, οι απώλειες σε ανθρώπινες ζωές αποδίδονται από τον αναμενόμενο αριθμό θυμάτων, με επιμέρους διάκριση σε νεκρούς και τραυματίες. Αντίστοιχα, οι υλικές απώλειες υπολογίζονται σε οικονομικούς όρους, είτε ως άμεσο κόστος επισκευής βλαβών και ανακατασκευής κατεστραμμένων στοιχείων, είτε ως έμμεσο κόστος λόγω μείωσης των εσόδων από την επιβράδυνση ή ακόμη και διακοπή της παραγωγικής δραστηριότητας, συνεπεία των ζημιών που έχει προκαλέσει ο σεισμός.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης τρωτότητας απαιτείται να προηγηθεί ένα στάδιο προκαταρκτικών ερευνών, κατά τη διάρκεια του οποίου προσδιορίζονται ο σεισμικός κίνδυνος και καταγράφονται όσο το δυνατόν αναλυτικότερα τα υλικά και έμψυχα υποκείμενα σε αυτόν (κατασκευές και πληθυσμός), προκειμένου να εκτιμηθεί η ευπάθειά τους σε περίπτωση έκθεσής τους στο σεισμικό κίνδυνο. Η εν λόγω διερεύνηση καθιστά εμφανή τον πολυδιάστατο χαρακτήρα των αναλύσεων τρωτότητας, καθώς επιβάλλει συνεκτίμηση και αξιολόγηση μηχανικών, γεωλογικών, σεισμολογικών, δημογραφικών και

οικονομικών δεδομένων, τα οποία τελικά ενσωματώνονται σε ένα μοντέλο που αναπτύσσεται βάσει της ενδεδειγμένης για την περίπτωση μεθοδολογίας.

II. Σκοπός και αποτελέσματα της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Οι προαναφερθέντες επιμέρους παράγοντες, που εξετάζονται στα πλαίσια των αναλύσεων τρωτότητας και εκτίμησης σεισμικών απωλειών, καθώς και κάποιες εκ των δημοφιλέστερων σχετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων που ακολουθούνται, παρουσιάζονται εποπτικά στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Σε συνέχεια της αρχικής θεωρητικής παρουσίασης επιλέγεται η πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού σεισμικών απωλειών κατά FEMA P-58 σε πολυώροφο κτήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, το οποίο αναλύεται με χρήση του συνοδευτικού ηλεκτρονικού εργαλείου PACT.

Σκοπός της ανωτέρω ανάλυσης είναι η εκτίμηση των απωλειών που αναμένεται να καταγραφούν στο κτήριο της μελέτης περίπτωσης μετά από την εκδήλωση ενός σεισμού, όσον αφορά σε κόστος και χρόνο επισκευής, θύματα και επισφαλή στοιχεία. Τα αποτελέσματα που εξάγονται από την ανάλυση παρουσιάζονται ανά είδος, ενώ παράλληλα σχολιάζονται ως προς τις πιθανοτικές τιμές τους και ως προς το εύρος πεδίου των υπόψη τιμών.

Τελικό ζητούμενο της διερεύνησης αποτελεί ο εντοπισμός τυχόν συσχετισμών μεταξύ των ανωτέρω εκτιμώμενων απωλειών, τόσο ανά είδος όσο και μεταξύ των ειδών, καθώς και μεταξύ αυτών και των παραγόντων που επιδρούν στη διαμόρφωση της συγκεκριμένης σεισμικής συμπεριφοράς του κτηρίου. Με αυτό τον τρόπο, επιχειρείται να δοθεί μία απλή, κατανοητή και χρηστική απάντηση στα ακόλουθα ερωτήματα:

- Ποιό είναι το αναμενόμενο κόστος αποκατάστασης των υλικών απωλειών;
- Ποιός αναμένεται να είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών αποκατάστασης, και πόσο επηρεάζεται από το βαθμό χρήσεως του κτηρίου;
- Πόσα θύματα θα καταγραφούν στο κτήριο, λόγω των βλαβών που αναμένεται να προκαλέσει ο σεισμός;
- Θα υπάρξει ανάγκη εκκένωσης των χώρων του κτηρίου, λόγω αστοχίας κρίσιμων στοιχείων του;

III. Μέθοδοι συλλογής δεδομένων και ακολουθούμενη μεθοδολογία

Για τη διερεύνηση, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εφαρμόσθηκε μεθοδολογία που διακρίνεται σε δύο επιμέρους τμήματα, ως εξής:

- **Στο πρώτο τμήμα** γίνεται μία σύντομη παράθεση των βασικών θεωρητικών αρχών που συνθέτουν την έννοια της τρωτότητας, με έμφαση στο στοιχείο του σεισμού. Αναλύονται οι παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό τρωτότητας των κατασκευών, και προσδιορίζονται οι αιτίες και οι δυνητικές συνέπειές της, οι οποίες καταγράφονται υπό μορφή απωλειών, υλικών και έμψυχων, άμεσων και έμμεσων. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι βασικότερες μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας και υπολογισμού απωλειών, καθώς και κάποια από τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα σχετικά λογισμικά.
- **Στο δεύτερο τμήμα** επιλέγεται πολυώροφο κτήριο από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με χρήση κατοικίας, ως μελέτη περίπτωσης και πρακτικής εφαρμογής της μεθοδολογίας εκτίμησης απωλειών λόγω σεισμού κατά FEMA P-58, με χρήση του σχετικού ηλεκτρονικού εργαλείου PACT. Οι πληροφορίες που εισάγονται στο PACT οδηγούν στη δημιουργία προσομοιώματος με τα βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, τον καθορισμό της ποσότητας, θέσης και τρωτότητας των δομικών και μη δομικών στοιχείων του και τον αρχικό προσδιορισμό της αναμενόμενης βλάβης αυτών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρέχουν εκτιμώμενες τιμές για το κόστος και το χρόνο επισκευής, τον αριθμό των θυμάτων και την εμφάνιση επισφαλών στοιχείων, τα οποία συνιστούν και τις ζητούμενες απώλειες που αναμένεται να καταγραφούν στο κτήριο λόγω σεισμού.

IV. Δομή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζεται και αναπτύσσεται σε πέντε επιμέρους Κεφάλαια ως εξής:

Στο 1^ο Κεφάλαιο (Τρωτότητα και Σεισμός) παρουσιάζονται η έννοια της σεισμικής τρωτότητας και οι εμπειρικές συνιστώσες της, υπό τη μορφή παραγόντων που συσχετίζονται με την ύπαρξή της, προκαλούν την εκδήλωσή της και διαμορφώνουν το εύρος των συνεπειών της. Επιπλέον, παρατίθενται οι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας, βάσει των υφιστάμενων εναλλακτικών θεωρήσεων που ακολουθούνται για τις ανάγκες ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού των βλαβών.

Στο 2^ο Κεφάλαιο (Απώλειες) παρουσιάζονται οι ποικίλες υπολογιστικές προσεγγίσεις που έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων ερευνητικών μεθόδων ποσοτικοποίησης της τρωτότητας των κατασκευών, βάσει σεισμικής επικινδυνότητας ή εύρους αντικειμένου ανάλυσης. Παράλληλα, παρατίθενται οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων λογισμικών εκτίμησης απωλειών.

Στο 3^ο Κεφάλαιο (Μεθοδολογία Ανάλυσης και Εκτίμησης Σεισμικών Απωλειών) επιλέγεται ως μελέτη περίπτωσης και παρουσιάζεται πολυώροφο κτήριο από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με χρήση κατοικίας. Για το υπόψη κτήριο, ακολουθείται η διαδικασία ανάλυσης σεισμικής τρωτότητας και εκτίμησης απωλειών κατά FEMA P-58, με χρήση του ηλεκτρονικού εργαλείου RACT και επιλογή των απαιτούμενων δεδομένων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κτηρίου και τις προδιαγραφές της μεθοδολογίας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο (Αποτελέσματα) παρουσιάζονται τα εξαγόμενα της ανάλυσης τρωτότητας του επιλεγμένου κτηρίου, ως εκτιμώμενες απώλειες λόγω σεισμού αναφορικά με το κόστος και το χρόνο επισκευής των αναμενόμενων βλαβών, τον αριθμό θυμάτων (τραυματισμών και θανάτων) και την εμφάνιση επισφαλών στοιχείων. Επίσης, για κάθε επιμέρους είδος απώλειας επιχειρείται να επεξηγηθούν οι τιμές που προκύπτουν από την ανάλυση και σχολιάζονται ενδεχόμενοι συσχετισμοί.

Στο 5^ο Κεφάλαιο (Συμπεράσματα) γίνεται ανακεφαλαίωση των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν από την ανάλυση τρωτότητας και εκτίμησης απωλειών. Τέλος, προτείνονται πεδία κατ' επέκταση του διερευνηθέντος, τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΣ

1.1. Σεισμική τρωτότητα και παράγοντες επιρροής

Το βασικότερο ζητούμενο σε μία μελέτη εκτίμησης απωλειών συνεπεία σεισμού είναι ο προσδιορισμός των παραγόντων που καθορίζουν το βαθμό τρωτότητας του αναλυόμενου αντικειμένου, είτε πρόκειται για περιοχή είτε για μεμονωμένη κατασκευή. Η προσπάθεια που έχει γίνει προς αυτή την κατεύθυνση από τους ερευνητές έγκειται κυρίως στη διατύπωση σχέσεων που συνδέουν τις αναμενόμενες απώλειες με ένα ή περισσότερα από τα μεγέθη που έχουν καθιερωθεί επιστημονικά να χαρακτηρίζουν τη σεισμική δόνηση, όπως είναι λ.χ. η ένταση, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA (Shoaf et al., 1998) και η απόσταση από το επίκεντρο (Liang et al., 2001). Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η σχέση εξάρτησης των απωλειών με τα εν λόγω μεγέθη δεν είναι ούτε αποκλειστική, ούτε στεγανή: με άλλα λόγια, ο συνολικός αριθμός των απωλειών σε ένα σεισμό αποτελεί συγκεντρωτική απόρροια της ταυτόχρονης επιρροής πολλών παραγόντων και όχι ενός μεμονωμένου.

Εκτός των φυσικών χαρακτηριστικών της σεισμικής δόνησης, επιπλέον παράγοντας που επιδρά στη διαμόρφωση του αριθμού των απωλειών σε μία περιοχή είναι το επίπεδο ανάπτυξης που αυτή παρουσιάζει. Σε γενικές γραμμές, η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη μίας χώρας οδηγεί στη χρήση υλικών βελτιωμένης ποιότητας για την ανέγερση κατασκευών που διέπονται από ισχυρότερες προδιαγραφές ασφαλείας έναντι σεισμού. Το χαρακτηριστικότερο, ίσως, παράδειγμα αυτής της διασύνδεσης αποτελούν η Κίνα και η Ιαπωνία, δύο γειτονικές χώρες που βιώνουν τακτικά σεισμούς μεγάλης έντασης. Η ανασκόπηση των πρόσφατων σεισμικών συμβάντων των δύο χωρών δείχνει ότι αν και η Ιαπωνία πλήττεται από σεισμούς εντάσεως μεγαλύτερης των 6 R σε μεγαλύτερη συχνότητα από την Κίνα, οι υλικές και έμψυχες απώλειες που καταγράφονται στην Κίνα είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της Ιαπωνίας, στην οποία επιπλέον τείνουν να ακολουθήσουν πτωτική πορεία. Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζουν και η Ινδία με τη Νέα Ζηλανδία, η οποία ηγάζει από το γεγονός ότι η δεύτερη χώρα, σε αντίθεση με την πρώτη, έχει υιοθετήσει και εφαρμόζει αυστηρά έναν εξελιγμένο αντισεισμικό κανονισμό, προχωρώντας παράλληλα στην ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση του πληθυσμού της σε θέματα ετοιμότητας.

Η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη συνδέεται με το ανθρωπογενή παράγοντα, ο οποίος διαδραματίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της εικόνας των απωλειών, εκφράζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού μίας περιοχής και εκφράζει, με τη σειρά του, το κοινωνικοοικονομικό επίπεδο. Το φύλο, η ηλικία, η νοσηρότητα και τα ήθη των κατοίκων μίας κοινωνίας διαμορφώνουν το βαθμό της θωράκισής της έναντι

σεισμού, όσον αφορά στην προσεισμική οργάνωση λ.χ. κέντρων αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών και άλλων συναφών υποδομών, αλλά και στη μετασεισμική αντίδρασή της, με ομάδες έρευνας και διάσωσης εγκλωβισμένων. Σε παλαιότερα συμβάντα, η εμπειρία έχει δείξει ότι κοινωνικοοικονομικά ασθενέστερες χώρες αντιμετωπίζουν ανεπαρκώς τις συνέπειες μίας φυσικής καταστροφής με συνέπεια να βιώνουν μεγάλες απώλειες, όπως στην περίπτωση του σεισμού που έπληξε την Αϊτή το 2010.

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται και εξειδικεύονται οι παράγοντες που αναφέρθηκαν, ώστε να διασαφηνισθεί η βαρύτητά τους στις απώλειες που προκαλούνται μετά από ένα σεισμό.

1.1.1. Χαρακτηριστικά σεισμικής δόνησης

Όπως προαναφέρθηκε, σε σεισμολογικό και γεωλογικό επίπεδο μία σεισμική δόνηση περιγράφεται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται:

- Το **μέγεθος** και η **ένταση**, τα οποία αποτελούν μονάδες μέτρησης της δύναμης της σεισμικής δράσης,
- Η **απόσταση από το επίκεντρο** του σεισμού, η οποία δίνει μία τοπική εικόνα της σεισμικής δύναμης που έδρασε σε μία περιοχή,
- Η **εδαφική σύσταση** και **διαστρωμάτωση**, οι οποίες επηρεάζουν τη μετάδοση των σεισμικών κυμάτων και, σε πολλές περιπτώσεις, ευθύνονται για τις εδαφικές αστοχίες που παρουσιάζονται υπό μορφή ρευστοποίησης ή κατολισθήσεων.

Ωστόσο, εξίσου σημαντική επίδραση στον αριθμό των απωλειών, ιδιαιτέρως σε ανθρώπινες ζωές, είναι και η ώρα του 24ώρου κατά την οποία συνέβη ο σεισμός, η οποία έχει άμεση σχέση με τη διασπορά του πληθυσμού στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι άνθρωποι εντοπίζονται στο εσωτερικό κτηρίων όπως οι χώροι εργασίας, διάφορα εκπαιδευτικά ιδρύματα κ.α., τα οποία χαρακτηρίζονται από σχεδιαστικές και κατασκευαστικές προδιαγραφές σχετικά αυστηρότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των κτηρίων με χρήση κατοικίας. Για συγκεκριμένες και περιορισμένου χρονικού εύρους περιόδους της ημέρας, άτομα μπορεί επίσης να βρίσκονται μαζικά σε εξωτερικούς χώρους, εντός ή εκτός οχημάτων και ΜΜΜ, όπως όταν είναι βρίσκονται καθοδόν προς την εργασία τους. Αντιθέτως, τις απογευματινές ώρες η ροή αντιστρέφεται και ο πληθυσμός συγκεντρώνεται στους χώρους κατοικίας, ενώ οι δραστηριότητα μειώνεται σταδιακά προς το βράδυ, μέχρι την έλευση της νύχτας, κατά τη διάρκεια της οποίας οι

άνθρωποι συνήθως κοιμούνται (Shoaf et al., 1998). Ευνόητο είναι, λοιπόν, το γεγονός ότι τόσο η διασπορά του πληθυσμού σε κτήρια διαφορετικής σχεδιαστικής και κατασκευαστικής τυπολογίας, όσο και το επίπεδο δραστηριότητας που διαφοροποιείται μεταξύ μεγίστου και ελαχίστου, ανάλογα με την ώρα του 24ώρου, επηρεάζουν τόσο την έκταση και το είδος των απωλειών μετά από ένα σεισμικό συμβάν, όσο και τη δυνατότητα εκτίμησης αυτών.

1.1.2. Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Χωρίς να υποβαθμίζεται η σημασία του φυσικού περιβάλλοντος, το ιδιαίτερο είδος του, το οποίο αναλύεται στα πλαίσια εκτίμησης απωλειών σε μία περιοχή, αφορά σχεδόν αποκλειστικά στο δομημένο περιβάλλον της. Περιλαμβάνει το σύνολο των κτηρίων και λοιπών κτηριακών υποδομών που χωροθετούνται στην εξεταζόμενη περιοχή, το οποίο απογράφεται και διερευνάται ως προς επιμέρους παράγοντες που περιλαμβάνουν την τυπολογία, την ηλικία και τον αριθμό των ορόφων, το είδος και την ποιότητα των υλικών κατασκευής, τις προδιαγραφές σχεδιασμού, τις κατασκευαστικές τεχνικές κ.α. Με την εν λόγω ανάλυση επιχειρείται εν πρώτοις να εκτιμηθεί η πιθανότητα πρόκλησης βλαβών εξαιτίας ενός σεισμού, καθώς και το είδος, η έκταση και η σοβαρότητα των υπόψη βλαβών. Με αφετηρία τις ως ανωτέρω προσδιορισμένες πλέον πιθανές βλάβες, περαιτέρω ανάλυση μπορεί να αποδώσει την έκταση και το είδος των απωλειών, κατά προτεραιότητα σε όρους τραυματισμών και θανάτων.

Η σπουδαιότητα με την οποία αντιμετωπίζεται το δομημένο περιβάλλον για τους σκοπούς της εκτίμησης απωλειών είναι εμφανής σε πολλές από τις σημαντικότερες μελέτες του είδους (Jaiswal et al., 2010; Peek-Asa et al., 1998). Θα πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι η έννοια του δεν περιορίζεται στα κτήρια ιδιωτικής ή δημόσιας χρήσης, αλλά επεκτείνεται σε κάθε είδους τεχνητή υποδομή ανθρωπογενούς προέλευσης, η οποία μπορεί ανά πάσα στιγμή να ενοχοποιηθεί ως γενεσιουργός αιτία απωλειών. Ενδεικτικά, η εμπειρία έχει δείξει ότι μεγάλος αριθμός συγκοινωνιακών υποδομών, όπως γέφυρες και δρόμοι, χαρακτηρίζονται από υψηλή τρωτότητα, με συνέπεια τη συχνή καταγραφή περιστατικών καταρρεύσεως γεφυρών κατά τη διάρκεια σεισμικής δόνησης, ή ακόμη και μετά από αυτή. Τελικά, παράλληλα με την καταστροφή της υποδομής, η οποία μεταφράζεται σε όρους υλικών και οικονομικών απωλειών, η πτώση και θέση εκτός λειτουργίας φωτεινών σηματοδοτών και πινακίδων οδηγεί στην πρόκληση τροχαίων ατυχημάτων, τα οποία συμβάλλουν στις συνολικά καταμετρούμενες απώλειες ανθρώπινων ζωών που προκαλεί ο σεισμός (Peek-Asa et al., 1998).

1.1.3. Ανθρωπογενείς παράγοντες

Εκτός των σεισμολογικών και περιβαλλοντικών όψεων της σεισμικής τρωτότητας, ο τρίτος, και αλληλένδετος με τους δύο προαναφερθέντες, παράγοντας είναι ο ίδιος ο άνθρωπος. Στην έννοια αυτή περιλαμβάνονται επιμέρους πτυχές οι οποίες συνοπτικά αφορούν στα δημογραφικά στοιχεία, στις αντιδράσεις βάσει της ανθρώπινης συμπεριφοράς και στη σωματική ανθεκτικότητα του πληθυσμού της πληττόμενης από σεισμό περιοχής.

Το δημογραφικό στοιχείο, έτσι όπως προσδιορίζεται από το φύλο, αποτελεί αμφιλεγόμενο αντικείμενο των υφιστάμενων μελετών εκτίμησης απωλειών. Κάποιες από αυτές θεωρούν ότι, μεταξύ των δύο φύλων, το γυναικείο τείνει να παρουσιάζει απώλειες σε διαφοροποιούμενο, μεταξύ των εν λόγω μελετών, αλλά οπωσδήποτε υψηλότερο ποσοστό από το ανδρικό (Peek-Asa et al., 2003; Chou et al., 2004). Άλλες, πάλι, εκτιμούν ότι και τα δύο φύλα καταγράφουν ποσοστά τραυματισμών και θανάτων χωρίς κάποια ουσιαστική μεταξύ τους διαφορά (Doocy et al., 2013; Liang et al., 2001). Τελικά, ωστόσο, η διχογνωμία των ερευνητών επιτείνεται από τη συγκριτική θεώρηση των ευρημάτων των αναλύσεων που προαναφέρθηκαν και βάσει των οποίων, για τα ίδια σεισμικά συμβάντα, προκύπτουν εκ διαμέτρου αντίθετα συμπεράσματα όσον αφορά στο εάν κάποιο από τα δύο φύλα πλήττεται περισσότερο από το άλλο.

Η ίδια εικόνα σχηματίζεται και από τα αποτελέσματα ερευνών που εξετάζουν τη διασύνδεση ηλικίας και απωλειών, με επίκεντρο τα δύο ηλικιακά άκρα. Σε γενικές γραμμές, θεωρείται ότι η αύξηση της ηλικίας επιφέρει αύξηση τραυματισμών κατά ποσοστό 3% (Doocy et al., 2009). Ειδικότερα, τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι φαίνεται να είναι τα άτομα που αποδεικνύονται περισσότερο ευάλωτα στο σεισμό, καθώς βιώνουν τους περισσότερους τραυματισμούς και θανάτους (Doocy et al., 2013; Peek-Asa et al., 2003). Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση του φύλου, τα εν λόγω ευρήματα αντικρούονται από έρευνες που εκτιμούν ότι ο κίνδυνος τραυματισμών και θανάτων είναι μεγαλύτερος για τα νεαρά άτομα, ενώ μειώνεται με την αύξηση της ηλικίας (Chou et al., 2004). Πάντως, αυτό που δεν αμφισβητείται είναι το ότι τα άτομα με σωματική αναπηρία είναι τα πλέον ευάλωτα, καθώς φαίνεται να καταγράφουν τα μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών μεταξύ του πληθυσμού.

Characteristic	No deaths (n=214)	1-9 deaths (n=258)	10-99 deaths (n=144)	≥ 100 deaths (n=122)	p-value
Decade, n (%)					
1980-89	50 (23.3%)	69 (26.7%)	42 (29.2%)	33 (27.1%)	0.008
1990-99	71 (33.2%)	82 (32.8%)	57 (39.6%)	58 (47.5%)	
2000-09	93 (43.5%)	107 (41.5%)	45 (31.3%)	31 (25.4%)	
World Health Organization Region, n (%)					
Europe	64 (29.9%)	49 (19.0%)	27 (18.8%)	16 (13.1%)	0.001
Americas	38 (17.8%)	65 (25.2%)	30 (20.8%)	21 (17.2%)	
Africa	6 (2.8%)	18 (7.0%)	9 (6.3%)	7 (5.7%)	
South-East Asia	25 (11.7%)	31 (12.0%)	19 (13.2%)	27 (22.1%)	
Western Pacific	54 (25.2%)	63 (24.4%)	32 (22.2%)	24 (19.7%)	
Eastern Mediterranean	27 (12.6%)	32 (12.4%)	27 (18.8%)	27 (22.1%)	
World Bank Development Level, n (%)					
Low-income	14 (6.5%)	26 (10.1%)	14 (9.7%)	18 (14.8%)	0.026
Lower-middle income	104 (48.6%)	121 (46.9%)	73 (50.7%)	67 (54.9%)	
Upper-middle income	47 (22.0%)	69 (26.7%)	38 (26.4%)	26 (21.3%)	
High-income	49 (22.9%)	42 (16.3%)	19 (13.2%)	11 (9.0%)	
GINI*(n=681)					
Mean (SD)	39.3 (6.4)	41.2 (8.0)	41.3 (7.6)	41.0 (7.0)	0.0241
Per Capita GDP (US\$) (n=732)					
Mean (SD)	11,777.1(14,911.8)	8975.9 (12,854.8)	7387.1 (10969.7)	6,058 (10,487.3)	0.0013

Εικόνα 1: Σεισμική θνησιμότητα βάσει επιλεγμένων κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών.
(Πηγή: Doocy et al., 2013)

Περαιτέρω, ερευνητές που επικεντρώνονται στον κοινωνικοοικονομικό παράγοντα παρατηρούν ότι περισσότεροι καταστρεπτικοί σεισμοί εκδηλώνονται σε αναπτυσσόμενες χώρες, από όσους σε ανεπτυγμένες. Επιπλέον, οι έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα νοικοκυριά με χαμηλό εισόδημα υφίστανται περισσότερες απώλειες, ανεξαρτήτως της κοινωνικοοικονομικής κατάστασης της πληττόμενης χώρας (Chou et al., 2004), ενώ το ποσοστό των απωλειών φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση του εισοδήματος (Doocy et al., 2013). Τέλος, το κοινωνικοοικονομικό επίπεδο εκτιμάται ότι αλληλεπιδρά με τον παράγοντα της ανθρώπινης συμπεριφοράς, στο βαθμό κατά τον οποίο επηρεάζει τις καθημερινές συνήθειες των ατόμων και, ως εκ τούτου, τις αντιδράσεις τους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Σε αυτή την περίπτωση, προκύπτει ότι ο αριθμός των απωλειών

περιλαμβάνει κατά μικρότερο ποσοστό άτομα που βρίσκονται εκτός κτηρίων, κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης, ενώ τα άτομα που βρίσκονται στο εσωτερικό κτηρίων θεωρούνται περισσότερο ευάλωτα, καθώς υφίστανται περισσότερους τραυματισμούς και θανάτους.

1.2. Αιτίες εκδήλωσης σεισμικής τρωτότητας

Μία γρήγορη επισκόπηση των μεθοδολογιών αξιολόγησης και ποσοτικοποίησης των συνεπειών της σεισμικής τρωτότητας καθιστά γρήγορα εμφανές το γεγονός ότι αυτές δεν είναι μονοδιάστατες, αλλά διέπονται από ποικιλομορφία προσεγγίσεων. Μεταξύ αυτών, κάποιες μέθοδοι αποβλέπουν στην εκτίμηση της τρωτότητας του κτηριακού αποθέματος ως αποκλειστικά οφειλόμενης στην κίνηση του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού συμβάντος, μερικές επιχειρούν να προβλέψουν πιθανή εδαφική αστάθεια συνεκτιμώντας την αλληλεπίδραση ρευστοποιήσεως εδάφους, κατολισθήσεων και ενδεχόμενης επιφανειακής εδαφικής ρήξης, ενώ άλλες λαμβάνουν υπόψη τις συνέπειες για τα κτήρια και την περιοχή από την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων.

1.2.1. Εδαφική κίνηση

Σε θεωρητικό επίπεδο, η κίνηση του εδάφους εξετάζεται μέσω της δημιουργίας ενός κατάλληλου μαθηματικού προσομοιώματος, το οποίο είναι δυνατόν να διαμορφωθεί είτε πάνω σε αιτιοκρατική ή, εναλλακτικά, σε πιθανολογική βάση. Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων έγκειται στο ότι κατά την αιτιοκρατική προσέγγιση διαμορφώνεται ένα σενάριο με συνδυαστική χρήση τριών μοντέλων, τα οποία παρουσιάζουν την αναγνώριση της σεισμικής πηγής, την εξασθένιση της εδαφικής κίνησης και τη σχετική αλληλεπίδραση εδάφους – ανωδομής, ενώ η πιθανολογική προσέγγιση προσθέτει στα τρία αυτά μοντέλα και ένα τέταρτο, με το οποίο επιχειρείται να προβλεφθεί η πιθανότητα εκδήλωσης συμβάντων σε μελλοντικό χρόνο.

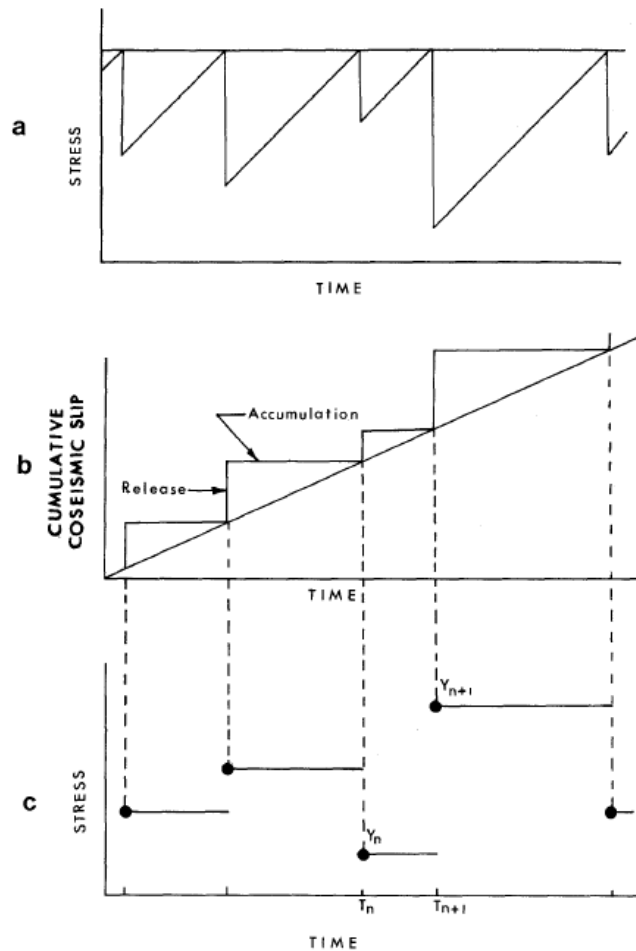
Οι υφιστάμενες αιτιοκρατικές και πιθανολογικές μεθοδολογίες διακρίνονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το εάν η φύση της αντιμετώπισης είναι ολοκληρωμένη και σε συνολικό επίπεδο, ή αφορά σε διακριτή ανάλυση των ιδιαίτερων συνιστωσών ή σταδίων του προβλήματος. Με άλλα λόγια, ως μεθοδολογίες ολοκληρωμένης προσέγγισης χαρακτηρίζονται αυτές που διαμορφώνουν ένα ενιαίο μοντέλο, στο οποίο ενσωματώνουν και αναλύουν ταυτόχρονα την πηγή της σεισμικής διέγερσης, την εξασθένιση της εδαφικής κίνησης, την αλληλεπίδραση εδάφους – ανωδομής και την πρόβλεψη των συνεπειών. Κατ' αντιστοιχία, οι μέθοδοι επιμέρους ανάλυσης αντιμετωπίζουν μόνο μία από τις

προαναφερθείσες συνιστώσες του προβλήματος, με συνέπεια να επιβάλλεται η συνδυαστική χρήση περισσότερων της μίας, προκειμένου να παραχθεί μία ολοκληρωμένη και πλήρης ανάλυση τρωτότητας.

Στην περίπτωση των μεθόδων ανάλυσης της τρωτότητας μίας περιοχής μέσω της εδαφικής κίνησης, το μοντέλο που διαμορφώνεται αποσκοπεί να ερμηνεύσει τη συχνότητα εμφάνισης σεισμών από μία σεισμική πηγή. Οι εν λόγω πηγές γένεσης σεισμών δεν είναι απαραίτητα σημειακές ή γραμμικές περιορισμένης εδαφικής έκτασης, αλλά κατά περίπτωση μπορούν να εκτείνονται σε μία ευρεία περιοχή με ομογενή εδαφικά και σεισμογενή χαρακτηριστικά. Ωστόσο, κρίσιμα χαρακτηριστικά αποτελούν η σαφής οριοθέτηση και ο ακριβέστερος δυνατός προσδιορισμός της πηγής της σεισμικής διέγερσης, δεδομένου ότι τα εν λόγω στοιχεία καθορίζουν την απόσταση μεταξύ της πηγής και της υπό ανάλυση περιοχής, η οποία αποτελεί τη βάση ανάπτυξης του σχετικού αλγορίθμου των υπόψη μεθόδων.

Η προσέγγιση που υιοθετούν οι ανωτέρω μέθοδοι κατατάσσεται σε δύο κατηγορίες, εκ των οποίων η πρώτη θεωρεί το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο σεισμών ως μεταβλητή που δεν σχετίζεται με το προηγούμενο σεισμικό ιστορικό της περιοχής. Σε αυτή την περίπτωση, υιοθετείται η παραδοχή σύμφωνα με την οποία τα διαστήματα μεταξύ σεισμικών συμβάντων αποτελούν ανεξάρτητα και ομοιογενή δεδομένα απαρτιθμητής χρονοσειράς, η οποία ακολουθεί γραμμική παλινδρόμηση βάσει κατανομής Poisson. Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για να περιγράψει σπάνια συμβάντα, όπως λ.χ. σεισμοί μεγάλου μεγέθους σε μία εκτεταμένη περιοχή μελέτης. Αντίθετα, μπορεί να αποκλίνει αρκετά σε περιπτώσεις σεισμών μικρότερου μεγέθους, οι οποίοι τείνουν να εκδηλώνονται συχνότερα και σχετίζονται με μικρότερη εδαφική κίνηση, η οποία άλλωστε έχει σχετικά οριακό ενδιαφέρον για την επιστήμη του Μηχανικού. Επιπλέον, η χρήση της κατανομής Poisson παρέχει μάλλον συντηρητικές τιμές εδαφικής κίνησης, για τις περιπτώσεις περιοχών ανάλυσης που επηρεάζονται από δύο ή περισσότερες πηγές σεισμικής διέγερσης.

Οι προαναφερθέντες περιορισμοί στην εφαρμογή της ανωτέρω μεθόδου επιχειρείται να εξαλειφθούν με την ανάπτυξη και διερεύνηση μίας δεύτερης κατηγορίας μεθόδων, σύμφωνα με την οποία το σεισμικό ιστορικό της περιοχής ανάλυσης λαμβάνεται υπόψη, όσον αφορά στην πρόβλεψη μελλοντικών συμβάντων. Βασική φιλοσοφία των μεθόδων αυτών αποτελεί η θεώρηση της εκδήλωσης των σεισμών ως μία διαδικασία φυσικής ανανέωσης, στα πλαίσια της οποίας συσσωρεύεται εκ νέου σεισμική ενέργεια μετά από κάθε διάρρηξη.



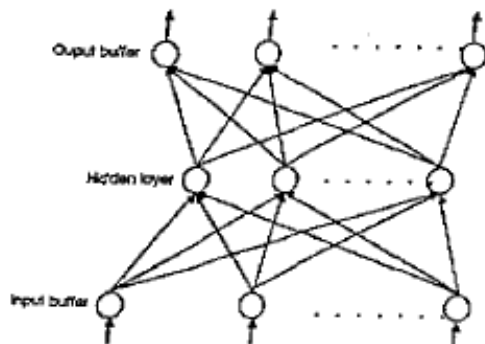
Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση χρονικά προβλέψιμης σεισμικής συμπεριφοράς
 (α) Συσσώρευση και απελευθέρωση πίεσης ως προς το χρόνο
 (β) Συσχέτιση σεισμικής ολίσθησης και χρόνου μεταξύ γεγονότων
 (γ) Ενδεικτική διαδικασία θεώρησης χρονικά προβλέψιμης συμπεριφοράς.
 (Πηγή: Anagnos and Kiremidjian, 1984)

Το διάστημα της συσσώρευσης χαρακτηρίζεται από ελαστική παραμόρφωση και αύξηση τάσεων, οι οποίες απελευθερώνονται απότομα κατά τη διάρρηξη του ρήγματος. Το διάστημα αυτό καθορίζει και την πιθανότητα εκδήλωσης ενός νέου μεγάλου σεισμού, η οποία διερευνάται ως προς δύο εναλλακτικές και αλληλοσυγκρουόμενες θεωρήσεις. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές (Anagnos and Kiremidjian, 1984), όσο μικρότερο είναι το διάστημα μέχρι τη διάρρηξη, τόσο μικρότερη είναι και η συσσωρευμένη ενέργεια, κατ' επέκταση και η πιθανότητα να συμβεί ένας ακόμη σεισμός εξίσου μεγάλου μεγέθους προερχόμενος από το ίδιο ρήγμα, σε αντίθεση με άλλους ερευνητές (Kagan and Jackson, 1991) που υποστηρίζουν το αντίθετο συμπέρασμα, θεωρώντας ότι η εν λόγω πιθανότητα αυξάνεται.

Όσον αφορά στην εξασθένηση της εδαφικής κίνησης, τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί επιχειρούν να συσχετίσουν την ένταση ή τη συχνότητα της εδαφικής κίνησης με την απόσταση της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται είτε εμπειρικά

δεδομένα παλαιότερων συμβάντων, είτε αναλυτικές μέθοδοι που βασίζονται σε αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη περίπτωση αξιοποιούνται τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία (λ.χ. χάρτες μακροσεισμικών εντάσεων ή άλλες ιστορικές καταγραφές) προκειμένου να εξαχθούν σχέσεις που συνδέουν τα χαρακτηριστικά της σεισμικής εστίας, της περιοχής μελέτης και της μεταξύ τους απόστασης με τις τιμές της εδαφικής κίνησης που έχουν καταγραφεί. Μέθοδοι αυτής της κατηγορίας, όπως αυτές που έχουν αναπτυχθεί από τους Evernden and Thomason (1988), Furumoto et al (1980), Barosh et al (1981), Taylor (1986) και Ballantyne et al (1990), έχουν διερευνηθεί εκτενώς από τη διεθνή βιβλιογραφία και γι' αυτό το λόγο, ως επαρκώς τεκμηριωμένες, είναι ευρέως διαδεδομένες και οι πλέον χρησιμοποιούμενες για χωρικές μελέτες εκτίμησης τρωτότητας

Αντίθετα, οι αναλυτικές μέθοδοι εστιάζουν στη δημιουργία μοντέλων τα οποία περιγράφουν θεωρητικά τους μηχανισμούς διάδοσης των σεισμικών κυμάτων βάσει των χαρακτηριστικών της εστίας ενώ, κατά περίπτωση, είναι δυνατόν να ενσωματώνεται στο βασικό αλγόριθμο και μέρος εμπειρικών δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα των υπόψη μεθόδων παρέχονται ως τιμές έντασης, μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης ή μέγιστης φασματικής απόκρισης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεθόδου αυτής της κατηγορίας αποτελεί το τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης που έχει διατυπωθεί από τον Frankel (1993), ο πολυπαραμετρικός χαρακτήρας του οποίου το καθιστά, ωστόσο, ιδιαίτερα δύσκολο προς εφαρμογή σε μία χωρική μελέτη εκτίμησης τρωτότητας. Σε περιπτώσεις τέτοιων μελετών θεωρούνται πιο εύχρηστες οι στοχαστικές αναλυτικές μέθοδοι, όπως αυτές των Hanks (1981) και Boore (1991) οι οποίες χρησιμοποιούν τις τιμές της εδαφικής κίνησης που έχουν παραχθεί από ένα στοχαστικό μοντέλο (με ή χωρίς ενσωμάτωση εμπειρικών δεδομένων) για να διαμορφώσουν το κατάλληλο παραμετρικό προσομοίωμα.



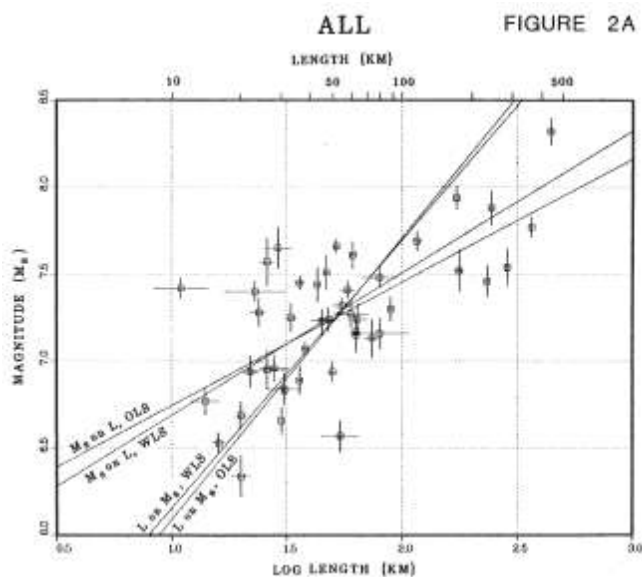
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα νευρωνικού δικτύου.
(Πηγή: Tung et al, 1993)

Οι πλέον πρόσφατες εξελίξεις στη μοντελοποίηση της εξασθένησης της εδαφικής κίνησης περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μεθόδων προγραμματισμού τεχνητής νοημοσύνης, όπως λ.χ. νευρωνικών δικτύων, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε περιοχές με σημαντική διαθεσιμότητα εμπειρικών δεδομένων από προηγούμενους σεισμούς (Tung et al, 1993). Αντιστοίχως, σε άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται εναλλακτική προσέγγιση

που βασίζεται στη μέθοδο λήψης απόφασης με Δέντρο Γνώσης, προκειμένου να συνεκτιμηθούν ενδεχόμενες αβεβαιότητες και διαφοροποιήσεις σε αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητικών εργασιών (Bernreuter, 1987).

Τέλος, στην επίδραση των προαναφερθέντων παραγόντων επί της εδαφικής επιφάνειας της περιοχής μελέτης συνυπολογίζεται η επιρροή των τοπικών χαρακτηριστικών και συνθηκών του υπεδάφους. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί το γεγονός ότι τα μαλακά μη στερεοποιημένα εδάφη τείνουν να ενισχύουν την εδαφική κίνηση, η οποία προκαλείται από τις σεισμικές δυνάμεις. Σε κάποιες περιπτώσεις, η υπόψη επίδραση ενσωματώνεται στο μοντέλο υπό μορφή συντελεστών που λαμβάνονται κατ' εκτίμηση, ενώ άλλες έρευνες επιλέγουν να προσδιορίσουν τους εν λόγω συντελεστές βάσει γενικευμένων γεωλογικών κριτηρίων, όπως οι επιφανειακές εδαφικές αποθέσεις (Evernden et al, 1975), τα βάθη των γεωλογικών στρωμάτων ή οι παλαιότερες καταγραφές της εδαφικής κίνησης στην περιοχή (Woodward and Clyde, 1990).

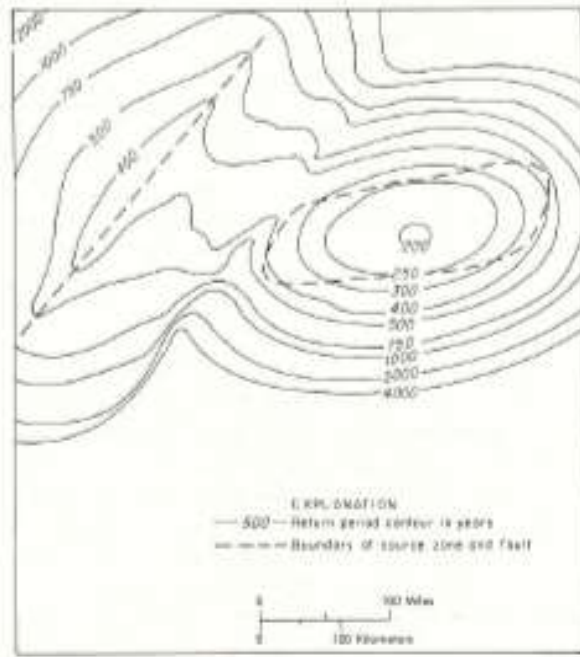
1.2.2. Επιφανειακή διάρρηξη



Εικόνα 4: Συσχέτιση μεγέθους σεισμού με μήκος επιφανειακής διάρρηξης, για διάφορους τύπους ρηγμάτων.
(Πηγή: Bonilla et al, 1984)

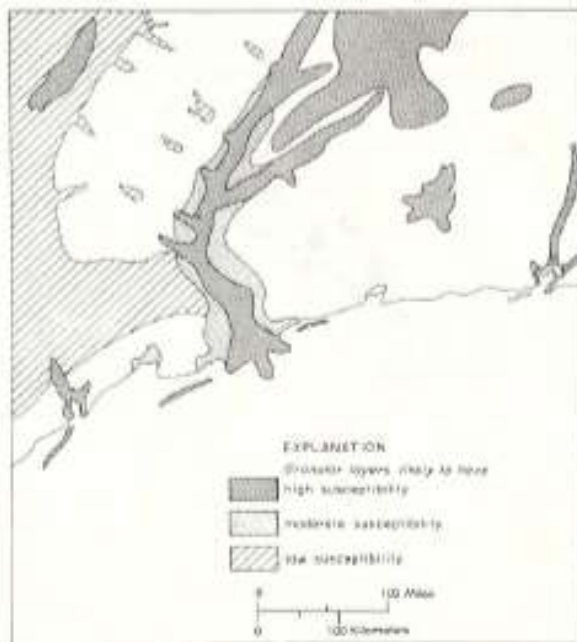
Μέσω επεξεργασίας διαθέσιμων στατιστικών δεδομένων, η διεθνής βιβλιογραφία είχε καταλήξει από νωρίς στη διατύπωση συσχετισμών μεταξύ του μεγέθους ενός σεισμού, του μήκους της επιφανειακής διάρρηξης και της επιφανειακής μετατόπισης του εδάφους κατά μήκος του ρήγματος (Bonilla et al, 1984), προκειμένου να προσδιορίσει την πιθανότητα, την έκταση και τη σοβαρότητα μιας ενδεχόμενης ρήξης του

εδάφους, για τις ανάγκες της ανάλυσης τρωτότητας μίας περιοχής. Περαιτέρω επεξεργασία των εν λόγω σχέσεων έχει οδηγήσει πλέον στην ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης της πιθανότητας υπέρβασης μίας επιφανειακής μετατόπισης ρήγματος σε δεδομένο χρονικό διάστημα, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική πρακτική αξία, ιδιαίτερως στις περιπτώσεις ανάλυσης κινδύνου των Δικτύων Κοινής Ωφέλειας μίας περιοχής (Kiremidjian, 1984).



Εικόνα 5: Χάρτης πιθανότητας περιόδου επαναφοράς επιφανειακής διάρρηξης, για την υποθετική περιοχή. (Πηγή: Youd et al, 1978)

εδαφικών ιζημάτων, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και τη θέση και απόσταση της εστίας του σεισμού από την περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 6: Χάρτης ευπάθειας σε επιφανειακή διάρρηξη λόγω ρευστοποίησης, για την υποθετική περιοχή. (Πηγή: Youd et al, 1978)

Ωστόσο, σε πρακτικό επίπεδο, η ρευστοποίηση εδαφών φαίνεται ότι τις τελευταίες δεκαετίες προσελκύει μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τη σχετικά περισσότερο περιορισμένη χωρικά επιφανειακή διάρρηξη. Η προσπάθεια επικεντρώνεται ως επί το πλείστον στη δημιουργία χαρτών πιθανότητας ρευστοποίησης του εδάφους μίας περιοχής, βάσει προσδιορισμού της ευαισθησίας του σε ρευστοποίηση και αναγνώρισης των τοπικών παραγόντων που είναι δυνατόν να εκκινήσουν τη διαδικασία της ρευστοποίησης. Τα κρίσιμα δεδομένα περιλαμβάνουν το είδος και τη σχετική πυκνότητα των

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κινούνται προς δύο κατευθύνσεις, ανάλογα με το αν επιλέγουν να προσαρμόζουν τα εκάστοτε τοπικά δεδομένα της αναλυόμενης περιοχής σε παλαιότερα καταγεγραμμένα περιστατικά ρευστοποίησης που χρησιμοποιούνται εν είδει γενικών προτύπων, όπως λ.χ. οι Youd et al (1978), ή αν διαμορφώνουν εξ αρχής το μοντέλο της περιοχής βάσει των ιδιαίτερων τοπικών γεωλογικών, γεωμορφολογικών και μηχανικών παραμέτρων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, απαιτείται η διεξαγωγή επιτόπιων γεωλογικών και γεωτεχνικών

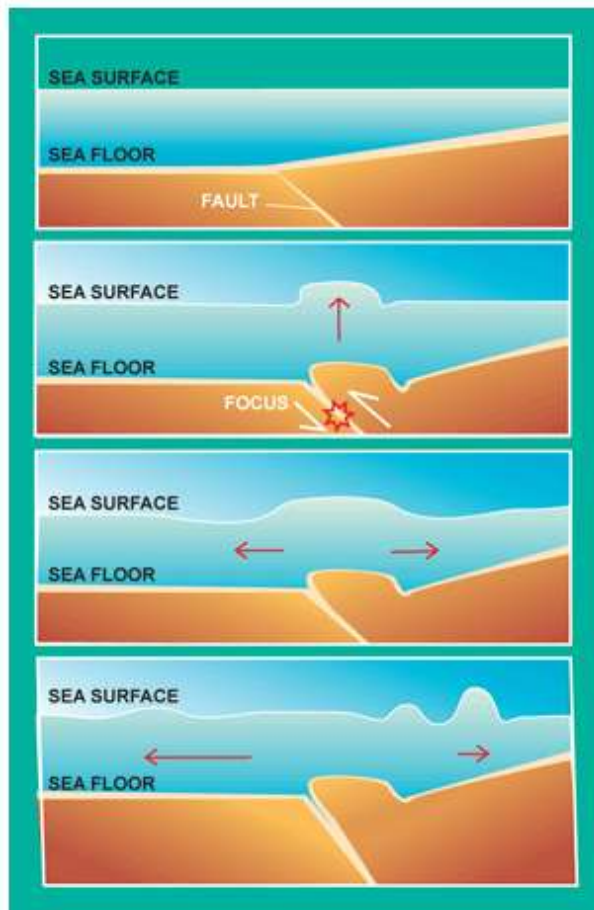
ερευνών καθώς και συνακόλουθων εργαστηριακών δοκιμών, γεγονός που μπορεί να αυξήσει σε απαγορευτικό, για αρκετές χώρες ή τοπικές αρχές, βαθμό το σχετικό κόστος.

Επιπλέον, μόνο οι μέθοδοι που συσχετίζουν την ένταση της επιτόπιας εδαφικής κίνησης με την πιθανότητα ρευστοποίησης θεωρούνται επαρκώς διερευνημένες, σε αντίθεση με τις μεθόδους που εκτιμούν την αναμενόμενη μετακίνηση του εδάφους βάσει ενδεχόμενης εδαφικής διάρρηξης συνεπεία ρευστοποίησης, οι οποίες συνήθως μπορούν να εφαρμοσθούν για συγκεκριμένο τύπο ρήγματος σε περιοχή με συγκεκριμένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (Youd and Perkins, 1987).

Αντίστοιχη κατεύθυνση με τη ρευστοποίηση ακολουθεί και η προσπάθεια εκτίμησης του κινδύνου εκδήλωσης κατολισθήσεων σε μία περιοχή, βάσει δημιουργίας σχετικών χαρτών. Σύμφωνα με την επικρατούσα φιλοσοφία, η πιθανότητα κατολίσθησης ενός εδαφικού στρώματος υπό κλίση εξαρτάται κυρίως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, από την απόστασή του από την εστία του σεισμού, καθώς και από το ύψος της βροχόπτωσης που καταγράφεται στην αναλυόμενη περιοχή. Όπως προαναφέρθηκε για τη ρευστοποίηση, και σε αυτή την περίπτωση τα μοντέλα κινούνται πάνω σε δύο εναλλακτικές κατευθύνσεις, επιλέγοντας είτε να συνδυάσουν παλαιότερες καταγραφές κατολισθήσεων με τοπικά γεωλογικά ή γεωμορφολογικά στοιχεία (Keefner and Wilson, 1989), είτε να εκτιμήσουν τις μηχανικές και λοιπές χαρακτηριστικές ιδιότητες των επιτόπιων εδαφικών υλικών, εισάγοντας τις τιμές ως δεδομένα σε εξειδικευμένα λογισμικά δυναμικής ανάλυσης. Ωστόσο, παραμένει και σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση η περιορισμένη δυνατότητα χρήσης των μοντέλων που διαμορφώνονται, τα οποία δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο για τη συγκεκριμένη περιοχή και δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για χωρική ανάλυση τρωτότητας οποιασδήποτε άλλης περιοχής.

1.2.3. Τσουνάμι

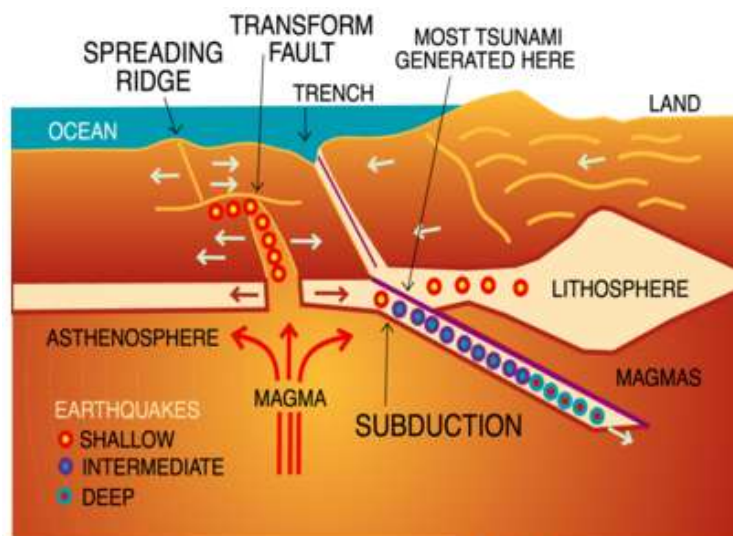
Στις κυριότερες δυνητικές συνέπειες ενός σεισμικού συμβάντος, που έχουν αναφερθεί και αναλυθεί μέχρι στιγμής στις προηγούμενες παραγράφους, προστίθεται ο θεωρητικά σπανιότερος κίνδυνος δημιουργίας τσουνάμι, ο οποίος εμφανίζεται ιδιαιτέρως αυξημένος σε κάποιες περιπτώσεις παραθαλάσσιων σεισμογενών περιοχών. Γενικά, με τον όρο τσουνάμι περιγράφεται μία ακολουθία θαλάσσιων κυμάτων μακράς περιόδου, τα οποία γεννώνται από διαδοχικές ανυψώσεις και καταβυθίσεις της επιφάνειας της θάλασσας κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια, υψηλές ταχύτητες μεταφοράς και, αν και σπανίως ανιχνεύονται στη θάλασσα, είναι δυνατόν να γίνουν εξαιρετικά επικίνδυνα και καταστροφικά, όταν προσεγγίσουν τις ακτές.



Εικόνα 7: Μηχανισμός δημιουργίας τσουνάμι.
(Πηγή: International Tsunami Information Center, UNESCO)

Η μοντελοποίηση ενός τσουνάμι περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία, με τα οποία επιδιώκεται να εκτιμηθούν η δημιουργία του ως συνέπεια ενός σεισμού, η διάδοση του κυματισμού και η περιοχή που διατρέχει ο κυματισμός αυτός εντός της ξηράς, μέχρι την πλήρη εξασθένησή του. Εξ αυτών, η γένεση ενός τσουνάμι βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το μηχανισμό διάρρηξης του ρήγματος και τη συνεπακόλουθη μετατόπιση της επιφάνειας του θαλάσσιου πυθμένα. Από την άλλη πλευρά, η διάδοση του κυματισμού αφορά στην εκτίμηση της κατεύθυνσης προς την οποία ταξιδεύουν τα κύματα, καθώς και στον υπολογισμό της ταχύτητας που αναπτύσσουν. Η ταχύτητα αυτή

μειώνεται όσο τα κύματα πλησιάζουν προς την ακτή, οπότε βαθμιαία ανυψώνεται ο πυθμένας, ενώ αντίθετα αυξάνεται το ύψος των κυμάτων. Τελικά, με γνωστά τα εν λόγω μεγέθη, μπορούν να εκτιμηθούν με σχετική ακρίβεια το ύψος του εισερχόμενου κύματος, καθώς και η αντίστοιχη εδαφική περιοχή που πρόκειται να κατακλυσθεί.



Εικόνα 8: Δημιουργία τσουνάμι λόγω σεισμικής δραστηριότητας.
(Πηγή: International Tsunami Information Center, UNESCO)

Με δεδομένη τη σπανιότητα εμφάνισης ενός τσουνάμι, η εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας μίας περιοχής λόγω αυτού του φαινομένου επικεντρώνεται ως επί το πλείστον στην ανάπτυξη μαθηματικών προσομοιωμάτων βάσει αναλυτικών μεθόδων. Τα εν λόγω προσομοιώματα, όπως λ.χ. στην περίπτωση του URRNSF (1988), διαμορφώνονται έτσι ώστε να συσχετίζουν το σεισμικό ρήγμα με την ταχύτητα του κυματισμού και την κατακλυζόμενη περιοχή. Σε πρακτικό επίπεδο, τα εν λόγω προσομοιώματα χρησιμοποιούνται ως βάση για την κατάρτιση χαρτών εκτίμησης του κινδύνου που διατρέχει μία περιοχή από πιθανή εκδήλωση τσουνάμι, καθώς και της κατακλυζόμενης έκτασης, όπως λ.χ. οι χάρτες που έχουν σχεδιαστεί από τους Ritter and Dyrpe (1972). Άλλες παράμετροι σχεδιασμού αυτών των χαρτών περιλαμβάνουν το ύψος του κύματος, την περίοδο επαναφοράς, το μέγεθος του σεισμού, καθώς και τη ζώνη που απαιτείται να εκκενωθεί από τους κατοίκους για λόγους ασφαλείας, κατά την εκδήλωση του πλημμυρικού κύματος. Ωστόσο, θα πρέπει εδώ να επισημανθεί το βασικό μειονέκτημα των μαθηματικών μοντέλων από τα οποία πηγάζουν οι υπόψη χάρτες, που είναι η αδυναμία επαλήθευσής τους, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεδομένης της έλλειψης στατιστικών στοιχείων από πραγματικά συμβάντα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με ενδεχόμενη δυσκολία εξακρίβωσης των στοιχείων της γενεσιουργού σεισμικής δόνησης, καθιστά τους εν λόγω χάρτες περισσότερο θεωρητικού χαρακτήρα και οδηγεί στην αναγκαιότητα εκτίμησης της τρωτότητας μίας περιοχής λόγω εκδήλωσης τσουνάμι κατά περίπτωση, βάσει και των ιδιαίτερων τοπογραφικών χαρακτηριστικών της.

1.3. Μέθοδοι εκτίμησης σεισμικής τρωτότητας

Σε γενικές γραμμές, οι μελέτες εκτίμησης τρωτότητας και υπολογισμού απωλειών βασίζονται στη δημιουργία μοντέλου εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, το οποίο δομείται σε άξονα είτε αιτιοκρατικό (ντετερμινιστικό), είτε πιθανολογικό. Οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτών προσεγγίσεων είναι οι εξής:

- Στην **αιτιοκρατική προσέγγιση** επιλέγεται ως αφετηρία ένα σενάριο σεισμικής διέγερσης, το οποίο αντιπροσωπεύει τη δυσμενέστερη δυνατή περίπτωση εκδήλωσης σεισμού σε μία περιοχή και χρησιμοποιείται για να αποδώσει σε πρώτο στάδιο την εδαφική κίνηση και, εξ αυτής, να προβλέψει τις αναμενόμενες βλάβες και απώλειες. Η εν λόγω μεθοδολογία αποτελεί την παλαιότερη προσπάθεια εκτίμησης βλαβών και αναπτύχθηκε αρχικώς για να καλύψει πρακτικές ανάγκες των μεγάλων ασφαλιστικών εταιρειών, το ενδιαφέρον των οποίων επικεντρωνόταν στον υπολογισμό του δείκτη **Μέγιστης Πιθανής Απώλειας (Probable Maximum Loss – PML)**. Το μέγεθος αυτό καθορίζει τα

μέγιστα αποθεματικά που θα πρέπει να είναι κάθε στιγμή διαθέσιμα από την ασφαλιστική εταιρεία, ώστε αυτή να μπορεί να καλύψει απρόσκοπτα τις απαιτούμενες αποζημιώσεις, σε περίπτωση ενδεχόμενης πρόκλησης βλαβών και απωλειών εξαιτίας σεισμού σε μία περιοχή.

- Στην **πιθανοτική προσέγγιση** αρχικά εξετάζονται όλες οι εντοπισμένες και γνωστές σεισμικές πηγές που είναι δυνατόν να επηρεάσουν μία περιοχή, καθώς και η συχνότητα με την οποία μπορούν να εκδηλωθούν σεισμοί προερχόμενοι από αυτές τις πηγές. Στη συνέχεια, για κάθε πηγή υπολογίζεται η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης συγκεκριμένων τιμών για χαρακτηριστικά μεγέθη της εδαφικής κίνησης. Με αυτό τον τρόπο, τελικά αποδίδονται οι αναμενόμενες απώλειες υπό μορφή πιθανοτικής κατανομής, για το σύνολο των σεισμικών πηγών που εξετάστηκαν. Η αιτιοκρατική είναι ίσως η πλέον χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία, παρέχοντας τη δυνατότητα υπολογισμού του δείκτη **Μέσης Ετήσιας Απώλειας (Average Annual Loss – AAL)**, ο οποίος αναφέρεται σε μακροχρόνιο διάστημα και αποδίδει τις μέσες ετήσιες απώλειες που εκτιμάται ότι θα καταγραφούν για το σύνολο των σεισμών που αναμένεται να εκδηλωθούν εντός αυτού του χρονικού διαστήματος αναφοράς. Πρόκειται για μέγεθος που αξιοποιείται από τις ασφαλιστικές εταιρείες για την εκτίμηση του ποσού που θα απαιτηθεί να καταβληθεί ως αποζημίωση για κάθε κτήριο που είναι ασφαλισμένο από την εταιρεία.

Θα πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι, παρά την ανωτέρω διάκριση, τα όρια μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι, ως ένα βαθμό, σχετικά ασαφή, καθώς είναι συχνό το φαινόμενο να περιλαμβάνονται διάφορες τυχαίες μεταβλητές ή άλλα πιθανοτικά μεγέθη σε αιτιοκρατικά μοντέλα. Επιπλέον, πιθανολογική ανάλυση είθισται να χρησιμοποιείται από αιτιοκρατικά μοντέλα εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, προκειμένου να προσδιορισθεί η σεισμική πηγή που εκτιμάται ότι συμβάλλει κατά το μέγιστο βαθμό στην πρόκληση βλαβών και απωλειών, σε μία περιοχή. Συνεπώς, η ύπαρξη και διαθεσιμότητα δεδομένων και λογισμικού, καθώς και ο ιδιαίτερος σκοπός για τον οποίο προορίζεται η εκάστοτε ανάλυση τρωτότητας, είναι τα στοιχεία αυτά που προσδιορίζουν τελικά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

1.3.1. Εμπειρικές μέθοδοι

Η μεθοδολογία που αξιοποιεί εμπειρικά δεδομένα, με έμφαση σε καταγραφές μακροσεισμικών εντάσεων, είναι η πρώτη προσέγγιση που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες εκτίμησης σεισμικών απωλειών. Όμως, επειδή το μέγεθος της έντασης δεν μετράται

ενόργανα αλλά εκτιμάται βάσει παρατηρήσεων, οπτικών καταγραφών, προσωπικών εκτιμήσεων και σχετικών οδηγιών της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης Κλίμακας Μακροσεισμικής Έντασης, η χρήση της για τη μέτρηση της εδαφικής κίνησης ενσωμάτων, αρχικά, σημαντικό ποσοστό αβεβαιοτήτων. Ωστόσο, με την πάροδο των ετών, αναλυτικότερες ενόργανες καταγραφές παραμέτρων της εδαφικής διέγερσης, όπως η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, επέτρεψαν την ισχυρότερη τεκμηρίωση και επιστημονική εξέλιξη των μεθόδων της υπόψη κατηγορίας, οι οποίες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Σε γενικές γραμμές, οι εμπειρικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν απαιτείται ακριβέστερη εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών από τα οποία έχουν κατασκευασθεί επιμέρους δομικά στοιχεία ή το σύνολο του αναλυόμενου κτηρίου. Επιπλέον, επιτρέπουν το λεπτομερή προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος εδάφους – ανωδομής.

Στις περιπτώσεις μεθόδων που χρησιμοποιούν το μέγεθος της έντασης, η τρωτότητα των κτηρίων αποδίδεται μέσω της δημιουργίας **Πινάκων Πιθανότητας Βλάβης (Damage Probability Matrices – DPM)** ανά τυπολογία κτηρίου, οι οποίοι αναπτύχθηκαν από τους Whitman et al. (1973) και αποτυπώνουν την πιθανότητα εμφάνισης βλάβης για συγκεκριμένη τιμή της σεισμικής έντασης. Βέβαια, οι Πίνακες Πιθανότητας Βλάβης δεν παρέχουν συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές αλλά άνω και κάτω όρια εκτιμήσεων, καθώς οι υφιστάμενες Κλίμακες Μακροσεισμικής Έντασης (Τροποποιημένη Κλίμακα Έντασης Μερκάλλι – MMI, Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα – EMS-98 κ.α.) χρησιμοποιούν ποιοτικούς προσδιορισμούς για να εκτιμήσουν το ποσοστό των κτηρίων της ίδιας τυπολογίας που αναμένεται να υποστούν τον ίδιο βαθμό βλάβης. Το γεγονός αυτό εξηγεί και την έλλειψη Πινάκων για τις μικρότερες τιμές εντάσεως, καθώς για τις εν λόγω τιμές συνήθως δεν καταγράφονται εμφανείς βλάβες. Τέλος, τα διαθέσιμα δεδομένα μίας περιοχής συνήθως αφορούν σε έως δύο βαθμούς έντασης, με συνέπεια να απαιτείται η προσαρμογή εμπειρικών δεδομένων από άλλα συμβάντα ή περιοχές, ή συνδυαστική χρήση άλλων μεθόδων, προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα της ανάλυσης με την επιλεγμένη εμπειρική μέθοδο.

1.3.2. Αναλυτικές μέθοδοι

Συχνά χαρακτηρίζονται ως αμιγώς θεωρητικές μέθοδοι, καθώς δεν βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία και καταγεγραμμένες παρατηρήσεις, αλλά σε θεωρητική πρόβλεψη των αναμενόμενων βλαβών μίας κατασκευής υπό σεισμική καταπόνηση. Με άλλα λόγια, πρόκειται για αμιγώς υπολογιστικές προσεγγίσεις, οι οποίες χρησιμοποιούν μαθηματικά

προσομοιώματα προκειμένου να προσδιορίσουν με τη λεπτομερέστερη δυνατή ανάλυση τη σεισμική απόκριση μίας κατασκευής. Απαιτούν γνώση εξελιγμένων (συνήθως μη γραμμικών) μεθόδων δομικής ανάλυσης και χρήση προηγμένων λογισμικών, γεγονός που τις καθιστά δυσκολότερες και ακριβότερες, εντούτοις πολύ πιο διεξοδικές και αξιόπιστες από τις υπόλοιπες μεθόδους. Εφαρμόζονται πάντοτε όταν οι άλλες μέθοδοι αδυνατούν να προσδιορίσουν με επαρκή ακρίβεια τα μέτρα μείωσης της τρωτότητας μίας κατασκευής που θα πρέπει να ληφθούν, συχνά όμως είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αυτοτελώς για την ανάλυση τρωτότητας ενός κτηρίου μεγάλης σπουδαιότητας ή εξαιρετικά σύνθετης δομής.

Η βασική φιλοσοφία των εν λόγω μεθόδων έγκειται στον προσδιορισμό της τρωτότητας μέσω μίας καμπύλης ικανότητας, η οποία εκφράζει τη μη γραμμική συμπεριφορά της αναλυόμενης κατασκευής, δηλαδή τη μετατόπιση που εκδηλώνει ένας επιλεγμένος κόμβος ελέγχου της για δεδομένη τιμή της τέμνουσας βάσης που αναπτύσσεται κατά τη σεισμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός της καμπύλης ικανότητας προϋποθέτει τη μόρφωση και δομική ανάλυση ενός θεωρητικού μαθηματικού προσομοιώματος της κατασκευής με χρήση μη γραμμικής μεθόδου, όπως είναι λ.χ. η μη γραμμική στατική ανάλυση ή ανάλυση pushover, βάσει παραμέτρων εδαφικής κίνησης όπως επιταχύνσεις και μετατοπίσεις, που αναπαρίστανται από ένα φάσμα απόκρισης. Πάνω σε αυτή τη βάση έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις, σημαντικότερες εκ των οποίων θεωρούνται η **Μέθοδος Φάσματος Ικανότητας (Capacity Spectrum Method – CSM)** και η **Μέθοδος Συντελεστή Μετατόπισης (Displacement coefficient method – DCM)**. Πρόκειται για μεθόδους που ενσωματώνουν τις αρχές του αντισεισμικού σχεδιασμού με στάθμες επιτελεσματικότητας και έχουν θεσμοθετηθεί υπό μορφή ποικίλων κανονιστικών κειμένων, με γνωστότερο αντιπρόσωπο τις διάφορες κανονιστικές διατάξεις της FEMA (FEMA 273, 1997a; FEMA 356, 2000; FEMA 440, 2005) και της μεθοδολογίας HAZUS (FEMA, 2003).

Η εκάστοτε επιλεγμένη, για κτήρια μίας συγκεκριμένης τυπολογίας, μεθοδολογία αποσκοπεί στον υπολογισμό της στοχευόμενης μετατόπισης, η οποία αντιπροσωπεύει τη μέση βλάβη που προκαλείται εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης στα υπόψη κτήρια. Η υπόψη μέση βλάβη μεταφράζεται τελικά σε πιθανοτική κατανομή μέσω συναρτήσεων τρωτότητας και αντίστοιχων επιπέδων βλάβης, όπου ενσωματώνονται επιμέρους αβεβαιότητες οι οποίες προέρχονται από τη γεωμετρία του μοντέλου, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής, τη σεισμική απαίτηση κ.λπ.

Με τον ανωτέρω τρόπο, η μεθοδολογία είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί ακόμη και σε περιοχές με χαμηλή σεισμικότητα, ή εκεί όπου οι καταγεγραμμένες βλάβες είναι ελάχιστες

έως ανύπαρκτες. Ωστόσο, η χρήση συναρτήσεων τρωτότητας είναι και το βασικότερο μειονέκτημα της, καθώς η περιορισμένη διαθεσιμότητά τους για λίγες τυπολογίες κτηρίων καθιστά δύσκολη τη συγκέντρωση στοιχείων υπό μορφή βάσης δεδομένων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αρκετά περιορισμένη μέχρι σήμερα ύπαρξη σχετικών μελετών εκτίμησης τρωτότητας και απωλειών, έλλειψη που αντιμετωπίζεται αναγκαστικά μέσω χρήσης άλλων εναλλακτικών μεθόδων.

1.3.3. Μέθοδοι κατηγοριοποίησης

Πρόκειται για προσέγγιση που αποσκοπεί στον προσδιορισμό της τυπολογίας των κτηρίων για τα οποία ενδέχεται να απαιτηθεί λεπτομερέστερη εξέταση των τρωτών χαρακτηριστικών τους, καθορίζοντας την πλέον ενδεδειγμένη μέθοδο. Αντιστρόφως, επισημαίνει την ιδιαίτερη τυπολογία των κτηρίων που θα πρέπει να αγνοηθούν. Περαιτέρω, ανιχνεύει την απαίτηση εφαρμογής μέτρων αποκατάστασης ή μετριασμού των επιπτώσεων ενός σεισμού σε συγκεκριμένα κτήρια. Τέλος, καθοδηγεί τους ερευνητές όσον αφορά στη διερεύνηση και λήψη πρόσθετων μέτρων μετριασμού της τρωτότητας, εντοπίζοντας τις προτεραιότητες και τους άξονες πάνω στους οποίους θα πρέπει να κινηθεί η εν λόγω διερεύνηση.

Σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι κατηγοριοποίησης παρέχουν εκτιμήσεις απωλειών γενικού χαρακτήρα, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους εφαρμογής προγραμμάτων αποκατάστασης. Επιπλέον χρήσεις τους αφορούν στον προσδιορισμό των μέγιστων απωλειών, στα πλαίσια προγραμμάτων ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης ή ασφαλιστικών προγραμμάτων. Τέλος, εκτός του προσδιορισμού των συνολικών (άμεσων και έμμεσων) αναμενόμενων απωλειών, οι μέθοδοι κατηγοριοποίησης δίνουν τη δυνατότητα εξέτασης της αναμενόμενης κατανομής των απωλειών αυτών. Συνεπώς, θεωρούνται εξαιρετικά χρήσιμες για τις ανάγκες ιεράρχησης και συγκριτικής αξιολόγησης του σεισμικού κινδύνου διαφόρων περιοχών μίας χώρας, προειδοποιώντας για τα κτήρια που είναι ιδιαίτερος ευάλωτα και γι' αυτό θα πρέπει να ενισχυθούν.

1.3.4. Μέθοδοι επιθεώρησης και εκτίμησης

Θεωρούνται οι πιο απλές και γρήγορες στην εφαρμογή του μέθοδοι. Παρουσιάζουν ομοιότητες με τις μεθόδους κατηγοριοποίησης, όσον αφορά στη χρήση δεδομένων (αν και μεγαλύτερης ποσότητας) για την αποτίμηση συγκεκριμένων τυπολογιών κτηρίων, αλλά διαφοροποιούνται ως προς το ότι δεν περιλαμβάνουν ανάλυση της αναμενόμενης απόκρισης της κατασκευής. Αντίθετα, χρησιμοποιούν οπτική επιθεώρησή της, βάσει

διαθέσιμου χρόνου και προσωπικών εκτιμήσεων, δίνοντας βαρύτητα σε δομικά στοιχεία και χαρακτηριστικά που θεωρούνται κρίσιμα για την υπόψη σεισμική απόκριση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο, αν και κατά βάση λειτουργούν ανεξάρτητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά προς τις μεθόδους κατηγοριοποίησης, προκειμένου να καθορίσουν τις υποχρεωτικές ή επιτρεπτές ενέργειες και επεμβάσεις που θα πρέπει να γίνουν στο κτήριο.

Οι ενέργειες αυτές πραγματοποιούνται είτε ως προσεισμικά μέτρα αποτροπής και μείωσης της τρωτότητας είτε ως μετασεισμικές επεμβάσεις με στόχευση στα τρωτά στοιχεία της κατασκευής. Επιλέγονται αναλόγως προς το χρόνο που διατίθεται για την ολοκλήρωσή τους και μπορεί να αφορούν σε εργασίες αποκατάστασης των βλαβών του κτηρίου, μείωση της χρήσης του ή ακόμη και της διάρκειας ζωής του, αφαίρεση των τρωτών δομικών τμημάτων του κ.λπ. Πέραν αυτών, η επιθεώρηση μπορεί να υποδείξει ότι απαιτείται διεξοδικότερη ανάλυση του κτηρίου, έτσι ώστε να προσδιοριστούν λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισής του, είτε για να καθορίσει με περισσότερη ακρίβεια και σαφήνεια (σε συνδυασμό και με βοηθητικές ερευνητικές εργασίες) τα μέτρα αποκατάστασης που θα πρέπει οπωσδήποτε να ληφθούν.

1.4. Άμεσες συνέπειες σεισμικής τρωτότητας

Οι συνέπειες ενός σεισμού ποσοτικοποιούνται μέσω δεικτών που αφορούν σε βλάβες και απώλειες τις οποίες προκαλεί η σεισμική δόνηση. Εξ αυτών, ως βλάβες ορίζονται οι φυσικές συνέπειες ενός σεισμού στο υφιστάμενο κτηριακό απόθεμα μίας περιοχής, οι οποίες αξιοποιούνται πρακτικά μέσω στατιστικών στοιχείων που συλλέγονται διαχρονικά και καταγράφονται με συστηματικό τρόπο σε παγκόσμιο επίπεδο, προκειμένου να εξυπηρετήσουν τη διαμόρφωση αξιόπιστων αντισεισμικών κανονιστικών κειμένων. Αντίστοιχα, οι απώλειες είθισται να προσδιορίζουν αφενός μεν το χρηματικό ποσό που απαιτείται για την επιδιόρθωση των βλαβών και την επαναφορά του κτηρίου στην προ σεισμού κατάσταση, αφετέρου δε τον αριθμό των ανθρώπινων θυμάτων, τόσο των ελαφρύτερα ή βαρύτερα τραυματιών όσο και των νεκρών. Τα στατιστικά στοιχεία των απωλειών αντλούνται κυρίως από τα αρχεία των ασφαλιστικών εταιρειών, οι οποίες αναλαμβάνουν τη συλλογή τους στα πλαίσια της υποχρέωσης καταβολής αποζημιώσεων. Ωστόσο, χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια και χρονική και χωρική αποσπασματικότητα, με συνέπεια να μην θεωρούνται επαρκώς αξιόπιστοι και αξιοποιήσιμοι δείκτες των συνεπειών ενός σεισμού.

Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των βλαβών περιλαμβάνει το διαχωρισμό τους σε άμεσες και έμμεσες βλάβες. Όντας συνήθως οι πρώτες που παρατηρούνται και

καταγράφονται μετά από μία σεισμική δόνηση, άμεσες χαρακτηρίζονται οι βλάβες που προκαλούνται σε δομικά και μη δομικά στοιχεία μίας κατασκευής, καθώς και αυτές που ποσοτικοποιούν τις συνέπειες για την κατασκευή από την απώλεια λειτουργίας της. Μεθοδολογικά, η αποτίμηση των άμεσων βλαβών που λαμβάνει χώρα στα πλαίσια μίας ανάλυσης τρωτότητας εξαρτάται από το είδος της κατασκευής που υφίσταται τη βλάβη: ένα μεμονωμένο κτήριο διερευνάται ως σύνολο χωροθετημένο σε μία ενιαία έκταση, ενώ τα Δίκτυα Κοινής Ωφελείας αναλύονται στις επιμέρους συνιστώσες τους, οι οποίες εξετάζονται στη συνέχεια διακριτά, βάσει της χωροθέτησης και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Επίσης, οι βλάβες ενός κτηρίου με χρήση κατοικίας ερμηνεύονται σε όρους θυμάτων και κόστους αποκατάστασης, ενώ στη περίπτωση των υποδομών όπως λ.χ. ενός Νοσοκομείου, βασικό θέμα αποτελεί το επίπεδο λειτουργικότητας αμέσως μετά το σεισμό.

Ως γενεσιουργός αιτία εμφάνισης βλαβών σε μία κατασκευή θεωρείται κατά βάση η κίνηση του εδάφους λόγω της σεισμικής διέγερσης. Ωστόσο, εκτεταμένες βλάβες και σημαντικού μεγέθους απώλειες είναι δυνατόν να προκληθούν και εξαιτίας άλλων παραγόντων τρωτότητας όπως λ.χ. αστοχία του εδάφους, κατολισθήσεις, δημιουργία τσουνάμι ή θραύση ενός φράγματος. Βέβαια, η παγκόσμια ιστορία έχει δείξει ότι τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται μάλλον σπάνια και υπό εξαιρετικές συνθήκες, γεγονός που συντελεί στη μάλλον περιορισμένη βιβλιογραφική αντιμετώπισή τους. Ωστόσο, σε κανονιστικό πλαίσιο έχουν υπάρξει διεθνώς κάποια σχετικά θεσμοθετημένα κείμενα, όπως ο ATC-13 (ATC, 1985), ο οποίος περιέχει διατάξεις βάσει των οποίων μπορούν να εκτιμηθούν πιθανές βλάβες λόγω ρευστοποίησης εδάφους και κατολισθήσεων.

Για τις ανάγκες εκτίμησης πιθανών απωλειών, τόσο ο υπόψη κανονισμός όσο και μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας υιοθετούν ως μέτρο ποσοτικοποίησης το **Μέσο Δείκτη Βλάβης (Mean Damage Factor – MDF)**, ο οποίος ορίζεται ως λόγος της δαπάνης αποκατάστασης μίας κατασκευής προς την αξία αντικατάστασης αυτής. Ως μέγεθος, εκφράζεται βάσει συσχετισμού παραμέτρων εδαφικής κίνησης, όπως η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), με την Τροποποιημένη Κλίμακα Έντασης Μερκάλλι (MMI). Η χρήση του, στα πλαίσια Μελετών εκτίμησης απωλειών, εξισώνει πρακτικά τις έννοιες της βλάβης και της απώλειας μέσω παραγόντων όπως είναι το είδος της κατασκευής, οι απαιτήσεις του οικείου αντισεισμικού κανονισμού καθώς και η έκταση και το είδος των εργασιών επισκευής. Ωστόσο, ζητήματα επιλογών στην εφαρμογή των εν λόγω παραμέτρων είναι δυνατόν να διαφοροποιήσουν δραματικά τις απώλειες που υπολογίζονται για ίδιες βλάβες: ελαφρές ρηγματώσεις σε φορέα από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα αντιμετωπίζονται με τοπικές επεμβάσεις, ενώ σε φορέα από φέρουσα τοιχοποιία ενδέχεται να απαιτήσουν την εκκένωση ή ακόμη και την κατεδάφιση του κτηρίου.

Επιπλέον μειονέκτημα αποτελεί η αδυναμία της Τροποποιημένης Κλίμακας Έντασης Μερκάλλι (MMI) να περιγράψει βλάβες σε σύγχρονες εγκαταστάσεις, ενώ υψηλή είναι και η αβεβαιότητα που ενσωματώνεται στις εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν την εν λόγω κλίμακα με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, λόγω μεγάλης διασποράς των σχετικών στατιστικών στοιχείων. Τέλος, διχογνωμία υπάρχει σχετικά με τα υψηλότερα επίπεδα της MMI και το εάν αυτά συνδέονται με υψηλές τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης ή με μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις, όπως λ.χ. οι κατολισθήσεις. Παρόλα αυτά, η συνδυασμένη χρήση MDF και MMI εξακολουθεί να αποτελεί τη βάση των περισσότερων μελετών ταχείας εκτίμησης απωλειών για τα περισσότερα είδη κατασκευών, εκτός ίσως από τα Δίκτυα Κοινής Ωφελείας για τα οποία τείνει να χρησιμοποιείται με διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.

1.4.1. Υφιστάμενο κτηριακό απόθεμα

Ως αντικείμενο μελετών εκτίμησης τρωτότητας και απωλειών, αποτελεί αδιαμφισβήτητη την ευρύτερη και πλέον ποικιλόμορφη κατηγορία κατασκευών. Περιλαμβάνει όλα τα είδη κτηρίων με χρήση κατοικίας, όπως και αυτά με διοικητικές και ποικίλες εμπορικές χρήσεις, βιοτεχνίες έως και ελαφρά βιομηχανία. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται ακόμη τα δημόσια κτήρια και άλλοι χώροι συνάθροισης κοινού, εκτός αυτών που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ως καταλύματα πληγέντων από φυσικές καταστροφές. Πέραν αυτών, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή τα ψηλά κτήρια και τα σχολικά συγκροτήματα, καθώς τα μεν πρώτα συνδέονται κατά κανόνα με μεγάλες απώλειες, ενώ τα δεύτερα είθισται να λειτουργούν ως χώροι φιλοξενίας σεισμοπλήκτων.

Η βασική συνιστώσα των μεθόδων εκτίμησης βλαβών και απωλειών των ανωτέρω κτηρίων συνίσταται στη διατύπωση μίας σχέσης μέσω της οποίας παράμετροι της εδαφικής κίνησης, που καταγράφεται κατά τη διάρκεια του σεισμού, συσχετίζονται με ένα μέτρο βλάβης που εκφράζει την τρωτότητα του κτηρίου. Με αυτό τον τρόπο, η βλάβη που υπολογίζεται μπορεί, σε επόμενο χρόνο, να μεταφραστεί σε όρους απωλειών. Για το σκοπό αυτό, οι παλαιότερες μελέτες εκτίμησης απωλειών επικεντρώνονταν στη δημιουργία καμπυλών Μέσου Δείκτη Βλάβης, οι οποίες αποτελούν ένα είδος καμπυλών τρωτότητας και χαράσσονταν βάσει στατιστικών στοιχείων που εξάγονταν από τα αρχεία ασφαλιστικών εταιρειών σε συνδυασμό με εμπειρική κρίση (Algermissen et al, 1978). Η νεότερη αντίληψη εστιάζει στη δημιουργία Πινάκων Πιθανότητας Βλάβης (DPM) ανά τυπολογία κτηρίου (λ.χ. Whitman, 1973) οι οποίοι, όπως και οι καμπύλες τρωτότητας, ενσωματώνουν πραγματικά στατιστικά στοιχεία, διαφέρουν όμως από τις δεύτερες ως προς το ότι χρησιμοποιούνται

κυρίως για την εκτίμηση τρωτότητας συνήθων κτηρίων, ενώ οι καμπύλες τρωτότητας αξιοποιούνται στην εκτίμηση βλαβών σε πυρηνικούς σταθμούς.

Παράλληλα με την ανωτέρω προσέγγιση, έχουν γίνει προσπάθειες συσχέτισης των βλαβών με επιλεγμένες μηχανικές παραμέτρους, οι οποίες λαμβάνονται βάσει των κριτηρίων σχεδιασμού των κτηρίων. Μεταξύ των εν λόγω παραμέτρων συγκαταλέγονται η ιδιοπερίοδος του κτηρίου, το δομικό σύστημα και τα εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής θεμελίωσης (Thiel and Zsutty, 1987) ενώ, επιπρόσθετα προς τους μηχανικούς υπολογισμούς, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικά δεδομένα και εκτιμήσεις. Η προσέγγιση αυτή φαίνεται εν πρώτοις αξιόπιστη, αλλά στην πράξη αποδεικνύεται σχετικά δύσχρηστη και περιορισμένης εφαρμογής, καθώς απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και ιδιαίτερως ακριβή γνώση των δομικών και λοιπών χαρακτηριστικών των κτηρίων. Γι' αυτό το λόγο δεν είναι πάντοτε δυνατή η εφαρμογή της στα πλαίσια μελετών χωρικής εκτίμησης απωλειών.

Η κατεύθυνση που επικρατεί τα τελευταία χρόνια διερευνά την εκτίμηση τρωτότητας και τον υπολογισμό απωλειών μέσω χάραξης γενικευμένων καμπυλών τρωτότητας ή δημιουργίας πινάκων DPM ανά τυπολογία κτηρίων. Ακολούθως, με κατάλληλη προσαρμογή τους στους ιδιαίτερους κατασκευαστικούς κανονισμούς και πρακτικές κάθε περιοχής, καθώς και με αξιολόγησή τους βάσει επαρκούς ποσότητας και ποιότητας δεδομένων για βλάβες και απώλειες από παλαιότερους σεισμούς, είναι δυνατόν να παραχθούν εργαλεία που θα μπορούν να παράξουν αξιόπιστα αποτελέσματα εκτίμησης απωλειών.

1.4.2. Εγκαταστάσεις Εκτάκτων Αναγκών

Σε αυτή την κατηγορία κτηρίων περιλαμβάνονται αφενός μεν Νοσοκομεία, Κέντρα Υγείας, κλινικά εργαστήρια, φαρμακεία και άλλες εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης, αφετέρου δε Αστυνομικά Τμήματα, Πυροσβεστικοί Σταθμοί και Κέντρα Τηλεπικοινωνιών. Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία κτηρίων συνήθους χρήσης κατοικίας, για τα οποία οι οικονομικές απώλειες ιεραρχούνται ως βασικότερες, ο μέγιστος δυνατός βαθμός λειτουργικότητας των υπόψη εγκαταστάσεων αμέσως μετά από ένα σεισμό είναι πρωταρχικής σημασίας. Ωστόσο, η έννοια της λειτουργικότητας δεν επηρεάζεται μονοσήμαντα από τη φέρουσα ικανότητα και την ακεραιότητα των δομικών μελών του φορέα, αλλά από πλήθος παραγόντων: εξίσου σημαντικός με τα δομικά μέλη είναι ο ρόλος των μη δομικών μελών και του κινητού εξοπλισμού των κτηρίων. Επιπλέον κρίσιμο στοιχείο αποτελεί η εξάρτηση των Εγκαταστάσεων Εκτάκτων Αναγκών από τα Δίκτυα Κοινής Ωφελείας, όπως λ.χ. ηλεκτρική ενέργεια, ύδρευση, τηλεπικοινωνιακό και συγκοινωνιακό

δίκτυο, προκειμένου να διασφαλισθεί η επάρκεια σε τροφοδοσία και προσωπικό. Και, ακριβώς λόγω αυτών των ιδιαιτεροτήτων τους καθώς και του περιορισμένου αριθμού τους εντός των πεπερασμένων ορίων μίας κοινότητας, αντιμετωπίζονται κατά κανόνα διακριτά ανά χρήση και ως μεμονωμένες περιπτώσεις από τις μελέτες εκτίμησης απωλειών.

Τα νοσοκομεία αποτελούν ίσως το μεγαλύτερο και σημαντικότερο αντιπρόσωπο της κατηγορίας, καθώς είναι αυτά πάνω στα οποία εστιάζουν οι περισσότερες μελέτες εκτίμησης απωλειών. Η χαμηλή αντοχή που επέδειξαν κάποια εκ των κατασκευασμένων με παλαιότερους κανονισμούς, σε προηγούμενους σεισμούς, οδήγησαν κανονιστικά κείμενα όπως ο ATC-13 στην πρόβλεψη της περίπτωσης να απολέσουν μέρος της λειτουργίας τους, λ.χ. σε κλίνες, για συγκεκριμένο επίπεδο άμεσης βλάβης του κτηρίου. Για τη διερεύνηση παρόμοιων περιπτώσεων, ο ATC-13 έχει αναπτύξει μεθοδολογία εκτίμησης απωλειών τόσο για τα δομικά στοιχεία των νοσοκομείων, όσο και για τη λειτουργικότητά τους, όσον αφορά στις κλίνες. Η εν λόγω μεθοδολογία περιλαμβάνεται και στον ATC-25, στα πλαίσια του οποίου διερευνήθηκαν ενδεχόμενες βλάβες σε δομικά και μη δομικά μέλη μονάδων υγείας, καθώς και οι συνεπαγόμενες τους λειτουργικές και οικονομικές απώλειες, για τέσσερα συνολικά σεισμικά σενάρια.

Στην περίπτωση των Αστυνομικών Τμημάτων, των Πυροσβεστικών Σταθμών και των Κέντρων Τηλεπικοινωνιών, είναι ίσως εμφανέστερη η βαρύτητα των μη δομικών στοιχείων και του εξοπλισμού στη διατήρηση της λειτουργικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το φρακάρισμα των θυρών σε ένα Πυροσβεστικό Σταθμό, με συνέπεια την καθυστερημένη και ως εκ τούτου αναποτελεσματική επέμβαση των Πυροσβεστικών Οχημάτων, λόγω αδυναμία άμεσης εξόδου τους από το χώρο στάθμευσης. Αντίστοιχα, βλάβες στην εγκατάσταση ασυρμάτου ενός Αστυνομικού Τμήματος εξαιτίας μίας σεισμικής δόνησης μπορεί να παρεμποδίσουν την άμεση κινητοποίηση και το συντονισμό των αστυνομικών οχημάτων και του προσωπικού.

Εξίσου σημαντικός είναι και ο ρόλος του τακτικού και έκτακτου προσωπικού που καλείται να παρέχει τις υπηρεσίες του στις Εγκαταστάσεις Εκτάκτων Αναγκών, αμέσως μετά από ένα σεισμό. Ο αριθμός τους θα πρέπει να είναι ανά πάσα στιγμή γνωστός και τα στοιχεία τους καταγεγραμμένα, έτσι ώστε αφενός να μπορούν να εκτιμηθούν γρήγορα οι απώλειες σε έμπυχο δυναμικό, αφετέρου να διασφαλίζεται η άμεση λειτουργία των υπόψη εγκαταστάσεων σε περιόδους κρίσης. Τέλος, αναπόσπαστο στοιχείο της λειτουργικότητας των ανωτέρω εγκαταστάσεων είναι η επίτευξη προσβασιμότητας, μέσω των διαθέσιμων οδικών υποδομών, καθώς και η δυνατότητα παροχής πόσιμου νερού και ηλεκτρικού ρεύματος. Σε διαφορετική περίπτωση διακυβεύεται λ.χ. η δυνατότητα ενός Πυροσβεστικού

οχήματος τόσο να μεταβεί στο σημείο όπου έχει κληθεί, όσο και να κατασβήσει την πυρκαγιά που έχει εκδηλωθεί.

1.4.3. Εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας μεγάλης κλίμακας

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται υποδομές όπως είναι οι Σταθμοί Παραγωγής Πυρηνικής Ενέργειας, Βιομηχανίες, στρατιωτικές βάσεις και φράγματα. Πρόκειται για εγκαταστάσεις οι οποίες δεν είναι απαραίτητως εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους, αλλά οι συνέπειες από ενδεχόμενες βλάβες τους λόγω σεισμού είναι δυνατόν να υπερβούν τον κτηριακό χώρο, προκαλώντας ευρείες υλικές και έμψυχες απώλειες, σε μεγάλη έκταση της γύρω περιοχής. Η τρωτότητα των εν λόγω εγκαταστάσεων πηγάζει από την πιθανότητα είτε πρόκλησης πυρκαγιάς ή έκρηξης και διάχυσης τοξικών αερίων, λόγω διαχείρισης επικίνδυνων υλικών, είτε κατακλυσμού μεγάλης έκτασης σε σύντομο χρονικό διάστημα με νερό και λάσπη, όπως στην περίπτωση κατάρρευσης του αναχώματος ενός φράγματος.

Για τους σκοπούς των μελετών εκτίμησης τρωτότητας και απωλειών, οι εν λόγω εγκαταστάσεις αντιμετωπίζονται σε τελικό στάδιο όχι ως διακριτά επιμέρους τμήματα αλλά ως ενιαίες και αδιάσπαστες κατασκευές. Στη συνέχεια, οι ενδεχόμενες απώλειες υπολογίζονται βάσει καμπυλών τρωτότητας ή Πινάκων Πιθανότητας Βλάβης, ενώ η απώλεια λειτουργικότητας προσδιορίζεται από την ποσότητα είτε του διαφυγόντος επικίνδυνου υλικού είτε του νερού που υπερχειλίζει από το φράγμα και υπολογίζεται βάσει επιπέδου βλάβης. Τα στοιχεία που εισάγονται ως αρχικά δεδομένα στο εκάστοτε μοντέλο είναι παρόμοια με αυτά του υφιστάμενου κτηριακού αποθέματος, ενώ πρόσθετες απαιτούμενες πληροφορίες αφορούν στη γεωγραφική χωροθέτηση, στην εσωτερική λειτουργία της εγκατάστασης και στην πιθανή διασπορά επικίνδυνων υλικών.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίδονται υπό μορφή καμπυλών τρωτότητας για τα κτήρια, τον εξοπλισμό, τις σωληνώσεις και τα συστήματα ελέγχου, ενώ επιδιώκεται η συστηματική αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων (Kennedy et al., 1980). Το εκάστοτε μοντέλο της μελετώμενης εγκατάστασης δημιουργείται και αναλύεται σε πρώτο επίπεδο με βασικό σκοπό να αποδώσει τις άμεσες απώλειες, όπως λ.χ. στην περίπτωση υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας του αναχώματος ενός φράγματος, ενώ οι όποιες έμμεσες απώλειες εκτιμώνται σε δεύτερο επίπεδο ανάλυσης, λ.χ. ως συνάρτηση του ύψους του πλημμυρικού κύματος που κατακλύζει την περιοχή κατάντη του αναχώματος. Θα πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι η ίδια η διαδικασία μόρφωσης και ανάλυσης του μοντέλου είναι ιδιαίτερα σύνθετη και περίπλοκη, στις περισσότερες περιπτώσεις εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας, με συνέπεια να μην μπορεί να εφαρμοσθεί για τις ανάγκες χωρικών μελετών εκτίμησης τρωτότητας, ακόμη και στο μεγαλύτερο δυνατό επίπεδο εξειδίκευσης.

Τα στοιχεία που συνθέτουν μία ολοκληρωμένη εκτίμηση απωλειών περιλαμβάνουν οπωσδήποτε ανάλυση σεισμικού κινδύνου για την περιοχή χωροθέτησης της εγκατάστασης, ανάλυση τρωτότητας των επιμέρους δομών που συνθέτουν την εγκατάσταση, χαρακτηριστικά ενός ενδεχόμενου ατυχήματος (συμπεριλαμβανομένης της αλληλουχίας των γεγονότων που συνδέονται με την αιτία και τις συνθήκες του ατυχήματος), καθώς και των συνεπειών που το ατύχημα αυτό προκαλεί. Ειδικότερα στην περίπτωση των Σταθμών Παραγωγής Πυρηνικής Ενέργειας εξετάζονται οι επιπλέον απώλειες λόγω πιθανούς διαφυγής ραδιενεργού υλικού, μετά από το σεισμό, και διασποράς του στην ατμόσφαιρα. Αντιστοίχως, στην περίπτωση στρατιωτικών βάσεων διερευνάται εάν έχουν εφαρμοσθεί οι προβλεπόμενοι κτηριοδομικοί κανονισμοί για την αποθήκευση εκρηκτικών υλών, καθώς και ο βαθμός τήρησης των απαιτήσεων που επιβάλλει ο στρατός για την επεξεργασία τους, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες πυροδότησής τους λόγω ατυχήματος. Όσον αφορά στα φράγματα, δεσπόζουσα θεωρείται η πολιτική των Η.Π.Α. με τη συμβολή της FEMA, του U.S. Army Corps of Engineers και άλλων ομοσπονδιακών υπηρεσιών και οργανισμών, καθώς και τη συμμετοχή τοπικών διαχειριστών λειτουργίας και συντήρησης των εν λόγω εγκαταστάσεων, που έχουν προχωρήσει από τη δεκαετία του 1970 σε συστηματική επιθεώρηση και καταγραφή μεγάλου αριθμού φραγμάτων ποικίλων χαρακτηριστικών. Η επεξεργασία των καταγραφών οδήγησε σε λεπτομερή αξιολόγηση της σεισμικής σταθερότητας των αναχωμάτων, με πρακτική συνέπεια την ανάπτυξη και καθιέρωση τοπικών και κυβερνητικών προγραμμάτων ασφαλείας φραγμάτων όπως λ.χ. το Εθνικό Πρόγραμμα Ασφάλειας Φραγμάτων (National Dam Safety Program). Τέλος, στην περίπτωση των Βιομηχανικών εγκαταστάσεων, για την εκτίμηση των σεισμικών απωλειών λόγω διάχυσης επικίνδυνων χημικών ουσιών εξετάζονται επιμέρους παράγοντες που συσχετίζουν την ποσότητα των επικίνδυνων ουσιών με τη συνολική δομή της εγκατάστασης και την τρωτότητα των επιμέρους δομών της, καθώς και την ειδικότερη αλληλεπίδραση των τελευταίων με τα εφαρμοζόμενα συστήματα και τις ακολουθούμενες διαδικασίες.

Σε κάθε περίπτωση, για την εκτίμηση σεισμικών απωλειών σε εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας μεγάλης κλίμακας γίνεται αποδεκτό ότι απαιτούνται τα ακόλουθα βήματα:

- Δημιουργία πρωτότυπου προσομιώματος και διεξαγωγή μίας αρχικής γενικού χαρακτήρα ανάλυσης, προκειμένου να προσδιορισθεί η τρωτότητα των επιμέρους δομών της εγκατάστασης και να εκτιμηθεί η αξιοπιστία της.

- Κατάλληλος καθορισμός των εννοιών της απώλειας και της βλάβης, βάσει της μεταξύ τους σχέσης, όπως αυτή συσχετίζεται με τις επιμέρους δομές της εγκατάστασης.
- Ανάπτυξη γενικευμένων σχέσεων διασύνδεσης των ιδιαίτερων παραγόντων κινδύνου κάθε εγκατάστασης (λ.χ. εκρηκτικές ύλες για τις στρατιωτικές βάσεις) με τις επιπτώσεις αυτών στο περιβάλλον και τον πληθυσμό.
- Ανάπτυξη γενικευμένων συναρτήσεων/καμπυλών τρωτότητας για κάθε είδος εγκατάστασης, οι οποίες θα επιτρέπουν την εφαρμογή τροποποιήσεων που ενδέχεται να απαιτηθούν ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε ιδιαίτερη περίπτωση.

1.4.4. Εγκαταστάσεις Κοινής Ωφελείας

Πρόκειται για μία ευρύτατη κατηγορία, με ποικιλομορφία δομών και εξοπλισμού όπως κτήρια, δεξαμενές, αντλιοστάσια, ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί/υποσταθμοί, Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας νερού/Λυμάτων, αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι, γέφυρες, αεροδρόμια, αγωγοί νερού/πετρελαίου/φυσικού αερίου, δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα τηλεπικοινωνίας. Κάποια εξ αυτών, όπως τα αεροδρόμια, παρουσιάζουν τοπικά χαρακτηριστικά, ενώ άλλα αποτελούν σύνθεση πολλών επιμέρους δομικών στοιχείων που καλύπτουν μία γεωγραφικά εκτεταμένη περιοχή. Και, όπως ποικίλει η σημασία της λειτουργίας κάθε επιμέρους δομικού στοιχείου της εγκατάστασης, κατ'αντιστοιχία διαφοροποιείται η τρωτότητά του συναρτήσει της περιοχής όπου βρίσκεται. Κάποιες εγκαταστάσεις, όπως τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, χαρακτηρίζονται επαρκώς ανθεκτικές έναντι σεισμού, ώστε να είναι δυνατόν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους ακόμη και αν έχουν υποστεί μεγάλες βλάβες. Αντίθετα, άλλες όπως οι αγωγοί μεταφοράς, διακόπτουν τη συνολική λειτουργία τους ανεξαρτήτως εάν οι βλάβες είναι εκτεταμένες ή μικρές και τοπικές. Ωστόσο, κοινό χαρακτηριστικό όλων των Εγκαταστάσεων Κοινής Ωφελείας είναι ο αντίκτυπος της ενδεχόμενης αστοχίας τους στην οικονομική δραστηριότητα μίας περιοχής, καθώς αυτή εξαρτάται σε κρίσιμο βαθμό από τη λειτουργία των εν λόγω δικτύων.

Σε γενικές γραμμές, οι Εγκαταστάσεις Κοινής Ωφελείας θεωρείται ότι επιτελούν τέσσερις διακριτές λειτουργίες, οι οποίες αφορούν σε αποθήκευση, μεταφορά/μετάδοση, επεξεργασία και διανομή/συλλογή, αν και κάποιες εξ αυτών μπορεί να μην περιλαμβάνονται σε κάποια συστήματα. Η αναγνώριση και κατανόηση αυτών των λειτουργιών είναι θεμελιώδους σημασίας για την ανάλυση τρωτότητας και εκτίμησης

απωλειών του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, η προσέγγιση θα πρέπει να περιλαμβάνει στοιχεία διαμόρφωσης του συστήματος, καταγραφής των συνιστωσών του, προσδιορισμό και μοντελοποίηση της επικινδυνότητας, ανάλυση τρωτότητας των επιμέρους δομικών μελών, καθώς και ανάλυση της τρωτότητας και χρησιμότητας του συστήματος ως συνόλου. Το εξαγόμενο αποτέλεσμα συμπεριλαμβάνει την εκτίμηση άμεσων βλαβών στο σύστημα και στις συνιστώσες του, συνέπειες των βλαβών των συνιστωσών στην ικανότητα και στη διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης, καθώς και τη διάρκεια της εν λόγω διακοπής.

Η προσομοίωση γίνεται μέσω σύνθετου συστήματος αποτελούμενου από κόμβους, οι οποίοι αναπαριστούν αντλιοστάσια, υποσταθμούς και άλλα σημειακά δομικά στοιχεία, και συνδέσμους που αντιπροσωπεύουν αγωγούς, δίκτυα ή άλλα γραμμικά μέλη της εγκατάστασης. Τόσο η γεωγραφική εξάπλωση μίας εγκατάστασης, όσο και τα διαφορετικά γεωμετρικά ή τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους δομικών μελών της, προσθέτουν σημαντική δυσχέρεια στην ανάλυση της αξιοπιστίας του συστήματος και στον προσδιορισμό της συνολικής αξιοπιστίας του. Κατά συνέπεια, οι υφιστάμενες αναλύσεις στηρίζονται κυρίως σε εμπειρικά δεδομένα από καταγραφές προηγούμενων σεισμών και χρησιμοποιούν Κλίμακες Μακροσεισμικής Έντασης, όπως η Τροποποιημένη Κλίμακα Έντασης Μερκάλλι (MMI), προκειμένου να καταρτίσουν μαθηματικές σχέσεις από τις οποίες θα εξαχθούν συμπεράσματα για την τρωτότητα των επιμέρους δομικών μελών της εγκατάστασης. Ωστόσο, η ελλιπής καταγραφή δεδομένων προηγούμενων σεισμών, σε συνδυασμό με την πληθώρα παραγόντων που είναι δυνατόν να επηρεάσουν την τρωτότητα ενός δομικού μέλους (λ.χ. υλικό κατασκευής αγωγών ή εδαφολογικές συνθήκες περιοχής), καθιστά τις προαναφερθείσες μαθηματικές σχέσεις περιορισμένης χρήσεως, καθώς αυτές απαιτείται να τροποποιηθούν κατά περίπτωση ώστε να μπορούν να εφαρμοσθούν για διαφοροποιημένα δεδομένα.

Πέραν των ανωτέρω, πρόσθετες δυσκολίες, όσον αφορά στην ανάλυση τρωτότητας των Εγκαταστάσεων Κοινής Ωφελείας, προκύπτουν διότι:

- Η εύστοχη μοντελοποίηση της εγκατάστασης και η αξιόπιστη ανάλυση της διαμόρφωσης και χρησιμότητας του συστήματος αποτελούν μία διαδικασία που προϋποθέτει εξειδικευμένη εμπειρογνωμοσύνη και απαιτεί τη συμμετοχή των φορέων λειτουργίας και διαχείρισης της εγκατάστασης.
- Η συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων και η ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο αποτελούν εξαιρετικά εκτενές και απαιτητικό καθήκον.
- Η έλλειψη ικανού αριθμού ψηφιακών δεδομένων επαρκούς ακρίβειας κωλύουν την πρακτικότητα και την ακρίβεια των προσομοιωμάτων. Το πρόβλημα γίνεται

πιο εμφανές στην περίπτωση του μικρού αριθμού υφιστάμενων ψηφιακών χαρτών επικινδυνότητας κατολισθήσεων, ενώ η αντιμετώπισή του μέσω ψηφιοποίησης και γεωγραφικής κωδικοποίησης των υπολοίπων χαρτών συνιστά ένα ιδιαιτέρως δαπανηρό και κοπιαστικό έργο.

- Συνήθως παραβλέπεται η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών Εγκαταστάσεων Κοινής Ωφελείας, με συνέπεια να μην συνεκτιμώνται, κατά την ανάλυση τρωτότητας, φαινόμενα όπως λ.χ. η διακοπή λειτουργίας ενός αντλιοστασίου λόγω βλάβης του δικτύου ηλεκτροδότησης της περιοχής.

1.5. Έμμεσες συνέπειες σεισμικής τρωτότητας

Έμμεσες χαρακτηρίζονται οι συνέπειες που εκδηλώνονται υπό μορφή βλαβών, όταν οφείλονται σε δευτερογενείς ή έμμεσους κινδύνους, οι οποίοι γεννώνται ως επακόλουθα της εδαφικής κίνησης λόγω της σεισμικής δόνησης. Πρόκειται για φυσικά φαινόμενα τα οποία, ως επί το πλείστον, διαθέτουν τυχαίο και περίπλοκο χαρακτήρα, ώστε να μην είναι δυνατή η ακριβής περιγραφή τους και η ποσοτικοποίηση των απωλειών που προκαλούν, παρά μόνο η αδρομερής και ποιοτική παρουσίασή τους. Στις κυριότερες έμμεσες βλάβες περιλαμβάνονται αυτές που προκαλούνται από πυρκαγιά, διασπορά επικίνδυνων υλικών και πλημμύρα, όπως αυτές αναλύονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

1.5.1. Πυρκαγιά

Σε γενικές γραμμές, γίνεται αποδεκτό ότι η ανάλυση απωλειών λόγω πυρκαγιάς που ξεσπά ως έμμεσο επακόλουθο μίας σεισμικής δόνησης ξεκινά από τη δημιουργία αναλυτικού μοντέλου, το οποίο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την αλληλουχία ανάφλεξης – εξάπλωσης – καταστολής της πυρκαγιάς, ενσωματώνοντας για την περιγραφή των επιμέρους σταδίων πληροφορίες γεωγραφικού χαρακτήρα. Επιπλέον, θα πρέπει να διερευνάται η σύγχρονη δράση άλλων επιβαρυντικών παραγόντων όπως ταυτόχρονη ανάφλεξη πολλαπλών εστιών, ύπαρξη δυσμενών καιρικών συνθηκών ή ανεπαρκής δύναμη κατάσβεσης, οι οποίοι αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα καταγραφής απωλειών (Orpenheim, 1984).

Η ασάφεια που διέπει τη μόρφωση του μοντέλου ξεκινά ευθύς εξαρχής από την πολυπλοκότητα του ίδιου του μηχανισμού ανάφλεξης της πυρκαγιάς, ο οποίος προϋποθέτει την αναγνώριση και εξέταση όλων των πιθανών πηγών ανάφλεξης, όπως είναι η διαρροή αερίου ή ένα ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα. Ταυτόχρονα, σημαντικό ρόλο στη διαδικασία ανάφλεξη έχουν η ένταση του σεισμού, η δομή και χρήση του κτηρίου, η

ύπαρξη εύφλεκτων υλικών, εδαφολογικές παράμετροι και άλλοι ποικίλοι εξωτερικοί παράγοντες, οι οποίοι καθιστούν προσεγγίσιμο το μηχανισμό ανάφλεξης κυρίως βάσει στατιστικών δεδομένων.

Αντίστοιχα, η εξάπλωση της πυρκαγιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διάταξη των κτηρίων, τα υλικά δόμησης και το περιεχόμενό τους, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται από παράγοντες όπως η μετάδοση της θερμικής ενέργειας στον περιβάλλοντα χώρο και η εκτίναξη φλεγόμενων υλικών σε μεγάλη απόσταση. Επιπλέον, σημαντική είναι η επιρροή της χρονικής στιγμής του 24ώρου και της εποχής του χρόνου, οι οποίες καθορίζουν τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, καθώς η αυξημένη θερμοκρασία, το χαμηλό ποσοστό ατμοσφαιρικής υγρασίας, η μεγάλη ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνσή του ευνοούν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτερη εξάπλωση μίας πυρκαγιάς.

Τέλος, η επιχείρηση καταστολής της πυρκαγιάς είθισται να επικεντρώνεται στην προσπάθεια κατάσβεσης των μικρότερων διάσπαρτων εστιών έτσι ώστε, εάν αυτό είναι δυνατόν, να απομονωθεί σε ένα περιορισμένο χώρο μία και μόνη κεντρική εστία, η οποία θεωρείται ευκολότερα ελεγχόμενη. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να συνεκτιμώνται παράγοντες όπως η διακοπή της υδροδότησης, η παρεμπόδιση των συγκοινωνιών και η διακοπή των τηλεπικοινωνιών λόγω των συνεπειών της σεισμικής δόνησης, ενώ εξίσου κρίσιμο είναι και το επίπεδο ετοιμότητας των τοπικών πυροσβεστικών δυνάμεων.

1.5.2. Διασπορά επικίνδυνων υλικών

Ως επικίνδυνα χαρακτηρίζονται απλά ή σύνθετα υλικά τα οποία, λόγω διακίνησης, αποθήκευσης, επεξεργασίας ή συσκευασίας τους μπορεί να έχουν επιζήμιες επιπτώσεις στον πληθυσμό ή στο περιβάλλον. Παρουσιάζουν ευρεία ποικιλομορφία, καθώς μπορεί να είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά, εκρηκτικά, τοξικά, ραδιενεργά, οξειδωτικά, νοσογόνοι παράγοντες ή εξαιρετικά αντιδραστικά.

Τα επικίνδυνα υλικά αποτελούν έμμεσο κίνδυνο που παρουσιάζεται με διττή μορφή, καθώς ενδεχόμενη διασπορά τους κατόπιν σεισμού μπορεί να έχει είτε τοπικές επιπτώσεις, λόγω διαρροής του επικίνδυνου υλικού εντός των χώρων μίας εγκατάστασης, είτε γενικευμένες επιπτώσεις σε μία ευρύτερη περιοχή, λόγω απελευθέρωσης αερομεταφερόμενου υλικού στην ατμόσφαιρα ή υδατοδιαλυτού υλικού στο έδαφος (επιφανειακά ή υπογείως), καθώς και έκλυσης τοξικών αερίων λόγω πυρκαγιάς.

Όπως και στην περίπτωση της πυρκαγιάς, ο πολυσύνθετος χαρακτήρας της διασποράς επικίνδυνων υλικών καθιστά δυσχερή την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων του

φαινομένου μέσω εκτίμησης των οφειλόμενων σε αυτό απωλειών, ιδιαιτέρως σε χωρικό επίπεδο. Η δυσκολία έγκειται στη δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα παρέχει πληροφορίες τόσο για ενδεχόμενη απελευθέρωση του υλικού, όσο και για το μηχανισμό διασποράς του. Ως πρωταρχικό βήμα λαμβάνεται η απαίτηση αναγνώρισης και προσδιορισμού των ακόλουθων παραγόντων, κατ' ελάχιστον, οι οποίοι αφορούν σε μία περιοχή:

- Είδος, αριθμός και χωροθέτηση/διάταξη των εγκαταστάσεων αποθήκευσης, επεξεργασίας ή χρήσεως επικίνδυνων υλικών.
- Είδος και ποσότητα των επικίνδυνων υλικών.
- Εδαφικά χαρακτηριστικά και σεισμολογικές συνθήκες της αναλυόμενης περιοχής.
- Ύπαρξη επαρκούς ποσότητας και καλής ποιότητας στατιστικών δεδομένων προηγούμενων συμβάντων.
- Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής.
- Υδρολογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα.

Επιπλέον των ανωτέρω, θα πρέπει να αξιολογείται η επίδραση των καιρικών συνθηκών στο μοντέλο διασποράς, καθώς και η πιθανότητα διασποράς επικίνδυνων υλικών από πολλαπλές πηγές, ιδίως σε περίπτωση εκδήλωσης εκτεταμένων και σοβαρών βλαβών κατόπιν μίας σεισμικής δόνησης μεγάλου μεγέθους.

1.5.3. Πλημμύρα

Πλημμύρες αναμένονται ως δευτερογενείς συνέπειες σεισμικής διέγερσης του εδάφους συνήθως σε περιπτώσεις εκδήλωσης τσουνάμι ή αστοχίας του αναχώματος ενός φράγματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απώλειες σημειώνονται λόγω των βλαβών οι οποίες καταγράφονται στα κτήρια και τις υποδομές που βρίσκονται εντός της κατακλυζόμενης έκτασης και, ακριβώς λόγω της ιδιαίτερης χωροθέτησής τους, παρουσιάζουν αυξημένη τρωτότητα έναντι της ποσότητας και της μεγάλης ταχύτητας του νερού.

Η εν λόγω τρωτότητα εντοπίζεται στην αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης των θεμελίων και συνεπακόλουθης αποσταθεροποίηση των υπόψη κατασκευών, κατά τη σαρωτική διέλευση του υδάτινου στρώματος που κατακλύζει την περιοχή. Επιπλέον κίνδυνο πρόκλησης βλαβών παρουσιάζουν οι προσπτώσεις οχημάτων, σκαφών και άλλων μεγάλων αντικειμένων που μεταφέρονται από τον κυματισμό, στους τοίχους των κτηρίων. Τέλος, εξαιρετικά συχνές είναι οι απώλειες λόγω ηλεκτροπληξίας, συνεπεία επαφής

απογυμνωμένων ηλεκτροφόρων καλωδίων με το νερό, καθώς και λόγω εκρήξεων και αναφλέξεων, οφειλόμενες σε σύγκρουση δεξαμενών καυσίμων που έχουν παρασυρθεί από το νερό με ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Ωστόσο, πρόβλημα δείχνει να εμφανίζεται στην εκτίμηση των απωλειών λόγω πλημμύρας, παρά την όχι και τόσο σπάνια εμφάνιση του φαινομένου. Το ζήτημα της ποσοτικοποίησης πηγάζει από τη σχετικά απλοϊκή διαμόρφωση των αντίστοιχων μοντέλων, καθώς για τη διαμόρφωσή τους είθισται να μη λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η ταχύτητα του κατακλυσμιαίου υδάτινου στρώματος. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια τη χρήση σχετικά περιορισμένων εργαλείων για την εκτίμηση απωλειών σε δεύτερο στάδιο.

Στα ανωτέρω εργαλεία ανήκουν τα υφιστάμενα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, τα οποία έχουν καταρτισθεί βάσει Χαρτών Επικινδυνότητας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας για όλα τα Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας, με μέριμνα της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Πρόκειται για εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ στον Ελλαδικό χώρο, όσον αφορά στην αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας από εσωτερικά ύδατα (ποτάμια και λίμνες) και από τη θάλασσα. Περιλαμβάνουν μέτρα και προτεραιότητες που κρίνονται απαραίτητα, αφενός για την αποτροπή της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμύρας και, αφετέρου, για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και τη μείωση των αρνητικών συνεπειών της για το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομία. Με αυτό τον τρόπο, αξιοποιώντας υφιστάμενα στατιστικά δεδομένα προηγούμενων συμβάντων μέσω οικονομικών, περιβαλλοντικών και άλλων συναφών παραμέτρων, τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας συνιστούν ένα χρήσιμο μεθοδολογικό εργαλείο πρόληψης και αντιμετώπισης του εν λόγω κινδύνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΩΛΕΙΕΣ

2.1. Ερευνητικές μέθοδοι και μοντέλα εκτίμησης απωλειών

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 1, η διεθνής βιβλιογραφία έχει να επιδείξει ένα μεγάλο αριθμό ερευνητικών εργασιών, οι οποίες στρέφονται γύρω από το ζήτημα της πλέον τεκμηριωμένης, κατά το δυνατόν, διεξαγωγής μίας ανάλυσης τρωτότητας με απώτερο σκοπό την αξιόπιστη εκτίμηση σεισμικών απωλειών. Οι εργασίες αυτές απομονώνουν και αναλύουν πλήθος παραγόντων, οι οποίοι λαμβάνονται κατά περίπτωση ως αιτίες εκδήλωσης τρωτότητας των κατασκευών και πρόκλησης βλαβών, με τελική συνέπεια την καταγραφή απωλειών στο κτηριακό απόθεμα και το έμφυχο δυναμικό.

Συνοψίζοντας τις βασικές αρχές, όσον αφορά στην υιοθετούμενη θεωρητική προσέγγιση, η σεισμική επικινδυνότητα εκτιμάται βάσει είτε πιθανολογικών μεθόδων, η φιλοσοφία των οποίων διέπει και τα σχετικά Κανονιστικά κείμενα αντισεισμικού σχεδιασμού, είτε στοχαστικών μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για τη διενέργεια εξειδικευμένων αναλύσεων εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας.

Περαιτέρω, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της αναλυόμενης περιοχής, οι μεθοδολογίες εκτίμησης τρωτότητας και σεισμικών απωλειών διαχωρίζονται, ανάλογα με το εύρος του αντικειμένου που διαχειρίζονται, σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις χωρικές και τις κτηριακές. Εξ αυτών, οι χωρικές μελέτες εξετάζουν τις αναμενόμενες σεισμικές απώλειες για ένα μεγάλο αριθμό κτηρίων εντός μίας εκτεταμένης περιοχής, όπως λ.χ. μία πόλη, ένα Δήμο ή μία ολόκληρη γεωγραφική ή διοικητική Περιφέρεια. Αντιθέτως, οι κτηριακές έρευνες επικεντρώνονται στην προσπάθεια ακριβέστερης εκτίμησης των απωλειών που αναμένονται εντός ενός συγκεκριμένου κτηρίου, χωροθετημένου εντός μίας συγκεκριμένης πόλης. Σε κάθε περίπτωση, μετά από τον προσδιορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας του αναλυόμενου αντικειμένου, η τρωτότητα εκτιμάται βάσει είτε Μητρώων Πιθανότητας Βλάβης είτε Καμπυλών Τρωτότητας. Επισημαίνεται σε αυτό το σημείο ότι, εάν γίνει δεκτή η γραμμικότητα της μακροσεισμικής έντασης, οι δύο αυτές προσεγγίσεις πρακτικά ταυτίζονται: πρόκειται για παραδοχή η οποία δεν τεκμηριώνεται θεωρητικά, διευκολύνει όμως σημαντικά τη διεξαγόμενη ανάλυση.

2.1.1. Κτηριακές ερευνητικές εργασίες εκτίμησης απωλειών

Επίκεντρο των εν λόγω ερευνητικών εργασιών αποτελεί ο αυστηρά καθορισμένος χώρος ενός μεμονωμένου κτηρίου ή μίας συγκεκριμένης τυπολογίας κτηρίων. Ο περιορισμός του εύρους του αναλυόμενου αντικειμένου σε επίπεδο κτηρίου αποσκοπεί αρχικά στον λεπτομερέστερο προσδιορισμό των παραγόντων που συνθέτουν τα τρωτά

στοιχεία του, η ανάλυση των οποίων επιζητεί να αποδώσει στον πλέον ακριβή βαθμό τις απώλειες που αναμένεται να καταγραφούν μετά από μία σεισμική δόνηση. Οι εργασίες αυτού του είδους δεν είναι πολυάριθμες, λόγω της σχετικά μικρής πρακτικής αξίας τους, καθώς η ανάλυση υποχρεούται να λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα κατά περίπτωση χαρακτηριστικά κάθε κτηρίου, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η αξιόπιστη επέκταση των συμπερασμάτων της ανάλυσης σε μία γεωγραφικά ευρύτερη περιοχή με μεγαλύτερο αριθμό κτηρίων, ακόμη και αν αυτά διαθέτουν παρόμοια χαρακτηριστικά με το αναλυόμενο κτήριο. Αυτό που αποτελεί, ωστόσο, κοινό ζητούμενο στις περισσότερες εργασίες της εν λόγω κατηγορίας, είναι η εκτίμηση των οικονομικών απωλειών, οι οποίες αναμένεται να προκληθούν για ένα δεδομένο σεισμικό γεγονός.

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στις υπόψη εργασίες εκφράζεται χαρακτηριστικά στην περίπτωση του Scholl (1979), ο οποίος ανέλυσε κτήρια μεγάλου ύψους σε μία ντετερμινιστική προσπάθεια να αναγνωρίσει, να αξιολογήσει και να συσχετίσει παραμέτρους εδαφικής κίνησης με δομικά χαρακτηριστικά των κατασκευών, προκειμένου να καταλήξει σε ένα μοντέλο εκτίμησης οικονομικών απωλειών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησε ως αφετηρία της ανάλυσης υφιστάμενες βάσεις δεδομένων προηγούμενων συμβάντων, από τις οποίες άντλησε καταγραφές τιμών παραμέτρων εδαφικής κίνησης, σε συνδυασμό με σχέσεις κίνησης – βλαβών οι οποίες είχαν ήδη διατυπωθεί για κτήρια διαφόρων υψών και τυπολογίας. Οι εν λόγω σχέσεις διερευνήθηκαν και προσαρμόστηκαν για κτήρια μεγάλου ύψους, βάσει μίας αναλυτικής διαδικασίας που υπολογίζει τη μέγιστη απόκριση του κτηρίου κατά τη διάρκεια μίας σεισμικής διέγερσης του εδάφους. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι βλάβες δομικών και μη δομικών στοιχείων του κτηρίου ως ποσοστό του κόστους αντικατάστασης κάθε κατηγορίας στοιχείων και εκτιμήθηκαν χρηματικά βάσει των προαναφερθεισών σχέσεων κίνησης – βλαβών. Σε τελικό στάδιο προσδιορίστηκαν οι συνολικές απώλειες του κτηρίου ως άθροισμα των επιμέρους απωλειών των μελών του κτηρίου.

Παρόμοια αντιμετώπιση υιοθετεί και ο Gunturi (1993), στην προσπάθειά του να εκτιμήσει τις αναμενόμενες οικονομικές απώλειες για ένα κτήριο που υφίσταται μία σεισμική δόνηση με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μεγέθη. Η προσέγγιση περιλαμβάνει μία αρχική αναγνώριση και ανάλυση των δομικών και μη δομικών μελών του φορέα, καθώς και του περιεχόμενου στο χώρο κινητού εξοπλισμού, προκειμένου να προσδιορίσει σε επόμενο στάδιο το επίπεδο βλάβης κάθε στάθμης. Συγκεκριμένα, οι δείκτες βλάβης προσδιορίζονται για τα δομικά μέλη της κατασκευής σύμφωνα με τους Park and Ang (1985), μέσω μη γραμμικής ανάλυσης ιστορίας του φορέα, ενώ για τα μη δομικά μέλη λαμβάνονται ως δείκτες βλάβης τόσο η σχετική μετατόπιση των ορόφων όσο και η μέγιστη εδαφική

επιτάχυνση, η οποία χρησιμοποιείται ως δείκτης βλάβης και για τον κινητό εξοπλισμό. Στο τελικό στάδιο προσδιορίζονται οι συνολικές οικονομικές απώλειες του κτηρίου μέσω σχέσεως που τις συσχετίζει με την απώλεια λειτουργικότητάς του, η οποία προκύπτει ως άθροισμα των ποσοστών που αντιστοιχούν στην απώλεια λειτουργικότητας κάθε στάθμης, υπολογισμένης βάσει των προαναφερθέντων δεικτών βλάβης.

Μειονέκτημα των ανωτέρω προσεγγίσεων αποτελεί το ότι χρησιμοποιούν ένα συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο για να εκτιμήσουν τις απώλειες, χωρίς όμως να λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες που διέπουν την εδαφική κίνηση κατά τη διάρκεια του σεισμού. Τον περιορισμό αυτό αντιμετώπισαν οι Singhal and Kiremidjian (1996), οι οποίοι διερεύνησαν την πιθανοτική φύση της εκτίμησης σεισμικών απωλειών σε μεμονωμένα κτήρια μέσω μεθοδολογίας που εκτιμά την πιθανότητα βλάβης του φορέα βάσει ενός συνόλου εδαφικών κινήσεων. Με αφετηρία την προσομοίωση Monte Carlo αναπτύχθηκαν σχέσεις που συνδέουν την εδαφική κίνηση με τις αναμενόμενες βλάβες για τρεις τυπολογίες πλαισίων Ωπλισμένου Σκυροδέματος, οι οποίες αντιπροσωπεύουν χαμηλά κτήρια (1 έως 3 στάθμες), μεσαία κτήρια (4 έως 7 στάθμες) και υψηλά κτήρια (8 και άνω στάθμες). Και σε αυτή την περίπτωση, οι δείκτες βλάβης προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τους Park and Ang (1985), ενώ η ανάλυση οδήγησε τελικά στην παραγωγή καμπυλών τρωτότητας και Πινάκων Πιθανότητας Βλάβης (DPM) ανά τυπολογία κτηρίου.

Η διερεύνηση της επιρροής των αβεβαιοτήτων στην εκτίμηση σεισμικών απωλειών συνεχίστηκε από τους Porter and Kiremidjian (2001), με μία μεθοδολογία αθροιστικής εκτίμησης σεισμικών απωλειών η οποία συνεκτίμησε περισσότερες πηγές αβεβαιοτήτων, έναντι των προηγούμενων ερευνητικών εργασιών. Η διαφορά έγκειται στο ότι μέσω του αναλυόμενου μοντέλου αντιμετωπίστηκαν ζητήματα μεταβλητότητας της εδαφικής κίνησης κατά το σεισμό, με την ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων, και ζητήματα αβεβαιοτήτων, τόσο όσον αφορά στην εκτίμηση της βλάβης κάθε δομικού ή μη δομικού στοιχείου, όσο και του αντίστοιχου κόστους αποκατάστασης που προκύπτει για κάθε στοιχείο συναρτήσεως των υπόψη βλαβών. Ωστόσο, και εδώ χρησιμοποιείται η προσομοίωση Monte Carlo για τη διατύπωση πιθανοτικών συναρτήσεων τρωτότητας, μέσω των οποίων υπολογίζονται οι στατιστικές παράμετροι του κόστους αποκατάστασης του κτηρίου συναρτήσεως της εδαφικής κίνησης. Επισημαίνεται δε ότι οι εν λόγω παράμετροι υποβλήθηκαν σε απλοποιημένη ανάλυση ευαισθησίας, προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός επιρροής τους επί του συνολικού κόστους αποκατάστασης του κτηρίου.

2.1.2. Χωρικές ερευνητικές εργασίες εκτίμησης απωλειών

Λαμβάνοντας ως σημείο εκκίνησης την προηγούμενη κατηγορία ερευνητικών εργασιών, το αντικείμενο της συγκεκριμένης κατηγορίας διευρύνεται ώστε να συμπεριλάβει την εκτίμηση σεισμικών απωλειών όχι πλέον για μεμονωμένα κτήρια αλλά για ένα σύνολο κτηρίων που καταλαμβάνουν ένα πιο εκτεταμένο χώρο. Η εν λόγω μεθοδολογία είχε ως έναυσμα κάποιες αρχικές ερευνητικές εργασίες οι οποίες άρχισαν να εμφανίζονται κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα και οφείλουν την ύπαρξή τους στην ανάγκη των ασφαλιστικών εταιρειών να αποκτήσουν μία επαρκώς αξιόπιστη εκτίμηση των αναμενόμενων οικονομικών απωλειών, συνεπώς και του ποσού των αποζημιώσεων που θα έπρεπε να καταβάλουν στους δικαιούχους ασφαλισμένους, σε περίπτωση σεισμού.

Χαρακτηριστική περίπτωση αυτών των πρώτων εργασιών για χρήση από τις ασφαλιστικές εταιρείες αποτελεί η βάση δεδομένων που ανέπτυξε ο Freeman (1932), όπου συμπεριέλαβε αδρές εκτιμήσεις πιθανοτικών μέσων όρων των αναμενόμενων σεισμικών απωλειών για ποικίλες περιοχές και τυπολογίες κτηρίων. Η πιθανοτική φύση αυτών των εκτιμήσεων αποτέλεσε και το βασικό μεθοδολογικό χαρακτηριστικό των περισσότερων εκ των εργασιών που ακολούθησαν, όπως αυτές των Steinbrugge et al (1969) και Whitman et al (1973), οι οποίοι διερεύνησαν το θέμα των απωλειών καταλήγοντας στην ανάπτυξη Πινάκων Πιθανότητας Βλάβης (DPM). Στην πρώτη περίπτωση, για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικά στοιχεία, εκτός της περιοχής, ποικίλα στατιστικά κτηριολογικά δεδομένα, όπως η χρονολογία κατασκευής, ο τύπος θεμελίωσης, το είδος των τοιχοπληρώσεων, καθώς και τα κόστη αντικατάστασης. Τα δεδομένα αυτά απεικονίσθηκαν υπό μορφή πίνακα, ο οποίος συσχέτιζε 24 τυπολογίες κτηρίων με τιμές έντασης της Τροποποιημένης Κλίμακας Μερκάλλι (MMI), παρέχοντας για κάθε ζεύγος δεδομένων ένα ποσοστό βλάβης και ένα αντίστοιχο δείκτη βλάβης, από τα οποία μπορούσε να προσδιορισθεί το ποσοστό απωλειών και το αντίστοιχο ύψος της ασφαλιστικής αποζημίωσης, για κάθε τυπολογία κτηρίου. Κατ' ανάλογο τρόπο, στη δεύτερη εργασία οι ερευνητές ανέλυσαν 5ώροφα κτήρια με πλαισιακούς φορείς Ω.Σ., μεταλλικούς ή από τοιχώματα, προκειμένου να συσχετίσουν ποσοστά βλάβης με τιμές της εδαφικής κίνησης, βάσει της Τροποποιημένης Κλίμακας Μερκάλλι (MMI).

Στα επόμενα χρόνια, η ανάγκη εκτίμησης των προβλεπόμενων απωλειών σε χωρικό επίπεδο οδήγησε σταδιακά στη συστηματική επεξεργασία και μεθοδολογική ομαδοποίηση προηγούμενων μεμονωμένων εργασιών. Κάθε σχετική εργασία αναλύθηκε ως προς το είδος των απαιτούμενων εισαγωγικών δεδομένων, της ακολουθούμενης διαδικασίας και των παραγόμενων αποτελεσμάτων (Steinbrugge, 1982; Reitherman, 1985). Οι περισσότερες προσπάθειες επικεντρώνονταν στη συσχέτιση διαφόρων τυπολογιών κτηρίων, οι οποίες

αποτελούσαν τα αρχικά δεδομένα, με τα αντίστοιχα κόστη αντικατάσταση κάθε τυπολογίας, που αποτελούσαν τα τελικά παραγόμενα, μέσω ανάπτυξης κατάλληλων γραφημάτων τα οποία εμπεριείχαν τιμές εντάσεως της εδαφικής κίνησης. Σε κάποιες περιπτώσεις (ATC-13, 1985), η εν λόγω μεθοδολογία αναλύθηκε και τεκμηριώθηκε περαιτέρω με απόψεις εμπειρογνομόνων, ενώ παράλληλα επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει κτήρια βιομηχανικών, εμπορικών και λοιπών χρήσεων, καθώς και ποικίλες υποδομές, εκτός από τα συνηθισμένα κτήρια με χρήση κατοικίας. Με αυτό τον τρόπο, αναπτύχθηκε μία βάση δεδομένων αποτελούμενη από Πίνακες Πιθανότητας Βλάβης για 78 τυπολογίες κτηρίων στην περιοχή της Καλιφόρνιας, μέσω της οποίας ήταν δυνατόν να εκτιμηθούν οι αντίστοιχες οικονομικές απώλειες και ο απαιτούμενος χρόνος αποκατάστασης κάθε υποδομής στην προ σεισμού κατάσταση, σε χωρικό επίπεδο.

Επέκταση της ανωτέρω φιλοσοφίας αποτελούν οι προσπάθειες που έγιναν αρχικά με τον Κανονισμό FEMA-177 (1989) και, ακολούθως με τον Κανονισμό FEMA-249 (1994), και οι οποίες αποσκοπούσαν να τυποποιήσουν τη διαδικασία εκτίμησης σεισμικών απωλειών σε χωρικό (και συγκεκριμένα εθνικό) επίπεδο στο μέγιστο βαθμό, βελτιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη συνέπεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της. Νέο στοιχείο των δύο Κανονισμών αποτελεί η συνεκτίμηση των ποικίλων αβεβαιοτήτων που συνδέονται με το σεισμικό κίνδυνο, οι οποίες αγνοούνταν από τις άλλες, μέχρι τότε αναπτυχθείσες μεθοδολογίες.

2.1.3. Μεθοδολογία HAZUS

Τα δύο προαναφερθέντα Κανονιστικά κείμενα FEMA-177 (1989) και FEMA-249 (1994) αποτέλεσαν εφαλτήριο ανάπτυξης (Whitman et al, 1973; Kircher et al, 1997) της πλέον τυποποιημένης, μέχρι τότε, μεθοδολογίας εκτίμησης σεισμικών απωλειών σε χωρικό επίπεδο, η οποία καθιερώθηκε υπό την ονομασία HAZUS®. Καινοτόμα αρχή της εν λόγω μεθοδολογίας αποτελεί η μέτρηση της έντασης της εδαφικής κίνησης όχι πλέον με χρήση ποιοτικών τιμών (όπως η MMI), αλλά με ποσοτικοποιημένες (κυρίως ελαστικές φασματικές) τιμές. Η διαφοροποίηση αυτή πηγάζει από την προσπάθεια μείωσης της επίδρασης που ασκούσε η εμπειρική κρίση στη μεθοδολογία του ATC-13 (1985), η οποία επηρέαζε σε μεγάλο βαθμό τα παραγόμενα αποτελέσματα. Επιπλέον, χαρακτηριστική είναι η προσπάθεια και των δύο Κανονισμών για κατά το δυνατόν ρεαλιστικότερη συνεκτίμηση των ποικίλων αβεβαιοτήτων, ιδίως δε αυτών που συνδέονται με τη σεισμική επικινδυνότητα.

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame (≤ 5,000 sq. ft.)		1 - 2	1	14
2	W2			All	2	24
		Wood, Commercial and Industrial (> 5,000 sq. ft.)				
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1 - 3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1 - 2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

Εικόνα 9: Τυπολογίες κτηρίων σύμφωνα με τη μεθοδολογία HAZUS.
(Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003)

Όσον αφορά στις βασικές αρχές της, η μεθοδολογία επιδιώκει την εκτίμηση βλαβών και το συνακόλουθο υπολογισμό απωλειών χρησιμοποιώντας δεδομένα, αποτελέσματα αναλύσεων και συμπεράσματα σεισμικής συμπεριφοράς συνολικά 36 πρότυπων τυπολογιών κτηρίων και 33 αντίστοιχων κατηγοριών χρήσεως. Οι τυπολογίες που έχουν αναλυθεί στα πλαίσια ανάπτυξης και βελτίωσης της μεθοδολογίας καθορίζονται σύμφωνα με το ύψος του κτηρίου και το είδος δόμησης του φέροντος οργανισμού (μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται φορείς από ξύλο, μέταλλο, σκυρόδεμα ή φέρουσα τοιχοποιία) και είναι αυτές βάσει των οποίων εκτιμώνται οι βλάβες και οι συνεπαγόμενες λειτουργικές απώλειες των κτηρίων.

Label	Occupancy Class	Example Descriptions
	Residential	
RES1	Single Family Dwelling	House
RES2	Mobile Home	Mobile Home
RES3	Multi Family Dwelling RES3A Duplex RES3B 3-4 Units RES3C 5-9 Units RES3D 10-19 Units RES3E 20-49 Units RES3F 50+ Units	Apartment/Condominium
RES4	Temporary Lodging	Hotel/Motel
RES5	Institutional Dormitory	Group Housing (military, college), Jails
RES6	Nursing Home	
	Commercial	
COM1	Retail Trade	Store
COM2	Wholesale Trade	Warehouse
COM3	Personal and Repair Services	Service Station/Shop
COM4	Professional/Technical Services	Offices
COM5	Banks	
COM6	Hospital	
COM7	Medical Office/Clinic	
COM8	Entertainment & Recreation	Restaurants/Bars
COM9	Theaters	Theaters
COM10	Parking	Garages
	Industrial	
IND1	Heavy	Factory
IND2	Light	Factory
IND3	Food/Drugs/Chemicals	Factory
IND4	Metals/Minerals Processing	Factory
IND5	High Technology	Factory
IND6	Construction	Office
	Agriculture	
AGR1	Agriculture	
	Religion/Non/Profit	
REL1	Church/Non-Profit	
	Government	
GOV1	General Services	Office
GOV2	Emergency Response	Police/Fire Station/EOC
	Education	
EDU1	Grade Schools	
EDU2	Colleges/Universities	Does not include group housing

Εικόνα 10: Κατηγορίες χρήσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία HAZUS.
(Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003)

Αντίστοιχα, οι κατηγορίες χρήσεως (μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται χρήσεις κατοικίας, επαγγελματικής στέγης, βιομηχανικής κ.α.) συνδέονται με τον υπολογισμό οικονομικών απωλειών, οι οποίες αυξάνονται ανάλογα με τη σπουδαιότητα του κτηρίου και τις ποιοτικές προδιαγραφές του εξοπλισμού που περιέχεται σε αυτό.

2.1.4. Περιορισμοί στη διαδικασία εκτίμησης απωλειών

Ανεξαρτήτως της γεωγραφικής χωροθέτησης ή του εύρους του αντικειμένου τους, όλες οι προαναφερθείσες ερευνητικές εργασίες και οι αντίστοιχες μεθοδολογικές προσεγγίσεις εκτίμησης απωλειών παρουσιάζουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: την ύπαρξη

ενός σημαντικού αριθμού απλοποιήσεων και παραδοχών, που λειτουργούν τελικά περιοριστικά ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Οι εν λόγω παραδοχές ουσιαστικά επιβάλλονται εκ των πραγμάτων, αφενός λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, τα οποία απαιτείται να συνεκτιμηθούν για τη δημιουργία του μοντέλου και, αφετέρου, λόγω της σχετικά περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος των μηχανημάτων που καλούνται να εκτελέσουν την ανάλυση εκτίμησης απωλειών, μέσω του κατάλληλα επιλεγμένου για κάθε περίπτωση λογισμικού.

Οι βασικότερες παραδοχές και απλοποιήσεις της αναλυτικής διαδικασίας αφορούν:

- Στη σοβαρότητα της βλάβης των δομικών στοιχείων, η οποία είθισται να χαρακτηρίζεται βάσει κατάταξης σε κάποιο επίπεδο βλάβης, επιλεγμένο από ένα αριθμό επιπέδων με συγκεκριμένο εύρος τιμών και διακριτά μεταξύ τους όρια.
- Στην κατάταξη του αναλυόμενου κτηρίου σε τυπολογική κατηγορία, βάσει παραδοχής σύμφωνα με την οποία κτήρια που ανήκουν στην ίδια τυπολογία και αναμένεται να παρουσιάσουν τις ίδιες βλάβες σε ένα σεισμικό γεγονός κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία.
- Στο βαθμό ανάλυσης που διέπει την εκάστοτε βάση δεδομένων, για τα κτήρια μίας αναλυόμενης περιοχής, ο οποίος καθορίζει τη γεωγραφική μονάδα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της ανάλυσης.
- Στην ύπαρξη και διαθεσιμότητα πληροφοριών για την τρωτότητα του αναλυόμενου αντικειμένου, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι, μέχρι σήμερα, για τις περισσότερες τυπολογίες κτηρίων δεν διατίθενται αναλυτικές συναρτήσεις και καμπύλες τρωτότητας.
- Στην ύπαρξη και διαθεσιμότητα μετρήσεων και εκτιμήσεων της σεισμικής εδαφικής κίνησης, καθώς πολλές φορές δεν λαμβάνονται υπόψη ούτε τα χαρακτηριστικά του ρήγματος ούτε η μεταβλητότητα της εδαφικής κίνησης λόγω της απόστασης ή των γεωλογικών συνθηκών του υπεδάφους.

2.2. Λογισμικά εκτίμησης απωλειών

Πέραν της εκάστοτε επιλεγόμενης μεθοδολογίας, ο υπολογισμός των απωλειών οποιουδήποτε είδους και σοβαρότητας, συνεπεία μίας σεισμικής δόνησης, προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα ενός λογισμικού ειδικού τύπου, το οποίο θα έχει σε κάθε περίπτωση τη δυνατότητα να επεξεργασθεί τις υφιστάμενες πληροφορίες που αφορούν τόσο στα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης, όσο και στην τυπολογία και τρωτότητα του

αναλυόμενου κτηρίου ή ομάδας κτηρίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εν λόγω ανάλυση πραγματοποιείται με υποβοηθητική χρήση κάποιου από τα υφιστάμενα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ – GIS), το οποίο μπορεί είτε να είναι ενσωματωμένο στο ανωτέρω λογισμικό εκτίμησης απωλειών, είτε να χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από αυτό.

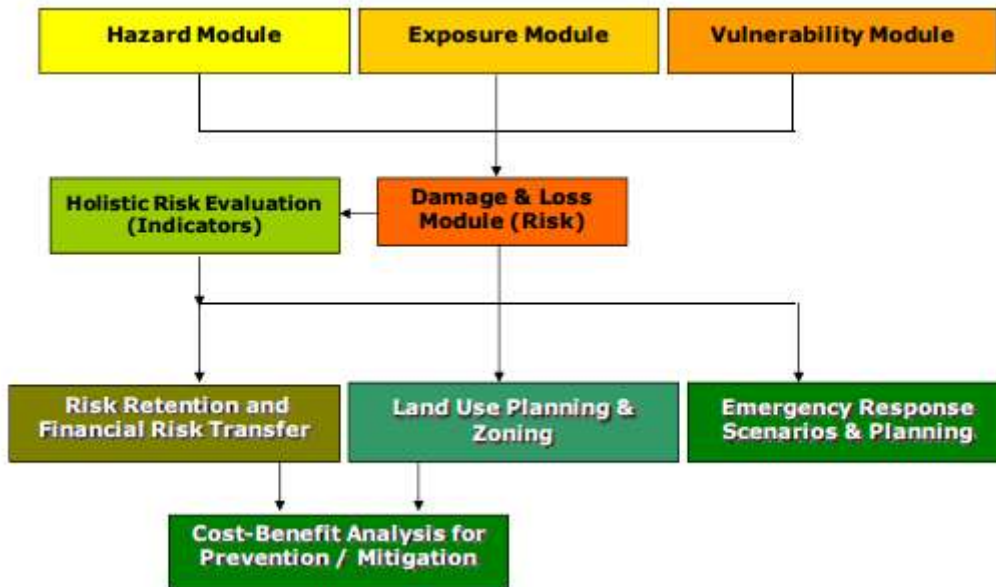
Αρκετά από τα λογισμικά εκτίμησης απωλειών που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι «ανοικτού κώδικα» (Open Source Software – OSS), η χρήση των οποίων δεν δεσμεύεται από κάποιο είδος άδειας ή περιορισμού. Η ελεύθερη πρόσβαση του κώδικα και η μελέτη του χρησιμοποιούμενου αλγορίθμου στοχεύει να κάνει δυνατή την πραγματοποίηση αλλαγών σε αυτόν από τους χρήστες, όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο, με σκοπό τη διαρκή βελτίωση της αξιοπιστίας του λογισμικού και τη διευκόλυνση της διάδοσής του μεταξύ άλλων ενδιαφερόμενων χρηστών. Ωστόσο, αξίζει να επισημανθεί ότι η ύπαρξη ανοικτού κώδικα δεν συνεπάγεται και δωρεάν χρήση του λογισμικού, σε αντίθεση με τα λογισμικά «κλειστού κώδικα» τα οποία, στην πλειοψηφία τους, διατίθενται μεν δωρεάν, συνήθως όμως άνευ δυνατότητας πραγματοποίησης αλλαγών στους αλγορίθμους τους. Συνεπώς, αναλόγως προς τη δέσμευση που διέπει τη διάθεση και χρήση τους, τα λογισμικά που διατίθενται για την εκτίμηση σεισμικών απωλειών μπορούν να ταξινομηθούν σε εμπορικά (δηλαδή με χρήση επί πληρωμή), ελεύθερης χρήσης κατόπιν αποστολής σχετικού αιτήματος, ελεύθερης διανομής αλλά κλειστού κώδικα και, τέλος, ανοικτού κώδικα.

Μεταξύ των ανωτέρω κατηγοριών, τα λογισμικά ελεύθερης διανομής και χρήσης θεωρούνται σήμερα τα πλέον διαδεδομένα. Η εξήγηση βρίσκεται στο πανεπιστημιακό περιβάλλον, εντός του οποίου διαμορφώνονται και εξελίσσονται τα περισσότερα εξ αυτών, και το οποίο συνήθως επιβάλλει νομικές απαγορεύσεις στην ανάπτυξη λογισμικού εμπορικής χρήσης. Επιπλέον, θα πρέπει να συνεκτιμηθεί και ο μικρός αριθμός χρηστών οι οποίοι χειρίζονται λογισμικά αυτού του είδους, γεγονός που σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θα καθιστούσε απαγορευτικά δαπανηρή την απόκτηση και χρήση τους. Τέλος, ανεξαρτήτως της τιμής, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ευρύτητα της διάδοσης και χρήσης ενός λογισμικού εκτίμησης απωλειών αφορούν στο βαθμό ευκολίας της διαθεσιμότητάς του (ιδίως εάν μπορεί να ληφθεί μέσω διαδικτύου), στη συνέργεια με άλλα λογισμικά, καθώς και στο εύρος των διαθέσιμων εγγράφων τεκμηρίωσης.

2.2.1. CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment)

Πρόκειται για λογισμικό το οποίο γεννήθηκε για τις ανάγκες ανάλυσης κινδύνου και εκτίμησης απωλειών λόγω εκδήλωσης φυσικών φαινομένων στην ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Αμερικής. Η ανάπτυξή του αποτελεί το επιτυχές επιστέγασμα μίας κοινής

προσπάθειας μεταξύ των CEPREDENAC, UNISDR και Παγκόσμιας Τράπεζας, σε συνεργασία με κυβερνητικές αρχές και τοπικούς φορείς. Η αποτελεσματικότητα της εν λόγω προσπάθειας ήταν τέτοια ώστε, αν και αρχικά το λογισμικό διαμορφώθηκε ώστε να ανταποκρίνεται στις ιδιαίτερες συνθήκες των χωρών της ανωτέρω περιοχής, στη συνέχεια έγινε ευρύτερα γνωστό με συνέπεια να επεκταθεί η χρήση του και σε άλλες χώρες, εκτός Αμερικής.



Εικόνα 11: Μοντέλο πιθανοτικής ανάλυσης και εφαρμογές διαχείρισης κινδύνου.
(Πηγή: Cardona et al, 2012)

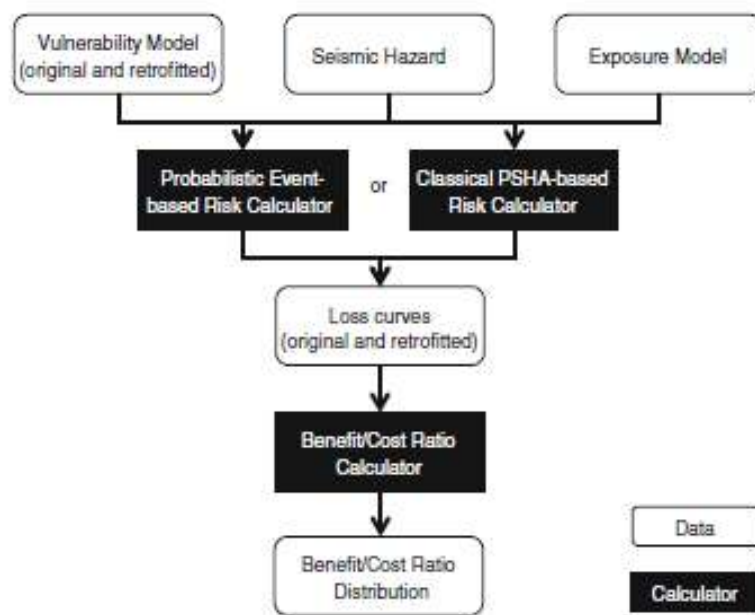
Το CAPRA ανήκει στην κατηγορία των λογισμικών «ανοικτού κώδικα» και δομείται σε πλατφόρμα ΓΣΠ, μέσω της οποίας μπορούν να χαρτογραφηθούν η έκθεση, η επικινδυνότητα και ο κίνδυνος που ενδέχεται να αντιμετωπίσει η αναλυόμενη υποδομή. Χαρακτηρίζεται από ευρύτητα δυνατοτήτων, όσον αφορά στην ποικιλία των φυσικών κινδύνων που αναλύει, παρέχοντας τη δυνατότητα διεξαγωγής πιθανοτικής ανάλυσης κινδύνου. Κατά τη διαδικασία εκτίμησης απωλειών, παράλληλα με το προαναφερθέν βασικό λογισμικό, που δίνεται ως τυποποιημένο μορφότυπο έκθεσης διαφορετικών στοιχείων της αναλυόμενης υποδομής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα πρόσθετα εργαλεία υπό μορφή διαφορετικών ενοτήτων λογισμικού, κάθε μία εκ των οποίων προσφέρει τη δυνατότητα ανάλυσης διαφορετικού είδους κινδύνου και εκτίμησης απωλειών που είναι πιθανόν να προκληθούν εξαιτίας αυτού (Marulanda et al, 2013).

Η πιθανοτική μεθοδολογία του CAPRA χρησιμοποιεί ιστορικές και στοχαστικές προσεγγίσεις για να προσομοιώσει την ένταση και τη συχνότητα της επικινδυνότητας που χαρακτηρίζει την αναλυόμενη υποδομή. Στη συνέχεια, η πληροφορία που προκύπτει μπορεί να συνδυαστεί με τα δεδομένα που αφορούν στην έκθεση και στην τρωτότητα της

υποδομής και να αναλυθεί σε χωρικό επίπεδο, προκειμένου να εκτιμηθούν οι πιθανές απώλειες. Τα αποτελέσματα δίνονται σε όρους κινδύνου, όπως η καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης, οι αναμενόμενες ετήσιες απώλειες και οι πιθανές μέγιστες απώλειες για οποιαδήποτε περίοδο επαναφοράς. Η εν λόγω προσέγγιση καθιστά το CAPRA ιδιαίτερος χρήσιμο για τη διεξαγωγή ανάλυσης κινδύνου λόγω πολλαπλής επικινδυνότητας.

2.2.2. OpenQuake

Αναπτύχθηκε από την GEM (Global Earthquake Model), ένα μη κερδοσκοπικό οργανισμό που συστάθηκε το 2009 στην Ιταλία με μορφή σύμπραξης Δημοσίου – Ιδιωτικού τομέα. Πρόκειται για το υπό διαρκή εξέλιξη αποτέλεσμα μίας παγκόσμιας συλλογικής προσπάθειας άνω των 300 επιστημόνων και ερευνητών, που αποσκοπεί στη διαμόρφωση ενός εύχρηστου και υψηλού επιπέδου εργαλείου ανάλυσης επικινδυνότητας και εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, τέτοιο ώστε να παρέχει ενιαίους υπολογισμούς με αξιόπιστα αποτελέσματα για κάθε χώρα της υφηλίου.



Εικόνα 12: Διάγραμμα ροής ανασχεδιασμού υφιστάμενων υποδομών (ανάλυση Κόστους-Οφέλους).
(Πηγή: Silva et al, 2014)

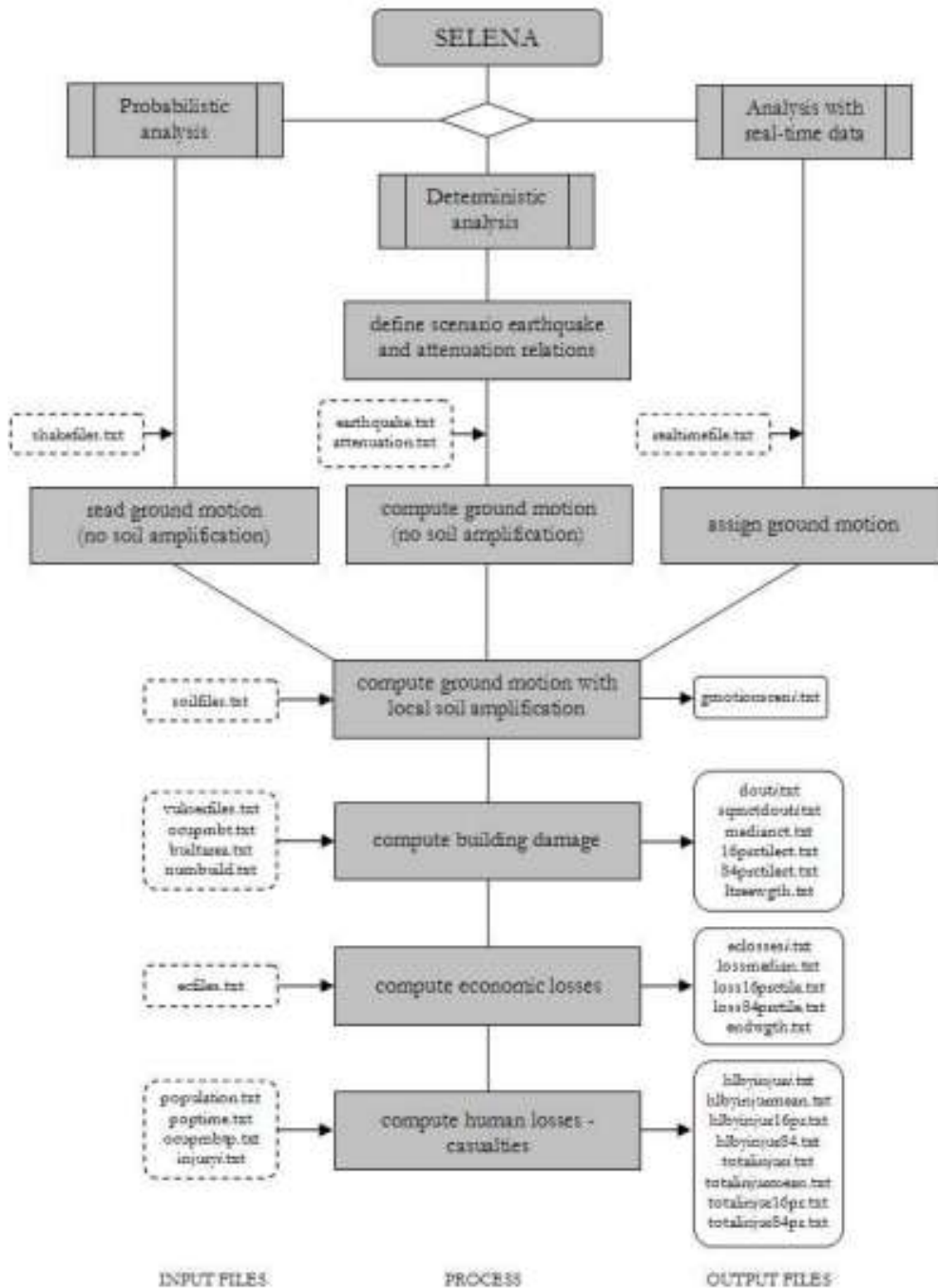
Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξή του έγινε το 2009, ως επακόλουθο μίας αρχικής επισκόπησης ενός σημαντικού αριθμού εκ των μέχρι τότε υφιστάμενων μη εμπορικών λογισμικών ανάλυσης σεισμικού κινδύνου, προκειμένου να εντοπισθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί τους (Silva et al, 2014), ώστε να τεθούν στη συνέχεια οι αντίστοιχες προδιαγραφές για το OpenQuake.

Όσον αφορά στα βασικά χαρακτηριστικά του, το OpenQuake ανήκει στα λογισμικά με κώδικα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Python, ανοικτό και προσβάσιμο μέσω διαδικτύου σε δημόσιο αποθετήριο (<http://github.com/gem/oq-engine>). Αποτελείται από πέντε (5) συνολικά κύρια υπολογιστικά τμήματα, καθένα εκ των οποίων συμβάλλει κατά μοναδικό τρόπο στην αναλυτική διαδικασία εκτίμησης έμφυχων και οικονομικών απωλειών που αναμένεται να προκληθούν είτε από ένα δεδομένο σεισμικό γεγονός, είτε από την πιθανότητα εκδήλωσης όλων των πιθανών σεισμικών γεγονότων σε μία περιοχή, εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Σε αντίθεση με άλλα, παρόμοιου σκοπού λογισμικά, η ανάλυση επικινδυνότητας και η εκτίμηση σεισμικού κινδύνου γίνονται με το ίδιο λογισμικό, ενώ παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να πραγματοποιήσει μεμονωμένους υπολογισμούς για κάθε μία εκ των ανωτέρω, καθώς και να χρησιμοποιήσει δικά του ήδη διαμορφωμένα μοντέλα κινδύνου, τρωτότητας και έκθεσης, ανεξαρτήτως γεωγραφικών συντεταγμένων. Συγκριτικό πλεονέκτημα αποτελεί, επίσης, η ευελιξία του λογισμικού, καθώς αυτό μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε φορητό υπολογιστή όσο και σε μεγαλύτερα ομαδοποιημένα υπολογιστικά συστήματα, ενώ προσφέρει επιλογές μοντελοποίησης υποδομών, πληθυσμού και διαφόρων άλλων πόρων. Τέλος, βασικό προτέρημα του λογισμικού αποτελεί η δυνατότητα αξιοποίησης των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής διαδικασίας (Ανάλυση Κόστους – Οφέλους) ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, όσον αφορά στο εάν είναι οικονομικά συμφέρουσα η λήψη μέτρων ανασχεδιασμού/ενίσχυσης σε ένα σύνολο υφιστάμενων υποδομών.

2.2.3. SELENA (*Seismic Loss Estimation using a Logic Tree Approach*)

Η εμφάνισή του τοποθετείται χρονολογικά το 2004, ως αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ του Διεθνούς Κέντρου Γεωλογικών Κινδύνων (International Centre for Geohazards – ICG), του Πανεπιστημίου του Αλικάντε (Ισπανία) και του μη κερδοσκοπικού σεισμολογικού – γεωεπιστημονικού ερευνητικού οργανισμού NORSAR (Νορβηγία). Και σε αυτή την περίπτωση, βασική επιδίωξη της συνεργασίας αποτέλεσε η προσπάθεια ανάπτυξης ενός χρηστικού εργαλείου υπολογισμού απωλειών, με δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων οποιασδήποτε μορφής επιθυμεί ο χρήστης. Για το σκοπό αυτό, αν και αρχικά ο κώδικας είχε δομηθεί σε MATLAB, από το 2009 μέχρι σήμερα είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C, ούτως ώστε να είναι πλήρως ανοικτός και η λειτουργία του λογισμικού ανεξάρτητη οποιασδήποτε εμπορικής άδειας χρήσης. Παράλληλα, σε αντίθεση με άλλα σχετικά λογισμικά, το SELENA δεν ενσωματώνει συγκεκριμένη πλατφόρμα ΓΣΠ, προκειμένου να προσαρμόζεται εύκολα σε κάθε λειτουργικό σύστημα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι τόσο τα δεδομένα εισαγωγής, όσο και τα αντίστοιχα αποτελέσματα

της ανάλυσης, αρκεί να είναι σε μορφή ASCII (.txt), ενώ μπορούν να απεικονιστούν σε οποιοδήποτε ΓΣΠ επιλογής του χρήστη, καθιστά τη χρήση του SELENA ευέλικτη και απλή.



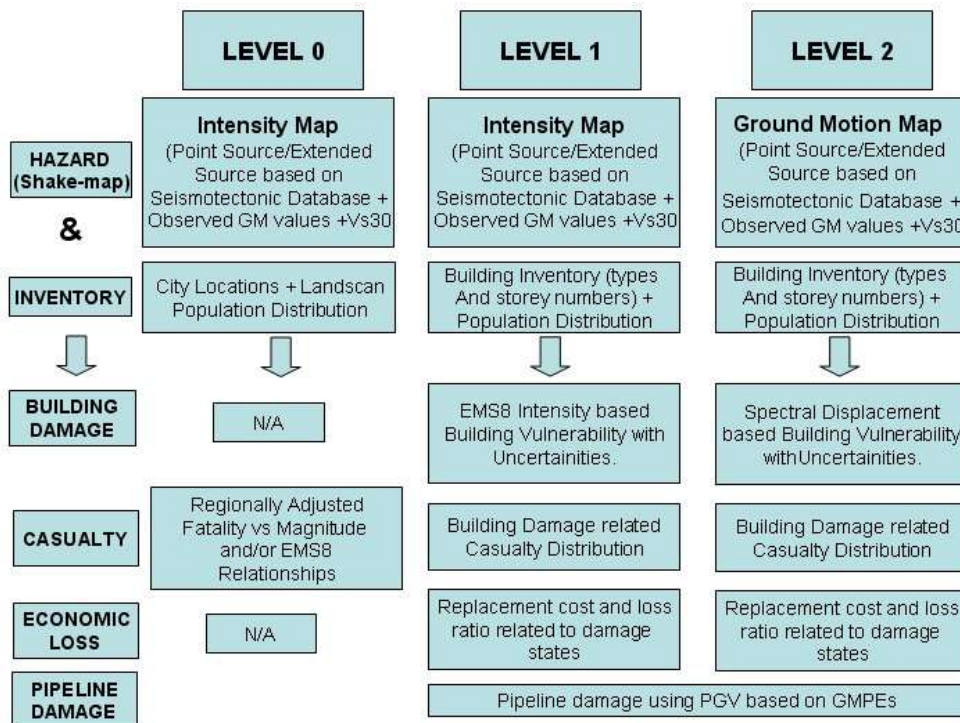
Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής του SELENA.
(Πηγή: SELENA User manual, 2010)

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του SELENA υπό μορφή χαρτών, παράλληλα με το κυρίως λογισμικό εκτίμησης απωλειών, έχει αναπτυχθεί και το σχετικό βοηθητικό λογισμικό ΓΣΠ με την ονομασία RISE (*Risk Illustrator for SELENA*). Όπως και το SELENA, έτσι και το RISE διαθέτει ανοικτό κώδικα και λειτουργεί ως ενδιάμεσο στάδιο της διαδικασίας ανάλυσης, μετατρέποντας τα αρχεία εισόδου και εξόδου που

παράγονται σε πρώτο στάδιο από το SELENA σε αρχεία μορφής KML, τα οποία μπορούν τελικά να απεικονισθούν στην εφαρμογή Google Earth υπό μορφή δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης.

2.2.4. ELER (Earthquake Loss Estimation Routine)

Βασισμένο και αυτό σε πλατφόρμα ΓΣΠ, και δομημένο σε κώδικα MATLAB, το ELER αναπτύχθηκε αρχικά βάσει σχετικής μεθοδολογίας η οποία επικεντρώνεται στα συγκεκριμένα σεισμολογικά χαρακτηριστικά και δεδομένα της Ευρω – Μεσογειακής περιοχής. Στη συνέχεια, το λογισμικό διαμορφώθηκε έτσι ώστε οι παράμετροί του να μπορούν να προσαρμόζονται σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος, αναλύοντας όμως αποκλειστικά και μόνο σεισμικά φαινόμενα. Αποτελεί το επιστέγασμα της κοινής προσπάθειας ερευνητών από το Imperial College, του NORSAR και του Ευρωπαϊκού Μεσογειακού Σεισμολογικού Κέντρου EMSC, επιδίωξη των οποίων ήταν η δημιουργία ενός λογισμικού γρήγορης μετασεισμικής εκτίμησης απωλειών. Σήμερα, ωστόσο, οι δυνατότητες του ELER έχουν επεκταθεί τόσο ώστε να περιλαμβάνουν, πέραν της εκτίμησης κατόπιν πραγματικών περιστατικών, και την πρόβλεψη αναμενόμενων απωλειών σε περίπτωση μελλοντικού σεισμικού συμβάντος.



Εικόνα 14: Τα 3 επίπεδα ανάλυσης του ELER.
(Πηγή: ELER v3.0 manual, 2010)

Τα κύρια βήματα της μεθοδολογίας, πάνω στην οποία βασίζεται το ELER, παρουσιάζονται στο ανωτέρω σχήμα και είναι συνοπτικά τα ακόλουθα (ELER v3.0 manual, 2010):

- Με γνωστές τις πληροφορίες που αφορούν στο μέγεθος και το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης γίνεται εκτίμηση της χωρικής κατανομής επιλεγμένων παραμέτρων της εδαφικής κίνησης.
- Ενσωματώνονται δεδομένα της ισχυρής εδαφικής κίνησης (εάν υπάρχουν διαθέσιμα), προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία των θεωρητικών εκτιμήσεων.
- Εκτιμώνται οι βλάβες των δομικών στοιχείων και υπολογίζονται οι απώλειες ανθρώπινων ζωών για ένα ή περισσότερα εκ των τριών (3) καθορισμένων επιπέδων τρωτότητας του λογισμικού, βάσει των πληροφοριών που διατίθενται για το κτηριακό απόθεμα της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Με γνωστές τις βλάβες, υπολογίζονται οι αντίστοιχες οικονομικές απώλειες.
- Τέλος, εκτιμώνται οι βλάβες των δικτύων αγωγών διανομής.

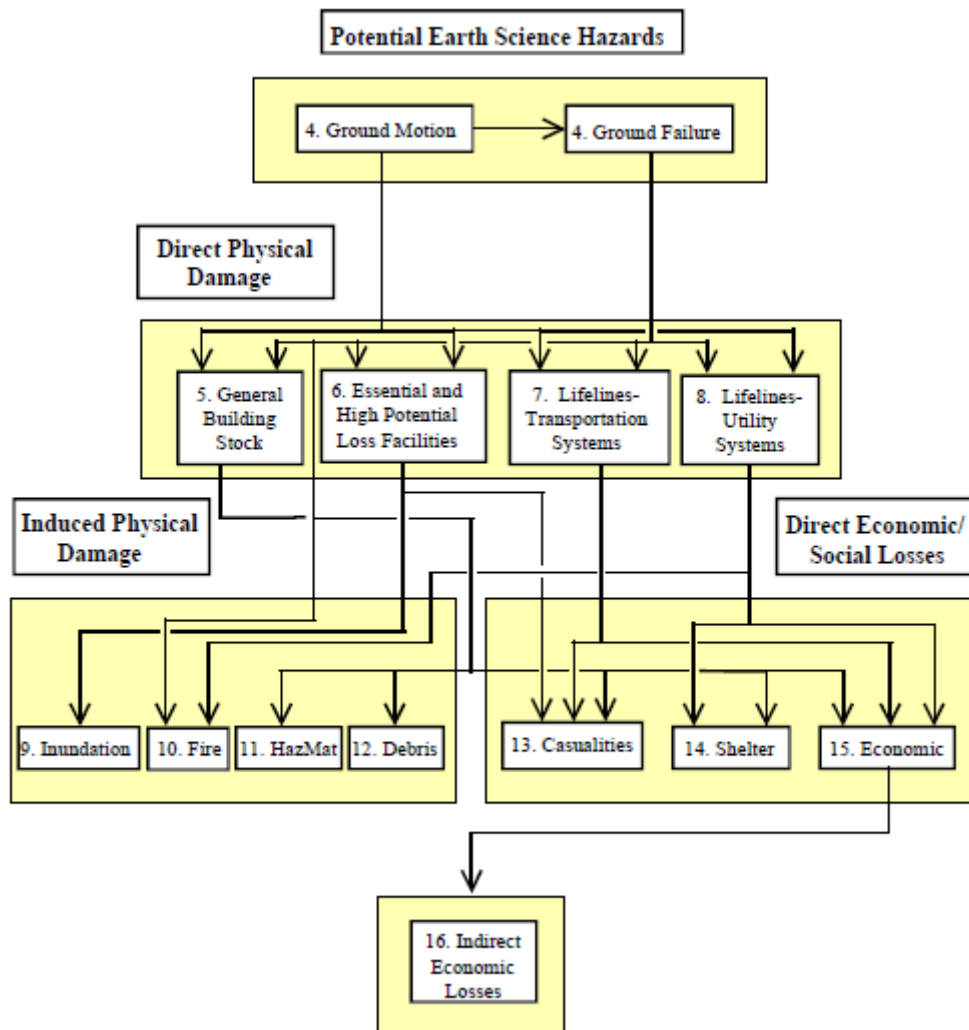
Επισημαίνεται ότι τα Επίπεδα 0 και 1 του λογισμικού αποδίδουν αναλυτικές κατανομές της έντασης και εκτιμήσεις απωλειών βάσει χωρικών πληροφοριών για μη αστικές περιοχές. Αντίστοιχα, το Επίπεδο 2 αποσκοπεί στην εκτίμηση υλικών και έμφυχων απωλειών σε αστικές περιοχές, κάνοντας χρήση μεθοδολογίας παρόμοιας με αυτή του HAZUS, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

2.2.5. HAZUS-MH

Βασισμένο στην αντίστοιχη ομώνυμη μεθοδολογία, αποτελεί ένα σύγχρονο λογισμικό εκτίμησης απωλειών λόγω φυσικών καταστροφών (σεισμοί, πλημμύρες και κυκλώνες), το οποίο αναπτύχθηκε με τη συνεργασία της FEMA και του Εθνικού Ινστιτούτου Οικοδομικών Επιστημών (National Institute of Building Sciences – NIBS), έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί με τις ίδιες τυποποιημένες παραμέτρους στο σύνολο των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Ανήκει στην κατηγορία των λογισμικών κλειστού κώδικα και απευθύνεται κυρίως σε Πολιτειακούς ή τοπικούς θεσμικούς φορείς, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η πρόσβασή του και στους ιδιώτες χρήστες.

Το HAZUS χρησιμοποιεί πλατφόρμα ΓΣΠ μέσω της οποίας παράγει χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας και βλαβών, με δυνατότητα ανάλυσης τριών επιπέδων πολυπλοκότητας (HAZUS MR4 Technical manual, 2003). Εξ αυτών, το 1^ο επίπεδο χρησιμοποιεί υφιστάμενα

δεδομένα εθνικών βάσεων που διατίθενται με το λογισμικό. Το 2^ο επίπεδο επιτρέπει την τροποποίηση των εν λόγω δεδομένων ή την εισαγωγή νέων, ιδιαίτερων τοπικών δεδομένων, προκειμένου ο εκάστοτε χρήστης να μπορεί να λαμβάνει περισσότερο εξειδικευμένα και γεωγραφικώς προσδιορισμένα αποτελέσματα. Τέλος, το 3^ο επίπεδο ανάλυσης παρέχει στο χρήστη σημαντικό βαθμό ανεξαρτησίας, ώστε αυτός να αξιοποιήσει ιδιαίτερες τεχνικές και γνώσεις για τη μελέτη και ανάλυση ειδικών φαινομένων, όπως λ.χ. τη θραύση ενός αναχώματος.



Εικόνα 15: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης σεισμικών απωλειών.
(Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003)

Όλα τα ανωτέρω συνοδεύονται από ένα σύστημα κατηγοριοποίησης κτηρίων, το οποίο περιλαμβάνει 36 πρότυπες τυπολογίες, διαμορφωμένες βάσει των κατά περίπτωση δομικών και πλαίσιακών κτηριακών χαρακτηριστικών, σε συνδυασμό με 33 είδη χρήσεων. Εξοπλισμένο με αυτές τις δυνατότητες και τα εργαλεία, το HAZUS προχωρά στη ζητούμενη ανάλυση, υπολογίζοντας τελικά βλάβες σε κτήρια με χρήση κατοικίας, καθώς και σε εμπορικές ή βιομηχανικές υποδομές, δίκτυα μεταφορών ή κοινής ωφελείας, συναρτήσει

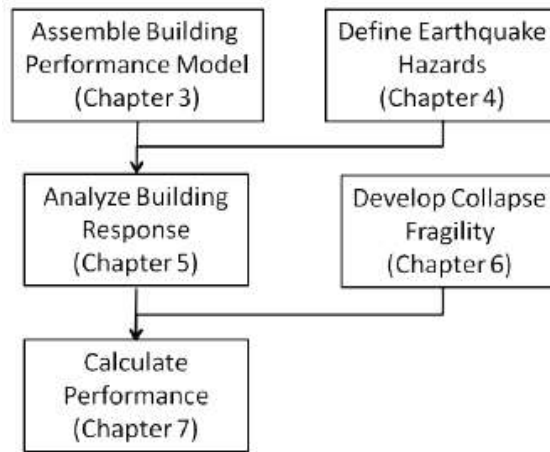
της έντασης της εδαφικής κίνησης, η οποία προσδιορίζεται βάσει μεγεθών του ελαστικού φάσματος.

Βασικά μειονεκτήματα στην εφαρμογή του λογισμικού παρουσιάζονται όσον αφορά στον υπολογισμό χωρικών απωλειών για ομάδα κτηρίων, με τα αποτελέσματα να κρίνονται ως μέτρια από τους ερευνητές, σε σύγκριση με τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα που θεωρείται ότι δίνει η ανάλυση για μεμονωμένα κτήρια. Επιπλέον, η ανάλυση με χρήση των ενσωματωμένων δεδομένων φαίνεται να αποδίδει αποτελέσματα μικρότερης ακρίβειας για τα δίκτυα κοινής ωφελείας, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης για κτήρια. Υπερεκτιμημένος κρίνεται και ο υπολογισμός χωρικών απωλειών σε εκτεταμένο αστικό πεδίο, για σεισμικές δονήσεις εντάσεως μικρότερης των M6.0. Τέλος, πέραν των ανωτέρω, επισημαίνεται και η μεγάλη διάρκεια (1 έως 2 ώρες) που μπορεί να απαιτήσει η διαδικασία της ταχείας χωρικής ανάλυσης για μεγάλες περιοχές (HAZUS MR4 Technical manual, 2003).

2.3. Μεθοδολογία αποτίμησης συμπεριφοράς και εκτίμησης απωλειών FEMA

Η πάγια και διαρκής ανάγκη βελτίωσης τόσο του αντισεισμικού σχεδιασμού νέων κτηρίων όσο και της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων κτηρίων οδήγησε τη FEMA προς την κατεύθυνση της έρευνας του Αντισεισμικού Σχεδιασμού με Στάθμες Επιτελεστικότητας. Πρωταρχικό αντικείμενο αποτέλεσε η ανάπτυξη μίας πρακτικά εύχρηστης μεθοδολογίας, βάσει της οποίας να μπορεί να εκτιμηθεί η σεισμική συμπεριφορά ενός κτηρίου υπό την επίδραση ενός δεδομένου σεισμού, λαμβάνοντας υπόψη τις πάσης φύσεως αβεβαιότητες. Ζητούμενο ήταν, επίσης, ο κατά το δυνατόν γενικός χαρακτήρας της υπόψη μεθοδολογίας, ώστε αυτή να μπορεί να εφαρμοσθεί σε κτήρια κάθε ηλικίας, είδους κατασκευής ή χρήσεως.

Η έρευνα ξεκίνησε το 2001, ως συνεργασία μίας πολυμελούς ομάδας άνω των 200 επιστημόνων μεταξύ της FEMA και του Συμβουλίου Εφαρμοσμένης Τεχνολογίας (Applied Technology Council – ATC), βασίστηκε σε περαιτέρω επεξεργασία παλαιότερων Κανονιστικών κειμένων (όπως οι FEMA 273, FEMA 349, FEMA 356 κ.α.) και απέδωσε μία νέα σειρά κατευθυντήριων οδηγιών, υπό την ονομασία ATC-58 (FEMA, 2018).



Εικόνα 16: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας FEMA P-58.
(Πηγή: FEMA, 2018)

Βασικός άξονας αυτών αποτελεί ο αντισεισμικός σχεδιασμός ενός κτηρίου βάσει απόδοσης (Performance-Based Seismic Design - PBSB), μέσω του οποίου αποτιμάται η πιθανότητα να καταγραφούν ποικίλες απώλειες για διάφορα σεισμικά γεγονότα που ενδέχεται να πλήξουν το υπόψη κτήριο. Οι διαδικασίες που προδιαγράφονται έχουν πιθανοτικό χαρακτήρα, καθώς προσδιορίζουν τη σεισμική συμπεριφορά των αναλυόμενων κτηρίων σε όρους πιθανών ανθρώπινων απωλειών (σοβαροί έως θανάσιμοι τραυματισμοί), άμεσων οικονομικών απωλειών (ως δαπάνες επισκευής ή ανακατασκευής) καθώς και έμμεσων οικονομικών απωλειών (αφορούν στον απαιτούμενο χρόνο επισκευής και στις γενικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις).

2.3.1. Seismic Performance Assessment of Buildings (FEMA P-58)

Οι πληροφορίες που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αφορούν σε βασικά στοιχεία σχεδιασμού του κτηρίου, τα οποία προσδιορίζουν την τρωτότητα των δομικών και μη δομικών στοιχείων του. Τα στοιχεία αυτά θα πρέπει αρχικά να εντάσσονται σε κάποια από τις κατηγορίες που αποτυπώνονται στους ακόλουθους πίνακες (χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η ανάλυση με χρήση στοιχείων εκτός πινάκων, κατόπιν κατάλληλης προσαρμογής τους) και σχετίζονται:

- με το δομικό σύστημα, τα επιμέρους στοιχεία που το συνθέτουν και τα υλικά κατασκευής τους.

Table 1-1 Structural Systems and Components for which Fragility and Consequence Data have been Provided

Material	System	Comments
Concrete	Beam-column frames	Conventionally reinforced, with or without modern seismic-resistant detailing
	Shear walls	Shear- or flexurally-controlled, with or without seismic-resistant detailing
	Concrete link beams	Conventionally or diagonal reinforced with modern seismic-resistant detailing
	Slab-column systems	Post-tensioned or conventionally reinforced, with or without slab shear reinforcement
Masonry	Walls	Special or ordinary reinforced masonry walls, controlled by shear or flexure
Steel	Moment frames	Fully restrained, pre- or post-Northridge, Special, Intermediate, and Ordinary detailing
	Centrally braced frames	"X"-braced, chevron-braced, single diagonals, special, ordinary, or nonconforming detailing
Steel (cont'd)	Buckling-restrained braced frames	"X"-braced, chevron-braced and single diagonals
	Eccentrically braced frames	Flexure or shear links at mid-span of link beam
	Light-framed walls	Structural panel sheathing, steel panel sheathing or diagonal strap bracing
	Conventional floor framing	Concrete-filled metal deck, untopped steel deck, or wood sheathing
Timber	Light-framed walls	Structural panel sheathing, gypsum board sheathing, cement plaster sheathing, let-in bracing, and with or without hold downs

Εικόνα 17: Δομικά στοιχεία κατά μεθοδολογία FEMA P-58.
(Πηγή: FEMA, 2018)

- με τη χρήση του κτηρίου και το αντίστοιχο πληθυσμιακό μοντέλο, όπου εμπεριέχονται ενσωματωμένες πληροφορίες για τις περιεχόμενες ποσότητες και τα συνήθη μη δομικά στοιχεία.

Table 1-2 Building Occupancies for which Nonstructural Component Data and Population Models have been Provided

Occupancy	Comment
Commercial Office	None
Education (K-12)	Typical elementary, middle school, high school classrooms
Healthcare	General in-patient hospitals, medical equipment excluded
Hospitality	Hotels and motels
Multi-Unit Residential	Apartments; also applicable to single-family detached housing
Research Laboratories	Special purpose laboratory equipment excluded
Retail	Shopping malls and department stores
Warehouse	Inventory excluded

Εικόνα 18: Κτηριακές χρήσεις κατά μεθοδολογία FEMA P-58.
(Πηγή: FEMA, 2018)

Αφού συγκεντρωθούν όσες από τις ανωτέρω πληροφορίες διατίθενται (για τις υπόλοιπες γίνονται σχετικές προσαρμογές ή παραδοχές), χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του μοντέλου του κτηρίου, το οποίο ακολούθως αναλύεται προκειμένου να αποτιμηθεί η πιθανότητα εμφάνισης βλαβών συνεπεία σεισμού στα δομικά και μη δομικά στοιχεία του. Βάσει αυτών, υπολογίζονται οι αναμενόμενες απώλειες σε όρους ανθρώπινων θυμάτων, κόστους και χρόνου αποκατάστασης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Για το στάδιο της ανάλυσης και αποτίμησης του κτηρίου, η μεθοδολογία υιοθετεί τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες βασίζονται στην ένταση, στην περίπτωση (σενάριο) και στο χρόνο, αντίστοιχα. Η πρώτη εξ αυτών θεωρεί ότι το κτήριο πλήττεται από σεισμική δόνηση συγκεκριμένης έντασης, η οποία προσδιορίζεται από το ελαστικό φάσμα απόκρισης (με συντελεστή απόσβεσης 5%), και χρησιμοποιείται για κτήρια που έχουν σχεδιαστεί με ανάλογες κανονιστικές προδιαγραφές. Στη δεύτερη προσέγγιση (η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις πιθανής επανάληψης ιστορικών σεισμών), η ανάλυση γίνεται για σεισμική διέγερση συγκεκριμένης έντασης που εκδηλώνεται σε συγκεκριμένη τοποθεσία και οφείλεται σε ένα ή περισσότερα γνωστά ρήγματα, κοντά στην τοποθεσία του κτηρίου. Η εν λόγω προσέγγιση είναι παρόμοια με την πρώτη, από την οποία διαφέρει ως προς το ότι λαμβάνει υπόψη την εκδήλωση συγκεκριμένου σεισμού αντί συγκεκριμένης έντασης, ενσωματώνοντας παράλληλα την αβεβαιότητα που οφείλεται σε αυτή. Τέλος, στην τρίτη προσέγγιση, η σεισμική συμπεριφορά του κτηρίου αποτιμάται για ένα χρονικό διάστημα που επιλέγεται βάσει των ιδιαίτερων αναγκών του ενδιαφερόμενου ιδιοκτήτη, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα εκδήλωσης κάθε σεισμού που είναι πιθανό να συμβεί εντός του χρονικού αυτού διαστήματος. Σε αυτή την περίπτωση, συνεκτιμάται η αβεβαιότητα που οφείλεται στο μέγεθος και την εστία της σεισμικής δόνησης, καθώς και αυτή που συνδέεται με την ένταση της εδαφικής κίνησης.

Ωστόσο, ανεξαρτήτως της εκάστοτε επιλεγόμενης προσέγγισης, θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι υπολογιζόμενες απώλειες αναφέρονται αποκλειστικά στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου, καθώς η εκτίμηση ενδεχόμενων απωλειών στους εξωτερικούς χώρους του (λ.χ. δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης, ηλεκτρισμού κ.λπ.) ή στον ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο (λόγω εμφάνισης εδαφικών ρωγμών ή εκδήλωσης τσουνάμι) δεν αποτελεί αντικείμενο της μεθοδολογίας.

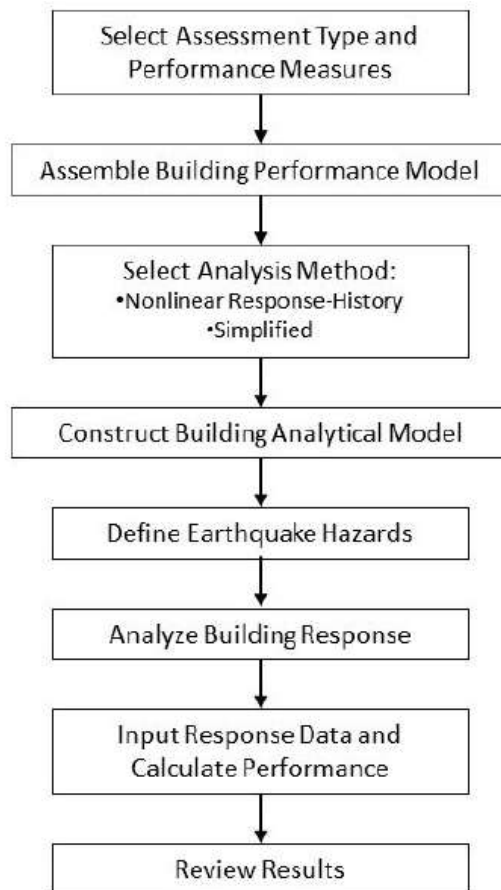
2.3.2. PACT (Performance Assessment Calculation Tool)

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένα στους ανωτέρω πίνακες (Table 1-1 και Table 1-2) συλλέχθηκαν, μαζί με άλλα ανάλογα στοιχεία, κατά τη διάρκεια της

έρευνας με σκοπό την εύρεση συσχέτισης μεταξύ τρωτότητας και συνεπειών για ένα μεγάλο αριθμό συνήθων δομικών συστημάτων, αναλύθηκαν και αξιοποιήθηκαν σε πρακτικό επίπεδο με την ανάπτυξη του ηλεκτρονικού εργαλείου PACT (*Performance Assessment Calculation Tool*), μέσω του οποίου εκτελούνται οι πιθανοτικοί υπολογισμοί που απαιτούνται για την εκτίμηση των απωλειών.

Στο εν λόγω ηλεκτρονικό εργαλείο, εκτός του λογισμικού, περιέχονται εφαρμογές με τις οποίες αφενός προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του αναλυόμενου κτηρίου και, αφετέρου, τροποποιούνται αναλόγως οι σχετικές πληροφορίες που περιλαμβάνονται στις ενσωματωμένες βάσεις δεδομένων και αποδίδουν την τελική εκτίμηση για την τρωτότητα και τις συνεπαγόμενες απώλειες.

Η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων στο λογισμικό διακρίνεται από διαδοχικά βήματα επιλογής παραμέτρων και ανάλυσης του δημιουργούμενου προσωμοιώματος, τα οποία αποτυπώνονται εποπτικά στο ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 19: Διαδικασία αποτίμησης κτηρίου κατά PACT.
(Πηγή: FEMA, 2018)

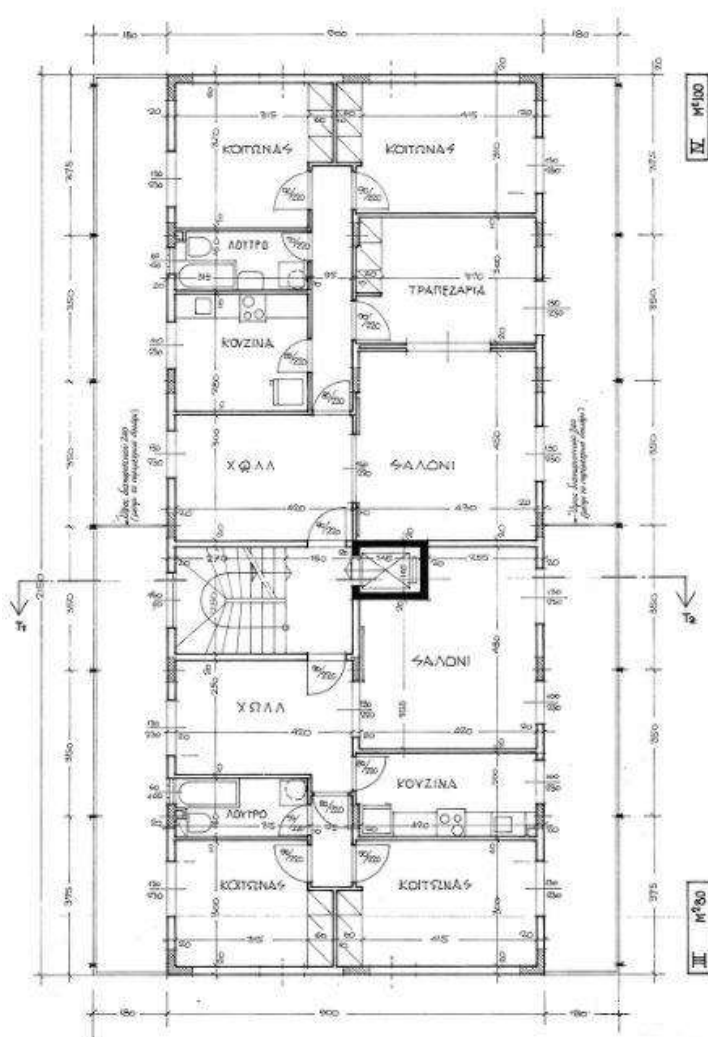
Αφού, λοιπόν, επιλεγεί το προς ανάλυση κτήριο, βάσει του ανωτέρω διαγράμματος και σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσεως του λογισμικού, δημιουργείται το απαιτούμενο

προσωμοίωμα. Σε αυτό εμπεριέχονται λεπτομερείς πληροφορίες που αφορούν σε βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, στον καθορισμό της ποσότητας, θέσης και τρωτότητας των δομικών και μη δομικών στοιχείων του, καθώς και στον αρχικό προσδιορισμό της αναμενόμενης βλάβης αυτών. Οι συνέπειες της βλάβης, σε συσχέτιση με τη σχετική συνάρτηση τρωτότητας που περιέχεται ενσωματωμένη στη βιβλιοθήκη του λογισμικού και εκφράζει την πιθανότητα κατάρρευσης του κτηρίου, αποτελούν και το τελικό κριτήριο λήψης απόφασης για την επιδιόρθωσή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

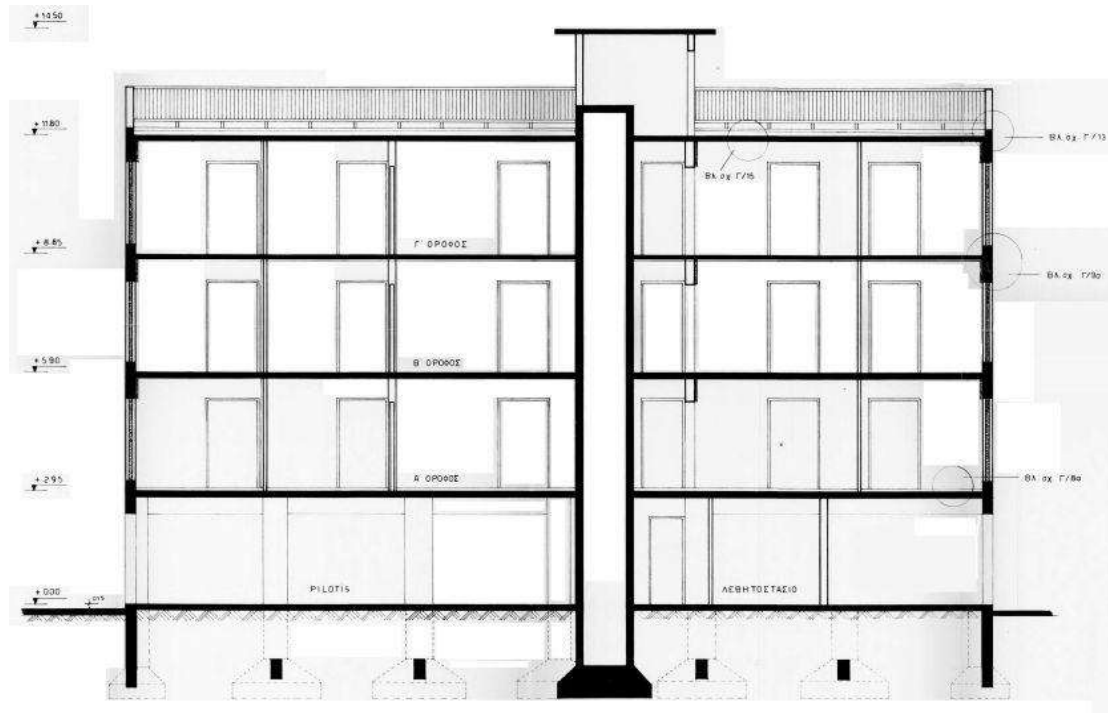
3.1. Επιλογή και περιγραφή κτηρίου

Μέχρι στιγμής, στα δύο προηγούμενα Κεφάλαια, παρατέθηκαν οι αρχές βάσει των οποίων προσδιορίζονται οι τρωτότητες σε επίπεδο υποδομής ή χωρικό, καθώς και οι βλάβες που είναι δυνατόν να επιφέρουν στις υποδομές και οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν απώλειες. Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται, ως πειραματική δοκιμή, μελέτη περίπτωσης υφιστάμενου κτηρίου, το οποίο αποτιμάται σύμφωνα με την μεθοδολογία της FEMA P-58 και αναλύεται με το σχετικό ηλεκτρονικό εργαλείο PACT, προκειμένου να εκτιμηθούν πιθανές απώλειες, σε περίπτωση έκθεσής του σε σεισμική δόνηση.



Εικόνα 20: Κάτοψη τυπικού ορόφου.
(Πηγή: Φάκελος Μελέτης κτηρίου)

Το εξεταζόμενο κτήριο αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα των πρότυπων μελετών που εκπονήθηκαν από τη Δ/νση Μελετών Έργων του πρώην Οργανισμού Εργατικής Κατοικίας για την εξυπηρέτηση σκοπών οργανωμένης κρατικής δόμησης και έχει παρουσιασθεί αναλυτικότερα σε παλαιότερη Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (Κολομβάκης, 2018). Μορφολογικά, αφορά στην παραλλαγή 3.12B(α) του βασικού τύπου μελέτης 3.12-4.12B(α) και κωδικοποιεί κτήριο με χρήση κατοικίας, το οποίο περιλαμβάνει υπόγειο, ισόγειο (pilotis), τρεις τυπικούς ορόφους, δώμα και απόληξη κλιμακοστασίου, καθώς και ποικίλους βοηθητικούς χώρους.



Εικόνα 21: Τομή κατά μήκος.
(Πηγή: Φάκελος Μελέτης κτηρίου)

Ειδικότερη παρουσίαση των επιμέρους χαρακτηριστικών του κτηρίου, καθώς και των παραδοχών που υιοθετούνται για τις ανάγκες της ανάλυσης, παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

3.2. Προσομοίωση κτηρίου

Σε γενικές γραμμές, το προσομοίωμα ενός κτηρίου αποτελεί μία οργανωμένη περιγραφή των συστατικών στοιχείων του, όπως λ.χ. στατικό σύστημα, δομικά και μη δομικά μέλη, χρήση κ.λπ. Για κάθε στοιχείο εμπεριέχονται πρόσθετες πληροφορίες που αφορούν στην τρωτότητά του, τις παραμέτρους απαίτησης που θα πρέπει να ικανοποιεί σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης, καθώς και κάθε είδος βλάβης που ενδέχεται να εμφανίσει, λόγω αδυναμίας εκπλήρωσης των εν λόγω απαιτήσεων, μαζί με τις αντίστοιχες συνέπειες αυτών των βλαβών.

Ειδικότερα, η συστηματική περιγραφή του αναλυόμενου κτηρίου θα πρέπει, για λόγους πληρότητας και μέγιστης δυνατής ακρίβειας πρόβλεψης των βλαβών και των συνεπαγόμενων απωλειών, να περιλαμβάνει γενική γεωμετρική περιγραφή του, κατάλογο με τα δομικά και μη δομικά μέλη, διεξοδική περιγραφή των ομάδων τρωτότητας και την καλύτερη δυνατή εκτίμηση του πληθυσμιακού μοντέλου και των χρήσεων του υπόψη κτηρίου. Οι υπόψη πληροφορίες λαμβάνονται κυρίως από το φάκελο μελέτης του κτηρίου

και συμπληρώνονται κατ' εκτίμηση, ενώ οι απαιτούμενες παραδοχές επιλέγονται σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες του εγχειριδίου χρήσεως (FEMA, 2018b).

Στα ανωτέρω πλαίσια, για τη δημιουργία του προσομοιώματος ακολουθείται η διαδικασία που έχει παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 2, παρ. 2.3.2, της παρούσας ΜΔΕ. Στην παρούσα περίπτωση, τα βήματα της διαδικασίας περιλαμβάνουν τις ενέργειες που αναπτύσσονται παρακάτω, ενώ τα απαιτούμενα στοιχεία εισάγονται διαδοχικά στα αντίστοιχα πεδία, ακολουθώντας τη σειρά εμφάνισης των σχετικών παραμέτρων στις καρτέλες του λογισμικού.

3.2.1. Δεδομένα Έργου (*Project Info*)

The screenshot shows the 'PACT Building Modeler - Εκτίμηση σεισμικών απωλειών στον Ελλαδικό χώρο' window. The 'Project Info' tab is active, displaying the following information:

- Project ID:** Εκτίμηση σεισμικών απωλειών στον Ελλαδικό χώρο.
- Building Description:** Κτήριο Ω.Σ. με υπόγειο, ισόγειο, 3 τυπικούς ορόφους και δώμα, με χρήση κατοικίας.
- Client:** Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
- Engineer:** Μαρία Ζμπή
- Cost Multipliers:**
 - Region Cost Multiplier: 1,00
 - Date Cost Multiplier: 1,00
 - Note: All costs should be relative to 2011 national averages.
- Solver Options:**
 - Solver Random Seed Value: 5 (0 indicates use of new random seed value for each run)

Region Cost Multiplier: Η τιμή καθορίζεται σύμφωνα με τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής όπου βρίσκεται το κτήριο, έτσι ώστε να αντανakλά το πραγματικό κόστος επισκευής του κατά το χρόνο της ανάλυσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ο τύπος του αναλυόμενου κτηρίου έχει χρησιμοποιηθεί κατά την ανέγερση οικισμών σε πολλές διαφορετικές περιοχές της χώρας, για λόγους απλοποίησης επιλέγεται να αγνοηθούν οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στα κόστη επισκευής μεταξύ αυτών των περιοχών. Συνεπώς, η παράμετρος λαμβάνει την τιμή 1,00.

Date Cost Multiplier: Αφορά σε γραμμική προσαρμογή στη σημερινή εποχή της προεπιλεγμένης από το λογισμικό ανάλυσης κόστους (τιμές 2011 για την περιοχή της Βόρειας Καλιφόρνιας), λαμβάνοντας υπόψη τη διαχρονική επίδραση του πληθωρισμού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, και για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, η παράμετρος λαμβάνει ομοίως την τιμή 1,00.

Solver Random Seed Value: Πρόκειται για παράμετρο που χρησιμοποιείται στη διαδικασία αποτίμησης και προτείνεται να λαμβάνει μη μηδενική τιμή, έτσι ώστε να διασφαλίζει την ομοιογένεια των αποτελεσμάτων, κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η ανάλυση. Για το

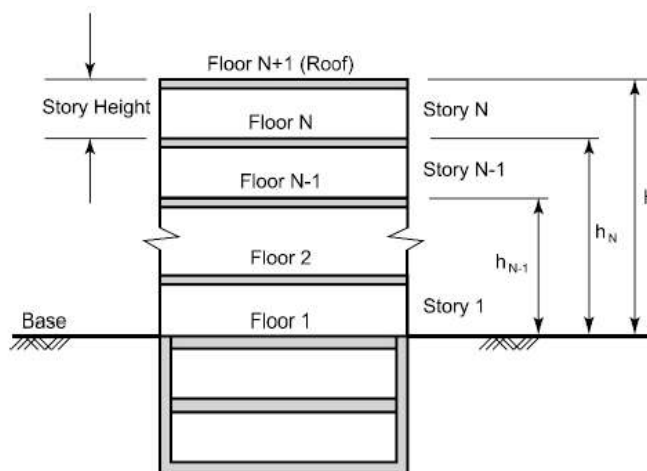
σκοπό αυτό, και προκειμένου να αποφευχθούν ενδεχόμενα μη κανονικά αποτελέσματα, επιλέγεται η χρήση της τιμής 5, όπως αυτή είναι προεπιλεγμένη από το λογισμικό.

3.2.2. Δεδομένα Κτηρίου (Building Info)

The screenshot shows the 'Building Info' tab in the PACT Building Modeler software. The 'Number of Stories' is set to 4. Input fields include Total Replacement Cost (\$), Replacement Time (days), Core and Shell Replacement Cost (\$), Max Workers per sq. m., Total Loss Threshold (As Ratio of Total Replacement Cost), Floor Area (sq. m.), and Story Height (m.). Below the input fields is a table with the following data:

Floor Num	Floor Name	Story Height (m.)	Area (sq. m.)	Height Factor	Hazmat Factor	Occupancy Factor
1	Pilotis	2.85	193.50	1	1	1.2
2	Τυπικός ορόφος 1	2.95	193.50	1	1	1.2
3	Τυπικός ορόφος 2	2.95	193.50	1	1	1.2
4	Τυπικός ορόφος 3	2.95	193.50	1	1	1.2
5	Δώμα		193.50	1	1	1.2

Number of Stories: Ως στάθμη νοείται ο όγκος του κτηρίου που ορίζεται μεταξύ των άνω επιφανειών δύο διαδοχικών υπέργειων ορόφων και εμπεριέχει τρωτά στοιχεία, τα οποία πρόκειται να συμπεριληφθούν στο προσομοίωμα. Στη περίπτωση του κτηρίου τύπου 3.12B(α) με ισόγειο και τρεις τυπικούς ορόφους, ο αριθμός των σταθμών είναι 4. Επισημαίνεται ότι το υπόγειο δεν λαμβάνεται υπόψη για τη δημιουργία του προσομοιώματος, καθώς θεωρείται ότι είναι πακτωμένο και δεν περιέχει τρωτά στοιχεία.



Εικόνα 22: Αριθμός και ύψος σταθμών κτηρίου κατά PACT. (Πηγή: FEMA, 2018b)

Story Height: Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό και τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο φάκελο της μελέτης, το μικτό ύψος της pilotis είναι 2,85 m, το αντίστοιχο μικτό ύψος κάθε

τυπικού ορόφου είναι ίσο με 2,95 m και το συνολικό ύψος του κτηρίου ανέρχεται σε 11,70 m (στάθμη δώματος).

Floor Area: Το κτήριο έχει ορθογωνική κάτοψη διαστάσεων 21,50x9,00 m και μικτό εμβαδό 193,50 m², η οποία εμπερικλείει δύο διαμερίσματα αντίστοιχης επιφάνειας 80 m² και 100 m², περίπου.

Total Replacement Cost: Περιλαμβάνει το κόστος αντικατάστασης πυρήνα και κελύφους, καθώς και του συνόλου των δομικών και μη δομικών στοιχείων του κτηρίου που βρίσκονται σε μη κοινόχρηστους χώρους. Βάσει πρόσφατων στοιχείων και εκτιμήσεων από το χώρο των κατασκευών, για κτήρια κατοικιών και για χρήση συνήθων υλικών, το εν λόγω κόστος εκτιμάται προσεγγιστικά σε 1.000€/m². Συνεπώς, το συνολικό κόστος αντικατάστασης του κτηρίου ανέρχεται σε 774x1.000 = €774.000 ή \$867.593 περίπου.

Core and Shell Replacement Cost: Περιλαμβάνει το κόστος της βασικής δομής και επένδυσης του κτηρίου, μαζί με όλα τα μη δομικά στοιχεία του που βρίσκονται σε κοινόχρηστους χώρους. Επίσης, συμπεριλαμβάνει το κόστος κατεδάφισης του κτηρίου και αποκομιδής των μπαζών. Εκτιμάται σε ποσοστό περίπου 40% του συνολικού κόστους αντικατάστασης, σύμφωνα και με τα σχετικά παραδείγματα του εγχειριδίου χρήσεως του λογισμικού. Συνεπώς, το εν λόγω κόστος ανέρχεται σε €774,000.00x40% = €309,600.00 ή \$347,037.00 περίπου.

Replacement Time: Εκτιμάται για το σύνολο του κτηρίου βάσει των ελάχιστων απαιτούμενων ημερομισθίων, τα οποία υπολογίζονται ανά μονάδα εργασίας από τους Πίνακες 1 και 2 του άρθρου 38 του Κανονισμού Ασφάλισης ΙΚΑ – ΕΤΑΜ, για κτήρια χωρίς αναλυτικό προϋπολογισμό εργασιών. Στην περίπτωση του αναλυόμενου κτηρίου, και με την παραδοχή απασχόλησης συνεργείου 10 εργατών όλων των ειδικοτήτων, ο χρόνος αντικατάστασης προσδιορίζεται σε 100 ημέρες, περίπου.

Maximum Workers per Square Foot: Στην πράξη, η πυκνότητα των εργατών που απασχολούνται στο κτήριο κατά τη διάρκεια των εργασιών επισκευής παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες σχετίζονται με τους διαθέσιμους χρονικούς και οικονομικούς πόρους. Γι' αυτό το λόγο, η ανάλυση γίνεται με την προεπιλεγμένη από το λογισμικό τιμή 0,001, καθώς αυτή θεωρείται ότι υποδηλώνει εύλογο χρόνο επισκευής (με αντίστοιχο ισορροπημένο κόστος), τέτοιο ώστε να επιτρέπει ταυτόχρονη χρήση του κτηρίου από τους διαμένοντες σε αυτό, κατά τη διάρκεια των επισκευαστικών εργασιών.

Total Loss Threshold (as Ratio of Total Replacement Cost): Ομοίως, για τις ανάγκες της ανάλυσης διατηρείται η προεπιλεγμένη από το λογισμικό τιμή 1. Η εν λόγω τιμή υποδηλώνει ότι, εάν το κόστος επισκευής υπερβεί ποσοστό 40% του συνολικού κόστους

αντικατάστασης, λαμβάνεται απόφαση για κατεδάφιση του κτηρίου και αντικατάστασή του με νέο κτήριο.

Height Factor: Ο συντελεστής συσχετίζει την αύξηση του κόστους, που παρουσιάζει η μεταφορά των απαιτούμενων υλικών και η εκτέλεση των εργασιών επισκευής σε κάθε στάθμη, με την αντιστοίχως αυξανόμενη δυσχέρεια λόγω του ύψους της υπόψη στάθμης. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1 του εγχειριδίου χρήσεως του λογισμικού, και βάσει του αριθμού των ορόφων του αναλυόμενου κτηρίου, ο συντελεστής λαμβάνει την τιμή 1.

Hazmat Factor: Ο συντελεστής προσαρμόζει το επισκευαστικό κόστος ανάλογα με την ύπαρξη επικίνδυνων υλικών στο κτήριο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υφίστανται χώροι αποθήκευσης επικίνδυνων υλικών, ούτε διατίθενται δεδομένα στο φάκελο της μελέτης για χρήση τους ως δομικών υλικών, επιλέγεται η τιμή 1.

Occupancy Factor: Ο συντελεστής αυξάνει το επισκευαστικό κόστος ανάλογα με το βαθμό χρήσεως του κτηρίου κατά τη διάρκεια των εργασιών επισκευής, λαμβάνοντας υπόψη την επιθυμητή πληρότητα των χώρων του. Δεδομένου ότι το αναλυόμενο κτήριο έχει χρήση κατοικίας, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-2 του εγχειριδίου χρήσεως, ο υπόψη συντελεστής λαμβάνει την τιμή 1.2 (κτήριο υπό χρήση, δονήσεις χαμηλής εντάσεως).

3.2.3. Πληθυσμιακά δεδομένα (Population)

Typical Occupancy Mix: Το αναλυόμενο πολυώροφο κτήριο έχει κατασκευασθεί από τον Ο.Ε.Κ. για τη στέγαση οικογενειών της εργατικής τάξης και έχει αμιγώς χρήση κατοικίας (Fraction = 1). Συνεπώς, χρησιμοποιείται το σχετικό πληθυσμιακό μοντέλο που παρέχει το λογισμικό, με την αντίστοιχη ωριαία πληθυσμιακή κατανομή.

Floor-by-Floor Distribution: Ομοίως, υιοθετείται το προαναφερθέν πληθυσμιακό μοντέλο για κάθε στάθμη του κτηρίου.

Population Model Name: Λόγω της μορφολογίας, διαρρύθμισης και χρήσεως του κτηρίου, ως πληθυσμιακό μοντέλο επιλέγεται το Multi-unit Residential.

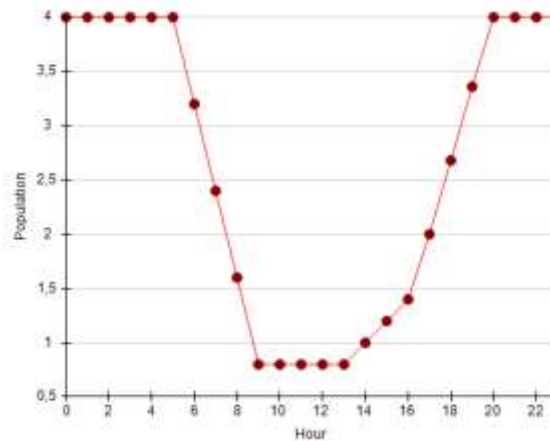
Peek number of occupants per 1000sf: Δεδομένης της διαφορετικής επιφάνειας των δύο διαμερισμάτων που καταλαμβάνουν κάθε όροφο του κτηρίου, επιλέγεται ως μέση τιμή η προεπιλεγμένη από το λογισμικό τιμή των 4 ατόμων ανά 1000 τετραγωνικά πόδια ($\approx 93 \text{ m}^2$), η οποία αντιστοιχεί προσεγγιστικά σε μία μέση οικογένεια με δύο παιδιά ανά διαμέρισμα.

Population Dispersion: Διατηρείται η προεπιλεγμένη από το λογισμικό τιμή διασποράς 0,2.

Η πληθυσμιακή κατανομή των ενοίκων, ανά ημέρα και ανά μήνα, είναι η ακόλουθη:

Population Model Name	Multi-unit Residential	
Peak number of occupants per 1000sf	4	
Population Dispersion	0.2	
Day of the Week	Month	Graph
Hour	Weekdays	Weekend
12:00 πμ	100%	100%
1:00 πμ	100%	100%
2:00 πμ	100%	100%
3:00 πμ	100%	100%
4:00 πμ	100%	100%
5:00 πμ	100%	100%
6:00 πμ	80%	100%
7:00 πμ	60%	100%
8:00 πμ	40%	100%
9:00 πμ	20%	75%
10:00 πμ	20%	50%
11:00 πμ	20%	50%
12:00 μμ	20%	50%
1:00 μμ	20%	50%
2:00 μμ	25%	50%
3:00 μμ	30%	50%
4:00 μμ	35%	50%
5:00 μμ	50%	50%
6:00 μμ	67%	50%
7:00 μμ	84%	50%
8:00 μμ	100%	50%
9:00 μμ	100%	75%
10:00 μμ	100%	100%
11:00 μμ	100%	100%

Εικόνα 23: Ωριαία κατανομή πληθυσμού ανά ημέρα (τυπικοί όροφοι).



Εικόνα 24: Διάγραμμα ωριαίας κατανομής πληθυσμού ανά ημέρα (τυπικοί όροφοι).

Population Model Name	Multi-unit Residential	
Peak number of occupants per 1000sf	4	
Population Dispersion	0.2	
Day of the Week	Month	Graph
Month	Weekdays	Weekend
Ιανουάριος	100%	100%
Φεβρουάριος	100%	100%
Μάρτιος	100%	100%
Απρίλιος	100%	100%
Μάιος	100%	100%
Ιούνιος	100%	100%
Ιούλιος	75%	75%
Αύγουστος	25%	25%
Σεπτέμβριος	75%	75%
Οκτώβριος	100%	100%
Νοέμβριος	100%	100%
Δεκέμβριος	100%	100%

Εικόνα 25: Μηνιαία κατανομή πληθυσμού ανά έτος (τυπικοί όροφοι).

3.2.4. Τρωτότητες μελών (Component Fragilities)

Category	Component	Dr. 1	Dr. 2	Population Model
A202: Basement Walls	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B: Shell				
B10: Super Structures				
B101: Floor Construction	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B102: Roof Construction	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B103: Structural Steel Elements	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B104: Reinforced Concrete Elements	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B1041.057b: ACI 318 CMF with w		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiaxial Random
B1041.067b: ACI 318 CMF with w		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiaxial Random
B105: Masonry Vertical Elements	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B106: Cold-formed Steel Structural E.	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B107: Wood Light Frame Structural E.	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E200: Exterior Enclosure		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Most Typical Specifications: Πρόκειται για πεδίο όπου συμπληρώνονται πληροφορίες για το σύνολο του κτηρίου, σχετικές με τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν την τρωτότητα των μελών τα οποία ενδέχεται να εμφανίσουν βλάβες λόγω σεισμικής καταπόνησης. Οι εν λόγω πληροφορίες περιλαμβάνουν περιγραφή της παραμέτρου που προσδιορίζει το επίπεδο βλάβης του μέλους, τα πιθανότερα είδη βλάβης, καθώς και συναρτήσεις πιθανοτικής εκτίμησης της τρωτότητας και των συνεπειών της, υπό μορφή απωλειών ανά είδος βλάβης, για το υπόψη μέλος. Επιπλέον, για την επιλεγμένη παράμετρο προσδιορισμού βλάβης, ορίζεται η διεύθυνση προς την οποία κάθε μέλος εμφανίζει μεγαλύτερη τρωτότητα.

Category	Component	Dr. 1	Dr. 2	Population Model
A202: Basement Walls	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B: Shell				
B10: Super Structures				
B101: Floor Construction	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B102: Roof Construction	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B103: Structural Steel Elements	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B104: Reinforced Concrete Elements	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B1041.057b: ACI 318 CMF with w		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiaxial Random
B1041.067b: ACI 318 CMF with w		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiaxial Random
B105: Masonry Vertical Elements	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B106: Cold-formed Steel Structural E.	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B107: Wood Light Frame Structural E.	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E20: Exterior Enclosure				
E201: Exterior Nonstructural Walls	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E202: Exterior Window Systems	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E203: Exterior Doors	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E30: Roof Elements				
E301: Roof Coverings	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E302: Roof Openings	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E303: Masonry Chimney (residential)	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E304:	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
E40: Exterior Finishes				
E401: Exterior Finishes	Please Select	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Floor-by-Floor Distribution: Στο εν λόγω πεδίο καταχωρούνται ανά όροφο οι ανωτέρω πληροφορίες, έτσι όπως αυτές προκύπτουν ποιοτικά και ποσοτικά από τα στοιχεία του φακέλου της μελέτης του κτηρίου.

Η αναγνώριση των μελών (δομικών και μη) πραγματοποιείται ανά στάθμη του κτηρίου, από τα θεμέλια έως το δώμα. Τα δεδομένα που καταχωρούνται με αυτό τον τρόπο επιλέγονται από τις υφιστάμενες ομάδες τρωτότητας και είναι τα ακόλουθα:

ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ

- **Θεμελίωση:** Δεν καταχωρείται ομάδα τρωτότητας, διότι τα θεμέλια του κτηρίου θεωρούνται πακτωμένα και, ως εκ τούτου, δεν εμφανίζουν τρωτότητα.
- **Υπόγειο:** Δεν καταχωρείται ομάδα τρωτότητας διότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υπόγειο θεωρείται ότι δεν περιέχει τρωτά στοιχεία.
- **Ισόγειο – Τυπικός όροφος:** Αναγνωρίζονται οι ακόλουθες ομάδες τρωτότητας ανά δομικό μέλος:
 - **Πλάκες:** Θεωρείται ότι οι πλάκες δαπέδου και οροφής δεν παραμορφώνονται στο επίπεδό τους λόγω διαφραγματικής λειτουργίας. Συνεπώς, δεν εμφανίζουν τρωτότητα.
 - **Λοιπά μέλη από Ω.Σ.:** Το κτήριο διαθέτει στατικό σύστημα από ομοιόμορφους πλαισιακούς φορείς. Συνεπώς, για τους κόμβους μεταξύ πλακών – υποστυλωμάτων, και λαμβάνοντας υπόψη τη στρεπτική ροπή που αναπτύσσεται σε αυτούς, από την ομάδα τρωτότητας B104: Reinforced Concrete Elements επιλέγονται οι υπ' αρ. B1041.051b και B1041.061b, για κόμβους με αμφίπλευρη σύνδεση δοκών. Για τις εν λόγω κατηγορίες, και υπέρ ασφαλείας, επιλέγεται ο έλεγχος τρωτότητας προς τις δύο διευθύνσεις.

ΜΗ ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ

Ο προσδιορισμός του είδους και η εκτίμηση της ποσότητας των μη δομικών μελών γίνεται μέσω του εξειδικευμένου ηλεκτρονικού βοηθητικού εργαλείου *Normative Quantity Estimation Tool*, που παρέχεται από το PACT. Για κάθε στάθμη του κτηρίου εισάγεται η συνολική επιφάνεια και η χρήση της στο σχετικό υπολογιστικό φύλλο excel, το οποίο αποδίδει στη συνέχεια μία λίστα των μη δομικών στοιχείων με τις εκτιμώμενες αντιπροσωπευτικές ποσότητες αυτών. Επισημαίνεται ότι ενδεχόμενη εμφάνιση αποκλίσεων των ως άνω εκτιμώμενων ειδών και ποσοτήτων από τα πραγματικά στοιχεία, κατά περίπτωση, θεωρείται αποδεκτή, καθώς η βάση δεδομένων του υπολογιστικού φύλλου βασίζεται σε γνώμες εμπειρογνομόνων. Επιπλέον, και για τα μη δομικά στοιχεία επιλέγεται ο έλεγχος προς τις δύο διευθύνσεις, υπέρ ασφαλείας. Τέλος, δεν αναγνωρίζονται ως τρωτά κάποια στοιχεία τα οποία μπορεί να υπάρχουν στο κτήριο, αλλά θεωρούνται πακτωμένα όπως λ.χ. παράθυρα, πόρτες κ.λπ.

Για τα μη δομικά μέλη του κτηρίου, η χρήση του *Normative Quantity Estimation Tool* έδωσε κάποια αρχικά αποτελέσματα, τα οποία ελέγχθηκαν και τροποποιήθηκαν σύμφωνα με τα δεδομένα του φακέλου μελέτης, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται κατά το δυνατόν στα

πραγματικά στοιχεία του κτηρίου. Τα προσαρμοσμένα αυτά αποτελέσματα παρουσιάζονται, ανά στάθμη και για το σύνολο του κτηρίου, στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1: Ομάδες τρωτότητας μη δομικών μελών.

COMPONENT SUMMARY MATRIX									
OCCUPANCY			Fragility Number	Fragility Name	Assumed Quantity per component within PACT	Quantity		Demand Parameter (value):	Correlated Fragility?
Type	Floor Name	Area (sq ft)				Directional	Non Directional		
APARTMENT	4th	193,5	B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	30 SF	0,97	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	B3011.011	Concrete tile roof, tiles secured and compliant with UBC94	100 SF	--	0,62	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	C1011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	C3011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	250 SF	--	0,74	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	1000 LF	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	1000 LF	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	10 EA	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	10 EA	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	30 SF	0,97	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	C1011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	C3011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	250 SF	--	0,74	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	1000 LF	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	1000 LF	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	10 EA	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	10 EA	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	30 SF	0,97	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	C1011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	C3011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	250 SF	--	0,74	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	1000 LF	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	1000 LF	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	10 EA	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	10 EA	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	C1011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	1st	193,5	C3011.001a	Wall Parttion, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	100 LF	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	1st	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	1000 LF	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	1000 LF	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	10 EA	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	10 EA	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	4th	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	225 AP	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	3rd	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	225 AP	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	2nd	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	225 AP	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	1st	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	225 AP	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	ALL	BLDG	D1014.011	Traction Elevator - Applies to most California Installations 1976 or later, most western states installations 1982 or later and most other U.S installations 1998 or later.	1 EA	--	0,03	Peak Floor Acceleration	NO

3.2.5. Ομάδες απόδοσης (Performance Groups)

No.	Component Type	Performance Group	Quantity	Height	Population Model	Demand Parameters
B1041.051b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides		25.00	0.00	Multi-Use Residential	Story Drift Ratio
B1041.061b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides		20.00	0.00	Multi-Use Residential	Story Drift Ratio
B1041.051a	Conc Walls - General Ribbed Slab Wall Curbs incl. Corng. Reinforc. Laprodion: Stirrups: Glass Type: Unreinforced Concrete: Aspect ratio > 4.5: Other details Unreinforced		57.00	0.00	Multi-Use Residential	Story Drift Ratio
B1041.051a	Wall Partition, Type: Oppium with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above		23.00	0.00	Multi-Use Residential	Story Drift Ratio
B1041.051a	Wall Partition, Type: Oppium with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above		7.00	0.00	Multi-Use Residential	Story Drift Ratio

Μετά από την αναγνώριση των τρωτών δομικών και μη δομικών μελών για το σύνολο του κτηρίου, ακολουθεί η καταχώρηση των ποσοτήτων τους ανά στάθμη. Τα δεδομένα που συμπληρώνονται αφορούν στο σύνολο των μελών, έτσι όπως αυτά έχουν προκύψει από το φάκελο της μελέτης και μέσω του βοηθητικού εργαλείου *Normative Quantity Estimation Tool*.

No.	Component Type	Performance Group	Quantity	Height	Population Model	Demand Parameters
B1041.051b	Substructure/Column, SDC A or B, Area (A) < A _{cr} , Not exposed only		14.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration
B1041.051b	Partition Element - Applies to most California Inclusions 1975 or later, most western states including 1982 or later and most other U.S. jurisdictions 1988 or later		0.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration
B1041.051b	Gas Water Piping (A) > 2 Inches, SDC A or B, PIPING HORIZONTAL		0.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration
B1041.051b	FRNC Reinforced Steel Mesh Overlay less than 8 in. R in cross section area, SDC A or B		0.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration
B1041.051b	FRNC Slabs / Diaphragms in supported ceiling - No independent safety walls, SDC A or B		18.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration
B1041.051b	Variable No Volume FRNC Slab with unreinforced, SDC A or B		0.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration
B1041.051b	Low Voltage Switchgear - Capacity 1000 to 1000 Amp. Unanchored equipment that is not vibration isolated. Equipment height only		0.00	0.00	Multi-Use Residential	Acceleration

Επίσης, η καταχώρηση γίνεται ανά διεύθυνση προς την οποία κάθε στοιχείο εμφανίζει τρωτότητα. Ομοίως καταχωρούνται σε διακριτό πεδίο και τα στοιχεία η τρωτότητα των οποίων δεν σχετίζεται με κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση. Σε κάθε περίπτωση, γίνεται η παραδοχή ότι οι ποσότητες των μελών δεν είναι μέσες αλλά έχουν εκτιμηθεί με σημαντικό βαθμό ακριβείας, οπότε θεωρείται ότι η διασπορά τους είναι μηδενική (Quantity Dispersion = 0,00).

ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ

Πίνακας 2: Ομάδες απόδοσης δομικών μελών.

COMPONENT SUMMARY MATRIX							
OCCUPANCY			Fragility Number	Fragility Name	Quantity per component	Demand Parameter (value):	Correlated Fragility?
Type	Floor Name	Area (sq ft)					
APARTMENT	4th	193,5	B1041.051b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	24	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	B1041.061b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	20	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	B1041.051b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	25	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	B1041.061b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	20	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	B1041.051b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	25	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	B1041.061b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	20	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	1st	193,5	B1041.051b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	25	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	1st	193,5	B1041.061b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	20	Story Drift Ratio	NO

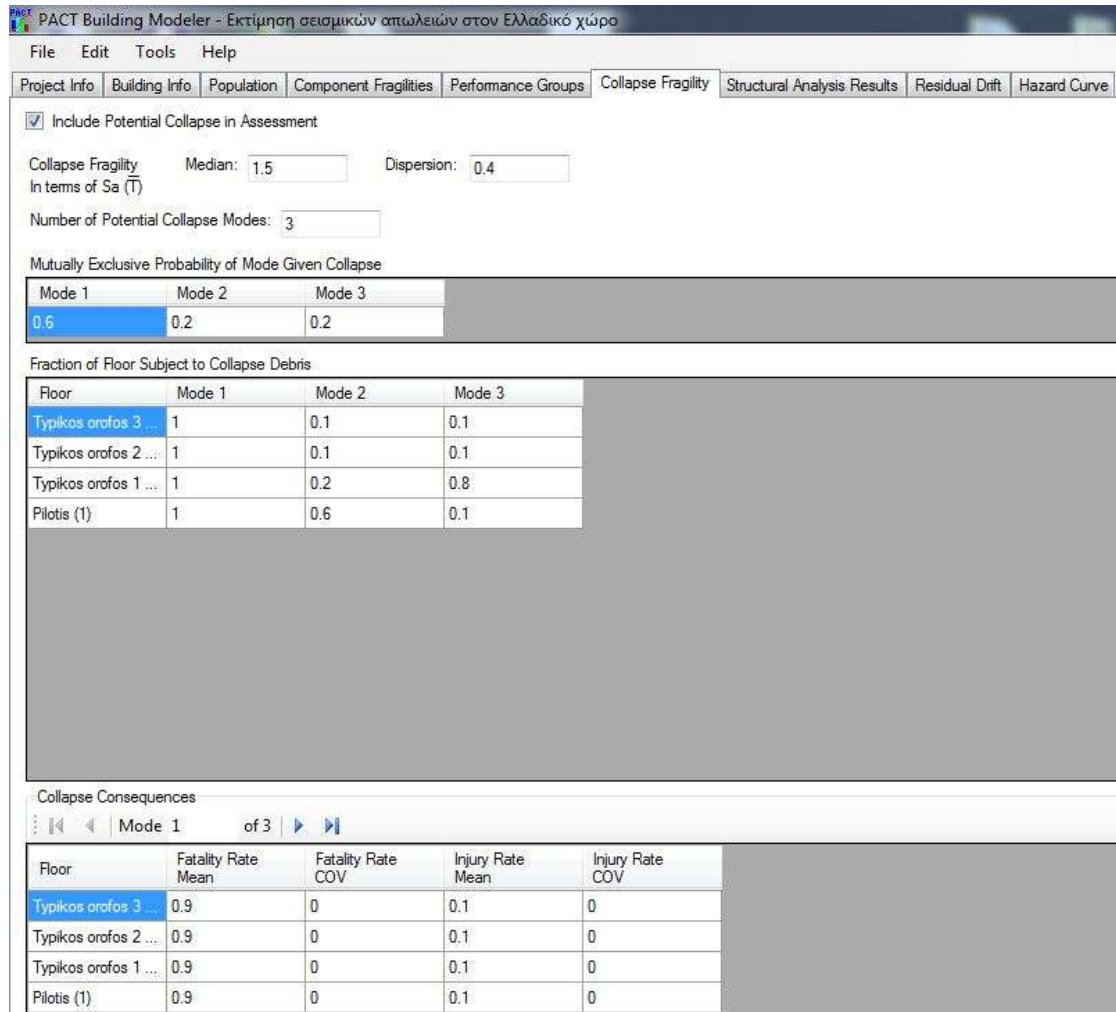
ΜΗ ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ

Πίνακας 3: Ομάδες απόδοσης μη δομικών μελών.

COMPONENT SUMMARY MATRIX								
OCCUPANCY			Fragility Number	Fragility Name	Quantity		Demand Parameter (value):	Correlated Fragility?
Type	Floor Name	Area (sq ft)			Directional	Non Directional		
APARTMENT	4th	193,5	B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	0,97	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	B3011.011	Concrete tile roof, tiles secured and compliant with UBC94	--	0,62	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	C1011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	C3011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	--	0,74	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	4th	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	0,97	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	C1011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	C3011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	3rd	193,5	C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	--	0,74	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	3rd	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	0,97	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	C1011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	C3011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	2nd	193,5	C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	--	0,74	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	2nd	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	C1011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	1st	193,5	C3011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	0,07	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	1st	193,5	D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	--	0,02	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	--	0,01	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	--	0,15	Peak Floor Acceleration	NO
APARTMENT	1st	193,5	D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	--	0,08	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	4th	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	3rd	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	2nd	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	1st	FLOOR	D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	--	0,00	Peak Floor Acceleration	NO
ALL	ALL	BLDG	D1014.011	Traction Elevator - Applies to most California Installations 1976 or later, most western states installations 1982 or later and most other U.S installations 1998 or later.	--	0,03	Peak Floor Acceleration	NO

3.2.6. Τρωτότητα κατάρρευσης (Collapse Fragility)

Ο προσδιορισμός της τρωτότητας κατάρρευσης γίνεται βάσει στοιχείων που παρέχονται από τη διεξαγωγή μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, κατόπιν δημιουργίας κατάλληλου μαθηματικού προσομοιώματος του κτηρίου. Μετά από την ολοκλήρωση της ανάλυσης προκύπτει η μέση τιμή $S_a(\bar{T})$ (Median = 1,5) της εδαφικής επιτάχυνσης, για την οποία επέρχεται κατάρρευση του κτηρίου.



Βάσει των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (Number of Potential Collapse Modes = 3), ορίζονται οι τιμές των σχετικών συντελεστών του PACT (Mutually Exclusive Probability of Mode Given Collapse, Fraction of Floor Subject to Collapse Debris). Σε αυτή την περίπτωση, για τα χαρακτηριστικά μεγέθη τραυματισμών και θανάτων διατηρούνται οι προεπιλεγμένες από το λογισμικό τιμές, οι οποίες δίνουν αντίστοιχα μέσα ποσοστά 0,1 και 0,9 και τυπικές αποκλίσεις 0. Τέλος, επιλέγεται η τιμή της διασποράς (Dispersion = 0,4).

3.2.7. Αποτελέσματα δομικής ανάλυσης (Structural Analysis Results)

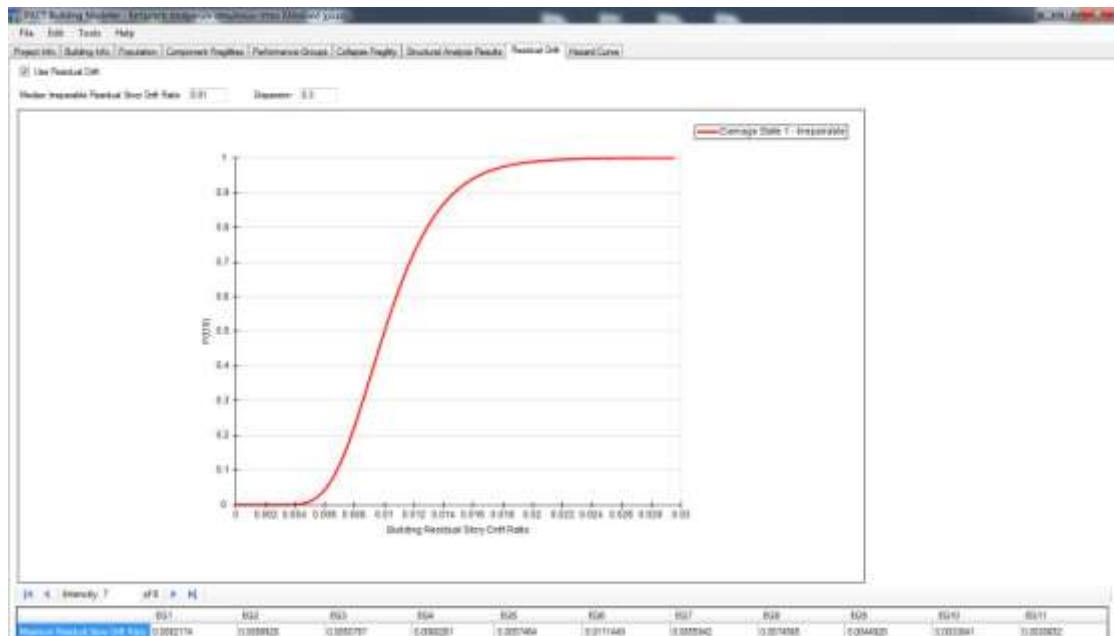
Μετά την εισαγωγή των ανωτέρω δεδομένων, συμπληρώνονται λοιπές βασικές πληροφορίες, οι οποίες αφορούν στον καθορισμό του είδους της εκτίμησης απωλειών βάσει έντασης της σεισμικής δόνησης (Assessment Type = Intensity) και της ανάλυσης ως μη γραμμικής (Analysis Type = Non-Linear). Διατηρούνται οι προεπιλεγμένες από το PACT τιμές του αριθμού επαναλήψεων (Number of Realizations = 200) και του μη-κατευθυντικού συντελεστή μετατροπής (Non-directional conversion factor = 1,2).

Floor/Story	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8	SD9	SD10	SD11
Floor 10	0.2	0.24	0.24	0.16	0.16	0.2	0.24	0.24	0.16	0.25	0.25
Floor 9	0.25	0.25	0.23	0.17	0.22	0.19	0.25	0.22	0.19	0.24	0.25
Floor 8	0.18	0.25	0.25	0.17	0.17	0.13	0.23	0.19	0.19	0.23	0.25
Floor 7	0.16	0.22	0.21	0.11	0.22	0.11	0.19	0.19	0.17	0.23	0.25
Floor 6	0.1	0.15	0.09	0.07	0.17	0.08	0.11	0.13	0.12	0.12	0.1

Τέλος, για κάθε φόρτιση από τις 8 που εξετάστηκαν κατά τη δυναμική ανάλυση του κτηρίου, και για τις δύο διευθύνσεις κάθε φόρτισης, εισάγονται οι τιμές της σχετικής μετακίνησης ορόφων και της επιτάχυνσης που προέκυψαν για τις 11 αναλύσεις (Typical Number of Demand Vectors = 11) κατά τις οποίες δεν προκαλείται κατάρρευση του κτηρίου. Επιπλέον, για κάθε φόρτιση εισάγεται η τιμή της αντίστοιχης μέσης φασματικής επιτάχυνσης, ενώ η σχετική διασπορά λαμβάνεται μηδενική (Modeling Dispersion $\beta_m = 0$).

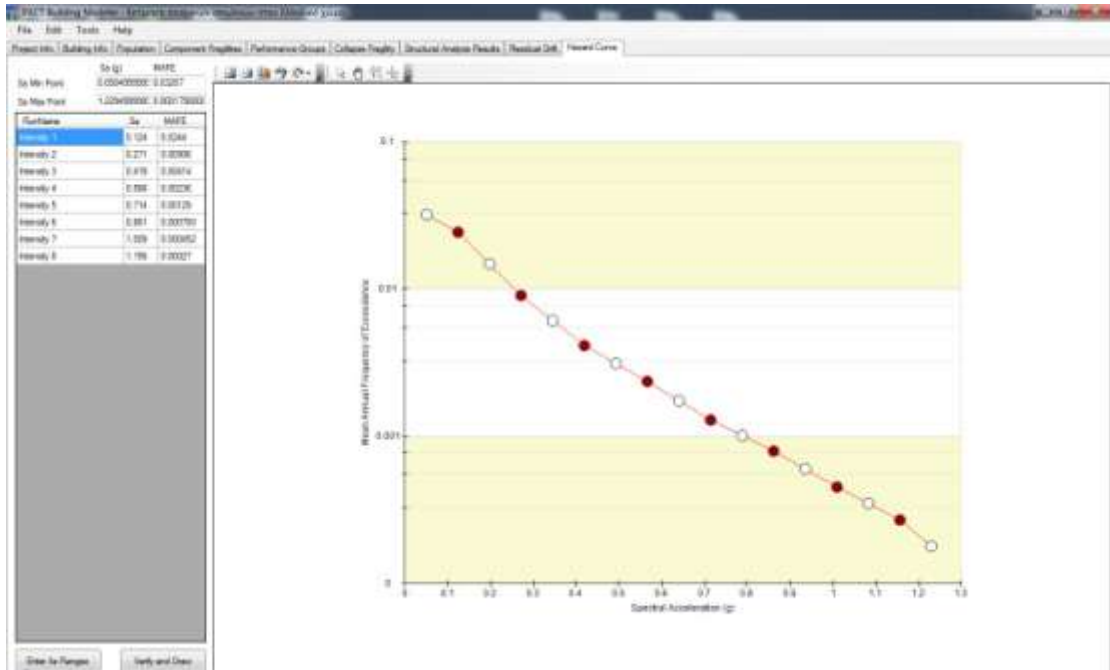
3.2.8. Παραμένουσα μετακίνηση (Residual Drift)

Για τη διαμόρφωση της σχετικής καμπύλης επιλέγεται η διατήρηση των προεπιλεγμένων από το PACT τιμών που αφορούν στη μέση εναπομένουσα σχετική μετακίνηση ορόφου, πέραν της οποίας το κτήριο κρίνεται κατεδαφιστέο (Median Irreparable Residual Story Drift Ratio = 0,01), και στη διασπορά της (Dispersion = 0,3).



Επίσης, για κάθε φόρτιση, εισάγονται οι τιμές της αντίστοιχης μέγιστης εναπομένουσας μετακίνησης (Maximum Residual Story Drift Ratio), όπως έχουν προκύψει από τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση.

3.2.9. Καμπύλη επικινδυνότητας (Hazard Curve)



Για τη χάραξη της καμπύλης χρησιμοποιούνται οι τιμές της μέσης φασματικής επιτάχυνσης που αντιστοιχούν στις 8 φορτίσεις. Για κάθε μία εξ αυτών καταχωρείται η τιμή της αντίστοιχης μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης (MAFE). Παράλληλα, καθορίζονται τα όρια χάραξης της καμπύλης, τα οποία δίνονται από τις τιμές της ελάχιστης ($S_a^{min} = 0,05049g$) και της μέγιστης ($S_a^{max} = 1,2295g$) φασματικής επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες τιμές MAFE.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Γενικές επισημάνσεις

Μετά από την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών για το κτήριο, έτσι όπως αυτή αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3, ακολουθεί η διεξαγωγή της κυρίως ανάλυσης. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, το PACT αποδίδει τις πιθανές απώλειες που αναμένεται να καταγραφούν σε μία σεισμική δόνηση συγκεκριμένης έντασης, σε όρους κόστους επισκευής, θυμάτων, χρόνου επισκευής και ύπαρξης επισφαλών στοιχείων.

Ως τελική επισήμανση υπενθυμίζεται ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο, οι εν λόγω απώλειες αφορούν στους εσωτερικούς χώρους του κτηρίου, καθώς ο αλγόριθμος του PACT δεν περιλαμβάνει εκτίμηση απωλειών στον εξωτερικό χώρο, διότι δεν προβλέπεται εκτίμηση αυτού του είδους από τη σχετική μεθοδολογία FEMA P-58.

4.2. Εξέταση αποτελεσμάτων

Για λόγους κατανοητής και εποπτικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων της διεξαχθείσας ανάλυσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι:

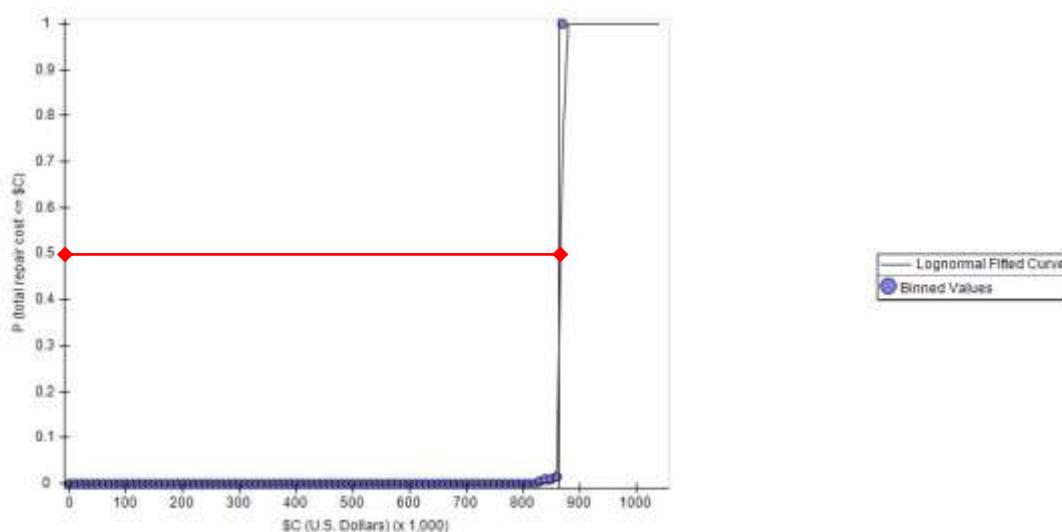
- Τα αποτελέσματα δίνονται βάσει διαγραμμάτων, σύμφωνα με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του PACT, και παρουσιάζονται ενδεικτικά μόνο για μία φόρτιση, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν είναι δυνατή η παρουσίαση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων για όλες τις φορτίσεις.
- Τα διαγράμματα που αφορούν στις τρωτότητες των μελών παρουσιάζονται, όπου αυτό είναι δυνατόν, τόσο ανά ομάδα τρωτότητας, όπως αυτές έχουν εντοπισθεί μεθοδολογικά και καταχωρηθεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3, όσο και ως ενιαίο διάγραμμα, όπου έχει συμπεριληφθεί το σύνολο των ομάδων τρωτότητας.
- Τα ποικίλα οικονομικά στοιχεία παρέχονται σε δολάρια Αμερικής (US dollars), με κατά περίπτωση στρογγυλοποιήσεις.
- Το κόστος επισκευής αφορά σε επαναφορά του κτηρίου στην προ σεισμού κατάσταση. Αντίστοιχα, σε περίπτωση κατάρρευσης, το εν λόγω κόστος αφορά σε ολική ανακατασκευή του κτηρίου με τα ίδια στοιχεία που περιέχονται στο αρχικό κτήριο.
- Ο χρόνος επισκευής δίνεται για την περίπτωση μερικής χρήσης του κτηρίου, σύμφωνα με τις παραδοχές και τους συντελεστές που έχουν αναφερθεί στην παρουσίαση της μεθοδολογίας.

- Τέλος, επισημαίνεται ότι ο υπόψη χρόνος δεν περιλαμβάνει εργασίες αντισεισμικής αναβάθμισης του κτηρίου, αλλά αφορά αποκλειστικά και μόνο σε εργασίες επισκευής προς επαναφορά των στοιχείων που έχουν υποστεί βλάβες στην αρχική τους (προ σεισμού) κατάσταση.

Κατόπιν των ανωτέρω, βάσει των χαρακτηριστικών μεγεθών του κτηρίου και των παραδοχών που έχουν γίνει, και για τη δεδομένη τιμή έντασης της σεισμικής δόνησης που εξετάστηκε, τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

4.2.1. Κόστος επισκευής (*Repair Cost*)

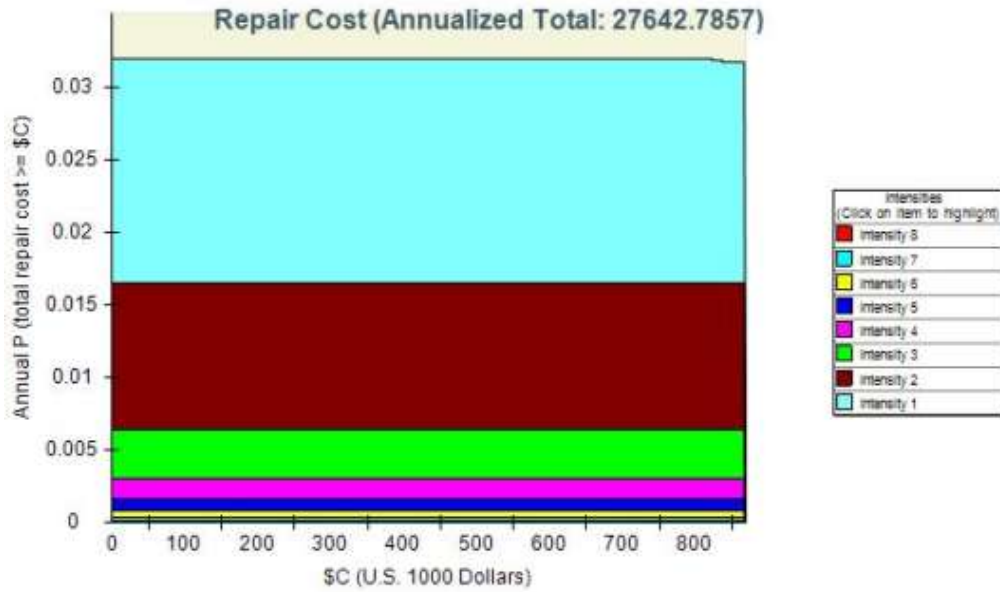
Το διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου κόστους, για το σύνολο των ομάδων απόδοσης του κτηρίου, είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 26: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου κόστους επισκευής.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι, για πιθανότητα μη υπέρβασης $P = 50\%$ περίπου, το εκτιμώμενο μέσο κόστος επισκευής ανέρχεται σε \$860.000,00 περίπου και αντιστοιχεί σε ποσοστό σχεδόν 100% του συνολικού κόστους αντικατάστασης του κτηρίου (\$867.593). Συνεπώς, επί του συνόλου των περιπτώσεων εκδήλωσης σεισμικής δόνησης με την επιλεγμένη ένταση, κατά το 1/2 αυτών, περίπου, θα χρειαστεί να εξετασθεί το ενδεχόμενο κατεδάφισης του κτηρίου, λόγω του εύρους των βλαβών που θα έχουν υποστεί τα μέλη του. Σημαντικό στοιχείο του εν λόγω συμπεράσματος αποτελεί η μικρή διασπορά της καμπύλης πιθανοτικού εκτιμώμενου μέσου κόστους επισκευής, γεγονός που υποδηλώνει σχετικά μεγάλη ακρίβεια της εκτίμησης.

Η επιμέρους συμμετοχή κάθε φόρτισης στη διαμόρφωση του κόστους επισκευής εμφανίζεται διακριτά στο ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 27: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης κόστους επισκευής ανά φόρτιση.

Το ανωτέρω διάγραμμα δείχνει ότι, εκ του συνόλου των 8 φορτίσεων που εξετάστηκαν, η φόρτιση υπ’ αρ. 7 (Intensity 7) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης και συμμετέχει στη διαμόρφωση του κόστους επισκευής κατά το μεγαλύτερο βαθμό. Επίσης, από το διάγραμμα προκύπτει ότι το μέσο ετήσιο κόστος επισκευής ανέρχεται σε \$27.650 περίπου.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα των ομάδων απόδοσης, με ομαδοποίηση ανά ομάδα και υποομάδα απόδοσης, είναι τα ακόλουθα:



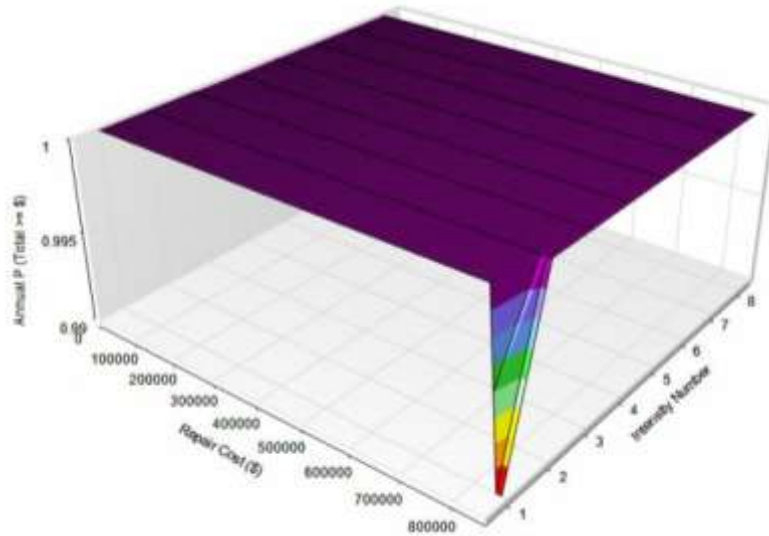
Εικόνα 28: Διάγραμμα κόστους ανά κύρια ομάδα απόδοσης.



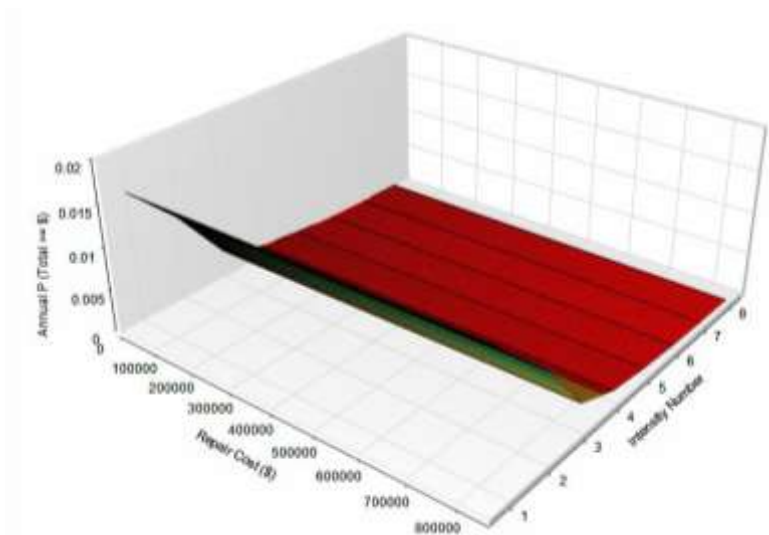
Εικόνα 29: Διάγραμμα κόστους ανά υποομάδα απόδοσης.

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα εσωτερικά μη δομικά στοιχεία επιβαρύνουν κατά το μεγαλύτερο μέρος το συνολικό κόστος επισκευής του κτηρίου, σε περίπτωση εμφάνισης βλαβών λόγω σεισμού.

Η πιθανότητα μη υπέρβασης του εκτιμώμενου μέσου ετήσιου κόστους επισκευής, για το σύνολο των 8 φορτίσεων, αποτυπώνεται στις ακόλουθες τρισδιάστατες καμπύλες, εκ των οποίων η δεύτερη αποτελεί τη σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

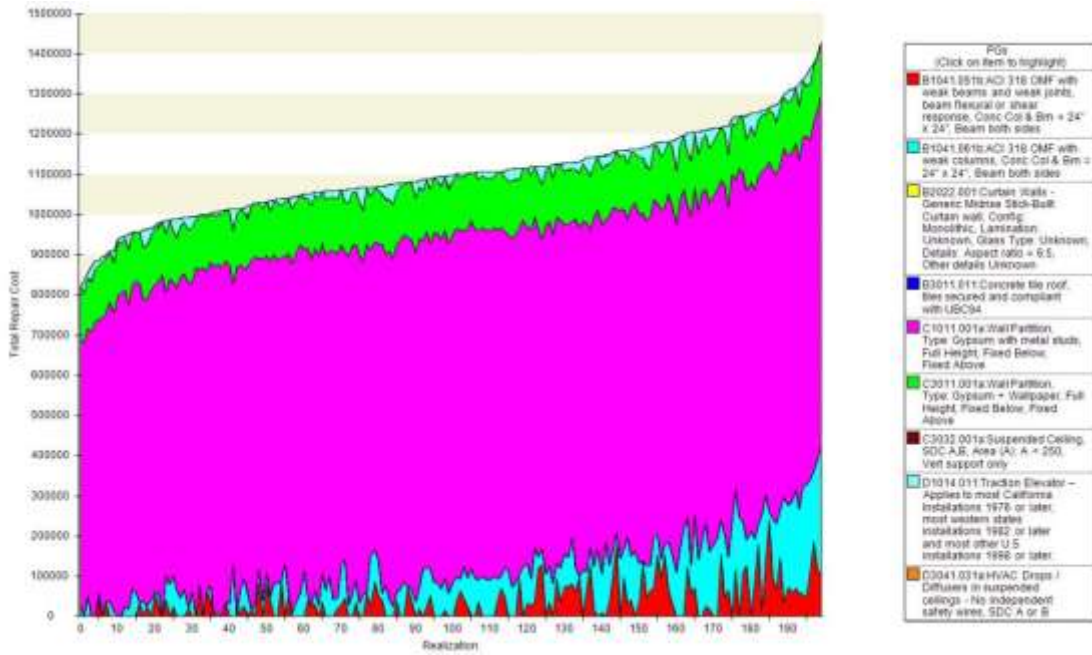


Εικόνα 30: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης κόστους επισκευής.



Εικόνα 31: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης κόστους επισκευής (σταθμισμένη).

Τέλος, στο ακόλουθο διάγραμμα εμφανίζονται το μέσο εκτιμώμενο κόστος επισκευής ανά επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας:

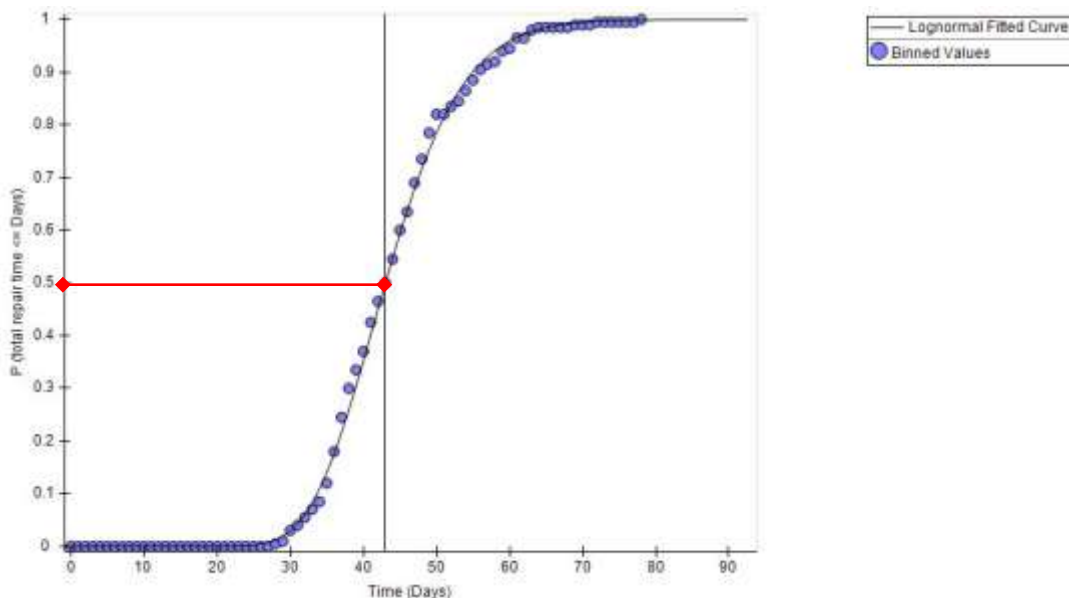


Εικόνα 32: Κόστος επισκευής στοιχείου ανά επανάληψη.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι ο ρόλος του εσωτερικού διαχωριστικού μη δομικού στοιχείου C1011.001a (Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above) είναι ο σημαντικότερος, καθώς οδηγεί σε κατάρρευση του κτηρίου για τις περισσότερες εκ των 200 επαναλήψεων.

4.2.2. Χρόνος επισκευής (Repair Time)

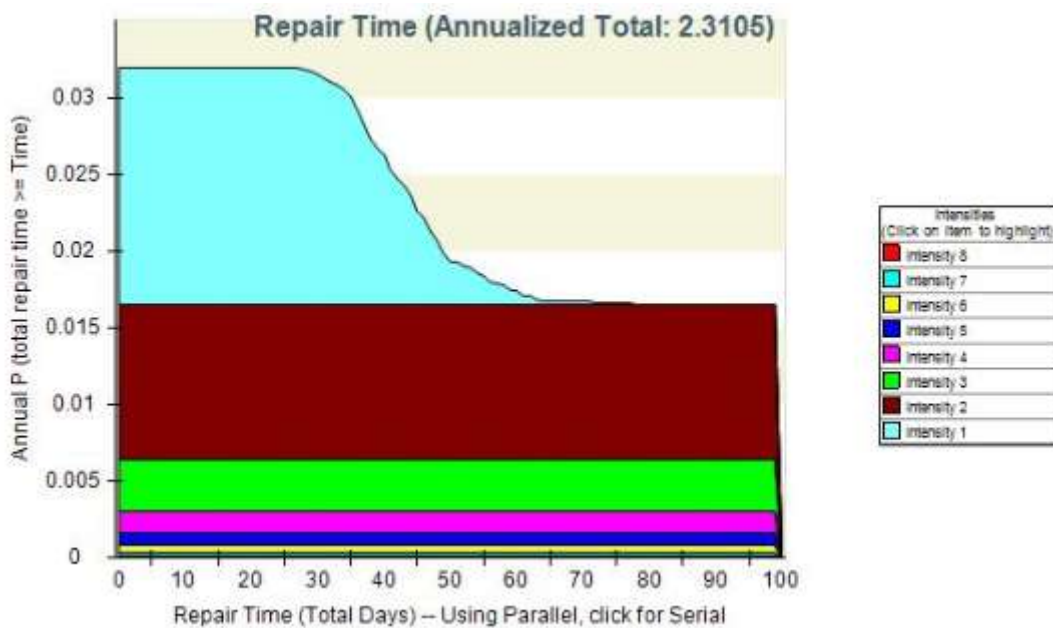
Το διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου χρόνου επισκευής του κτηρίου είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 33: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου χρόνου επισκευής.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι, για πιθανότητα μη υπέρβασης $P = 50\%$, ο εκτιμώμενος μέσος χρόνος επισκευής ανέρχεται σε 43 ημέρες, περίπου, και αντιστοιχεί σε ποσοστό 43% του συνολικού χρόνου αντικατάστασης του κτηρίου, ο οποίος έχει προσδιορισθεί σε 100 ημέρες. Η εν λόγω διάρκεια ολοκλήρωσης των εργασιών επισκευής υποδηλώνει ότι τα στοιχεία του κτηρίου ενδέχεται να εμφανίζουν βλάβες μεσαίας έκτασης ή σε μέτριο αριθμό. Επιπλέον, από την καμπύλη διαπιστώνεται μεγάλη διασπορά του εκτιμώμενου μέσου χρόνου επισκευής, γεγονός που ερμηνεύεται ως ένδειξη αυξημένης αβεβαιότητας, όσον αφορά στην ακρίβεια της εκτίμησης. Συνεπώς, θεωρείται αρκετά πιθανή η υπέρβαση της εκτιμώμενης χρονικής διάρκειας των εργασιών επισκευής του κτηρίου, γεγονός που δυσχεραίνει τη δυνατότητα χρήσης του από τους ενοίκους του κατά το υπόψη χρονικό διάστημα.

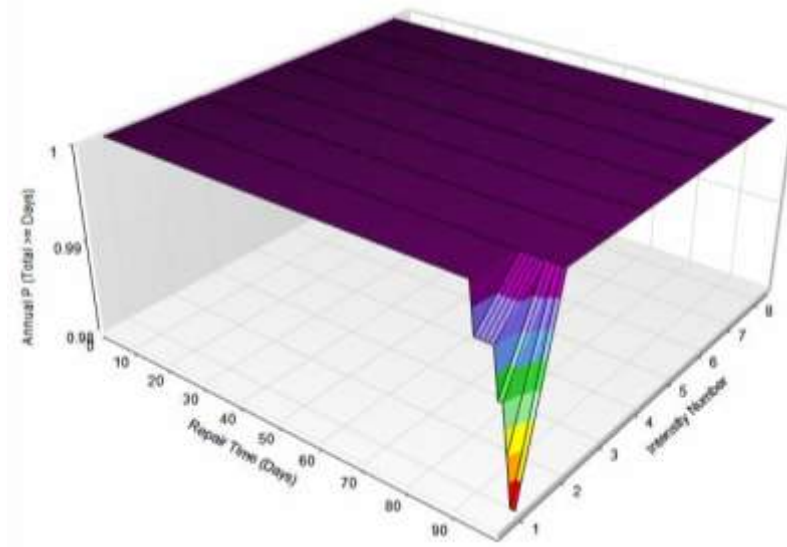
Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η πιθανότητα υπέρβασης του μέσου ετήσιου χρόνου επισκευής του κτηρίου.



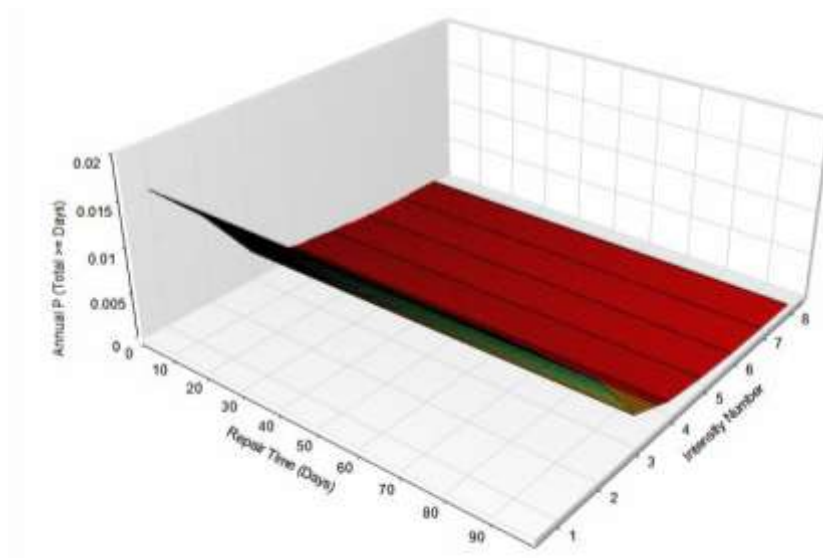
Εικόνα 34: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης χρόνου επισκευής ανά φόρτιση.

Από την ανωτέρω καμπύλη γίνεται αντιληπτό ότι, για τη φόρτιση υπ' αρ. 7 (Intensity 7), χρόνοι επισκευής μεγαλύτερης διάρκειας των 80 ημερών, εμφανίζουν σχετικά αυξημένη πιθανότητα, γεγονός που καθιστά δυσχερή τη διαμονή των ενοίκων του κτηρίου μέχρι την ολοκλήρωση των εργασιών επισκευής. Επιπλέον, για όλες τις υπόλοιπες φορτίσεις, η χρονική διάρκεια των εργασιών επισκευής εμφανίζει σταθερή πιθανότητα. Το γεγονός αυτό ελέγχεται ως αρνητικό, καθώς δεν μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλείς εκτιμήσεις για την ακριβή χρονική διάρκεια των εργασιών επισκευής. Επίσης, από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο μέσος ετήσιος χρόνος επισκευής ανέρχεται σε 2,3 εβδομάδες ή 17,5 ημέρες, περίπου.

Η πιθανότητα μη υπέρβασης του εκτιμώμενου μέσου ετήσιου χρόνου επισκευής, για το σύνολο των 8 φορτίσεων, αποτυπώνεται στις ακόλουθες τρισδιάστατες καμπύλες, εκ των οποίων η δεύτερη αποτελεί τη σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

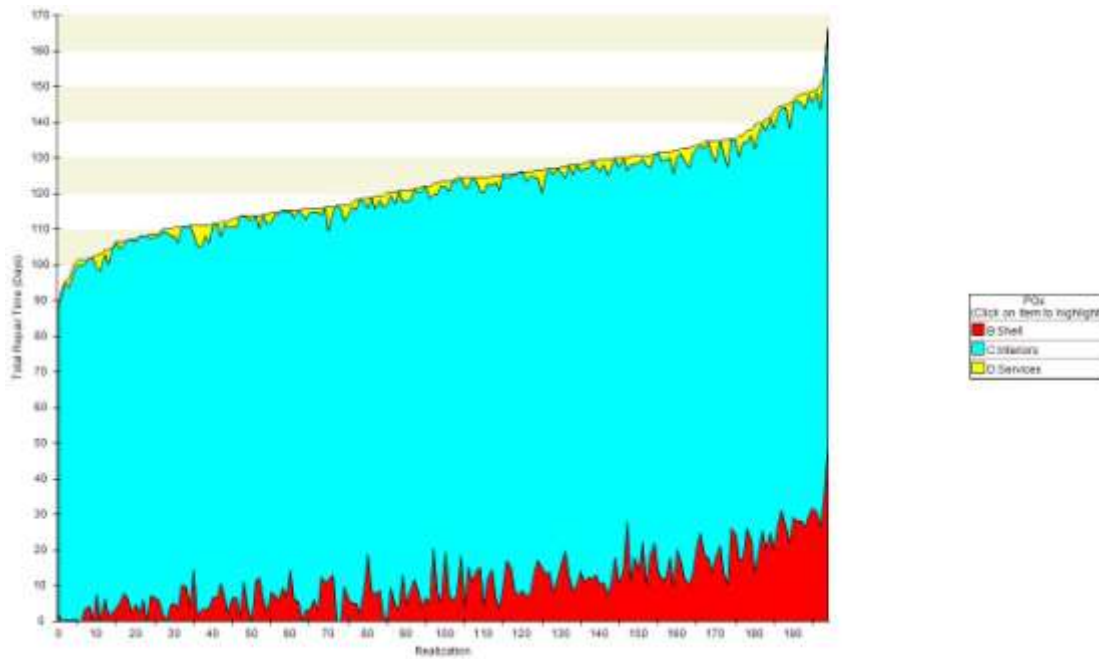


Εικόνα 35: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης χρόνου επισκευής.



Εικόνα 36: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης χρόνου επισκευής (σταθμισμένη).

Τέλος, στο ακόλουθο διάγραμμα εμφανίζονται ο μέσος εκτιμώμενος χρόνος επισκευής ανά επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας:



Εικόνα 37: Χρόνος επισκευής στοιχείου ανά επανάληψη.

Από την ανωτέρω καμπύλη επιβεβαιώνεται ότι τα εσωτερικά μη δομικά μέλη του κτηρίου είναι αυτά που αναμένεται να υποστούν τις περισσότερες βλάβες, με συνέπεια να απαιτήσουν και το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού χρόνου επισκευής. Αντίθετα, σχετικά ανθεκτικά εμφανίζονται τα δομικά μέλη, γεγονός που ερμηνεύεται ως ένδειξη ενσωμάτωσης αντίστοιχων υψηλών σχεδιαστικών προδιαγραφών στη μελέτη του κτηρίου.

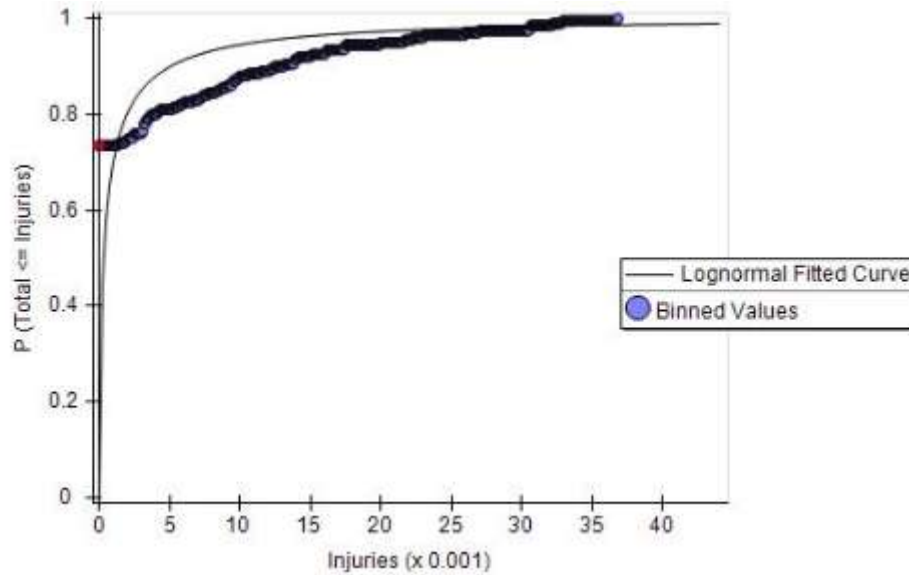
4.2.3. Θύματα (Casualties)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όσον αφορά στον αριθμό των εκτιμώμενων θυμάτων της σεισμικής δόνησης, εμπερικλείουν τραυματισμούς και θανάτους που αναμένεται να συμβούν εντός του κτηρίου και είναι τα ακόλουθα:

ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΙ (Injuries)

Για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, διευκρινίζεται ότι η έννοια του τραυματισμού κατά PACT εκτείνεται σε όλο το εύρος βαρύτητας του τραύματος, από το πλέον ελαφρύ έως το πλέον σοβαρό και, σε κάθε περίπτωση, συμπεριλαμβανομένων των τραυμάτων που χρήζουν ιατρικής φροντίδας εντός ή εκτός νοσηλευτικής μονάδας.

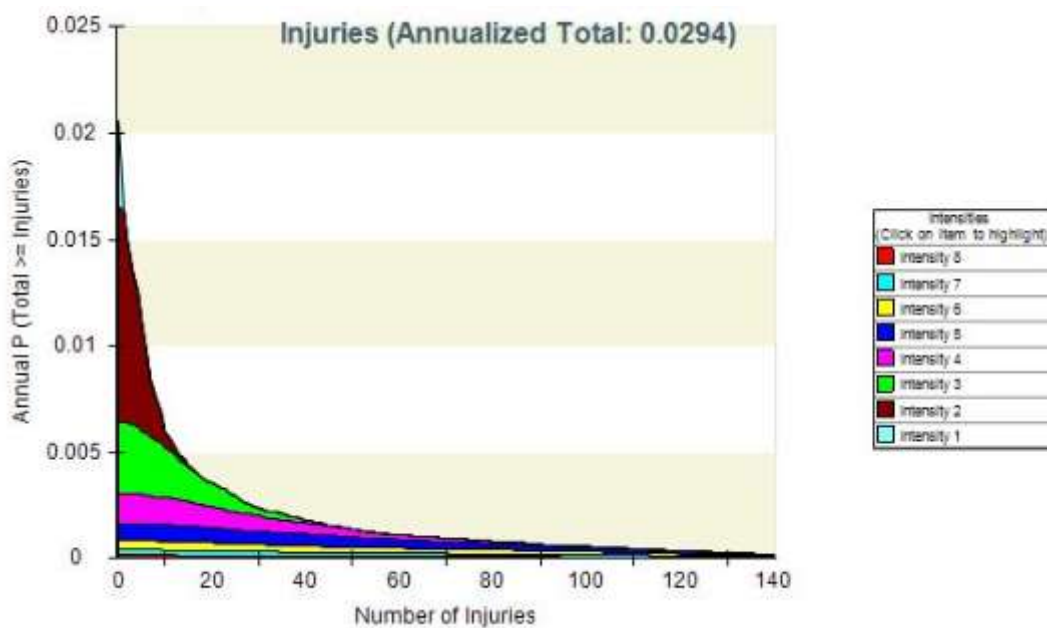
Το διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου αριθμού τραυματισμών είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 38: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου αριθμού τραυματισμών.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι, για μεγάλη πιθανότητα μη υπέρβασης, ο εκτιμώμενος μέσος αριθμός τραυματισμών είναι ουσιαστικά μηδενικός. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι, για σεισμικές δονήσεις με την επιλεγμένη ένταση, δεν αναμένεται να καταγραφούν τραυματισμοί. Επιπλέον, από την καμπύλη διαπιστώνεται περιορισμένη διασπορά του εκτιμώμενου μέσου αριθμού τραυματισμών, γεγονός που ερμηνεύεται ως ένδειξη σχετικά επαρκούς ακρίβειας της εκτίμησης.

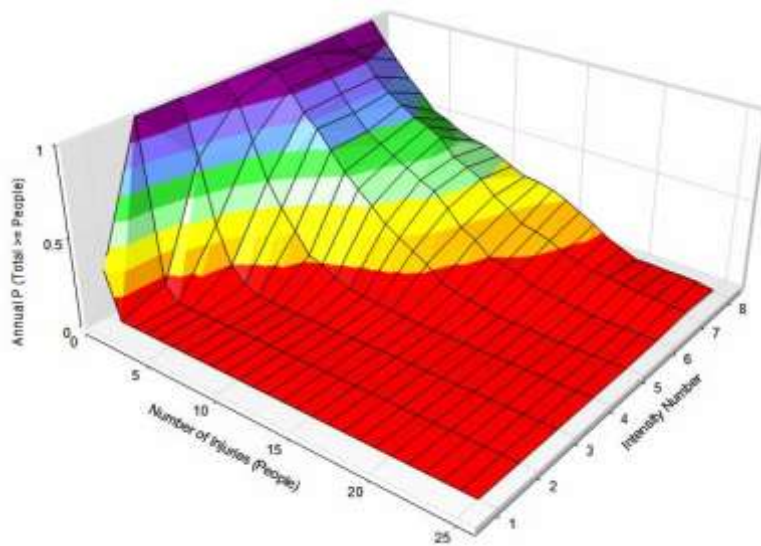
Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η πιθανότητα υπέρβασης του μέσου ετήσιου αριθμού τραυματισμών, ο οποίος εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 0,029 περίπου:



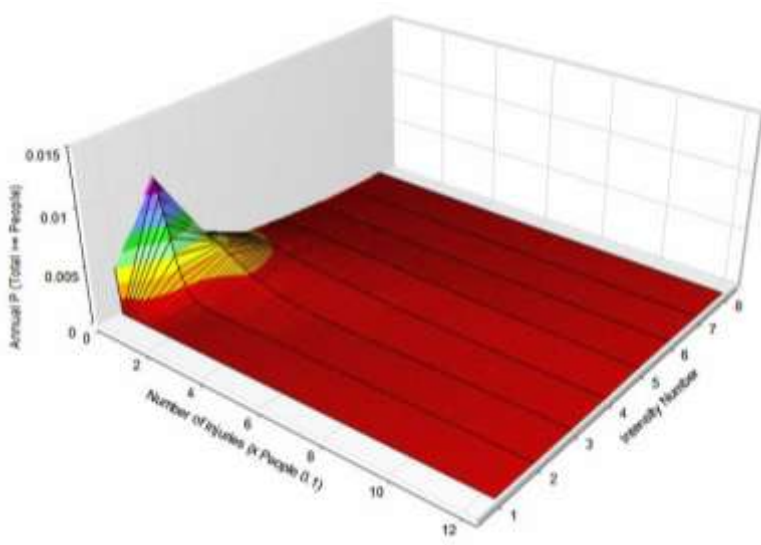
Εικόνα 39: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης αριθμού τραυματισμών ανά φόρτιση.

Από την καμπύλη προκύπτει ότι η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης αφενός είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των τραυματισμών, αφετέρου εμφανίζει σημαντική κλίση. Η τελευταία παρατήρηση επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που προαναφέρθηκε, σχετικά με το ότι η μελέτη του κτηρίου ενσωματώνει αξιόλογες προδιαγραφές ασφαλείας, συμβάλλοντας κατά επαρκή βαθμό στην προστασία ζωής των διαμενόντων σε αυτό.

Η πιθανότητα μη υπέρβασης του εκτιμώμενου μέσου ετήσιου αριθμού τραυματισμών, για το σύνολο των 8 φορτίσεων, αποτυπώνεται στις ακόλουθες τρισδιάστατες καμπύλες, εκ των οποίων η δεύτερη αποτελεί τη σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

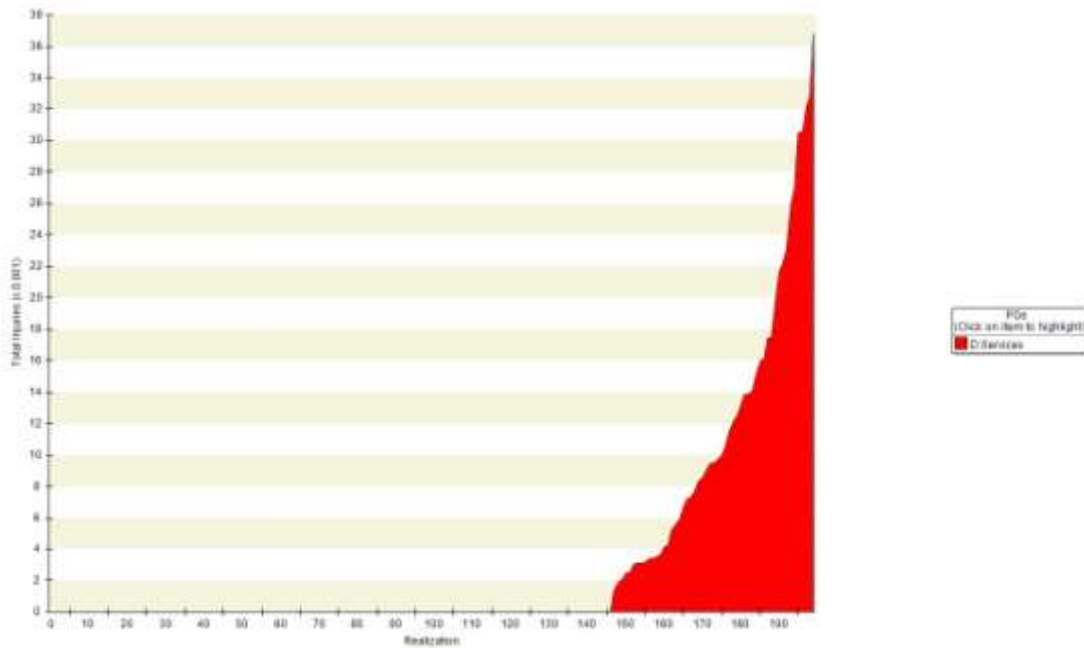


Εικόνα 40: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού τραυματισμών.



Εικόνα 41: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού τραυματισμών (σταθμισμένη).

Τέλος, στο ακόλουθο διάγραμμα εμφανίζονται ο μέσος εκτιμώμενος αριθμός τραυματισμών ανά επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας:

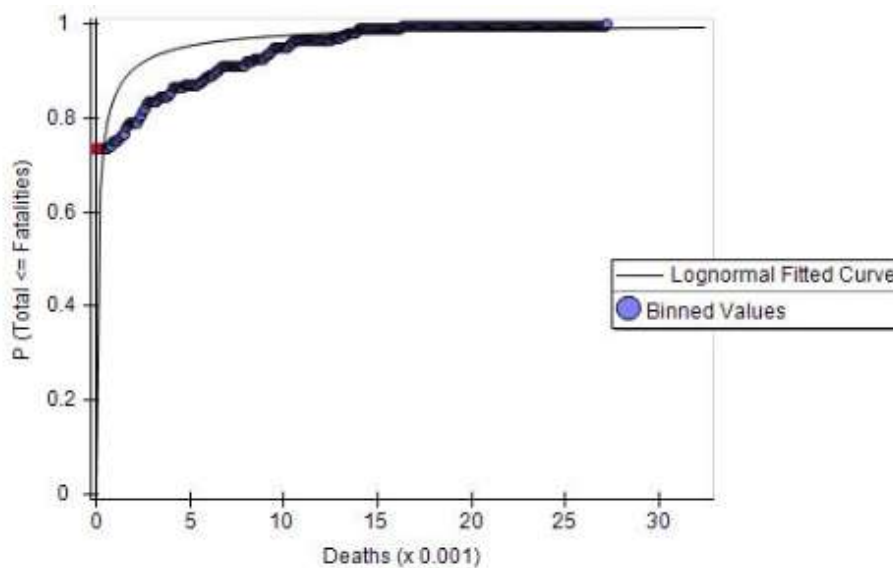


Εικόνα 42: Αριθμός τραυματισμών ανά επανάληψη.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι, σε περίπτωση καταγραφής τραυματισμών, εκτιμάται ότι αυτοί θα οφείλονται αποκλειστικά σε μη δομικά στοιχεία του κτηρίου, για ποσοστό 26% περίπου, εκ του συνόλου των 200 επαναλήψεων της υπολογιστικής διαδικασίας.

ΘΑΝΑΤΟΙ (Fatalities)

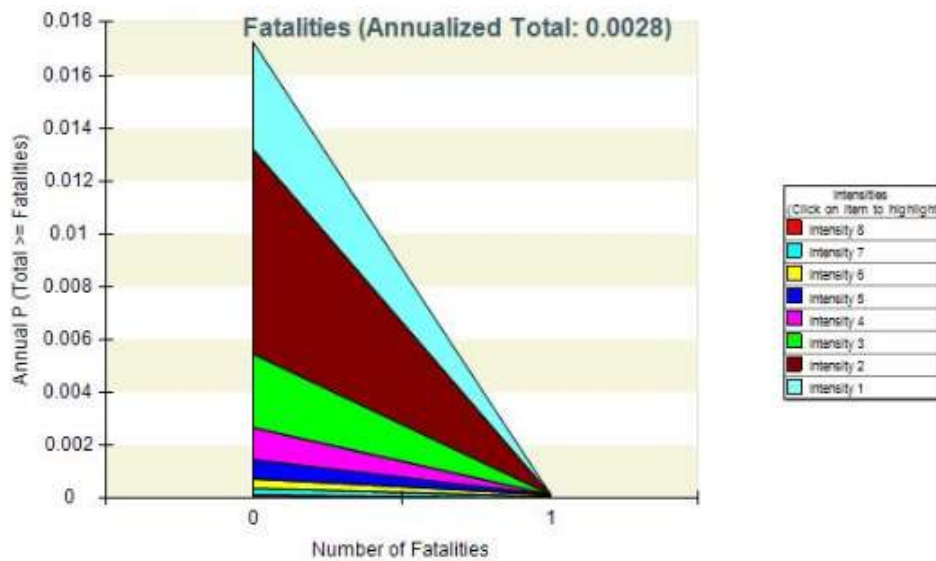
Το διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου αριθμού θανάτων είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 43: Διάγραμμα εκτιμώμενου μέσου αριθμού θανάτων.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι, για μεγάλη πιθανότητα μη υπέρβασης, ο εκτιμώμενος μέσος αριθμός θανάτων είναι ουσιαστικά μηδενικός. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι, για σεισμικές δονήσεις με την επιλεγμένη ένταση, δεν αναμένεται να καταγραφούν θάνατοι. Επιπλέον, από την καμπύλη διαπιστώνεται περιορισμένη διασπορά του εκτιμώμενου μέσου αριθμού θανάτων, γεγονός που ερμηνεύεται ως ένδειξη σχετικά επαρκούς ακρίβειας της εκτίμησης.

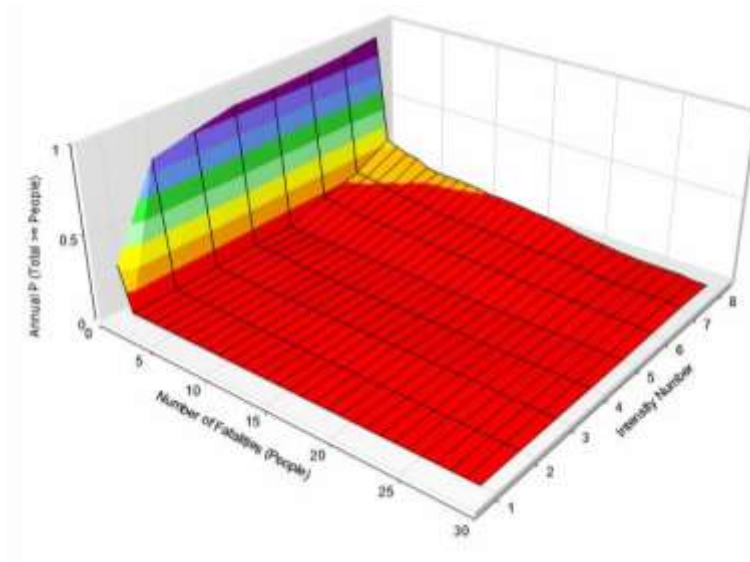
Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η πιθανότητα υπέρβασης του μέσου ετήσιου αριθμού θανάτων, ο οποίος εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 0,003 περίπου:



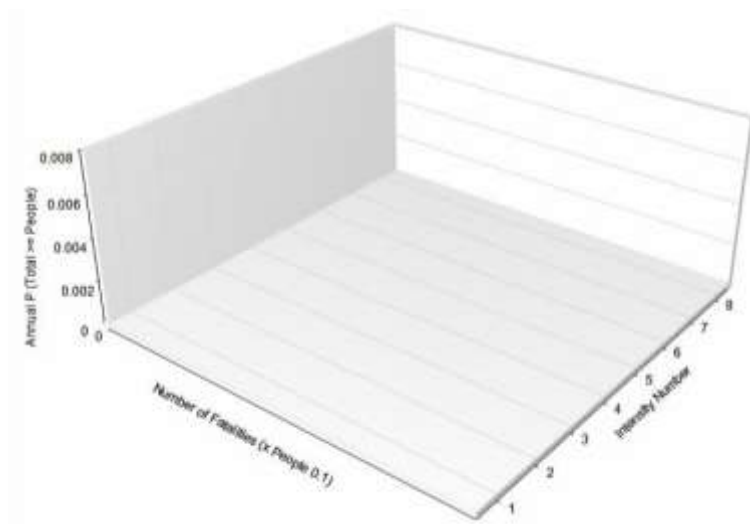
Εικόνα 44: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης αριθμού θανάτων ανά φόρτιση.

Και από την ανωτέρω καμπύλη προκύπτει ότι η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης αφενός είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των θανάτων, αφετέρου εμφανίζει σημαντική κλίση. Η τελευταία παρατήρηση επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που προαναφέρθηκε για την αντίστοιχη καμπύλη των τραυματισμών, σχετικά με το ότι η μελέτη του κτηρίου ενσωματώνει αξιόλογες προδιαγραφές ασφαλείας, συμβάλλοντας κατά επαρκή βαθμό στην προστασία ζωής των διαμενόντων σε αυτό.

Η πιθανότητα μη υπέρβασης του εκτιμώμενου μέσου ετήσιου αριθμού θανάτων, για το σύνολο των 8 φορτίσεων, αποτυπώνεται στις ακόλουθες τρισδιάστατες καμπύλες, εκ των οποίων η δεύτερη αποτελεί τη σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

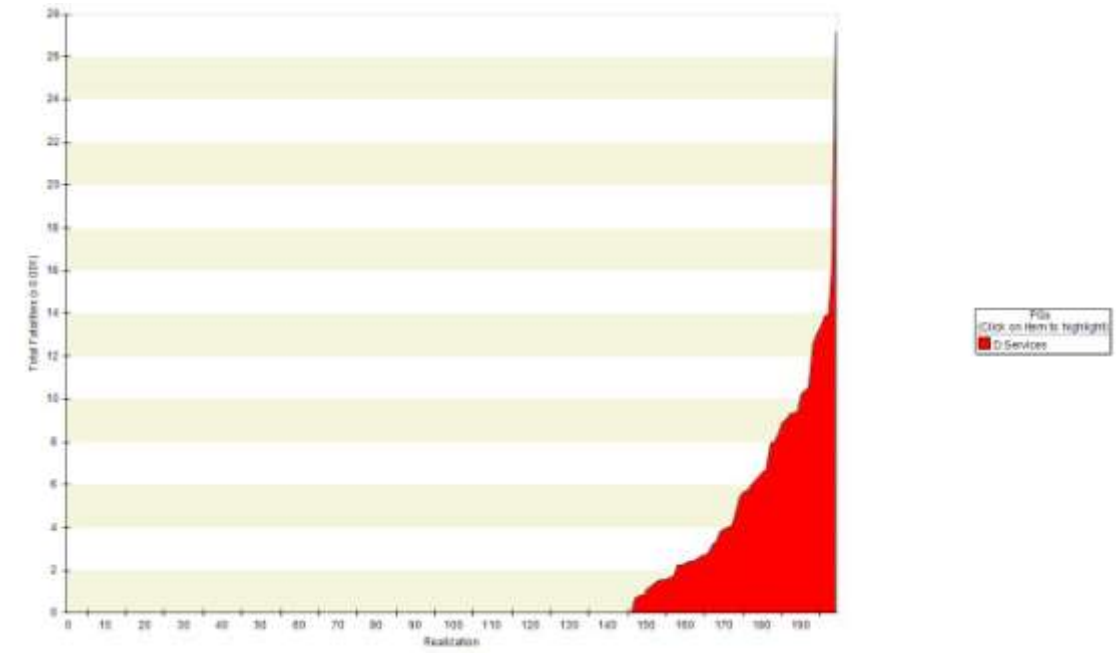


Εικόνα 45: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού θανάτων.



Εικόνα 46: Καμπύλη ετήσιας πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού θανάτων (σταθμισμένη).

Τέλος, στο ακόλουθο διάγραμμα εμφανίζονται ο μέσος εκτιμώμενος αριθμός θανάτων ανά επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας:

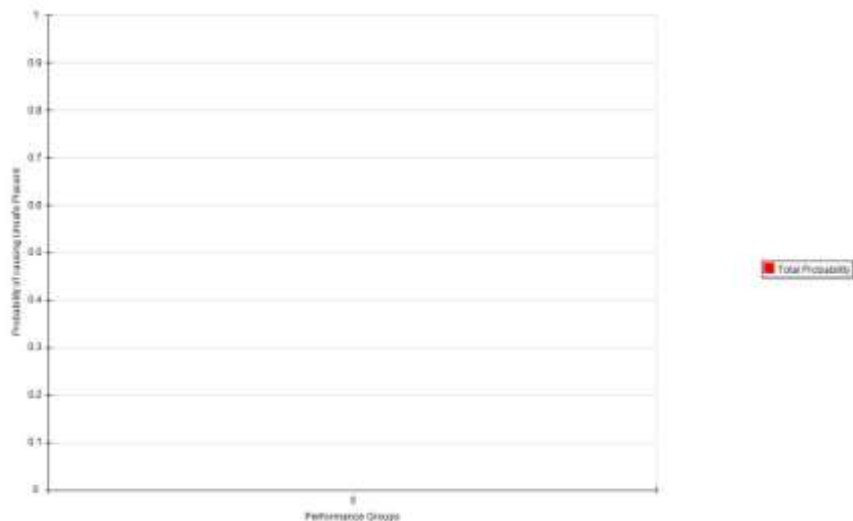


Εικόνα 47: Αριθμός θανάτων ανά επανάληψη.

Από την ανωτέρω καμπύλη διαπιστώνεται ότι, σε περίπτωση καταγραφής θανάτων, εκτιμάται ότι αυτοί θα οφείλονται αποκλειστικά σε μη δομικά στοιχεία του κτηρίου, για ποσοστό 26% περίπου, εκ του συνόλου των 200 επαναλήψεων της υπολογιστικής διαδικασίας.

4.2.4. Επισφαλή στοιχεία (Unsafe Placards)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τρωτότητας και εκτίμησης απωλειών δεν απέδωσαν στοιχεία πιθανής εμφάνισης επισφαλών στοιχείων του κτηρίου, για καμία από τις φορτίσεις που εξετάστηκαν. Συνεπώς, το σχετικό διάγραμμα παρατίθεται μόνο για λόγους πληρότητας.



Εικόνα 48: Διάγραμμα εμφάνισης επισφαλών στοιχείων ανά ομάδα απόδοσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Γενικά συμπεράσματα

Με το τελευταίο αυτό Κεφάλαιο ολοκληρώνεται η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας. Βασικό αντικείμενό της αποτέλεσε η εκτίμηση απωλειών λόγω σεισμού για ένα πολυώροφο κτήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος με χρήση κατοικίας, η μελέτη του οποίου εκπονήθηκε με μέριμνα του πρώην Οργανισμού Εργατικής Κατοικίας. Το υπόψη κτήριο επιλέχθηκε με το σκεπτικό ότι αποτελεί τυπική περίπτωση κτηρίου εν χρήσει, καθώς εντοπίζεται σε μεγάλο αριθμό, είτε υπό τη μορφή που παρουσιάστηκε είτε με ποικίλες παραλλαγές και τροποποιήσεις μικρής κλίμακας, σε οργανωμένους οικισμούς αρκετών περιοχών της Ελληνικής επικράτειας.

Επικουρικά προς τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το φάκελο της μελέτης του κτηρίου, προκειμένου να προσδιορισθούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του και να απομονωθούν πληροφορίες για τη διαμόρφωση του στατικού συστήματος και των δομικών και μη δομικών μελών του. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τη δημιουργία μαθηματικού προσομοιώματος, το οποίο αναλύθηκε με εφαρμογή μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης σε κατάλληλα επιλεγμένο λογισμικό. Στοιχεία της ανάλυσης αξιοποιήθηκαν στη συνέχεια ως δεδομένα που εισήχθησαν στο ηλεκτρονικό εργαλείο PACT, με το οποίο πραγματοποιήθηκε η κυρίως ανάλυση τρωτότητας και εκτίμησης απωλειών.

Υπενθυμίζεται, σε αυτό το σημείο, ότι τα στοιχεία των δομικών και μη δομικών μελών, που καταχωρήθηκαν προς ανάλυση, δεν ταυτίζονται σε όλες τις περιπτώσεις (εν μέρει ή στο σύνολό τους) με τα πραγματικά στοιχεία του κτηρίου, μέρος των οποίων δεν περιλαμβάνεται στη σχετική βάση δεδομένων του PACT. Ωστόσο, επιλέχθηκε η καταχώρηση αντίστοιχων στοιχείων της εν λόγω βάσης δεδομένων, προκειμένου να υπάρχει μία, ίσως όχι απολύτως ακριβής, αλλά κατά το δυνατόν πληρέστερη εικόνα της διαδικασίας εκτίμησης των απωλειών που αναμένεται να καταγραφούν στο κτήριο.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 4. Συνοψίζοντας τα εν λόγω σχόλια, μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα:

1. **Όσον αφορά στο κόστος επισκευής:** διαπιστώνεται ότι, κατά το 1/2 των περιπτώσεων εκδήλωσης σεισμικής δόνησης με την ένταση που εξετάσθηκε, το εκτιμώμενο μέσο κόστος επισκευής (\$860.000) ανέρχεται σε ποσοστό σχεδόν 100% του συνολικού κόστους αντικατάστασης του κτηρίου (\$867.593). Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις, το κόστος επισκευής δεν μπορεί να θεωρηθεί αποκλειστικό κριτήριο λήψης απόφασης για

επισκευή ή ανακατασκευή του κτηρίου, στα πλαίσια αντιμετώπισης των βλαβών που αναμένεται να εκδηλωθούν. Σε κάθε περίπτωση, για λόγους ολοκληρωμένης θεώρησης των υπόψη βλαβών, προτείνεται η συνεκτίμηση πρόσθετων κριτηρίων, πριν από την επιλογή και εφαρμογή της ενδεδειγμένης στρατηγικής.

2. **Όσον αφορά στο χρόνο επισκευής:** διαπιστώνεται ότι, κατά το 1/2 των περιπτώσεων εκδήλωσης σεισμικής δόνησης με την ένταση που εξετάσθηκε, ο εκτιμώμενος μέσος χρόνος επισκευής (43 ημέρες περίπου) ανέρχεται σε ποσοστό 43% του συνολικού χρόνου αντικατάστασης του κτηρίου (100 ημέρες, περίπου). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει έμμεσα την εκδήλωση βλαβών σχετικά μεσαίας έκτασης ή σε μέτριο αριθμό, για μία στις δύο σεισμικές δονήσεις. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακριβής εκτίμηση του χρόνου επισκευής δεν είναι απολύτως εφικτή, καθώς υπερβάσεις του εν λόγω χρόνου εμφανίζουν σταθερή πιθανότητα εκδήλωσης, καθιστώντας δυσχερή την παράλληλη χρήση του κτηρίου από τους ενοίκους του, κατά τη διάρκεια των εργασιών επισκευής.
3. **Όσον αφορά στα θύματα:** διαπιστώνεται ότι ο αριθμός τραυματισμών και θανάτων που αναμένεται να καταγραφούν εντός του κτηρίου είναι εξαιρετικά μικρός. Περαιτέρω, ενδεχόμενοι τραυματισμοί και θάνατοι εκτιμάται ότι θα οφείλονται αποκλειστικά σε μη δομικά στοιχεία του κτηρίου, για το 1/4 περίπου εκ του συνόλου των 200 επαναλήψεων της υπολογιστικής διαδικασίας.
4. **Όσον αφορά στα επισφαλή στοιχεία:** δεν θεωρείται πιθανή η εμφάνιση επισφαλών στοιχείων στο κτήριο, για καμία από τις φορτίσεις που εξετάσθηκαν. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις ανωτέρω παρατηρήσεις για τους επιμέρους δείκτες απωλειών, και λόγω της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που αποτυπώνεται στα σχετικά διαγράμματα, επιβεβαιώνει την ενσωμάτωση επαρκών προδιαγραφών ασφαλείας στη μελέτη του κτηρίου που αναλύθηκε. Συνεπώς, από τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν διαφαίνεται να υφίσταται σοβαρός κίνδυνος για τους ενοίκους του κτηρίου, κατά την καταπόνησή του από σεισμό.

5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πέραν του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει το ερευνητικό σκέλος των ανωτέρω αποτελεσμάτων, εξίσου σημαντική θα μπορούσε να είναι και η πρακτική αξιοποίησή τους από την Πολιτεία ή άλλο αρμόδιο Δημόσιο ή Ιδιωτικό φορέα. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί μία βασική πτυχή της ανάλυσης: η πλήρης και αξιόπιστη προσαρμογή των αποτελεσμάτων στα δεδομένα των κτηρίων της Ελληνικής επικράτειας.

Η παρατήρηση αυτή θεωρείται εύλογη, καθώς πηγάζει πρωτογενώς από την ίδια την προέλευση του PACT. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο, το ηλεκτρονικό αυτό εργαλείο αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, με συνεργασία ομάδων Επιστημόνων της FEMA και του ATC, βασιζόμενο για την τεκμηρίωσή του σε παλαιότερα εθνικά Κανονιστικά κείμενα και στατιστικά στοιχεία. Ως εκ τούτου, οι πληροφορίες που έχουν συμπεριληφθεί στη βάση δεδομένων του αφορούν σε υλικά και είδη δόμησης που είναι τυπικά και χαρακτηριστικά μεν για τα Αμερικανικά δεδομένα, όπως λ.χ. εσωτερικά χωρίσματα από γυψοσανίδες, δεν απαντώνται όμως στα Ελληνικά κτήρια με την ίδια συχνότητα ή στον ίδιο βαθμό. Επιπλέον, χαρακτηριστικά υλικά και τύποι δόμησης των Ελληνικών κτηρίων, όπως λ.χ. οπτοπλινθοδομή, δεν συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων του PACT διότι δεν χρησιμοποιούνται στα Αμερικανικά κτήρια.

Συνεπώς, η αξιόπιστη χρήση του PACT εντός των ορίων της Ελλάδας προϋποθέτει κατ' αρχήν τροποποίηση των παραμέτρων της βάσης δεδομένων του, προκειμένου να συμπεριληφθούν σε αυτή στοιχεία και λοιπά συνήθη δομικά χαρακτηριστικά των Ελληνικών κτηρίων, όπως αυτά που προαναφέρθηκαν. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εκτιμώμενες απώλειες περιορίζονται στο εσωτερικό των αναλυόμενων κτηρίων, περαιτέρω εξέλιξη του αλγόριθμου θα μπορούσε να εξετασθεί, έτσι ώστε διερευνηθεί η δυνατότητα εκτίμησης απωλειών στον άμεσο εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο. Σε αυτά τα πλαίσια, θα μπορούσε να ελεγχθεί η δυνατότητα συνεργασίας με την Ελληνική Στατιστική Αρχή, προκειμένου να δημιουργηθεί ιδιαίτερη βάση δεδομένων με στοιχεία κτηρίων της Ελληνικής επικράτειας τα οποία να μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω του PACT για εκτίμηση χωρικών απωλειών και δημιουργία σχετικών εξειδικευμένων χαρτών.

Τέλος, άμεσο πρακτικό ενδιαφέρον διαφαίνεται στη διερεύνηση των διαφοροποιήσεων που παρουσιάζει η εκτίμηση σεισμικών απωλειών μεταξύ των διαφορετικών λογισμικών του είδους, τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Σε αυτή την περίπτωση, θα μπορούσε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα εκτίμησης απωλειών για το ίδιο κτήριο, τα οποία θα έχουν προκύψει με χρήση λ.χ. του ELER ή του HAZUS. Κατ' επέκταση, εάν διατίθενται στατιστικά στοιχεία παρελθόντων ετών για σεισμούς που έπληξαν το κτήριο και προκάλεσαν απώλειες, τα στοιχεία αυτά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την εξέλιξη του σχετικού αλγορίθμου του PACT, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του και αυξάνοντας την αξιοπιστία του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- 1) Αναστασιάδης Κ. (2008): Η εξέλιξη των αντισεισμικών κανονισμών – Ένας αιώνας συνεχούς βελτίωσης της αντισεισμικής ασφάλειας. Άρθρο στο: *30 χρόνια μετά το σεισμό της Θεσσαλονίκης – Μνήμες και προοπτική*. Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- 2) Κολομβάκης Σ. (2018): Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών με εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. – Χρονικός και οικονομικός προγραμματισμός. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. Πάτρα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- 1) Alexander D. (1996): The health effects of earthquakes in the mid-1990s. *Disasters*, Vol. 20(3), pp. 231-247.
- 2) Anagnos T., Kiremidjian A. S. (1984): Stochastic Time- Predictable Model for Earthquake Occurrences. *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol. 74(6), pp. 2593-2611.
- 3) Applied Technology Council (1985): ATC-13 - Earthquake Damage Evaluation Data for California. Redwood City, California. Applied Technology Council.
- 4) Applied Technology Council (1991): Seismic Vulnerability and Impact of Disruption on Lifelines in the Conterminous United States. ATC-2S. Redwood City, California. Applied Technology Council.
- 5) Applied Technology Council (2018a): FEMA P-58 Next-generation Seismic Performance Assessment for Buildings, Volume 1 – Methodology, Second Edition. Prepared by the Applied Technology Council (ATC) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA). Washington D.C.
- 6) Applied Technology Council (2018b): FEMA P-58 Next-generation Seismic Performance Assessment for Buildings, Volume 2 – Implementation Guide, Second Edition. Prepared by the Applied Technology Council (ATC) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA). Washington D.C.
- 7) Algermissen S.T., McGrath M.B., Hanson S. L. (1978): Development of a Technique for the Rapid Estimation of Earthquake Losses. USGS Open File Report 78-440. Reston, Virginia. United States Geological Survey.

- 8) Ballantyne D.B., Berg E., Kennedy J., Reneau R., Wu D. (1990): Earthquake Loss Estimation Modeling of the Seattle Water System, K/J/C 886005.00. Federal Way, Washington. Kennedy/Jenks/Chilton.
- 9) Barosh P.J., et al. (1981): The Seismicity of New England and the Earthquake Hazard in Massachusetts. Massachusetts Civil Defense Agency.
- 10) Bernreuter D.L., Savy J.B., Mensing R.W., Chung D.H. (1987): Development of Eastern United States Ground Motion Models. Report NUREG/GR-3756. Washington D.C. United States Nuclear Regulatory Agency.
- 11) Bonilla M.G., Mark R.K., Lienkaemper J.J. (1984): Statistical Relations Among Earthquake Magnitude, Surface Rupture Length, and Surface Fault Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 74(6), pp. 2379-2412.
- 12) Boore D.M, Joyner W. B. (1991): Estimation of Ground Motion at Deep-Soil Sites in Eastern North America. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 81(6), pp.2167-2185.
- 13) Chou Y. J., Huang N., Lee C.H., Tsai S.L., Chen L.S., Chang H.J. (2004): Who is at risk of death in an earthquake? American Journal of Epidemiology, Vol. 160(7), pp. 688-695.
- 14) Demircioglu M.B., Erdik M., Hancilar U., Harmandar E., Kamer Y., Sesetyan K., Tuzun C., Yenidogan C., Zulfikar A.C. (2010): Technical Manual and User's Guide – Earthquake Loss Estimation Routine ELER v3.0. Bogazici University Istanbul, Department of Earthquake Engineering. Turkey.
- 15) Doocy S., Daniels A., Packer C., Dick A., Kirsch T.D. (2013): The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. PLoS Curr. 2013.
- 16) Doocy S., Daniels A., Aspilcueta D. (2009): Mortality and injury following the 2007 Ica earthquake in Peru. American Journal of Disaster Medicine, Vol. 4(1), pp. 15-22.
- 17) Evernden J.F., Thomason J.M. (1988): Predictive Model for Important Ground Motion Parameters Associated with Large and Great Earthquakes. USGS Bulletin 1838.
- 18) Evernden J.F., Kohler W. M., Clow G. D. (1975): Seismic Intensities of Earthquake of Conterminous United States - Their Prediction and Interpretation. USGS Professional Paper 1223.
- 19) Federal Emergency Management Agency (1997a): NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273. Washington D.C., United States.

- 20)** Federal Emergency Management Agency (1989): Estimating losses from future earthquakes (Panel report and technical background). Prepared by the Panel of Earthquake Loss Estimation Methodology, Committee on Earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems and National Research Council for Federal Emergency Management Agency. Washington DC.
- 21)** Federal Emergency Management Agency (1994): Assessment of the state-of-the-art earthquake loss estimation methodologies. Prepared by Risk Management Software Inc. (RMS) and California University for Research in Earthquake Engineering (CUREe) for the National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency. Washington DC.
- 22)** Federal Emergency Management Agency (2000): Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356. Prepared by American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia, United States.
- 23)** Federal Emergency Management Agency (2005): Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440. Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project). Washington D.C., United States.
- 24)** Federal Emergency Management Agency (2003): HAZUS-MH MR4 Technical Manual. Washington D.C., United States.
- 25)** Frankel A. (1993): Three-dimensional Simulations of Ground Motions in the San Bernardino Valley, California, for Hypothetical Earthquakes on the San Andreas Fault. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 83(4), pp. 1020-1041.
- 26)** Freeman J.R. (1932): Earthquake damage and earthquake insurance: studies of a rational basis for earthquake insurance, also studies of engineering data for earthquake-resisting construction. McGraw-Hill. New York, 1st edition.
- 27)** Furumoto A.S., Lum W., Nielsen N.N., Yamamoto J.T. (1980). A Study of Earthquake Losses in the Honolulu Area: Data and Analysis. Honolulu, Hawaii. Hawaii Department of Defense.
- 28)** Gunturi S. (1993): Building-specific earthquake damage estimation. Ph.D. thesis, John A. Blume Earthquake Engineering Center. Dept. of Civil Engineering, Stanford University. Stanford, CA.
- 29)** Jaiswal K., Eeri M., Wald D., Porter K. (2010): A Global Building Inventory for Earthquake Loss Estimation and Risk Management. Earthquake Spectra - Vol. 26(3).

- 30)** Hanks T.C., McGuire R. K. (1981): The Characteristic of High-Frequency Strong Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71(6), pp. 2071-2095.
- 31)** Kagan Y.Y., Jackson D. (1999): Worldwide doublets of large shallow earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89(5), pp. 1147-1155.
- 32)** Keefer D.K., Wilson R.C. (1989): Predicting Earthquake-Induced Landslides, with Emphasis on Arid and Semi-Arid Environments. *Publications of the Inland Geological Society*, Vol. 2, pp. 118-149.
- 33)** Kennedy R.P., Cornell C.A., Campbell R.L., Kaplan S., Perla H.F. (1980): Probabilistic Seismic Safety of an Existing Nuclear Power Plant. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 59(2), pp. 315-338.
- 34)** Kircher C.A., Reitherman R.K., Whitman R.V., Arnold C. (1997): Estimation of earthquake losses to buildings. *Earthquake Spectra*, Vol. 13(4), pp. 703-720.
- 35)** Kiremidjian A.S. (1984): Reliability of Structures Subjected to Differential Fault Slip. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol. 12, pp. 608-611.
- 36)** Liang N.J., Shih Y.T., Shih F.Y., Wu H.M., Wang H.J., Shi S.F., et al. (2001): Disaster epidemiology and medical response in the chi-chi earthquake in Taiwan. *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 38(5), pp. 549-555.
- 37)** Marulanda M.C., Carreño M.L., Cardona O.D., Ordaz M.G., Barbat A.H. (2013): Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain. *Nat. Hazards* Vol. 69, pp. 59–84.
- 38)** Oppenheim I. (1984): Modeling Earthquakes -Induced Fire Loss. *Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. VII, pp. 777-784. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice-Hall, Inc.
- 39)** Park Y.J., Ang A.H.S. (1985): Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 111(4), pp. 722-739.
- 40)** Peek-Asa C., Kraus J.F., Bourque L., Vimalachandra D., Yu J., Abrams J. (1998): Fatal and hospitalized injuries resulting from the 1994 Northridge Earthquake. *International journal of epidemiology*, Vol. 27(3), pp. 459-465.
- 41)** Peek-Asa C., Ramirez M., Seligson H., Shoaf K.I. (2003): Seismic, structural, and individual factors associated with earthquake related injury Injury. *Prevention*, Vol. 9, pp. 62-66.

- 42)** Porter K.A., Kiremidjian A.S. (2001): Assembly-based vulnerability of buildings and its uses in seismic performance evaluation and risk management decision-making. Report No 309, John A. Blume Earthquake Engineering Center. Stanford University. Stanford, CA.
- 43)** Reitherman R. (1985): A review of earthquake damage estimation methods. *Earthquake Spectra*, Vol. 1(4), pp. 805-847.
- 44)** Ritter J., Dupre W. (1972): Maps Showing Areas of Potential Inundation by Tsunamis in the San Francisco Bay Region. California. USGS MF 480.
- 45)** Scholl R.E. (1979): Seismic damage assessment for high-rise buildings: annual technical report. URS/John A. Blume & Associate Inc. San Francisco, CA.
- 46)** Shoaf K.I., Sareen G.S., Nguyen L.H., Bourque L.B. (1998): Injuries as a result of California earthquakes in the past decade. *Disasters* Vol. 22(3), pp. 218-235.
- 47)** Silva V., Crowley H., Pagani M., Monelli D., Pinho R. (2014): Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat. Hazards*, Vol. 72, pp. 1409–1427.
- 48)** Singhal A., Kiremidjian A.S. (1996): A method for earthquake motion-damage relationships with application to reinforced concrete frames. Report No 119, John A. Blume Earthquake Engineering Center. Dept. of Civil Engineering, Stanford University. Stanford, CA.
- 49)** Spence R. (2007): Saving lives in earthquakes: Successes and failures in seismic protection since 1960. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5(2), pp. 139-251.
- 50)** Steinbrugge K.V., McClure F., Snow A.J. (1969): Studies on seismicity and earthquake damage statistics. Prepared for the US Coast and Geodetics Survey, Dept. of housing and urban development. Washington DC.
- 51)** Steinbrugge K.V. (1982): Earthquakes, volcanoes and tsunamis: an anatomy of hazards. Skandia America Group, 1st edition. New York.
- 52)** Taylor C.E. (1986): A Systems Approach to Wasatch Front Seismic Risk Problems. San Francisco, California. Dames and Moore.
- 53)** Thiel Jr. C.C., Zsutty T.C. (1987): Earthquake Parameters and Damage Statistics. San Francisco, California. Forell/Elesser Engineers.

- 54)** Tung A.T.Y., Wong F. S., Dong W. (1993): A Neural Network Based MMI Attenuation Model. Proceedings, 1993 National Earthquake Conference, Vol. I, pp. 205-214. Memphis, Tennessee. Central United States Earthquake Consortium.
- 55)** Urban Regional Research (1988): Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunami Hazard Areas. Prepared for the National Science Foundation.
- 56)** Whitman R.V., Reed J., Hong S.-T. (1973): Earthquake Damage Probability Matrices. Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2. International Association for Earthquake Engineering. Rome, Italy.
- 57)** Woodward-Clyde Consultants in association with Booker Associates Inc. (1990): Draft-Report of Seismic Condition Survey, Vol. 1. Prepared for the Illinois Department of Transportation (IOT), Bureau of Bridges and Structures, WCC Project No. 89C8623.
- 58)** Youd T., Tinsley J., Perkins D., King E., Preston R. (1978): Liquefaction Potential Map of San Fernando Valley, California. Proceedings, 2nd International Conference on Microzonation, Vol. I, pp. 267-78. Oakland, California. Earthquake Engineering Research Institute.
- 59)** Youd T.L., Perkins D.M. (1987): Mapping of Liquefaction Severity Index. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol. 113(11), pp. 1374-1392.