

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«Σεισμική Τρωτότητα και απώλειες»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας  
Οικονόμου Αθανασίας

A.M. 24

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
Πνευματικός Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου  
Δυτικής Αττικής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Νικόλαο Πνευματικό, επίκουρο καθηγητή στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για την ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την άψογη συνεργασία, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου προσέφερε για την υλοποίησή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Δημάκο, διευθυντή του προγράμματος καθώς και όλους τους καθηγητές που συμμετείχαν στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και μοιράστηκαν μαζί μας τις γνώσεις και τις εμπειρίες τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν δίπλα μου το διάστημα αυτό, με στήριξαν και μου έδωσαν τεράστια δύναμη να συνεχίσω και να καταφέρω να ολοκληρώσω τη διπλωματική αυτή εργασία.

Μέλη τριμελούς εξεταστικής επιτροπής

Επιβλέπων Καθηγητής: Πνευματικός Νικόλαος

Δ/ντής Π.Μ.Σ.: Δημάκος Κωνσταντίνος

Μέλος επιτροπής: Ρεπαπής Κωνσταντίνος

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Οικονόμου Αθανασία του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 24 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑ» του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 30/11/2021 και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Η Δηλούσα  
ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ



**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	14
I. Γενικά14	
II. Αποτελέσματα και σκοπός της Πτυχιακής Εργασίας .....	15
III. Η ακολουθούμενη μεθοδολογία και οι μέθοδοι συλλογής δεδομένων.....	15
IV. Η δομή της Πτυχιακής Εργασίας .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ.....	18
1.1. Παράγοντες επιρροής της σεισμικής τρωτότητας .....	18
1.2. Τα αίτια εκδηλώσεως της σεισμικής τρωτότητας κατασκευών .....	19
1.2.2. Η Επιφανειακή διάρρηξη.....	24
1.2.3. Θαλάσσιοι κυματισμοί (Τσουνάμι) .....	27
1.3. Διαθέσιμες μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας.....	30
1.3.1. Οι εμπειρικές μέθοδοι .....	31
1.3.2. Οι αναλυτικές μέθοδοι.....	32
1.3.3. Οι κατηγοριοποιητικές μέθοδοι .....	34
1.3.4. Οι μέθοδοι εκτίμησης και επιθεώρησης .....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΩΛΕΙΕΣ .....	36
2.1. Ερευνητικές μέθοδοι και μοντέλα εκτίμησης απωλειών .....	36
2.1.1. Οι ερευνητικές εργασίες εκτίμησης κτιριακών απωλειών (Κτιριακές) ..	37
2.1.2. Οι ερευνητικές εργασίες εκτίμησης χωρικών απωλειών (Χωρικές) .....	39
2.1.3. Μεθοδολογία HAZUS.....	41
2.1.4. Οι επιβληθέντες περιορισμοί της διαδικασίας εκτίμησης απωλειών....	44
2.2. Τα διαθέσιμα Λογισμικά Προγράμματα εκτίμησης απωλειών .....	45
2.2.1. Το Λογισμικό Κεντρικής Αμερικανικής Πιθανοτικής Εκτίμησης Τρωτότητας (CAPRA).....	46

2.2.2. Το λογισμικό πρόγραμμα OpenQuake .....	48
2.2.3. Το λογισμικό πρόγραμμα Seismic Loss Estimation using a Logic Tree Approach (SELENA).....	49
2.2.4. Το λογισμικό Earthquake Loss Estimation Routine (ELER).....	51
2.2.5. HAZUS-MH.....	53
2.3. Υπολογισμός απωλειών και αποτίμηση συμπεριφοράς με βάση τη μεθοδολογία FEMA .....	55
2.3.1. FEMA P-58 (Seismic Performance Assessment of Buildings).....	56
2.3.2. Το εργαλείο εκτίμησης υπολογισμού απόδοσης PACT (Performance Assessment Calculation Tool) .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	61
3.1.Επιλογή και δομικά χαρακτηριστικά κτηρίου.....	61
3.2. Διαδικασία προσομοίωσης κτηρίου .....	64
3.2.1.Δεδομένα Κτηριακού Έργου.....	65
3.2.2.Κτηριακά δεδομένα .....	66
3.2.3. Δεδομένα πληθυσμού.....	69
3.2.4.Ορισμός τρωτοτήτων δομικών μελών.....	71
3.2.5.Ομάδες απόδοσης.....	75
3.2.6.Ορισμός της τρωτότητας στο επίπεδο της κατάρρευσης .....	76
3.3.Αποτελέσματα δομικής ανάλυσης.....	77
3.4.Απομένουσες σχετικές μετακινήσεις ανώτερης στάθμης κτηρίου ( <i>Residual Drift</i> ).....	78
79	
3.5.Χάραξη καμπύλων επικινδυνότητας ( <i>Hazard Curve</i> ).....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	81

---

4.Γενικά Σχόλια.....	81
4.2.Κριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	81
4.2.1.Κόστος επισκευής ( <i>Repair Cost</i> ).....	82
4.2.2.Επισκευαστικοί χρόνοι.....	87
4.2.3.Θύματα .....	90
4.2.4.Επισφαλή στοιχεία ( <i>Unsafe Placards</i> ).....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	100
5.1. Γενικά συμπεράσματα .....	100
5.2. Συστάσεις προς μελλοντική διερεύνηση .....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	104

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 1: Απεικόνιση της πιθανότητας περιόδου επαναφοράς επιφανειακής διάρρηξης σε υποθετική περιοχή, (Πηγή: Youd et al., 1978) .....	25
Εικόνα 2: Αποτύπωση της σχετικής ευπάθειας σε επιφανειακή διάρρηξη λόγω ρευστοποίησης σε ορισμένη περιοχή, (Πηγή: Youd et al., 1978).....	26
Εικόνα 3: Αποτύπωση του μηχανισμού δημιουργίας ενός τσουνάμι, (Πηγή: International Tsunami Information Center, UNESCO) .....	28
Εικόνα 4: Η δημιουργία ενός Τσουνάμι συνέπεια σεισμού, (Πηγή: International Tsunami Information Center, UNESCO) .....	29
Εικόνα 5: Απεικόνιση του Μοντέλου πιθανοτικής ανάλυσης και εφαρμογών διαχείρισης κινδύνου, (Πηγή: Cardona et al, 2012).....	47
Εικόνα 6: Απεικόνιση διαγράμματος ροής ανασχεδιασμού σε υφιστάμενες υποδομές, (Πηγή: Silva et al, 2014).....	48
Εικόνα 7: Απεικόνιση του διαγράμματος ροής του SELENA, (Πηγή: SELENA Εγχειρίδιο χρήστη, 2010) .....	50
Εικόνα 8: Απεικόνιση των τριών επιπέδων ανάλυσης του ELER, (Πηγή: ELER v3.0 manual, 2010) .....	52
Εικόνα 9: Απεικόνιση διαγράμματος ροής της μεθοδολογίας υπολογισμού σεισμικών απωλειών, (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης Λογισμικού HAZUS MR4, 2003) .....	54
Εικόνα 10: Απεικόνιση Διαγράμματος ροής FEMA P-58, (Πηγή: FEMA, 2018) ....	56
Εικόνα 11: Πίνακας Δομικών στοιχείων με βάση τη μεθοδολογία FEMA P-58, (Πηγή: FEMA, 2018).....	57
Εικόνα 12: Πίνακας απεικόνισης κτιριακών χρήσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία FEMA P-58, (Πηγή: FEMA, 2018).....	58
Εικόνα 13: Απεικόνιση της Διαδικασίας αποτίμησης κτιρίων με το εργαλείο PACT, (Πηγή: FEMA, 2018) .....	60
Εικόνα 11: <b>Κάτοψη – Τυπικός Όροφος.</b> ....	62
Εικόνα 12: <b>Κατά μήκος τομή.</b> .....	63
Εικόνα 13: <b>Αριθμός σταθμών και αντίστοιχο ύψος του σύμφωνα με το λογισμικό PACT.</b> (Πηγή: FEMA, 2018b).....	66
Εικόνα 14: <b>Κατανομή κατοίκων κτηρίου ανά ημέρα και ανά ώρα σε κάθε τυπικό</b>	



όροφο.....	70
Εικόνα 15: Σχήμα ωριαίας κατανομής κατοίκων κτηρίου μελέτης ανά τυπικό όροφο .....	70
Εικόνα 16: Κατανομή κατοίκων κτηρίου ανά μήνα για τυπικό έτος ανά τυπική στάθμη.....	71
Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης του ενδεχόμενου υπέρβασης στα κατασκευαστικά έξοδα για κάθε φόρτιση.....	83
Εικόνα 21: Σχήμα επισκευαστικού κόστους ταξινομημένο για κάθε βασική υποομάδα απόδοσης.....	84
Εικόνα 22: Τρισδιάστατη καμπύλη απεικόνισης ετήσιας πιθανότητας σχετικά με τη μη υπέρβαση των ετησίων επισκευαστικών εξόδων.....	85
Εικόνα 23: Τρισδιάστατη καμπύλη πιθανότητας σε ετήσια βάση για τη μη υπέρβαση επισκευαστικών εξόδων (σταθμισμένη καμπύλη) .....	86
Εικόνα 24: Διαμόρφωση επισκευαστικού κόστους σε κάθε επανάληψη υπολογισμού .....	86
Εικόνα 25: Καμπύλη υπολογισθείσας μέσης διάρκειας επισκευών .....	87
Εικόνα 26: Καμπύλη πιθανότητας να υπάρξει υπέρβαση επισκευαστικών χρόνων σε κάθε περίπτωση φόρτισης.....	88
Εικόνα 27: Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης της πιθανότητας ανά έτος για την μη υπέρβαση στη διάρκεια των επισκευαστικών εργασιών.....	89
Εικόνα 28: Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης της πιθανότητας ανά έτος για την μη υπέρβαση στη διάρκεια των επισκευαστικών εργασιών (σταθμισμένη μορφή) .....	89
Εικόνα 29: Επισκευαστικοί χρόνοι δομικών στοιχείων σε κάθε υπολογιστική επανάληψη .....	90
Εικόνα 30: Καμπύλη εκτίμησης μέσου αριθμού τραυματισμών. ....	91
Εικόνα 31: Καμπύλη πιθανότητας να υπάρξει υπέρβαση στον απόλυτο αριθμό τραυματιών σε κάθε φόρτιση.....	92
Εικόνα 32: Διάγραμμα πιθανότητας σε ετήσια βάση για την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού ατόμων που τραυματίστηκαν.....	93
Εικόνα 33: Διάγραμμα πιθανότητας σε ετήσια βάση για την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού ατόμων που τραυματίστηκαν.....	93
Εικόνα 34: Τραυματίες σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.....	94

Εικόνα 35: Καμπύλη εκτίμησης μέσου αριθμού θανάτων .....	95
Εικόνα 36: Καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης αριθμού θανάτων με ταξινόμηση για κάθε φόρτιση.....	96
Εικόνα 37: Διάγραμμα ετήσιου ενδεχομένου σχετικό με την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού νεκρών .....	97
Εικόνα 38: Διάγραμμα ετήσιου ενδεχομένου σχετικό με την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού νεκρών (σταθμισμένη μορφή) .....	97
Εικόνα 39: Αριθμός νεκρών σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.....	98
Εικόνα 40: Καμπύλη παρουσίας επισφαλών μελών για κάθε ομάδα απόδοσης .....	99

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1: Οι τυπολογίες των κτιρίων με τη μεθοδολογία HAZUS, (Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003) .....	42
Πίνακας 2: Οι διάφορες κατηγορίες χρήσεων της μεθοδολογίας HAZUS, (Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003) .....	43
Πίνακας 3: Ομάδες τρωτότητας για τα μη δομικά μέλη του κτηρίου .....	74
Πίνακας 4: Δομικά μέλη Performance Groups .....	76

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 1: Αναπαράσταση προβλέψιμης χρονικά σεισμικής συμπεριφοράς .....	21
Σχήμα 2: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου, (Πηγή: Tung et al, 1993).....	23
Σχήμα 3: Ο συσχετισμός μεγέθους σεισμού με το μήκος της επιφανειακής διάρρηξης, επι διαφόρων τύπων ρήγματος, (Πηγή: Bonilla et al., 1984) .....	24
Σχήμα 4: Συγκεντρωτικό μέσο κόστος για τις ομάδες απόδοσης του φέροντος οργανισμού .....	83

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής είναι η εκτίμηση των αναμενόμενων απωλειών εντός ενός κτηρίου (εσωτερικά) κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης ορισμένου μεγέθους κατά την μεθοδολογία FEMA P-58. Στα πλαίσια της έρευνας που πρόκειται να διεξαχθεί και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται, γίνεται τεκμηριωμένη επιλογή (σε συνάρτηση με το μελετητικό φάκελο), ένα τυπικό κτίριο από Ω/Σ (διώροφο ή τριώροφο αναλόγως των στοιχείων που θα αντληθούν), σχετικά χαμηλού ύψους, (πιθανόν να επιλεγθεί το κτίριο να έχει και υπόγειο και pilotis). Σε πρώτη φάση, η οικοδομή θα αναλυθεί με τη μέθοδο της ανάλυσης time history (γραμμική δυναμική ανάλυση) ούτως ώστε να βρούμε τα κύρια παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη. Εν συνεχεία, τα μεγέθη που θα προκύψουν καθώς και τα υπόλοιπα δεδομένα που χρειαζόμαστε και διάφορες τιμές παραμέτρων που θα επιλεγθούν καταλλήλως, θα εισαχθούν στο ελεύθερο λογισμικό PACT (έχει ήδη γίνει download στο ακόλουθο Link <https://femap58.atcouncil.org/pact>). Στο λογισμικό αυτό θα είναι εφικτό να γίνει η ανάλυση τρωτότητας και η εύρεση των ενδεχόμενων σεισμικών απωλειών, όπως ορίζει η επιλεγμένη μεθοδολογία. Κατά το πέρας της ανάλυσης αναμένεται να εξαχθούν αποτελέσματα που σχετίζονται σε πιθανές απώλειες οι οποίες πρόκειται να εκφραστούν σε όρους ανθρωπίνων απωλειών (θάνατοι ή/και τραυματισμοί), χρόνου επισκευών, κόστους επισκευών και δομικών στοιχείων που καθίστανται επισφαλή. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν σε σχέση με το ποια πιθανότητα έχουν όσον αφορά την εμφάνισή τους και ταυτόχρονα θα δοθούν και κάποιες χαρακτηριστικές τους τιμές. Εν τέλει, στο πλαίσιο διερεύνησης πιθανής εφαρμογής στην πράξη των εξαγομένων αποτελεσμάτων, θα διατυπωθούν συστάσεις για μελλοντική έρευνα.

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

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### I. Γενικά

Εντός του περιβάλλοντος διαρκούς δραστηριότητας και εξελίξεως, όπως αυτό έχει επικρατήσει ως καθημερινή πραγματικότητα στον πλανήτη μας, εντοπίζουμε και την εκδήλωση ποικίλων φυσικών φαινομένων, όπως το σεισμικό φαινόμενο. Οι σεισμικές αυτές εντάσεις λαμβάνουν χώρα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη μας, με αρκετά σημαντική συχνότητα, κατατάσσοντας τα σεισμικά φαινόμενα σε κυρίαρχη θέση μεταξύ των λοιπών φυσικών φαινομένων, τα οποία προκαλούν ιδιαίτερα σημαντικές συνεπαγόμενες απώλειες. Το γεγονός αυτό επιτάσσει την εξεύρεση τρόπων και μέσων προς ελαχιστοποίηση τόσο των υλικών, όσο και των ανθρώπινων απωλειών από ενδεχόμενο σεισμό.

Υπό την σκοπιά αυτή, στις μελέτες εκτίμησης κινδύνων σεισμού αρχικά επιχειρείται η εκτίμηση των κινδύνων οι οποίοι προέρχονται από τα σεισμικά φαινόμενα, ενώ ακολούθως επιχειρείται ο υπολογισμός των προκαλούμενων απωλειών, με κυρίαρχο θέμα την διαπίστωση των παραγόντων τρωτότητας σε συγκεκριμένη περιοχή ή κτίριο, τη διαπίστωση της έκθεσης των ανθρώπων και των δομικών υλικών σε σεισμικά φαινόμενα και φυσικά ο υπολογισμός πρόκλησης πιθανών υλικών φθορών και απωλειών ζωής ως παράγωγο της τρωτότητας κατασκευής σε ενδεχόμενη σεισμική φόρτιση. Οι υλικές φθορές και απώλειες υπολογίζονται σε έμμεσο κόστος εξαιτίας της μείωσης ή της διακοπής δραστηριοτήτων παραγωγής και σε άμεσο κόστος εξαιτίας της ανάγκης αποκατάστασης των φθορών που προκλήθηκαν. Οι ανθρώπινες απώλειες εξετάζονται σε αναμενόμενο αριθμό θυμάτων, ο οποίος κατ' επέκταση διακρίνεται περαιτέρω σε τραυματίες και σε νεκρούς.

Κατά τη διεξαγωγή ανάλυσης τρωτότητας κατασκευών, επιβάλλεται αρχικά η διενέργεια έρευνας προς προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου και προς λεπτομερή καταγραφή υποβαλλόμενων στο σεισμικό κίνδυνο υλικών και εμπύχων, διαδικασία η οποία αναδεικνύει την πολυδιάστατη φύση της ανάλυσης τρωτότητας, επιβάλλοντας την ταυτόχρονη αξιολόγηση δημογραφικών, μηχανικών, οικονομικών, σεισμολογικών και τέλος δημογραφικών δεδομένων, ενσωματώνοντας τα δεδομένα αυτά βάσει ακολουθούμενης μεθοδολογίας σε ένα μοντέλο.

## II. Αποτελέσματα και σκοπός της Πτυχιακής Εργασίας

Διενεργώντας την ανάλυση τρωτότητας και για τις ανάγκες διαπίστωσης των απωλειών που επιφέρει το σεισμικό φαινόμενο, εξετάζουμε τους προαναφερόμενους παράγοντες και παραθέτουμε περιγραφικά τις δημοφιλέστερες ακολουθούμενες μεθοδολογικές προσεγγίσεις. Κατόπιν, για τον υπολογισμό των απωλειών, επιλέγουμε τη μεθοδολογία FEMA P-58 για την ανάλυση του πολυωρόφου κτιρίου με τη χρήση PACT.

Στόχος αποτελεί η διαπίστωση ενδεχόμενων απωλειών και η εκτίμησή τους στο επιλεγμένο κτίριο, ως αποτέλεσμα της σεισμικής φόρτισης, σε σχέση με τις ενδεχόμενες βλάβες ανθρώπων, τον χρόνο και το κόστος αποκατάστασης των προκαλούμενων φθορών. Ακολουθεί η κατά είδος παρουσίαση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός των πιθανοτικών τιμών αυτών και του εύρους πεδίου του.

Εν κατακλείδι, σκοπός είναι η διαπίστωση πιθανού συσχετισμού μεταξύ των κατηγοριών των ενδεχόμενων απωλειών και η διαπίστωση συνεπίδρασης των παραγόντων αυτών στη σεισμική απόκριση του εξεταζόμενου κτιρίου, με απώτερο στόχο την απόδοση κατανοητών απαντήσεων σχετικά με τα εξής ερωτήματα:

- Είναι ενδεχομένως επιβεβλημένη η εκκένωση του εξεταζόμενου κτιρίου, εξαιτίας αστοχίας κρίσιμων στοιχείων;
- Ποιος είναι ο αριθμός των θυμάτων, τα οποία ενδεχομένως να καταγραφούν στο κτίριο, λόγω των προξενούμενων από το σεισμικό φαινόμενο φθορών;
- Ποιο είναι το απαιτούμενο χρονικό διάστημα αποκατάστασης των προξενηθέντων ζημιών, και κατά πόσο επηρεάζεται η χρήση του κτηρίου;
- Σε ποια επίπεδα κυμαίνεται η δαπάνη αποκατάστασης των υλικών φθορών;

## III. Η ακολουθούμενη μεθοδολογία και οι μέθοδοι συλλογής δεδομένων

Η εφαρμοζόμενη στη παρούσα εργασία μεθοδολογία αποτελείται από δυο στάδια.

- Το στάδιο περιγραφικής παρουσίασης της θεωρητικής εννοιολογικής βάσης της τρωτότητας με επίκεντρο το σεισμικό φαινόμενο, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι καθοριστικοί παράγοντες, οι οποίοι το βαθμό τρωτότητας των

κατασκευών και ταυτόχρονα διαπιστώνονται οι συνέπειες και η έκταση των ενδεχόμενων απωλειών, τις οποίες επιφέρει η τρωτότητα αυτή, σε άμεσες και έμμεσες υλικές και έμψυχες απώλειες.

- Το στάδιο επιλογής πολυωρόφου κτιρίου κατοικίας οπλισμένου σκυροδέματος προς εφαρμογή της μεθοδολογίας FEMA P-58, με ταυτόχρονη χρήση του εργαλείου PACT, προς διαπίστωση των απωλειών ως συνέπεια σεισμικής διέγερσης. Με τη χρήση του εργαλείου PACT επιτυγχάνεται η διαμόρφωση του προσομοιώματος του κτιρίου, όπου καθορίζεται η θέση, ο αριθμός και ο βαθμός τρωτότητας δομικών στοιχείων και μη, ενώ διαπιστώνεται ο βαθμός της αναμενόμενης βλάβης των στοιχείων αυτών. Τα παραγόμενα αποτελέσματα προσφέρουν μια εκτίμηση του αριθμού των ανθρωπίνων απωλειών και του χρόνου και του κόστους επισκευής των υλικών απωλειών και των φθορών.

#### **IV. Η δομή της Πτυχιακής Εργασίας**

Στο 1ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται μια εννοιολογική περιγραφική ανάλυση της σεισμικής τρωτότητας και των παραγόντων που σχετίζονται με την ύπαρξή της και οι οποίοι επιφέρουν την εκδήλωσή της, διαμορφώνοντας και επέκταση τις επιπτώσεις της και γίνεται παρουσίαση των μεθόδων εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας και διαπίστωσης ενδεχόμενων απωλειών.

Στο 2ο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μεθόδων υπολογισμού, οι οποίες οδηγούν, είτε βάσει σεισμικής επικινδυνότητας, είτε βάσει αναλυτικού εύρους, στη διαμόρφωση μεθόδων ποσοτικής διερεύνησης της τρωτότητας κατασκευής, ενώ παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις λειτουργικές αρχές των πλέον διαδεδομένων λογισμικών εκτίμησης απωλειών.

Στο 3ο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και επιλογή του κτιρίου της μελέτης περίπτωσης. Σύμφωνα με την ακολουθούμενη μεθοδολογία και τις κτιριακές προδιαγραφές, διενεργείται εκτίμηση πιθανών απωλειών ανάλυση σεισμικής τρωτότητας κατά FEMA P-58, με τη συνδυαστική χρήση του εργαλείου PACT.

Στο 4ο Κεφάλαιο διενεργείται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσεως



σχετικά με τις εκτιμώμενες ενδεχόμενες απώλειες εξαιτίας του σεισμικού φαινομένου, τόσο σε υλικές φθορές αναφορικά με το οικονομικό κόστος και το χρόνο αποκατάστασης αυτών, όσο και σχετικά με τον ενδεχόμενο αριθμό πιθανών θυμάτων. Κατόπιν επεξηγούνται οι προκύπτουσες τιμές και επιχειρείται η διαπίστωση πιθανών συσχετισμών.

Στο 5ο Κεφάλαιο γίνεται, συμπερασματικά, παράθεση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης σεισμικής τρωτότητας και προτείνονται πιθανά αντικείμενα μελλοντικής έρευνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

### 1.1. Παράγοντες επιρροής της σεισμικής τρωτότητας

Κατά τη διεξαγωγή μελετών εκτιμήσεων απωλειών σε ενδεχόμενο σεισμό σε περιοχές ή κατασκευές επιχειρείται η διαπίστωση των καθοριστικών για το βαθμό τρωτότητας του αντικειμένου παραγόντων, μέσα από την απομόνωση και ανάδειξη των σχέσεων των ενδεχόμενων απωλειών με τα εντατικά μεγέθη του σεισμού, όπως για παράδειγμα η απόσταση από το επίκεντρο (Liang et al., 2001). η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και η ένταση (Shoaf et al., 1998). Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως ο συγκεντρωτικός αριθμός των απωλειών σε δεδομένη σεισμική φόρτιση διαμορφώνεται ως συνολικό αποτέλεσμα της πολλαπλής και ταυτόχρονης επίδρασης διαφορετικών και σημαντικού αριθμού παραγόντων. Πέραν των ειδικών φυσικών χαρακτηριστικών τα οποία διακρίνουν τη σεισμική δόνηση, ο συνολικός βαθμός και αριθμός των πιθανών απωλειών εξαρτάται παράλληλα και από το επίπεδο ανάπτυξης της πληγείσας περιοχής, καθώς αναλόγως της οικονομικής κατάστασης της κοινωνίας της περιοχής η οποία εξετάζεται, προκύπτει και η αντίστοιχη τεχνολογική εξέλιξη, η οποία κατ' επέκταση οδηγεί στη χρήση βελτιωμένων υλικών κατά την δόμηση, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των κατασκευών σε ενδεχόμενο σεισμό.

Για παράδειγμα η Ιαπωνία και η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας αποτελούν δυο γειτνιάζουσες χώρες, οι οποίες πλήττονται συστηματικά από έντονα σεισμικά φαινόμενα. Κατ' ερμηνεία των πιο πρόσφατων εκδηλωθέντων σεισμικών φαινομένων στις δυο αυτές χώρες προκύπτει πως η Κίνα, παρά το γεγονός πως πλήττεται από σεισμικά φαινόμενα μικρότερης εντάσεως και συχνότητας από ότι η Ιαπωνία, εντούτοις καταγράφει μεγαλύτερα ποσοστά έμψυχων και υλικών απωλειών εξαιτίας σεισμού. Παρεμφερή αποτελέσματα παρατηρούνται και κατά την συγκριτική εξέταση της Νέας Ζηλανδίας και της Ινδίας. Οι διαπιστώσεις αυτές αναδεικνύουν αφενός την διασύνδεση της οικονομικής κατάστασης και της τεχνολογικής προόδου με τον ανθρώπινο παράγοντα (το επίπεδο εκπαίδευσης, ετοιμότητας, διαχείρισης και αντίδρασης σε σεισμικά φαινόμενα) και κατά συνέπεια του κοινωνικού επιπέδου της μελετώμενης περιοχής, καθώς ειδικά ποιοτικά χαρακτηριστικά των κοινωνιών, όπως είναι η ηλικία, το φύλο, τα ήθη και η

νοοτροπία, καθορίζουν και τον εκάστοτε βαθμό διαχείρισης του σεισμικού φαινομένου. Έχει παρατηρηθεί σε παλαιότερες περιπτώσεις πως οι οικονομικά ή κοινωνικά ασθενείς χώρες παρουσιάζουν μη επαρκείς βαθμούς αντίδρασης και διαχείρισης φυσικών καταστροφών (π.χ. σεισμός της Αϊτής 2010)

## **1.2. Τα αίτια εκδηλώσεως της σεισμικής τρωτότητας κατασκευών**

Οι διαθέσιμες διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησης των επιπτώσεων της σεισμικής τρωτότητας χαρακτηρίζονται από πολυδιάστατες προσεγγίσεις, επιχειρώντας αναλόγως της εφαρμοζόμενης μεθόδου, είτε να παρέχουν προβλέψεις σχετικά με την ενδεχόμενη αστάθεια του εδάφους λαμβάνοντας υπόψιν την ρευστοποίηση του εδάφους συμπεριλαμβανομένης της εδαφικής ρήξης και της κατολισθήσεως, είτε διερευνούν την τρωτότητα του εδάφους ως απόρροια της κίνησής του κατά τη διάρκεια σεισμού, είτε διερευνούν πιθανά πλυμμυρικά γεγονότα στην περιοχή/κατασκευή μελέτης ως συνέπεια των σεισμικών φαινομένων.

### **1.2.1. Κίνηση εδάφους**

Θεωρητικά η εδαφική κίνηση μελετάται με τη διαμόρφωση μαθηματικών προσομοιωμάτων τα οποία συγκροτούνται είτε πιθανολογικά, είτε αιτιοκρατικά. Στην πιθανολογική προσέγγιση επιχειρείται η διαπίστωση της πιθανότητας εκδήλωσης μελλοντικών συμβάντων, η αναγνώριση της πηγής σεισμικού φαινομένου, η ενδεχόμενη αλληλεπίδραση ανωδομής και εδάφους και η εξασθένηση της εδαφικής κινήσεως.

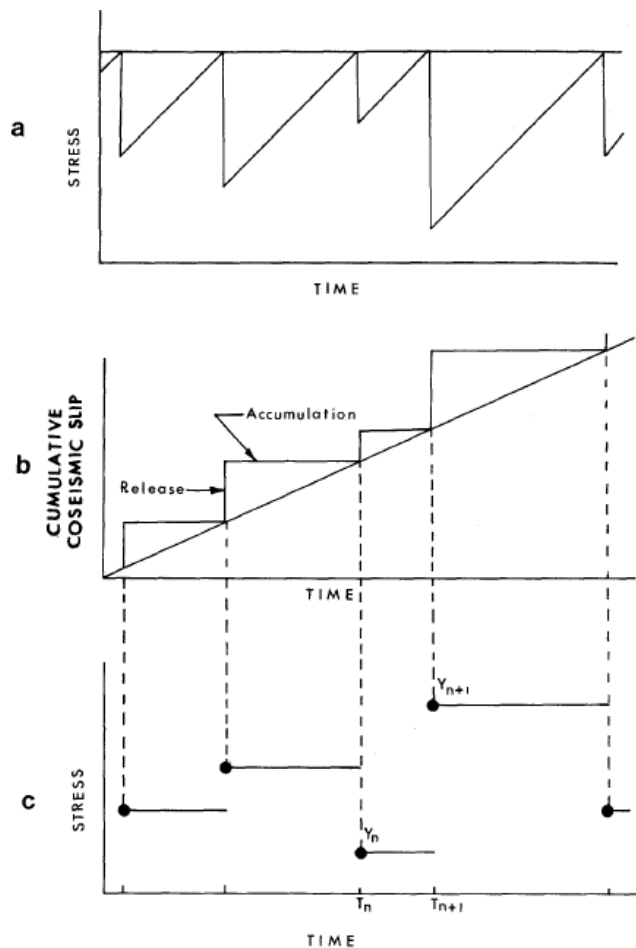
Στην αιτιολογική προσέγγιση επιχειρείται η αναγνώριση της πηγής σεισμικού φαινομένου, η ενδεχόμενη αλληλεπίδραση ανωδομής και εδάφους και η εξασθένηση της εδαφικής κινήσεως.

Πέραν των ειδικών χαρακτηριστικών τα οποία τις διακρίνουν, οι πιθανολογικές και αιτιολογικές μέθοδοι διακρίνονται σε δυο επιμέρους κατηγορίες. Σε εκείνες οι οποίες αφορούν ολοκληρωμένη (επι κάθε επιπέδου) αντιμετώπιση, τις ονομαζόμενες ως ολοκληρωμένες μεθοδολογικές προσεγγίσεις και σε εκείνες οι οποίες

επικεντρώνουν στην ανάλυση και αντιμετώπιση επιμέρους σταδίων, τις επιμέρους μεθοδολογικές προσεγγίσεις.

Όταν διενεργούμε ανάλυση τρωτότητας σε μια περιοχή με εδαφική κίνηση, το υπό διαμόρφωση μοντέλο επιχειρεί την ερμηνεία της συχνότητας κατά την οποία εμφανίζονται τα σεισμικά φαινόμενα. Οι πηγές των σεισμών αυτών μπορεί να είναι είτε γραμμικές ή σημειακές πηγές, οι οποίες περιορίζονται εδαφικά σε έκταση, είτε να εκτείνονται σε μία ευρεία περιοχή, παρουσιάζοντας ομοιογενή σεισμογενή, αλλά και εδαφικά χαρακτηριστικά. Τα πιά σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η ακριβής οριοθέτηση και ο, όσο το δυνατόν, σωστότερος προσδιορισμός της πηγής της σεισμικής διεγέρσεως., καθώς οι δύο αυτές πληροφορίες, συμβάλλουν στον καθορισμό της απόστασης μεταξύ της μελετώμενης περιοχής και της και της πηγής σεισμού, με βάση τις οποίες αναπτύσσεται ο αλγόριθμος των διαθέσιμων μεθόδων. Οι παραπάνω μέθοδοι ακολουθούν διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αντιμετωπίζει το μεσοδιάστημα το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δυο σεισμών, ως μη σχετική με το προηγούμενο σεισμικό ιστορικό της περιοχής μεταβλητή και κατά αυτή την περίπτωση υιοθετούμε την παραδοχή πως τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ σεισμικών φαινομένων είναι ανεξάρτητα δεδομένα απαριθμητής χρονοσειράς, ακολουθούμενης γραμμικής παλινδρόμησης σύμφωνα με την κατανομή Poisson. Βέβαια, οφείλουμε να επισημάνουμε πως η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως προς περιγραφή σπάνιων συμβάντων, για παράδειγμα τα μεγάλα μεγέθους σεισμικά φαινόμενα επί μίας ευρείας μελετώμενης περιοχής. Σε αντίθεση, υπάρχει περίπτωση να παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση κατά τη μελέτη σεισμικών φαινομένων μικρότερου μεγέθους, που εκδηλώνονται με μεγαλύτερη συχνότητα και παρουσιάζουν μικρότερη εδαφική κίνηση, που παρουσιάζει κατ' ουσία οριακό ενδιαφέρον για τους πολιτικούς Μηχανικούς. Με τη χρήση της κατανομής Poisson επιπροσθέτως, για περιπτώσεις μελετώμενων περιοχών, οι οποίες επηρεάζονται από πλέον των δυο πηγών σεισμικής διεγέρσεως, παρέχονται συντηρητικές τιμές εδαφικής κίνησης. Επιχειρείται η εξάλειψη των περιορισμών που προκύπτουν με τη προαναφερθείσα μέθοδο, μέσα από τη δημιουργία μιας ακόμη κατηγορίας μεθόδων ανάλυσης, κατά την οποία, για την πρόβλεψη μελλοντικών συμβάντων, λαμβάνεται υπόψιν το ιστορικό σεισμικής δραστηριότητας της μελετώμενης περιοχής. Το

κυρίαρχο χαρακτηριστικών των αυτών των μεθόδων είναι η αντιμετώπιση των σεισμικών φαινομένων, ως φυσική ανανέωση, όπου πραγματοποιείται συσσώρευση σεισμικής ενέργειας έπειτα από περιπτώσεις διάρρηξης.



Σχήμα 1: Αναπαράσταση προβλέψιμης χρονικά σεισμικής συμπεριφοράς (α) Συσσώρευόμενη και απελευθερούμενη πίεση σε σχέση με τον χρόνο, (β) Ολίσθηση σεισμού σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ των γεγονότων, (γ) Παράδειγμα διαδικασίας θεώρησης προβλέψιμης χρονικά συμπεριφοράς, (Πηγή: Anagnos and Kiremidjian, 1984)

Η αύξηση των τάσεων, που εκτονώνονται ξαφνικά κατά τη διάρρηξη ρήγματος και η ελαστική παραμόρφωση χαρακτηρίζουν το διάστημα συσσώρευσης, το οποίο επηρεάζει καθοριστικά την πιθανότητα ενδεχόμενης εκδήλωσης νεότερου μεγάλης ισχύος σεισμού. Η πιθανότητα αυτή μελετάται σε σχέση με δυο εκ διαμέτρου

διαφορετικές θεωρήσεις.

Κατά τους Anagnos και Kiremidjian (1984), το μέγεθος της συσσωρευόμενης ενέργειας μεταβάλλεται αναλόγως του μεγέθους του διαστήματος διάρρηξης, με αποτέλεσμα, όσο μικρότερο είναι το διάστημα διάρρηξης, τόσο μικρότερη είναι και η συσσωρευόμενη ενέργεια. Συνεπώς, με βάση την αρχή αυτή, αντίστοιχα μικρή διαμορφώνεται και η πιθανότητα ενδεχόμενου μεγάλης έντασης σεισμού εκ του ίδιου ρήγματος. Σε αντιδιαστολή με την παραπάνω θεώρηση οι Kagan και Jackson (1991) θεωρούν πως η πιθανότητα ενδεχόμενου μεγάλης εντάσεως σεισμού σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται.

Τα διαθέσιμα μοντέλα αναφορικά με την εξασθένηση της εδαφικής κινήσεως, στοχεύουν στον συσχετισμό είτε της συχνότητας εδαφικής κινήσεως, είτε την ένταση αυτής, με την παρατηρούμενη απόσταση της μελετώμενης περιοχής, χρησιμοποιώντας μεθόδους ανάλυσης, οι οποίες στηρίζονται στη διενέργεια αριθμητικών προσομοιώσεων, ή στηρίζονται στα διαθέσιμα δεδομένα παρελθόντων σεισμικών συμβάντων.

Στην δεύτερη περίπτωση, στοιχεία όπως οι χάρτες μακροσεισμικής έντασης, χρησιμοποιούνται προς εξαγωγή σχέσεων οι οποίες αλληλοσυσχετίζουν τα χαρακτηριστικά της πηγής του σεισμικού συμβάντος, με την μελετώμενη περιοχή, και της μεταξύ τους απόστασης με τις καταγεγραμμένες τιμές εδαφικής κινήσεως. Τέτοιες μέθοδοι έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί εκτενώς με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία (Ballantyne et al., 1990; Barosh et al., 1981; Evernden & Thomason, 1988; Furumoto et al., 1980; Taylor, 1986), παρουσιάζοντας εκτενή τεκμηρίωση και ευρεία διάδοση, χαρακτηριστικά τα οποία καθιερώνουν τις μεθόδους αυτές σε μελέτες εκτίμησης σεισμικής τρωτότητας.

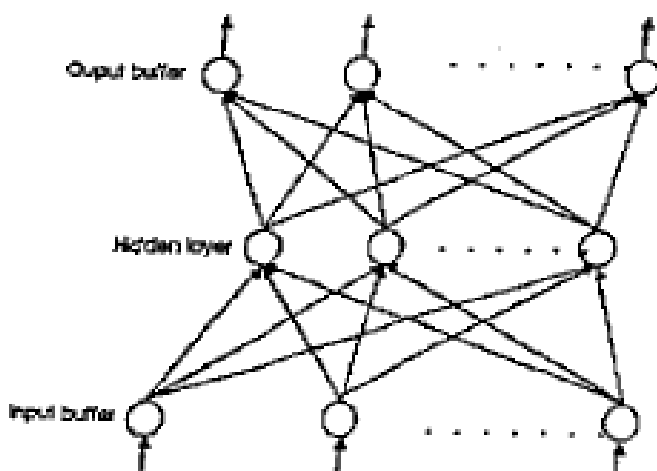
Οι μέθοδοι αναλύσεως της πρώτης προαναφερθείσας περιπτώσεως, στοχεύουν στη διαμόρφωση μοντέλων θεωρητικής περιγραφής των μηχανισμών διάδοσης κύματος σεισμού, εδραζόμενες στα χαρακτηριστικά της πηγής του σεισμικού συμβάντος. Στα μοντέλα αυτά ενδεχομένως να δύναται να ενσωματωθούν στον βασικό τους αλγόριθμο και εμπειρικά δεδομένα από προηγούμενα σεισμικά συμβάντα της περιοχής μελέτης.

Τα προκύπτοντα αποτελέσματα από τη χρήση των μεθόδων της κατηγορίας αυτής, διαμορφώνονται είτε ως τιμές μέγιστης φασματικής αποκρίσεως, είτε ως τιμές μέγιστης εδαφικής έντασης ή επιτάχυνσης.

Αποτέλεσμα της χρήσης των μεθόδων της κατηγορίας αυτής είναι η διατύπωση του τρισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης της εδαφικής κινήσεως (Frankel, 1993), του οποίου η εφαρμογή αναδεικνύεται ως δυσχερής σε χωρικές μελέτες εκτιμήσεως της τρωτότητας, εξαιτίας της πολυπαραμετρικής του φύσεως.

Ως καταλληλότερες, λόγω της ευκολίας χρήσης του σε μελέτες τέτοιων περιπτώσεων αναδεικνύονται οι μέθοδοι ανάλυσης, που διαμορφώνουν κατάλληλα παραμετρικά προσομοιώματα με τη χρήση των τιμών εδαφικής κινήσεως, οι οποίες παράγονται με την χρήση στοχαστικού μοντέλου, ανεξαρτήτως ενσωματώσεως ή μη των διαθέσιμων εμπειρικών δεδομένων (Boore, 1991; Hanks, 1981).

Σύμφωνα με τους Tung et al, (1993), η μοντελοποίηση της εξασθενίσεως της εδαφικής κινήσεως, στη σύγχρονη της πλέον μορφή περιλαμβάνει και την ανάπτυξη μεθόδων προγραμματισμού, οι οποίες εφαρμόζονται σε μελετώμενες περιοχές, που παρουσιάζουν διαθεσιμότητα ικανού αριθμού εμπειρικών στοιχείων, από προγενέστερα σεισμικά συμβάντα. Ένα παράδειγμα των μεθόδων αυτών αποτελούν και τα νευρωνικά δίκτυα.

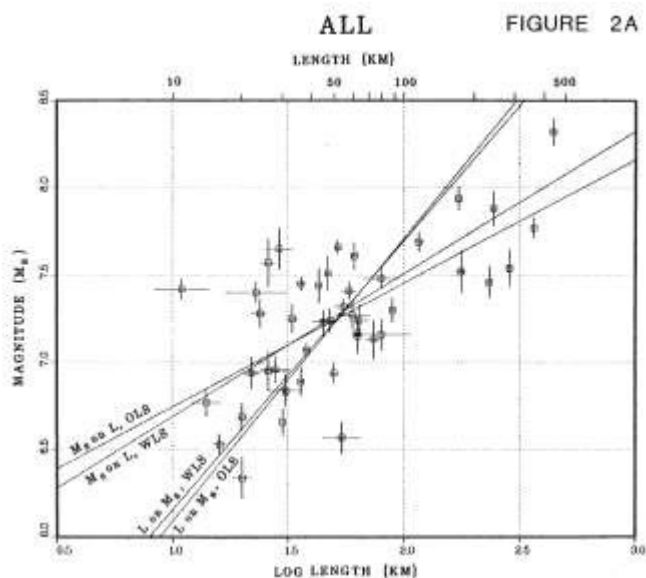


Σχήμα 2: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου, (Πηγή: Tung et al, 1993)

Σύμφωνα με τον Bernreuter (1987), σε διαφορετικές περιπτώσεις, προς εκτίμηση ενδεχόμενων αβεβαιωτήτων και διαφοροποιήσεων αποτελεσμάτων παρελθόντων ερευνών, χρησιμοποιείται μια διαφορετική προσέγγιση, η οποία στηρίζεται στη λήψη αποφάσεων με τη χρήση της μεθόδου Δέντρου Γνώσης.

Ακόμη, κατά την μελέτη της επίδρασης των παραγόντων, οι οποίοι αναφέρθηκαν παραπάνω στην εδαφική επιφάνεια της μελετώμενης περιοχής, συνεκτιμάται και η επιρροή την οποία ασκούν οι συνθήκες και τα τοπικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Επί παραδείγματι, τα μη στερεοποιημένα-μαλακά εδάφη επιδρούν ενισχυτικά της προκαλούμενης από σεισμική δύναμη εδαφικής κινήσεως και σε ορισμένες περιπτώσεις η επίδραση αυτή, υπο την μορφή κατ'εκτίμηση συντελεστή/συντελεστών, ενσωματώνεται στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Σε άλλες περιπτώσεις, οι μελέτες επιχειρούν τον προσδιορισμό των συντελεστών αυτών είτε χρησιμοποιώντας προηγούμενα δεδομένα εδαφικής κινήσεως της περιοχής, είτε χρησιμοποιώντας επιφανειακές εδαφικές αποθέσεις ή άλλα γενικευμένα γεωλογικά κριτήρια, είτε εργαλειοποιώντας τα βάθη γεωλογικών στρωμάτων της περιοχής μελέτης (Evernden et al., 1975; Woodward & Clyde, 1990).

### 1.2.2. Η Επιφανειακή διάρρηξη



Σχήμα 3: Ο συσχετισμός μεγέθους σεισμού με το μήκος της επιφανειακής διάρρηξης, επι διαφόρων τύπων ρήγματος, (Πηγή: Bonilla et al., 1984)

Σύμφωνα με την έρευνα των Bonilla et al., (1984), κατά τη διενέργεια ανάλυσης της σεισμικής τρωτότητας μιας μελετώμενης περιοχής, ο προσδιορισμός της

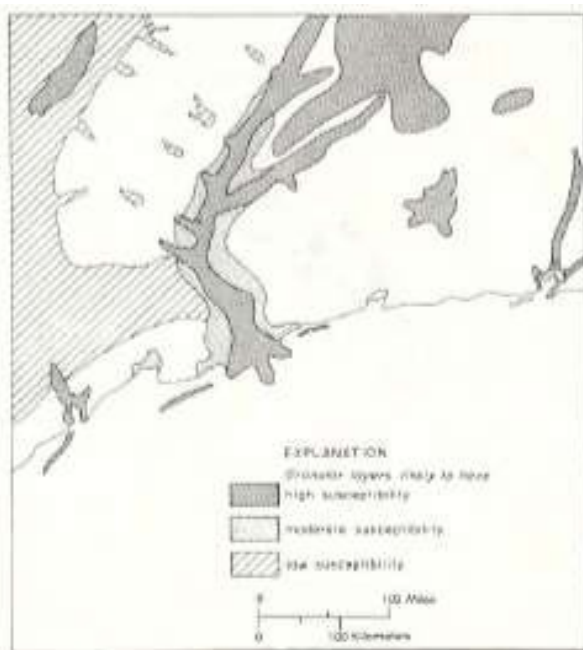


πιθανότητας, της σοβαρότητας και της εκτάσεως της ρήξης του εδάφους σε ενδεχόμενο σεισμού, προκύπτει από τον συσχετισμό μεταξύ του μήκους της επιφανειακής μετατόπισης και της διάρρηξης κατά μήκος του ρήγματος. Οι σχέσεις μεταξύ των παραγόντων αυτών, κατόπιν περεταίρω διερεύνησης, συντέλεσαν στη διαμόρφωση νέων μεθόδων, οι οποίες επιχειρούν να εκτιμήσουν την πιθανότητα υπέρβασης ορισμένης επιφανειακής μετατόπισης ρήγματος σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Σύμφωνα με τον Kiremidjian (1984), οι εν λόγω μέθοδοι αξιολογούνται ως έχουσες σημαντική πρακτική αξία κατά τη διενέργεια αναλύσεων κινδύνου σχετικά με τα Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας σε μία ορισμένη περιοχή.



Εικόνα 1: Απεικόνιση της πιθανότητας περιόδου επαναφοράς επιφανειακής διάρρηξης σε υποθετική περιοχή, (Πηγή: Youd et al., 1978)

Η μελέτη της ενδεχόμενης ρευστοποίησης εδάφους παρουσίασε κατά το πρόσφατο παρελθόν σημαντικό ενδιαφέρον σε σχέση με την επιφανειακή διάρρηξη. Η διαδικασία εμπεριέχει κατά κύριο λόγο την κατάρτιση χαρτών πιθανοτήτων ρευστοποίησης εδάφους σε μια ορισμένη περιοχή. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τον προσδιορισμό βαθμού ευαισθησίας του εδάφους σε ενδεχόμενη ρευστοποίηση και από τη διαπίστωση των ειδικών τοπικών παραγόντων, οι οποίοι ενδεχομένως να προκαλέσουν τη διαδικασία ρευστοποίησης. Τα σημαντικά δεδομένα μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν το βάθος υδροφόρου ορίζοντα, την απόσταση της εστίας του σεισμικού γεγονότος από την μελετώμενη περιοχή, τη σχετική πυκνότητα και το είδος των εδαφικών ιζημάτων.



Εικόνα 2: Αποτύπωση της σχετικής ευπάθειας σε επιφανειακή διάρρηξη λόγω ρευστοποίησης σε ορισμένη περιοχή, (Πηγή: Youd et al., 1978)

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διακρίνονται σε εκείνες, οι οποίες προσαρμόζουν διαθέσιμα δεδομένα από προγενέστερα περιστατικά ρευστοποίησης στη περιοχή, τα οποία χρησιμοποιούνται ως γενικά πρότυπα (Youd et al., 1978) και σε εκείνες, οι οποίες συγκροτούν από την αρχή ένα μοντέλο για τη

μελετώμενη περιοχή, αξιοποιώντας μηχανικούς, γεωμορφολογικούς και γεωλογικούς παράγοντες, μέσα από τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών και σχετικών ελέγχων, διαδικασίες οι οποίες αυξάνουν σημαντικά το κόστος.

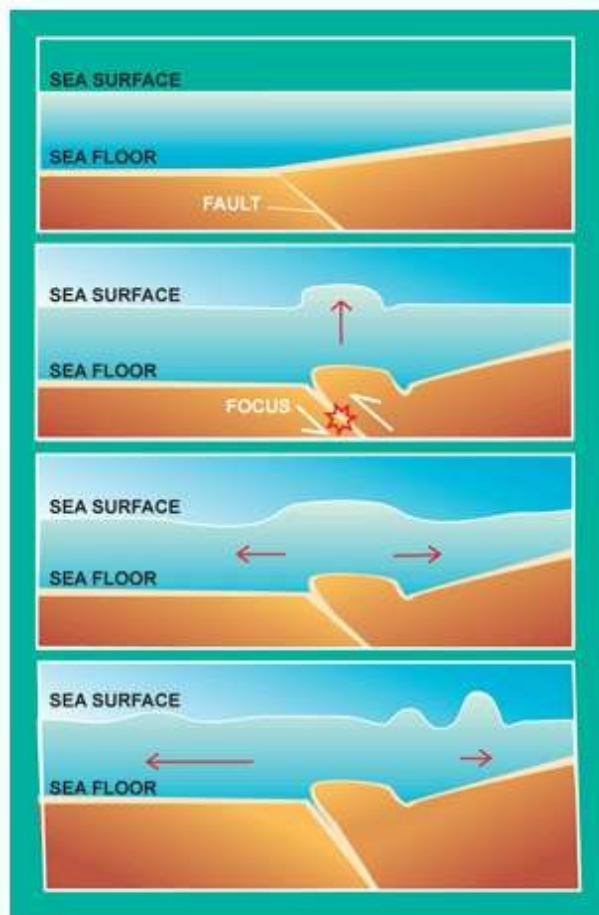
Σύμφωνα με τους Youd & Perkins (1987), οι μέθοδοι συσχέτισης της πιθανότητας ρευστοποίησης με την ένταση επιτόπιας εδαφικής κινήσεως έχουν αναπτυχθεί και διαμορφωθεί πληρέστερα σε σχέση με μεθόδους, οι οποίες σε ενδεχόμενη εδαφική ρήξη ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης παρέχουν εκτιμήσεις σχετικά με την αναμενόμενη μετακίνηση εδάφους και που εφαρμόζονται σε ορισμένους τύπους ρήγματος ειδικών μορφολογικών χαρακτηριστικών.

Η διαδικασία κινδύνου εκδήλωσης κατολίσθησης, κατά αντιστοιχία με τη ρευστοποίηση, επιχειρεί την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης κατολίσθησης σε μία ορισμένη περιοχή, με τη συγκρότηση σχετικών χαρτών. Τα βρισκόμενα υπό κλίση εδαφικά στρώματα εμφανίζουν πιθανότητα κατολίσθησης σε εξάρτηση με την απόσταση από την εστία του σεισμικού συμβάντος, το ύψος της καταγεγραμμένης βροχοπτώσεως της περιοχής μελέτης και φυσικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού. Και στη μελέτη πρόβλεψης της πιθανότητας κατολίσθησης επικρατούν δυο διαφορετικές κατευθύνσεις. Σύμφωνα με τους Keefer & Wilson (1989), τα διαθέσιμα μοντέλα, είτε εκτιμούν μηχανικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υπό μελέτη εδαφικών υλικών, είτε συσχετίζουν προγενέστερες καταγεγραμμένες κατολισθήσεις με το γεωμορφολογικό και γεωλογικό προφίλ της μελετώμενης περιοχής, μέσα από την εισαγωγή των τιμών αυτών σε εξειδικευμένα λογισμικά τα οποία διενεργούν δυναμική ανάλυση, παράγοντας αξιόπιστα δεδομένα, που όμως εξειδικεύονται στην μελετώμενη περιοχή, δίχως να δύνανται να γενικευτούν, αξιοποιούμενα σε χωρική ανάλυση τρωτότητας άλλων περιοχών.

### **1.2.3. Θαλάσσιοι κυματισμοί (Τσουνάμι)**

Τα Τσουνάμι αποτελούν θαλάσσιους κυματισμούς, υψηλών ταχυτήτων μεταφοράς και μεγάλης διάρκειας, που χαρακτηρίζονται από μακρά περίοδο και προκαλούνται από τις διαδοχικές καταβυθίσεις ή ανυψώσεις της θαλάσσιας επιφάνειας, ως

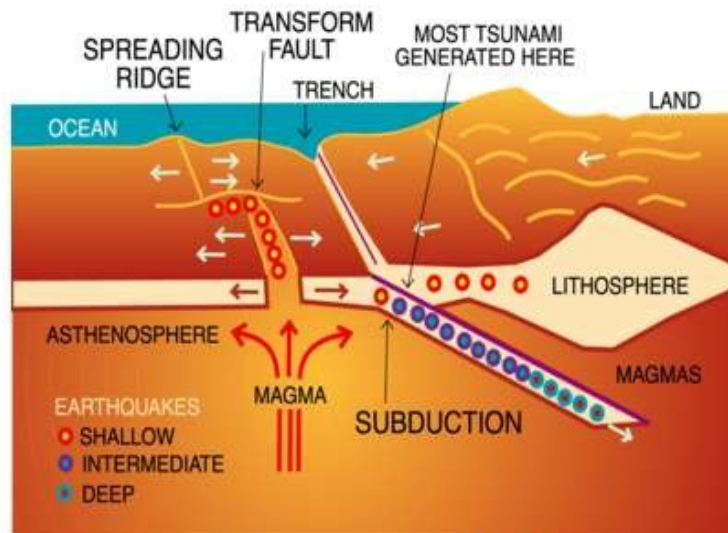
αποτέλεσμα μιας σεισμικής δόνησης. Οι κυματισμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα καταστρεπτικοί για τις παραθαλάσσιες περιοχές τις οποίες πλήττουν.



Εικόνα 3: Αποτύπωση του μηχανισμού δημιουργίας ενός τσουνάμι, (Πηγή: International Tsunami Information Center, UNESCO)

Τα διαθέσιμα μοντέλα μελέτης των Τσουνάμι επιχειρούν να εκτιμήσουν την περιοχή την οποία καλύπτει ο κυματισμός έως ότου εξαντληθεί πλήρως, το ενδεχόμενο δημιουργίας του μετά από σεισμικό γεγονός και ο τρόπος και ο βαθμός διάδοσης του κυματισμού αυτού. Ο μηχανισμός διάρρηξης του ρήγματος και η μετατόπιση του πυθμένα της θάλασσας συνεπιδρούν στη δημιουργία ενός Τσουνάμι. Η εκτίμηση της αναπτυσσόμενης ταχύτητας και της κατεύθυνσης προς την οποία κινούνται τα κύματα συμβάλλουν στην διαμόρφωση της εκτίμησης διάδοσης των κυματισμών ενός Τσουνάμι. Η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι κυματισμοί βαίνει μειούμενη κατά τη προσέγγιση των κυμάτων προς την ακτή, ανυψώνοντας τον πυθμένα και

αυξάνοντας το ύψος κύματος. Με τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών επιτυγχάνεται ο ακριβής υπολογισμός του ύψους εισερχομένου κύματος, όπως επίσης και η κατακλυζόμενη εδαφική περιοχή.



Εικόνα 4: Η δημιουργία ενός Τσουνάμι συνέπεια σεισμού, (Πηγή: International Tsunami Information Center, UNESCO)

Στις εκτιμήσεις σεισμικής τρωτότητας σχετικά με το σχηματισμό Τσουνάμι σε μια ορισμένη περιοχή, επιχειρείται η ανάπτυξη μαθηματικού προσομοιώματος με βάση τις χρησιμοποιούμενες αναλυτικές μεθόδους. Προσομοιώματα τέτοιου τύπου επιχειρούν τη συσχέτιση της ταχύτητας κυματισμού και της επιφανείας της κατακλυζόμενης περιοχής. Επί του πρακτέου, τα προσομοιώματα αυτά αποτελούν το υπόβαθρο επάνω στο οποίο διαμορφώνονται σχετικοί χάρτες εκτίμησης κινδύνου από Τσουνάμι για μια ορισμένη περιοχή (Ritter & Dupre, 1972). Οι καταρτιζόμενοι χάρτες αυτοί περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση επιπλέον παραμέτρων, όπως η περίοδος επαναφοράς και το ύψος κυμάτων, την απαιτούμενη ζώνη προς εκκένωση από τον πληθυσμό και το μέγεθος σεισμού. Οι χάρτες αυτοί διατηρούν έναν θεωρητικό χαρακτήρα, καθώς τα μαθηματικά μοντέλα από τα οποία προκύπτουν δεν είναι δυνατόν να επαληθευθούν πάντοτε με συνέπεια, ελλείψει διαθέσιμων

στατιστικών στοιχείων πραγματικών συμβάντων. Για τον λόγο αυτό θεωρείται αναγκαία η εκτίμηση τρωτότητας από Τσουνάμι μιας ορισμένης περιοχής, με συγκεκριμένα γεωμορφολογικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά.

### **1.3. Διαθέσιμες μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας**

Η διαμόρφωση ενός μοντέλου εκτιμήσεως των σεισμικών κινδύνων αποτελεί την πεμπουσία κάθε μελέτης εκτίμησης τρωτότητας και πιθανών απωλειών. Τα μοντέλα αυτά ουσιαστικά θεμελιώνονται επί δυο διαφορετικών προσεγγίσεων. Την πιθανοτική και την ντετερμινιστική προσέγγιση.

Η **πιθανοτική προσέγγιση** μελετά τις καταγεγραμμένες πηγές σεισμικών συμβάντων, όπως και την συχνότητα εκδήλωσης των συμβάντων αυτών από τις πηγές εκείνες, οι οποίες επηρεάζουν μια ορισμένη περιοχή. Ακολουθεί ο υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης σε ετήσια βάση των καταγεγραμμένων αυτών τιμών επί χαρακτηριστικών μεγεθών εδαφικής κινήσεως, με σκοπό την απόδοση σε πιθανοτική μορφή των αναμενόμενων απωλειών ανά εξεταζόμενη σεισμική πηγή.

Η **αιτιοκρατική προσέγγιση** διαμορφώνεται εκκινώντας από ένα δεδομένο σενάριο σεισμικής διεγέρσεως, ως σημείο εκκίνησης, που αρχικά εργαλειοποιείται προς απόδοση της εδαφικής κινήσεως και εν συνεχεία με βάση αυτή την εδαφική κίνηση να εκτιμήσει ενδεχόμενες απώλειες και βλάβες, αποτελώντας την δυσμενέστερη περίπτωση εκδήλωσης σεισμικού γεγονότος σε μία ορισμένη περιοχή. Πρόκειται κατ' ουσία για την παλιότερη μέθοδο υπολογισμού βλαβών, η οποία διαμορφώθηκε προς κάλυψη των πρακτικών αναγκών των ασφαλιστικών ομίλων, που προσέβλεπαν στη δυνατότητα εκτίμησης του δείκτη PML (δείκτης Μέγιστης Πιθανής Απώλειας). Ο δείκτης αυτός ορίζει το ύψος των μέγιστων αποθεματικών, τα οποία οφείλονται να είναι διαθέσιμα ανά πάσα στιγμή, ώστε η ασφαλιστική εταιρεία να βρίσκεται σε θέση να ικανοποιήσει αιτήματα αποζημίωσης σε ενδεχόμενη πρόκληση απωλειών και βλαβών ως συνέπεια σεισμού σε μια δεδομένη περιοχή. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο, η οποία προσφέρει επίσης την δυνατότητα υπολογισμού του

δείκτη AAL (δείκτης Μέσων Ετήσιων Απωλειών). Ο δείκτης αυτός υπολογίζει σε μέσες τιμές τις καταγεγραμμένες απώλειες για το σύνολο των σεισμικών συμβάντων συγκεντρωτικά σε μία συγκεκριμένη περιοχή ανά έτος και χρησιμοποιείται προς υπολογισμό των ποσών τα οποία θα απαιτηθεί να καταβληθούν από την ασφαλιστική εταιρεία ως αποζημίωση για κάθε ασφαλισμένο από την εταιρεία κτίριο στην εξεταζόμενη περιοχή.

Ανεξαρτήτου της ανωτέρας διακρίσεως, ως συχνό φαινόμενο επικρατεί η συμπερίληψη πιθανοτικών μεγεθών και μεταβλητών σε αιτιοκρατικά μοντέλα. Ακόμη, έχει επικρατήσει η χρήση πιθανολογικής ανάλυσης σε αιτιοκρατικά μοντέλα, προς ανάδειξη της σεισμικής πηγής, η οποία προκαλεί απώλειες και βλάβες σε μία ορισμένη περιοχή.

Κατά συνέπεια, τα καθοριστικά στοιχεία επιλογής της καταλληλότερης μεθόδου κατά περίπτωση είναι ο σκοπός της διενεργούμενης ανάλυσης τρωτότητας και η διαθεσιμότητα τόσο των απαραίτητων σχετικών δεδομένων, όσο και του εξειδικευμένου λογισμικού.

### **1.3.1. Οι εμπειρικές μέθοδοι**

Η αξιοποίηση εμπειρικών δεδομένων από καταγεγραμμένες μακροσεισμικές εντάσεις αποτελεί την αρχική προσέγγιση, η οποία διαμορφώθηκε προς κάλυψη των αναγκών υπολογισμού ενδεχόμενων σεισμικών απωλειών. Η μακροσεισμική ένταση ως μέγεθος δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί με τη χρήση οργάνων και έτσι υπολογίζεται με την αξιοποίηση προσωπικών εκτιμήσεων, παρατηρήσεων και οπτικών καταγραφών, ακολουθώντας ένα πλαίσιο σχετικών κατευθυντήριων της υιοθετούμενης Κλίμακας εκτίμησης της Μακροσεισμικής εντάσεως. Για τον λόγο αυτό, αρχικά η χρήση της Μακροσεισμικής εντάσεως προς υπολογισμό της εδαφικής κίνησης παρουσίαζε σημαντικά ποσοστά αβεβαιότητας. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, σταδιακά οι αναλυτικές καταγραφές των οργάνων μέτρησης σε μεγέθη, όπως για παράδειγμα η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, κατέστησαν δυνατή την πληρέστερη τεκμηρίωση των εμπειρικών μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται

αδιαλείπτως και στις ημέρες μας.

Οι μέθοδοι αυτοί επιτυγχάνουν την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών κατασκευής ενός κτιρίου με μεγαλύτερη ακρίβεια, επιτρέποντας την αναλυτική απόδοση των χαρακτηριστικών τα οποία διακρίνουν το σύστημα ανωδομής-εδάφους.

Η απόδοση της τρωτότητας κατασκευής σε μεθόδους οι οποίες εργαλειοποιούν το μέγεθος της εντάσεως επιτυγχάνεται με τη συγκρότηση DPM (Πινάκων Πιθανοτήτων Βλάβης) αναλόγως του τύπου κτιρίου. Οι πίνακες αυτοί εμπεριέχουν την αποτύπωση της πιθανότητας εμφάνισης βλάβης για δεδομένες τιμές σεισμικής εντάσεως (Whitman et al., 1973). Οι εν λόγω πίνακες περιέχουν κατώτατα και ανώτατα εκτιμώμενα όρια, βάσει των ποιοτικών προσδιορισμών, του οποίους χρησιμοποιούν η Κλίμακα EMS-98, η Τροποποιημένη Κλίμακα Μακροσεισμικής έντασης του Μερκάλλι και η Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα, με στόχο της διαμόρφωσης μίας εκτίμησης για το αναμενόμενο ποσοστό κτιρίων ίδιας τυπολογίας που ενδέχεται να εμφανίσουν παρόμοιο βαθμό βλαβών. Εξαιτίας του χαρακτηριστικού αυτού, δεν προβλέπεται η κατάρτιση πινάκων μικρότερων τιμών έντασης, εφόσον για τις τιμές αυτές δεν είναι σύνηθες να διατηρούνται καταγραφές με εμφανείς βλάβες. Ως συνηθέστερο σενάριο, η τήρηση διαθέσιμων δεδομένων για έως και 2 βαθμούς εντάσεως ανά περιοχή, επιτάσσει είτε την αναπροσαρμογή εμπειρικών δεδομένων από διαφορετικές περιοχές ή συμβάντα, είτε την χρήση συνδυαστικών μεθόδων προς επίτευξη των επιδιωκόμενων αποτελεσμάτων της επιλεγμένης εμπειρικής μεθόδου.

### **1.3.2. Οι αναλυτικές μέθοδοι**

Αποτελούν θεωρητικές μεθόδους υπολογισμού, βασιζόμενες σε θεωρητικές προβλέψεις αναμενόμενων βλαβών κατασκευών υποβαλλόμενων σε σεισμική καταπόνηση, οι οποίες χρησιμοποιούν μαθηματικά προσομοιώματα για τον προσδιορισμό μιας λεπτομερούς ανάλυσης της σεισμικής αποκρίσεως μιας



κατασκευής. Για τη διενέργεια των αναλύσεων των μεθόδων αυτών απαιτείται η χρήση προηγμένων λογισμικών και μεθόδων (μη γραμμικών μεθόδων επικρατέστερα) δομικών αναλύσεων. Οι απαιτήσεις αυτές καθιστούν μεν δαπανηρές και δύσκολες τις μεθόδους αυτές, τις αναδεικνύουν δε ως περισσότερο αξιόπιστες και διεξοδικότερες σε σχέση με άλλες μεθόδους. Η εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων καθίσταται αναγκαία όταν οι υπόλοιπες διαθέσιμες μέθοδοι δεν δύνανται να προσδιορίσουν επακριβώς τα προς εφαρμογή μέτρα ελαχιστοποίησης τρωτότητας σε μια κατασκευή, ενώ μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν για τη διενέργεια αναλύσεως τρωτότητας σύνθετων δομικά κατασκευών και σημαντικών κτιρίων.

Οι αναλυτικές μέθοδοι προσδιορίζουν την τρωτότητα με τη χρήση καμπύλης ικανότητας. Η καμπύλη αυτή αποτελεί την έκφραση της μη γραμμικής συμπεριφοράς της μελετώμενης κατασκευής. Αφορά δηλαδή την εκδηλούμενη μετατόπιση του επιλεγμένου κόμβου ελέγχου της για μια δεδομένη τιμή της τέμνουσας βάσης, η οποία αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της σεισμικής καταπόνησής. Η διαμόρφωση της καμπύλης ικανότητας προαπαιτεί τη δημιουργία και την δομική ανάλυση ενός θεωρητικού μαθηματικού προσομοιώματος κατασκευής, χρησιμοποιώντας μη γραμμική μέθοδο (Pushover analysis, Γραμμική Στατική Ανάλυση) με βάση παραμέτρους, οι οποίες αναπαρίστανται από φάσμα απόκρισης (όπως η εδαφική μετατόπιση και η εδαφική επιτάχυνση).

Σημαντικές σχετικές προσεγγίσεις, οι οποίες οφείλουν να αναφερθούν, αποτελούν η DCM (Μέθοδος Συντελεστού Μετατόπισης) και η CSM (Μέθοδος Φάσματος Ικανότητας). Οι μέθοδοι αυτές εδράζονται σε αρχές αντισεισμικού σχεδιασμού με τη χρήση στάθμων επιτελεστικότητας και ισχύουν ως θεσμοθετημένα κανονιστικά κείμενα (Για παράδειγμα η μεθοδολογία HAZUS-FEMA 2003 και οι διατάξεις FEMA273, 1997a, FEMA440, 2005, FEMA356, 2000).

Η επιλεγόμενη μέθοδος στοχεύει στον υπολογισμό της μέσης προκαλούμενης βλάβης από σεισμική διέγερση στο μελετώμενο κτίριο, η οποία αντιπροσωπεύει την στοχευόμενη μετατόπιση. Η μέση βλάβη η οποία υπολογίζεται λαμβάνει τη μορφή πιθανοτικής κατανομής αντίστοιχων επιπέδων βλάβης με τη χρήση

συναρτήσεων τρωτότητας, που ενσωματώνουν αβεβαιότητες προερχόμενες από τη σεισμική απαίτηση, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής και τη γεωμετρία του μοντέλου, και άλλα στοιχεία. Έτσι οι μέθοδοι αυτές δύναται να εφαρμοστούν σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας ή σε περιοχές με περιορισμένες καταγραφές βλαβών. Σημαντικότερο μειονέκτημα της εξεταζόμενης μεθοδολογίας αποτελεί η ανάγκη χρήσης συναρτήσεων τρωτότητας, οι οποίες δεν διατίθενται για ικανό εύρος τυπολογιών κτιρίων, δυσχεραίνοντας τη συλλογή δεδομένων σε μια κεντρική βάση διαχείρισης (π.χ. βάση δεδομένων).

### **1.3.3. Οι κατηγοριοποιητικές μέθοδοι**

Η προσέγγιση αυτή προβλέπει τον καθορισμό της πλέον ενδεδειγμένης μεθόδου επιδιώκοντας να προσδιορίσει την τυπολογία των κτιρίων, που απαιτούν λεπτομερή εξέταση των χαρακτηριστικών τους, επισημαίνοντας παράλληλα την τυπολογία των προς αγνόηση από την προσέγγιση κτιρίων. Η προσέγγιση αυτή διαπιστώνει την ανάγκη λήψης μέτρων περιορισμού των επιπτώσεων σεισμού στα μελετώμενα κτίρια, διαπιστώνοντας τους τομείς προτεραιότητας προς διερεύνηση.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να παράσχουν γενικού χαρακτήρα εκτιμήσεις βλαβών, που αξιοποιούνται προς υπολογισμό του συγκεντρωτικού κόστους ανάπτυξης και υλοποίησης ενός προγράμματος αποκατάστασης των βλαβών αυτών, ενώ παρέχουν δεδομένα υπολογισμού του κόστους των μέγιστων απωλειών για τις ανάγκες ασφαλιστικής κάλυψης. Επιπροσθέτως, οι κατηγοριοποιητικές μέθοδοι μπορούν να εξετάσουν την αναμενόμενη κατανομή των άμεσων και έμμεσων απωλειών, γεγονός το οποίο τις καθιστά ιδιαίτερες σημαντικές σε σενάρια συγκριτικής αξιολόγησης του σεισμικού κινδύνου διαφορετικών περιοχών της επικράτειας και ανάδειξης των χρηζόντων ενίσχυσης κτιρίων και κατασκευών.

### **1.3.4. Οι μέθοδοι εκτίμησης και επιθεώρησης**

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.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΩΛΕΙΕΣ

### 2.1. Ερευνητικές μέθοδοι και μοντέλα εκτίμησης απωλειών

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, σύμφωνα με τη διαθέσιμη διεθνή βιβλιογραφία, ένας μεγάλος όγκος ερευνητικών εργασιών στοχεύει στη διενέργεια αναλύσεων τρωτότητας με σκοπό την αξιόπιστη εκτίμηση σεισμικών βλαβών και απωλειών, απομονώνοντας και κατά περίπτωση αναλύοντας πληθώρα παραγόντων, οι οποίοι ορίζονται ως αίτια εκδήλωσης τρωτότητας κτιρίων και ενδεχομένως προξένησης βλαβών και απώτερο στόχο την καταγραφή σε έμψυχες και κτιριακές απώλειες.

Σύμφωνα με το μέγεθος της περιοχής στην οποία διενεργούνται οι αναλύσεις και ανάλογα με το εύρος του αντικειμένου το οποίο αυτές διαχειρίζονται, οι μέθοδοι εκτιμήσεως της σεισμικής τρωτότητας διαχωρίζονται σε κτιριακές και σε χωρικές. Οι χωρικές εξετάζουν την αναμενόμενη σεισμική απώλεια ικανού αριθμού κατασκευών στα πλαίσια μιας περιοχής, όπως για παράδειγμα εντός των ορίων μίας πόλεως, ενώ οι κτιριακές επιχειρούν ένα ακριβέστερο προσδιορισμό των εκτιμώμενων αναμενόμενων απωλειών εντός ενός συγκεκριμένου μελετώμενου κτιρίου, ευρισκόμενου εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής (π./χ. πόλη).

Ανεξαρτήτως ακολουθούμενης μεθόδου, κατόπιν διαπιστώσεως της σεισμικής επικινδυνότητας του μελετώμενου κτιρίου, ή της μελετώμενης περιοχής, διενεργείται ανάλυση τρωτότητας σύμφωνα με τις Καμπύλες τρωτότητας, ή με τα Μητρώα πιθανοτήτων βλάβης. Δεδομένης της δυνατότητας αποδοχής της γραμμικότητας της φύσεως της μακροσεισμικής εντάσεως και παρά το γεγονός πως μια τέτοια παραδοχή δεν θα ήταν δυνατόν να επιβεβαιωθεί θεωρητικά, οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις είναι δυνατόν να ταυτιστούν, απλοποιώντας την αναλυτική διαδικασία.

### **2.1.1. Οι ερευνητικές εργασίες εκτίμησης κτιριακών απωλειών (Κτιριακές)**

Οι ερευνητικές εργασίες αυτές μελετούν συγκεκριμένους χώρους συγκεκριμένων κτιρίων ή συγκεκριμένους χώρους συγκεκριμένης τυπολογίας κτιρίων. Η ειδίκευση αυτή ευνοεί τη λεπτομερή ανάδειξη των τρωτών στοιχείων του μελετώμενου αντικειμένου και η ανάλυσή τους προς απόδοση ενός ακριβούς βαθμού ενδεχόμενων απωλειών σε ενδεχόμενο σεισμό. Ο εξειδικευμένος χαρακτήρας της συγκεκριμένης αναλυτικής μεθόδου, καθιστούν τα αποτελέσματα της μεθόδου μη ευρέως επεκτάσιμα, ακόμη και όταν παρόμοια με το αναλυόμενο με αυτή τη μέθοδο κτίρια παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η εφαρμογή των κτιριακών ερευνητικών εργασιών περιλαμβάνει την ανάλυση πολυώροφων κτιρίων μεγάλου ύψους για την διαπίστωση, την αξιολόγηση και τον συσχετισμό των δομικών χαρακτηριστικών της μελετώμενης κατασκευής, με την εδαφική επιτάχυνση. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η ντετερμινιστική ερευνητική εργασία του Scholl 1(979), ο οποίος χρησιμοποίησε στην έρευνά του ως αφετηρία βάσεις δεδομένων, με στοιχεία από προγενέστερα συμβάντα, τα οποία περιλάμβαναν καταγεγραμμένες τιμές διαφόρων παραμέτρων εδαφικής επιτάχυνσης και τα οποία στοιχεία συνδύαζε με σχέσεις κίνησης-βλαβών για κατασκευές διαφόρων τυπολογιών και υψών.

Ακολούθησε η προσαρμογή και η διεύρυνση των σχέσεων αυτών σε μεγάλο ύψους κτίρια, σύμφωνα με μια αναλυτική διαδικασία υπολογισμού μέγιστης κτιριακής απόκρισης σε συνθήκες σεισμικής διέγερσης. Κατόπιν, διαπιστώθηκε το κόστος αντικατάστασης σε ποσοστιαία μορφή των στοιχείων όλων των κατηγοριών συμπεριλαμβανομένων δομικών και μη δομικών βλαβών και ακολούθησε χρηματική εκτίμηση των σχέσεων βλάβων-κίνησης. Τέλος, ακολούθησε η εκτίμηση των συνολικών απωλειών του κτιρίου, ως άθροισμα των επιμέρους απωλειών.

Στο ίδιο μήκος κύματος κινήθηκε και η προσπάθεια του Gunturi (1993) να προσδιορίσει με ακρίβεια ενδεχόμενες απώλειες σε οικονομικά μεγέθη επί ενός κτιρίου, συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, το οποίο υπόκειται σε σεισμική φόρτιση, ως αποτέλεσμα σεισμού. Σε αρχικό στάδιο η μέθοδός αυτή περιλαμβάνει την

καταγραφή και την ανάλυση μη δομικών και δομικών μελών του φορέως, όπως και του φέροντος εξοπλισμού του κτιρίου, για τις ανάγκες κατάρτισης του επιπέδου βλάβης ανά κτιριακή στάθμη.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, για τον προσδιορισμό των δεικτών βλάβης των μη δομικών μελών πραγματοποιείται λήψη ως δείκτες βλάβης, τόσο η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, όσο και η σχετική μετατόπιση ορόφων, ενώ για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων δεικτών των δομικών μελών της κατασκευής, διενεργείται γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας φορέως. Κατόπιν, πραγματοποιείται εκτίμηση των οικονομικών απωλειών του κτιρίου, με τη χρήση σχέσης συσχετισμού με την απώλεια λειτουργικότητας του κτιρίου, που διαμορφώνεται ως το άθροισμα των ποσοστών απώλειας λειτουργικότητας ανα στάθμη του κτιρίου (Park & Ang, 1985).

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των κτιριακών ερευνητικών εργασιών είναι η παράληψη των αβεβαιοτήτων, οι οποίες διέπουν την εδαφική επιτάχυνση κατά τη διάρκεια του σεισμού, από το σενάριο εκτίμησης των ενδεχόμενων απωλειών (Singhal & Kiremidjian, 1996),

Η προσομοίωση Monte Carlo αποτέλεσε το σημείο εκκίνησης ανάπτυξης σχέσεων σύνδεσης των αναμενόμενων βλαβών με την εδαφική κίνηση, αναφορικά με 3 διαφορετικές τυπολογίες πλαισίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος, που αφορούν χαμηλά κτίρια από μια έως και τρεις στάθμες, μεσαία κτίρια από τέσσερις έως επτά στάθμες και υψηλά κτίρια, από οκτώ στάθμες και άνω, ενώ ο προσδιορισμός των δεικτών βλάβης επετεύχθη σύμφωνα με τους Park and Ang (1985), οδηγώντας την ανάλυση σε κατάρτιση DPM (Πινάκων Πιθανότητας Βλάβης καμπύλων τρωτότητας) αναλόγως του τύπου κτιρίου.

Οι Porter & Kiremidjian (2001), συνέχισαν να διερευνούν την επιρροή των αβεβαιοτήτων κατά την εκτίμηση σεισμικών απωλειών με τη χρήση μιας μεθοδολογίας η οποία προσέφερε τη δυνατότητα αθροιστικής εκτίμησης των απωλειών αυτών, συνεκτιμώντας ένα μεγαλύτερο εύρος αβεβαιοτήτων σε σχέση με τις παλαιότερες ερευνητικές εργασίες. Με το μοντέλο ανάλυσης αντιμετωπίζονταν πλέον ζητήματα μεταβλητότητας της εδαφικής κινήσεως κατά τη διάρκεια σεισμού, ενσωματώνοντας ικανό αριθμό επιταχυνσιογραφημάτων, όπως

και ζητήματα εκτίμησης του κόστους αποκατάστασης κάθε στοιχείου σε συνάρτηση των μελετώμενων βλαβών, αλλά και ζητήματα αβεβαιοτήτων σχετικά με την εκτίμηση βλάβης κάθε μη δομικού ή δομικού στοιχείου. Και στη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται χρήση της προσομοιώσεως Monte Carlo, προς διατύπωση πιθανοτικών συναρτήσεων τρωτότητας, με τις οποίες επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των στατιστικών παραμέτρων κόστους αποκατάστασης του μελετώμενου κτιρίου, σε συνάρτηση με την εδαφική κίνηση. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως οι παράμετροι αυτοί υπεβλήθησαν σε ανάλυση ευαισθησίας (απλοποιημένη) προς διαπίστωση του βαθμού επιρροής τους στο συνολικό κόστος αποκατάστασης του μελετώμενου κτιρίου.

### **2.1.2. Οι ερευνητικές εργασίες εκτίμησης χωρικών απωλειών (Χωρικές)**

Η συγκεκριμένη κατηγορία ερευνητικών εργασιών εκκινώντας από την προηγούμενη κατηγορία εργασιών, διευρύνει το αντικείμενο μελέτης, συμπεριλαμβάνοντας την εκτίμηση σεισμικών απωλειών σε σύνολο κτιρίων, τα οποία βρίσκονται σε εκτενή χώρο. Η εν λόγω μεθοδολογία διαμορφώθηκε ως εξέλιξη παλαιότερων ερευνητικών μεθοδολογιών του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι οποίες εμπνεύστηκαν προς ικανοποίηση των αναγκών των ασφαλιστικών εταιρειών για ακριβείς και αξιόπιστες εκτιμήσεις των αναμενόμενων οικονομικών απωλειών και των οφειλόμενων οικονομικών αποζημιώσεων προς δικαιούχους κατά τη περίπτωση σεισμού.

Ένα παράδειγμα τέτοιου είδους εργασιών αποτελεί και η συμπεριλαμβανούσα αδρές εκτιμήσεις πιθανοτικών μέσων όρων αναμενόμενων σεισμικών απωλειών ποικίλων περιοχών και κτιριακών τυπολογιών βάση δεδομένων την οποία δημιούργησε ο Freeman (1932).

Ο πιθανοτικός χαρακτήρας αυτού του είδους εκτιμήσεων εκφράζει το σύνολο των εργασιών οι οποίες επακολούθησαν. Στην εργασία των Steinbrugge et al., (1969) η περιοχή, ο τύπος θεμελίωσης, το είδος τοιχοπληρώσεων, το κόστος αντικατάστασης και η χρονολογία κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τη διαμόρφωση του μοντέλου. Για την απεικόνιση των στοιχείων αυτών συγκροτήθηκε πίνακας συσχετισμού 24<sup>ων</sup> τυπολογιών κτιρίων με τιμές έντασης της

τροποποιημένης κλίμακας Μερκάλλι και με αυτό το τρόπο παρεχόταν ένας δείκτης βλάβης κατά αντιστοιχία με ένα ποσοστό βλάβης, με βάση τα οποία ήταν δυνατό να εκτιμηθεί το ποσό της ασφαλιστικής αποζημίωσης επί του αντίστοιχου ποσού απωλειών επί κάθε τύπου κτιρίου.

Στην εργασία των Whitman et al., (1973), ανελύθησαν πενταόροφα κτίρια πλαισιακών φορέων μεταλλικών ή Ωπλισμένου Σκυροδέματος, προς συσχέτισμό των ποσοστών βλάβης με τις τιμές εδαφικής κινήσεως, σύμφωνα με την Τροποποιημένη Κλίμακα Μερκάλλι.

Στα χρόνια που ακολούθησαν η ανάγκη συγκρότησης μιας μεθόδου εκτιμήσεως απωλειών σε χωρικό επίπεδο είχε ως αποτέλεσμα την επεξεργασία σε συστηματική βάση και την ομαδοποίηση σε μεθοδολογικό επίπεδο των προγενέστερων εργασιών. Οι περισσότερες προσπάθειες επικεντρώνονταν στη συσχέτιση διαφόρων τυπολογιών κτηρίων, οι οποίες αποτελούσαν τα αρχικά δεδομένα, με τα αντίστοιχα κόστη αντικατάστασης 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 ( $\leq 5,000$ 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

Πίνακας 1: Οι τυπολογίες των κτιρίων με τη μεθοδολογία HAZUS, (Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003)

Η μεθοδολογία, σύμφωνα με τις βασικές της αρχές, στοχεύει στον ακριβή προσδιορισμό των εκτιμώμενων βλαβών και απωλειών με τη χρήση δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από συμπεράσματα και παρατηρήσεις σεισμικών συμπεριφορών όπως και από αποτελέσματα αναλύσεων σε 33 κατηγορίες χρήσεως και σε 36 πρότυπα τυπολογίας κτιρίων. Το ύψος του κτιρίου, όπως και το υλικό δόμησης του φέροντα οργανισμού διαμορφώνουν τις τυπολογίες ανάλυσης στα

πλαίσια διαμόρφωσης και ανάπτυξης της μεθοδολογίας και με βάση αυτές υπολογίζονται τυχόν λειτουργικές απώλειες και ενδεχόμενες βλάβες των κτιρίων.

<b>Label</b>	<b>Occupancy Class</b>	<b>Example Descriptions</b>
	<b>Residential</b>	
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	
	<b>Commercial</b>	
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
	<b>Industrial</b>	
IND1	Heavy	Factory
IND2	Light	Factory
IND3	Food/Drugs/Chemicals	Factory
IND4	Metals/Minerals Processing	Factory
IND5	High Technology	Factory
IND6	Construction	Office
	<b>Agriculture</b>	
AGR1	Agriculture	
	<b>Religion/Non/Profit</b>	
REL1	Church/Non-Profit	
	<b>Government</b>	
GOV1	General Services	Office
GOV2	Emergency Response	Police/Fire Station/EOC
	<b>Education</b>	
EDU1	Grade Schools	
EDU2	Colleges/Universities	Does not include group housing

Πίνακας 2: Οι διάφορες κατηγορίες χρήσεων της μεθοδολογίας HAZUS, (Πηγή: HAZUS MR4 Technical manual, 2003)

Με βάση τη μεθοδολογία αυτή, πραγματοποιείται μία σύνδεση μεταξύ του

υπολογισμού των οικονομικών απωλειών, και των κατηγοριών χρήσεων. Οι οικονομικές απώλειες αυξάνονται αναλόγως των ποιοτικών προδιαγραφών και της σημαντικότητας του μελετώμενου κτιρίου, όπως επίσης και του εξοπλισμού του.

#### **2.1.4. Οι επιβληθέντες περιορισμοί της διαδικασίας εκτίμησης απωλειών**

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι των παραπάνω παρατιθέμενων εργασιών ταυτίζονται στην έδραση επι ικανού αριθμού παραδοχών και απλοποιήσεων, οι οποίες επιδρούν αρνητικά στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων από την ανάλυση, περιορίζοντας το εύρος τους. Οι παραδοχές αυτές ορίζονται κατ' ουσία εξαιτίας τόσο του σημαντικού όγκου δεδομένων που απαιτείται να ληφθούν υπόψη προς συγκρότηση του μοντέλου, όσο και του περιορισμού της υπολογιστικής ισχύς του εξοπλισμού, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη διενέργεια αναλύσεων εκτίμησης απωλειών με τη χρήση ειδικού λογισμικού.

Η αναλυτική διαδικασία αφορά βασικές απλοποιήσεις και παραδοχές, όπως:

- Η ύπαρξη και διαθεσιμότητα δεδομένων σχετικά με την σεισμική εδαφική επιτάχυνση (όπως εκτιμήσεις και μετρήσεις), καθότι δεν συνηθίζεται να λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες όπως οι γεωλογικές συνθήκες του υπεδάφους ή η μεταβλητότητα εδαφικής κινήσεως εξαιτίας της απόστασης.
- Η βάσει παραδοχής κατάταξη του μελετώμενου κτιρίου σε συγκεκριμένη τυπολογική κατηγορία, με βάση την οποία τα κτίρια που ανήκουν στην ίδια κατηγορία και αναμένεται να παρουσιάσουν παρόμοιες βλάβες σε ενδεχόμενη σεισμική δόνηση κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία.
- Το κατά πόσο υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες και σε ποιο βαθμό αναφορικά με τα αναλυόμενα αντικείμενα, δεδομένου πως σχετικά με τις περισσότερες τυπολογίες κτιρίων, δεν υφίστανται μέχρι σήμερα καμπύλες τρωτότητας και σχετικές αναλυτικές συναρτήσεις
- Η σημαντικότητα βλάβης δομικών στοιχείων, σύμφωνα με την

κατάταξή της στο αντίστοιχο επίπεδο βλάβης από ένα συγκεκριμένο αριθμό επιπέδων με διακριτά όρια και συγκεκριμένο εύρος.

- Ο βαθμός αναλύσεως κάθε βάσης δεδομένων αναφορικά με τα εξεταζόμενα κτίρια της μελετώμενης περιοχής, που καθορίζει και την γεωγραφική μονάδα και ο οποίος επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της αναλύσεως.

## 2.2. Τα διαθέσιμα Λογισμικά Προγράμματα εκτίμησης απωλειών

Ανεξαρτήτως της μεθόδου επιλογής, όταν επιχειρείται εκτίμηση απωλειών σε ενδεχόμενο σεισμικό συμβάν, καθίσταται απαραίτητη η επιλογή του κατάλληλου ειδικού λογισμικού προγράμματος, το οποίο θα δύναται να προσπελάσει τις διαθέσιμες πληροφορίες αναφορικά με την μελετώμενη εδαφική κίνηση και την τρωτότητα της συγκεκριμένης τυπολογίας των αναλυόμενων κτιρίων. Η ανάλυση εν προκειμένω διενεργείται με την επικουρική χρήση υφιστάμενων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), τα οποία είτε χρησιμοποιούνται ανεξαρτήτως του λογισμικού προγράμματος υπολογισμού απωλειών, είτε ως ενσωματωμένο σε αυτό λογισμικό.

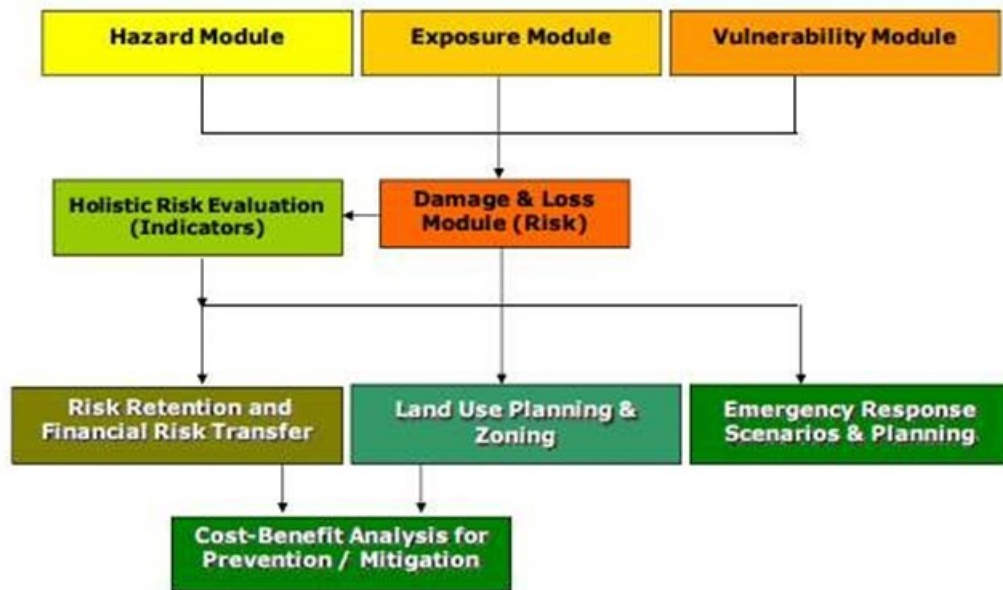
Ένας μεγάλος αριθμός λογισμικών προγραμμάτων υπολογισμού απωλειών ανήκουν στην κατηγορία λογισμικού Open Source (Ανοικτού Κώδικα) και χαρακτηρίζονται συνεπώς από τη μη επιβολή περιορισμών κατά τη διάθεση και χρήση τους, επιτρέποντας την διαμόρφωση του αλγορίθμου και του πηγαίου κώδικά τους από τον χρήστη, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας τους. Η ειδοποιός διαφορά των λογισμικών τέτοιου τύπου σε σύγκριση με τα λογισμικά προγράμματα που επιβάλλουν περιορισμούς, έγκειται στο γεγονός πως τα τελευταία διατίθενται δωρεάν, χωρίς ωστόσο να υποστηρίζεται η διαμόρφωση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών τους από τους χρήστες. Κατά συνέπεια, τα διαθέσιμα λογισμικά προγράμματα υπολογισμού απωλειών σε ενδεχόμενο σεισμού χωρίζονται σε αυτά που είναι ελεύθερης χρήσης και αυτά τα οποία είναι εμπορικής χρήσης και απαιτούν πληρωμή ή συνδρομή.

Σαφώς, ο αριθμός των χρηστών οι οποίοι θα χρησιμοποιούν το επιλεγόμενο λογισμικό αποτελεί κομβικό κριτήριο επιλογής του κατάλληλου προγράμματος,

καθώς επηρεάζει άμεσα το τελικό κόστος απόκτησης αδειών χρήσης σε περίπτωση επιλογής προγραμμάτων κλειστού κώδικα, όπως επίσης, κατά την επιλογή του κατάλληλου λογισμικού προγράμματος υπολογισμού απωλειών, σημαντικό είναι να εκτιμηθεί και τα ειδικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε προγράμματος, όπως το κατά πόσο είναι εύκολα προσβάσιμο και διαθέσιμο (π.χ. λήψη μέσω ίντερνετ), ή η συμβατότητά και η συνέργεια που προσφέρει σε ενδεχόμενη υποβοηθητική χρήση μαζί με άλλα λογισμικά.

### **2.2.1. Το Λογισμικό Κεντρικής Αμερικανικής Πιθανοτικής Εκτίμησης Τρωτότητας (CAPRA)**

Αποτελεί ένα λογισμικό πρόγραμμα που διαμορφώθηκε για την ικανοποίηση των αναγκών ανάλυσης απωλειών και υπολογισμού κινδύνου από εκδηλούμενα φυσικά φαινόμενα για την Κεντρική Αμερική. Η δημιουργία του λογισμικού αυτού επετεύχθη χάρη στη σύμπραξη της Παγκόσμιας Τράπεζας (World Bank), της UNISDR και της CEPREDENAC, υπό τον συντονισμό κρατικών αρχών και φορέων και κατά την αρχική διαμόρφωση του λογισμικού αυτού, βασικός στόχος αποτελούσε η ανταπόκριση έναντι των ειδικών συνθηκών, οι οποίες επικρατούν στην περιοχή της Κεντρικής Αμερικής. Σταδιακά ωστόσο, η εύρεια διάδοση της χρήσης του είχε ως συνέπεια την διάδοση της χρήσης και σε χώρες εκτός Κεντρικής Αμερικής.



Εικόνα 5: Απεικόνιση του Μοντέλου πιθανοτικής ανάλυσης και εφαρμογών διαχείρισης κινδύνου, (Πηγή: Cardona et al, 2012)

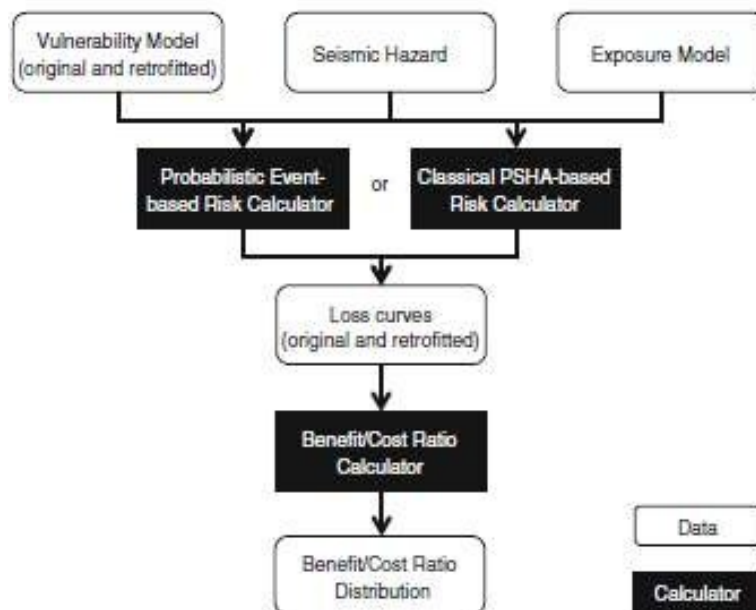
Το λογισμικό CAPRA εντάσσεται στην «οικογένεια» λογισμικών Open Source και είναι διαμορφωμένο σε πλατφόρμα GIS, με βάση την οποία καθίσταται δυνατή η απεικόνιση του του ενδεχόμενου βαθμού κινδύνου και του βαθμού έκθεσης της αναλυόμενης περιοχής. Το λογισμικό προσφέρει ποικίλες δυνατότητες ανάλυσης φυσικών κινδύνων, όπως η διεξαγωγή πιθανοτικών αναλύσεων κινδύνου, μέσα από τυποποιημένα μορφότυπα έκθεσης συγκεκριμένων στοιχείων των αναλυόμενων υποδομών και την δυνατότητα χρήσης επιπλέον εργαλείων, ως επιμέρους ενότητες του προγράμματος, οι οποίες προσφέρουν ποικίλες διαφορετικές δυνατότητες αναλύσεων των διαφορετικών μορφών κινδύνων και υπολογίζουν την πιθανότητα πρόκληση βλαβών και απωλειών από τις μορφές κινδύνου αυτές (Marulanda et al., 2013).

Η μέθοδος πιθανολογικής ανάλυσης κινδύνου την οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό προσομοιώνει την συχνότητα, την ένταση και την επικινδυνότητα των αναλυόμενων αντικειμένων, εργαλειοποιώντας τόσο στοχαστικές, όσο και ιστορικές προσεγγίσεις. Κατόπιν, οι εξαγόμενες πληροφορίες δύναται να συνδυαστεί με διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την τρωτότητα και τον βαθμό έκθεσης των αναλυόμενων υποδομών και να αναλυθούν σε χωρικό επίπεδο, προς υπολογισμό των ενδεχόμενων απωλειών. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα αποδίδονται σε μορφή παραγόντων κινδύνου, όπως

για παράδειγμα οι αναμενόμενες απώλειες κατά έτος, οι ενδεχόμενες μέγιστες απώλειες και η καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης ανά περιόδους επαναφοράς. Οι δυνατότητες αυτές καθιερώνουν το λογισμικό ως πλέον κατάλληλο προς διεξαγωγή αναλύσεων κινδύνου εξαιτίας πολλαπλής επικινδυνότητας.

### 2.2.2. Το λογισμικό πρόγραμμα OpenQuake

Αποτελεί ένα πρόγραμμα, το οποίο δημιουργήθηκε από τον οργανισμό Global Earthquake Model στην Ιταλία, ως αποτέλεσμα της σύμπραξης Ιδιωτικού και Δημοσίου τομέα και αποτελεί μια διαρκώς εξελισσόμενη πλατφόρμα, η οποία στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ποιοτικού και προσιτού στον χρήστη εργαλείου υπολογισμού σεισμικού κινδύνου και ανάλυσης επικινδυνότητας υψηλής απόδοσης, με δυνατότητα παραγωγής αξιόπιστων δεδομένων σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 6: Απεικόνιση διαγράμματος ροής ανασχεδιασμού σε υφιστάμενες υποδομές, (Πηγή: Silva et al, 2014)



Η ανάπτυξη του λογισμικού ξεκίνησε το 2009 μετά από ενδελεχή έρευνα επι των τότε σύγχρονων διαθέσιμων λογισμικών ανάλυσης σεισμικών κινδύνων ανοικτού κώδικα, τα αποτελέσματα της οποίας καθόρισαν και τις προδιαγραφές του (Silva et al, 2014),.

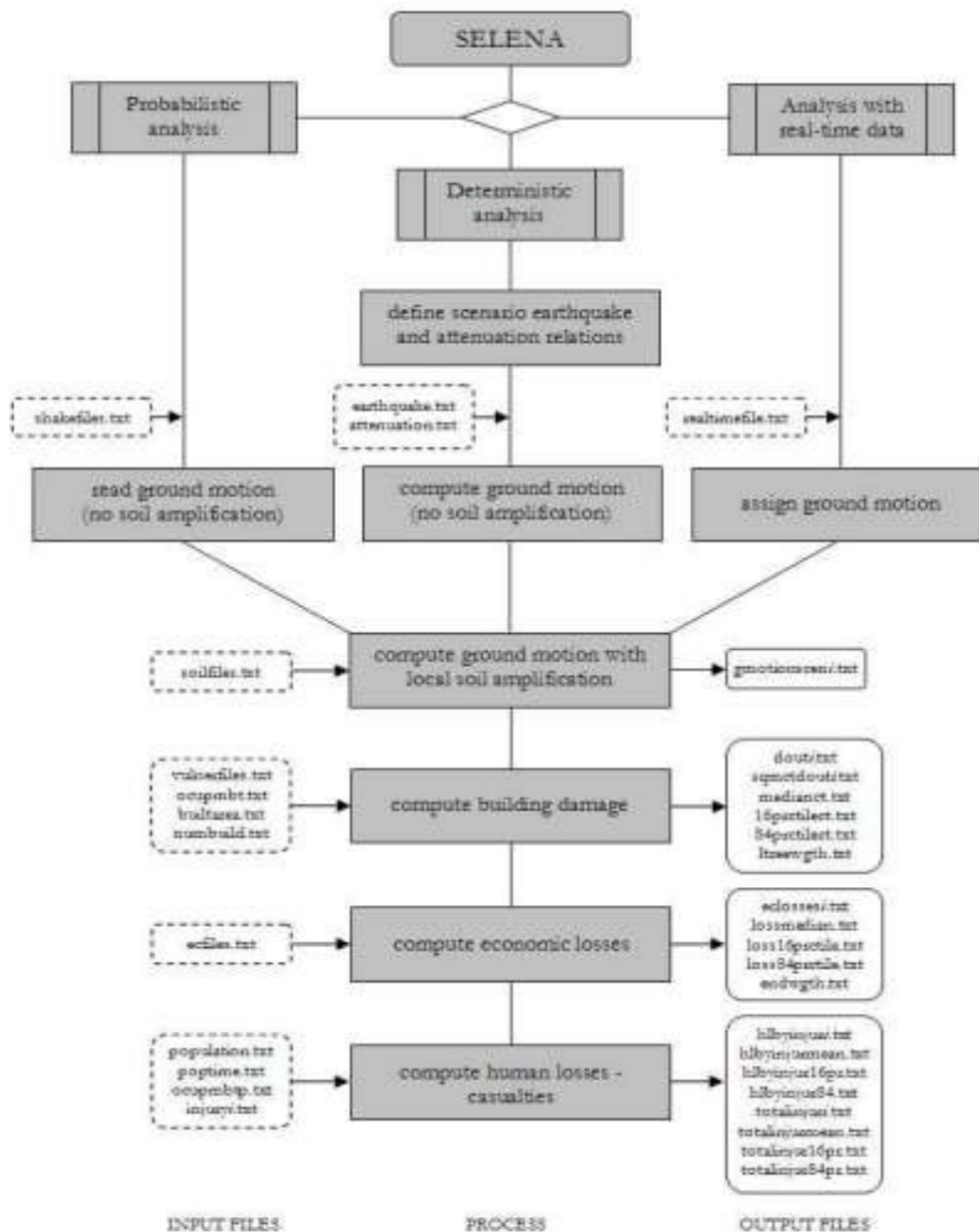
Το λογισμικό είναι διαθέσιμο σε ανοικτά προσβάσιμο διαδικτυακό αποθετήριο (Github) και έχει δημιουργηθεί με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python. Η λειτουργία του περιλαμβάνει την συμβολή 5 διαφορετικών υπολογιστικών τμημάτων, τα οποία υπολογίζουν ενδεχόμενες απώλειες και βλάβες (υλικές και έμψυχες), οι οποίες αναμένεται να προκληθούν είτε ως απόρροια της πιθανότητας εκδήλωσης του συνόλου των πιθανών σεισμικών γεγονότων εντός της μελετώμενης περιοχής, είτε ως απόρροια συγκεκριμένου σεισμικού συμβάντος, σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο. Η διαφορά του λογισμικού έναντι παρόμοιου τύπου λογισμικών, έγκειται στη διενέργεια τόσο υπολογισμού σεισμικού κινδύνου, όσο και ανάλυσης επικινδυνότητας με τη χρήση του ίδιου λογισμικού. Επιπροσθέτως, το λογισμικό αυτό καθιστά δυνατή τη διενέργεια υπολογισμών για κάθε περίπτωση από τις προαναφερθείσες, ενώ επίσης καθιστά δυνατή τη χρήση προσαρμοσμένων από τον χρήστη μοντέλων τρωτότητας, έκθεσης και κινδύνου. Βασικό πλεονέκτημα του εν λόγω λογισμικού αποτελούν αφενός η δυνατότητα μοντελοποίησης πόρων, όπως είναι ο πληθυσμός ή οι υποδομές και αφετέρου η παροχή δεδομένων προς υποστήριξη των αποφάσεων ενίσχυσης ή ανασχεδίασης υφιστάμενων υποδομών, προς υποστήριξη των αναλύσεων οφέλους-κόστους.

### **2.2.3. Το λογισμικό πρόγραμμα Seismic Loss Estimation using a Logic Tree Approach (SELENA)**

Το λογισμικό αυτό αποτελεί το αποτέλεσμα συνεργασίας του Ισπανικού Πανεπιστημίου Αλικάντε, του NORSAR (Γεωεπιστημονικός Σεισμολογικός Οργανισμός) και του ICG (Διεθνές Κέντρο Γεωλογικών Κινδύνων). Ο βασικός στόχος της σύμπραξης αυτής ήταν η διαμόρφωση ενός λογισμικού εκτίμησης απωλειών, το οποίο θα ήταν δυνατό να εισάγει οποιασδήποτε μορφής δεδομένα. Προς εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού, το λογισμικό έχει αρχικά διαμορφωθεί στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB και το 2009 ο κώδικάς του

επαναδιαμορφώθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C.

Το λογισμικό SELENA δεν προβλέπει την ενσωμάτωση συγκεκριμένων λογισμικών GIS, με αποτέλεσμα να αποτελεί μια ευέλικτη λύση. Επιπροσθέτως, τα εισαγόμενα δεδομένα, όπως και τα παραγόμενα αποτελέσματα των αναλύσεων του λογισμικού διατηρούν την μορφή αρχείου \*.txt (Κωδικοποίηση ASCII), γεγονός το οποίο επιτρέπει την προσπελασιμότητά τους από ένα εύρος πλατφόρμων GIS.

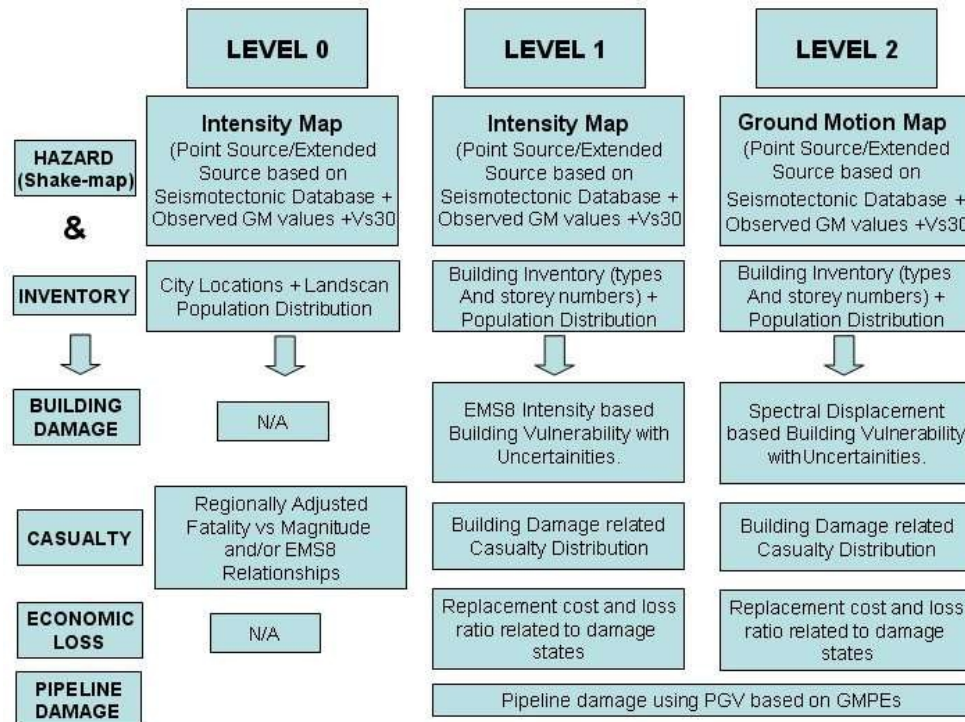


Εικόνα 7: Απεικόνιση του διαγράμματος ροής του SELENA, (Πηγή: SELENA Εγχειρίδιο χρήστη, 2010)

Τα αποτελέσματα των διεξαγόμενων αναλύσεων του λογισμικού απεικονίζονται σε μορφή χάρτη με τη βοήθεια του λογισμικού *Risk Illustrator for SELENA* (RISe), τύπου GIS, το οποίο αναπτύχθηκε παράλληλα με το κυρίως λογισμικό και διαθέτει επίσης ανοικτό κώδικα. Το RISe αποτελεί ουσιαστικά το βήμα μετάβασης στην αναλυτική διαδικασία, μέσα από τη μετατροπή των αρχείων εισόδου και εξόδου σε αρχεία KML. Αρχεία του τύπου αυτού είναι δυνατόν να απεικονισθούν ως υψηλής αναλύσεως εικόνες δορυφόρου σε εφαρμογές, όπως η εφαρμογή Earth της Google.

#### **2.2.4. Το λογισμικό Earthquake Loss Estimation Routine (ELER)**

Το λογισμικό αυτό είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας του EMSC (Ευρωπαϊκού Μεσογειακού Σεισμολογικού Κέντρου), του Imperial College, και του NOR SAR. Το ELER έχει επίσης δημιουργηθεί με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB και κατά την αρχική του μορφή επικέντρωνε κυρίως στην ευρύτερη Ευρω-Μεσογειακή περιοχή. Σταδιακά, το λογισμικό υπέστη τροποποιήσεις, με αποτέλεσμα οι παράμετροι του να είναι τροποποιήσιμες και με σκοπό να είναι εφικτή η χρήση του σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος για την κατά αποκλειστικότητα μελέτη σεισμικών φαινομένων. Οι σημερινές δυνατότητες του λογισμικού περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την πρόβλεψη αναμενόμενων απωλειών σε μελλοντικά σεισμικά γεγονότα και την εκτίμηση με βάση πραγματικά περιστατικά.



Εικόνα 8: Απεικόνιση των τριών επιπέδων ανάλυσης του ELER, (Πηγή: ELER v3.0 manual, 2010)

Με βάση την παραπάνω εικόνα και σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος, παρατίθενται ακολούθως συνοπτικά τα επίπεδα μεθοδολογίας αναλύσεως του λογισμικού.

- Με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα κτίρια της περιοχής μελέτης, διενεργείται εκτίμηση των απωλειών ανθρώπινων ζώων και των βλαβών δομικών στοιχείων βάσει ενός ή και περισσότερων επιπέδων τρωτότητας του λογισμικού
- Ισχυροποιείται η αξιοπιστία των θεωρητικών εκτιμήσεων με την ενσωμάτωση διαθέσιμων δεδομένων σχετικά με την εδαφική κίνηση (προαιρετικό βήμα).
- Υπολογίζεται η κατανομή σε χωρικό επίπεδο συγκεκριμένων παραμέτρων της εδαφικής κίνησης (απαιτείται η γνώση πληροφοριών σχετικά με το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης και με το μέγεθος αυτής).
- Διενεργείται υπολογισμός των βλαβών του δικτύου αγωγών.

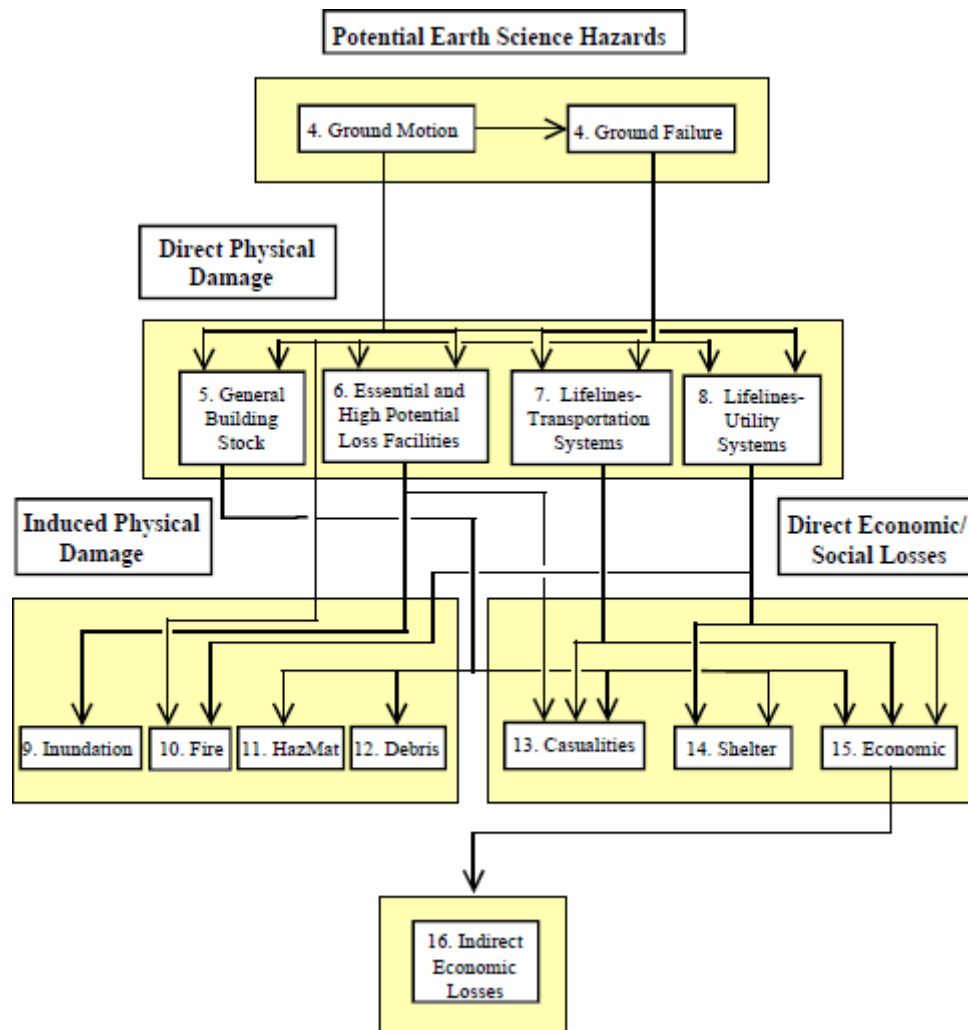
- Διενεργείται υπολογισμός των οικονομικών απωλειών των βλαβών (απαιτείται η διαπίστωση των ενδεχόμενων βλαβών).

Τα δύο πρώτα επίπεδα αναλύσεως του λογισμικού (Επίπεδο 0 και Επίπεδο 1) προσφέρουν αναλυτικές κατανομές της εντάσεως και υπολογισμό εκτιμώμενων απωλειών με την χρήση χωρικών πληροφοριών μη αστικών περιοχών. Στο τρίτο επίπεδο (Επίπεδο 2) διενεργείται υπολογισμός έμψυχων και υλικών απωλειών αστικών περιοχών.

### **2.2.5. HAZUS-MH**

Το λογισμικό HAZUS-MH είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ του Ινστιτούτου NIBS (Ινστιτούτο Οικοδομικών Επιστημών) και της FEMA και έχει βασιστεί στην ομώνυμη μεθοδολογία, στοχεύοντας στον υπολογισμό των απωλειών και βλαβών συνεπεία φυσικών καταστροφών. Αποτελεί λογισμικό κλειστού κώδικα και προορίζεται για χρήση κυρίως από τους κρατικούς φορείς, αλλά και για ιδιωτική χρήση. Το HAZUS-MH είναι παραμετροποιημένο, ώστε να είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.

Με την χρήση της πλατφόρμας GIS από το λογισμικό επιτυγχάνεται η κατάρτιση χαρτών βλαβών και χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας με βάσει αναλύσεις τριών επιπέδων πολυπλοκότητας (Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού HAZUS MR4I, 2003). Στο επίπεδο 1 ενσωματώνονται διαθέσιμα σχετικά δεδομένα από την εθνική βάση δεδομένων του προγράμματος. Στο επίπεδο 2 είναι δυνατή η επεξεργασία των υφιστάμενων δεδομένων, ο εμπλουτισμός ή η αντικατάστασή τους, προς εξατομίκευση των παραγόμενων αποτελεσμάτων προσαρμοσμένων στη μελετώμενη γεωγραφική περιοχή. Στο επίπεδο 3 ο χρήστης δύναται να αξιοποιεί ειδικές γνώσεις ή τεχνικές κατά την ανάλυση και τη μελέτη ειδικών φαινομένων.



Εικόνα 9: Απεικόνιση διαγράμματος ροής της μεθοδολογίας υπολογισμού σεισμικών απωλειών, (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού HAZUS MR4, 2003)

Τα χαρακτηριστικά αυτά πλαισιώνονται από ένα σύστημα 36 πρότυπων διαφορετικών τυπολογιών κτιρίων και 33 ειδών χρήσης. Με τις προδιαγραφές αυτές, το λογισμικό είναι ικανό να διενεργεί αναλύσεις εκτίμησης σε βιομηχανικά κτίρια, σε δίκτυα κοινής ωφέλειας, σε εμπορικά κτίρια και σε κτίρια με χρήση κατοικίας, σε συνάρτηση της εντάσεως της εδαφικής κίνησης, υπολογιζόμενη με βάση τα μεγέθη του ελαστικού φάσματος.

Μεταξύ των σημαντικότερων μειονεκτημάτων/περιορισμών του λογισμικού εντοπίζεται η αδυναμία παραγωγής αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε κτιριακές ομάδες, σε σχέση με την ανάλυση μεμονωμένων κτιρίων. Ένα άλλο μειονέκτημα

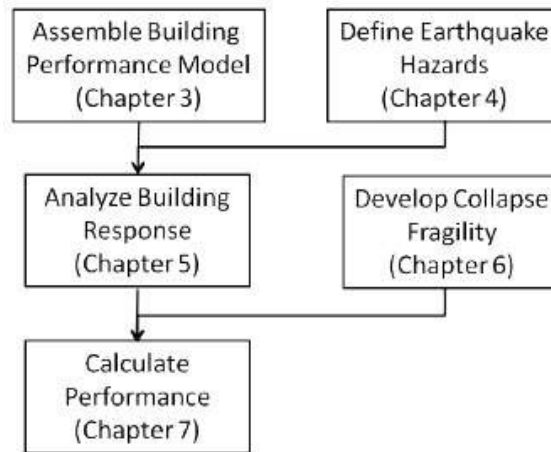
αποτελεί η εξαγωγή αποτελεσμάτων μικρής ακρίβειας αναφορικά με τα δίκτυα κοινής ωφέλειας, ενώ η διενέργεια ανάλυσης απωλειών σε γεωγραφικό επίπεδο, εντός ενός ευρέως αστικού ιστού αναφορικά με σεισμικές διεγέρσεις, που έχουν ένταση χαμηλότερη του Moment Magnitude=6 (Σεισμική ροπή). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως σημαντικός παράγοντας και η αυξημένη απαιτούμενη διάρκεια (μερικές φορές μεγαλύτερη των 2 ωρών), ούτως ώστε να εκτελεστεί ταχεία χωρική ανάλυση μεγάλης γεωγραφικής κλίμακας (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης Λογισμικού HAZUS MR4, 2003).

### **2.3. Υπολογισμός απωλειών και αποτίμηση συμπεριφοράς με βάση τη μεθοδολογία FEMA**

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας FEMA εδράζεται στην έρευνα αντισεισμικού σχεδιασμού με στάθμες επιτελεστικότητας και προέκυψε ως αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ του Συμβουλίου ATC (Συμβουλίου Εφαρμοσμένης Τεχνολογίας) και της FEMA. Η ανάπτυξή του στηρίχθηκε σε προγενέστερα κανονιστικά κείμενα και είχε ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση της ATC-58 (FEMA, 2018).

Βασικά προαπαιτούμενα της ανάπτυξης της μεθοδολογίας αποτέλεσαν η διαμόρφωση μιας μεθοδολογίας εκτίμησης σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων κάτω από την επίδραση συγκεκριμένης σεισμικής δόνησης, κατά την οποία θα λαμβάνονται υπόψιν όλες οι πιθανές αβεβαιότητες, και η δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας σε αναλύσεις κτιρίων ανεξαρτήτου χρήσεως, χρόνου και είδους κατασκευής, σύμφωνα με τον αντισεισμικό σχεδιασμό PBSD (σχεδιασμός αντισεισμικότητας κτιρίου βάσει αποδόσεως), με βάση τον οποίο υπολογίζεται η πιθανότητα καταγραφής διαφόρων απωλειών σε ενδεχόμενα σεισμικά συμβάντα τα οποία ενδέχεται να πλήξουν τα μελετώμενα κτίρια.

Η σεισμική συμπεριφορά των κτιρίων που αναλύονται αποτυπώνεται σε πιθανοτική μορφή (για παράδειγμα πιθανές ανθρώπινες απώλειες, πιθανές έμμεσες οικονομικές απώλειες, πιθανές άμεσες οικονομικές απώλειες και τέλος πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις).



Εικόνα 10: Απεικόνιση Διαγράμματος ροής FEMA P-58, (Πηγή: FEMA, 2018)

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

Τα ειδικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού του μελετώμενου κτιρίου, από τα οποία κρίνεται ο βαθμός της τρωτότητας των μη δομικών και δομικών στοιχείων του, αποτελούν τα βασικά δεδομένα εφαρμογής της μεθοδολογίας αυτής.

Κατά το αρχικό στάδιο, τα στοιχεία κατηγοριοποιούνται βάσει καταρτισμένων πινάκων (παρατίθενται εν συνεχεία), ενώ παρέχεται επίσης η δυνατότητα εισαγωγής επιπλέον παραμέτρων εκτός των παρατιθέμενων πινάκων. Η κατηγοριοποίηση σχετίζεται με τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Το στατικό σύστημα του φέροντος οργανισμού, τα στοιχεία που το αποτελούν και το υλικό από το οποίο αυτά κατασκευάζονται.



**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 11: Πίνακας Δομικών στοιχείων με βάση τη μεθοδολογία FEMA P-58, (Πηγή: FEMA, 2018)

- Το είδος χρήσης του μελετώμενου κτιρίου, όπως και τις περιεχόμενες ποσότητες του σχετικού πληθυσμιακού μοντέλου και την μη δομικών στοιχείων.

**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 12: Πίνακας απεικόνισης κτιριακών χρήσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία FEMA P-58, (Πηγή: FEMA, 2018)

Κατόπιν συγκεντρώσεως των απαιτούμενων πληροφοριών, συγκροτείται το μοντέλο του κτιρίου και ακολούθως το μοντέλο αυτό τίθεται υπό ανάλυση προς αποτίμηση των πιθανοτήτων ανάκυψης βλαβών σε δομικά και μη δομικά μέρη συνεπεία σεισμικού γεγονότος. Με τις αναλύσεις αυτές προκύπτουν εκτιμήσεις σε αναφορικά με αναμενόμενα ανθρώπινα θύματα, πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και πιθανό απαιτούμενο χρόνο αποκατάστασης των προκληθέντων βλαβών.

Κατά την διενέργεια ανάλυσης του μελετώμενου κτιρίου, εφαρμόζονται 3 διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση αφορά σε κτίρια τα οποία σχεδιαστικά πληρούν ανάλογες κανονιστικές προδιαγραφές, εφαρμόζεται η θεώρηση πως το κτίριο υφίσταται δεδομένης εντάσεως σεισμική φόρτιση, προσδιοριζόμενη από το ελαστικό φάσμα απόκρισης διατηρώντας συντελεστή απόσβεσης 5%.

Η δευτερή προσέγγιση εφαρμόζεται σε σενάρια εκτίμησης απωλειών εξαιτίας της επανάληψης ιστορικών σεισμικών γεγονότων, όπου διενεργείται ανάλυση συγκεκριμένης εντάσεως σεισμικής διέγερσης, η οποία λαμβάνει χώρο σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή πλησίον του μελετώμενου κτιρίου και η προέλευση της οποίας εντοπίζεται σε γνωστό ρήγμα. Κατά την προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπόψιν η εκδήλωση συγκεκριμένου σεισμού και όχι συγκεκριμένης

εντάσεως.

Η τρίτη και τελευταία προσέγγιση εφαρμόζεται κατά την ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός συγκεκριμένου κτιρίου, επί δεδομένου χρονικού διαστήματος. Κατά την εφαρμογή της προσέγγισης αυτής, συνεκτιμάται πιθανοτικά το ενδεχόμενο εκδήλωσης του συνόλου των πιθανών σεισμών, οι οποίοι υπάρχει περίπτωση να εκδηλωθούν κατά το μελετώμενο χρονικό διάστημα. Κατά τη περίπτωση αυτή, λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός αβεβαιότητας ο οποίος προκύπτει τόσο από την εστία και το μέγεθος της σεισμικής δόνησης, όσο και από την αβεβαιότητα η οποία σχετίζεται με την ένταση της εδαφικής κίνησης.

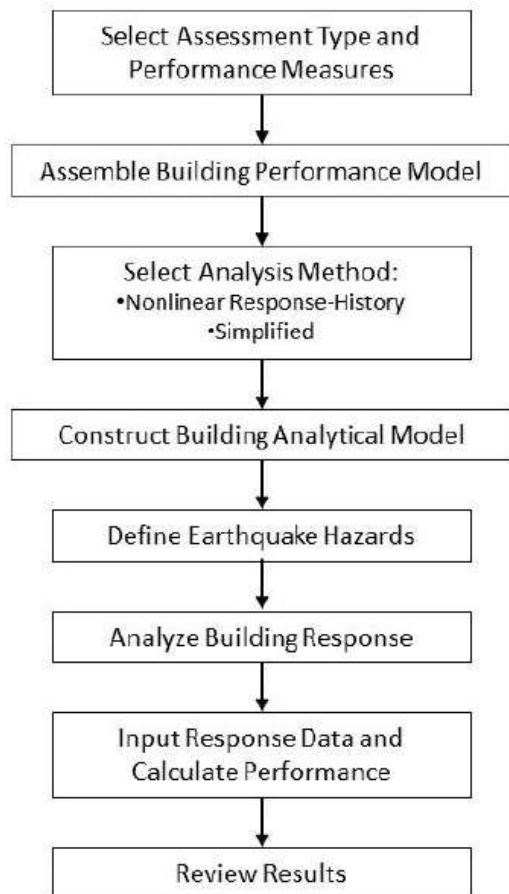
Και οι τρεις προσεγγίσεις επιχειρούν αποκλειστικά και μόνο την εκτίμηση πιθανών αναμενόμενων απωλειών εντός του εσωτερικού των μελετώμενων κτιρίων.

### **2.3.2. Το εργαλείο εκτίμησης υπολογισμού απόδοσης PACT (Performance Assessment Calculation Tool)**

Οι παρατιθέμενοι στην ανωτέρω ενότητα (2.3.1.), εμπεριέχουν πληροφορίες, οι οποίες συγκεντρώθηκαν κατόπιν έρευνας με στόχο τον συσχετισμό των συνεπειών και της τρωτότητας για ένα σημαντικό αριθμό δομικών συστημάτων. Το εργαλείο PACT αξιοποιεί τα δεδομένα αυτά διενεργώντας απαραίτητους πιθανοτικούς υπολογισμούς προς υπολογισμό των απωλειών.

Το εργαλείο αποτελείται από επιπλέον υποστηρικτικές εφαρμογές, που διαπιστώνουν τα ειδικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων κτιρίων και τροποποιούν ανάλογα τα δεδομένα τα οποία εμπεριέχονται στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού, με αποτέλεσμα την απόδοση υπολογισμών αναφορικά με τις πιθανές αναμενόμενες απώλειες και την τρωτότητα των αναλυόμενων κτιρίων.

Τα βήματα δημιουργίας και ανάλυσης του προσομοιώματος απεικονίζονται ακολούθως.



Εικόνα 13: Απεικόνιση της Διαδικασίας αποτίμησης κτιρίων με το εργαλείο PACT, (Πηγή: FEMA, 2018)

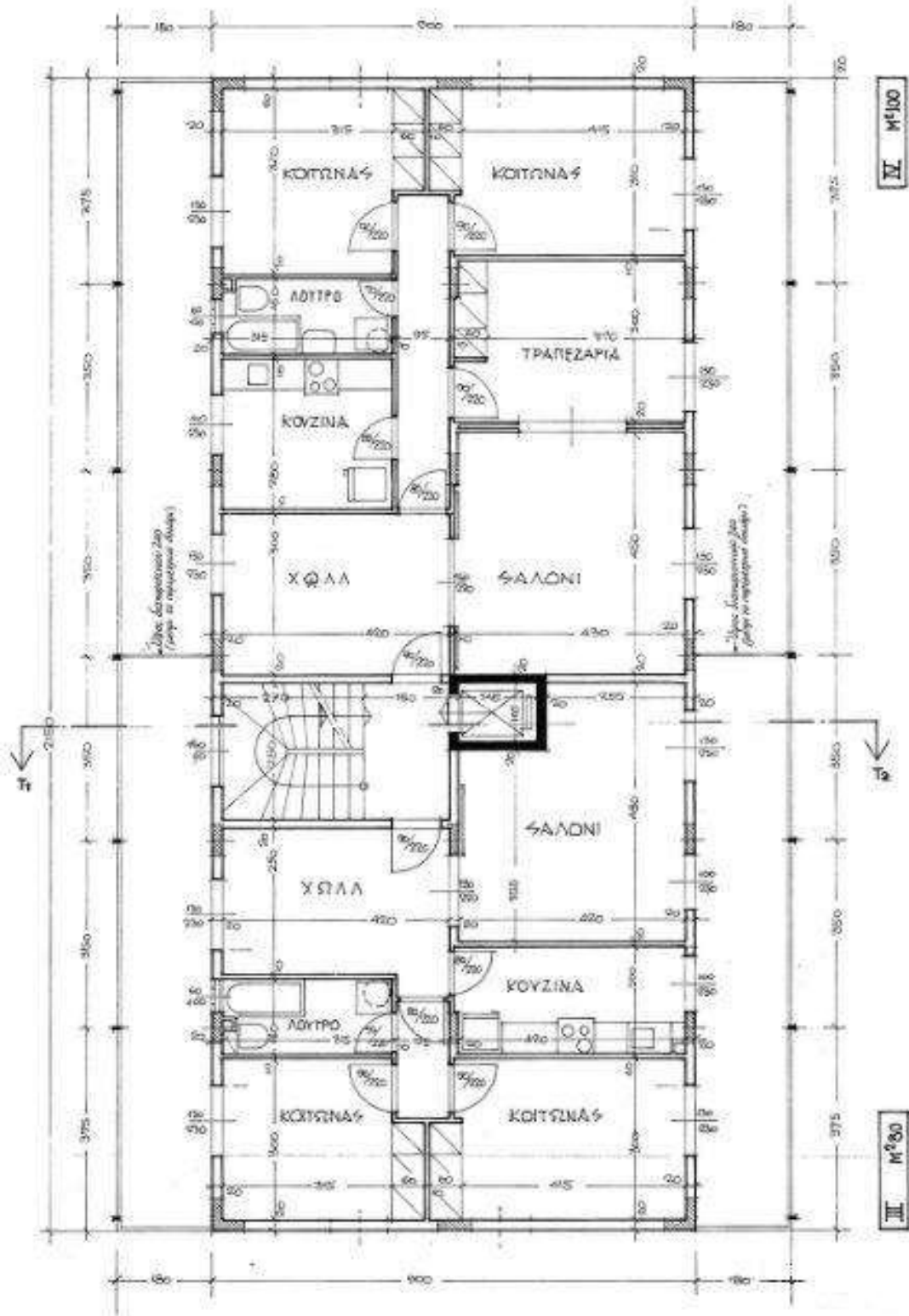
Κατόπιν επιλογής του κτιρίου το οποίο θα αναλυθεί και σύμφωνα με το παραπάνω απεικονιζόμενο διάγραμμα, δημιουργείται το προσομοίωμα. Το προσομοίωμα αυτό αφορά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας του κτιρίου, την ποσότητα, την τρωτότητα και τη θέση των μη δομικών και δομικών στοιχείων, εκτιμώντας τις αναμενόμενες βλάβες των στοιχείων αυτών. Οι εκτιμώμενες συνέπειες των βλαβών συσχετίζονται με την εμπειροχόμενη στο λογισμικό συνάρτηση τρωτότητας, εκφράζοντας την πιθανότητα κατάρρευσης του αναλυόμενου κτιρίου και επηρεάζουν ενδεχόμενη απόφαση επιδιόρθωσης ή μη του μελετώμενου κτιρίου.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### 3.1.Επιλογή και δομικά χαρακτηριστικά κτηρίου

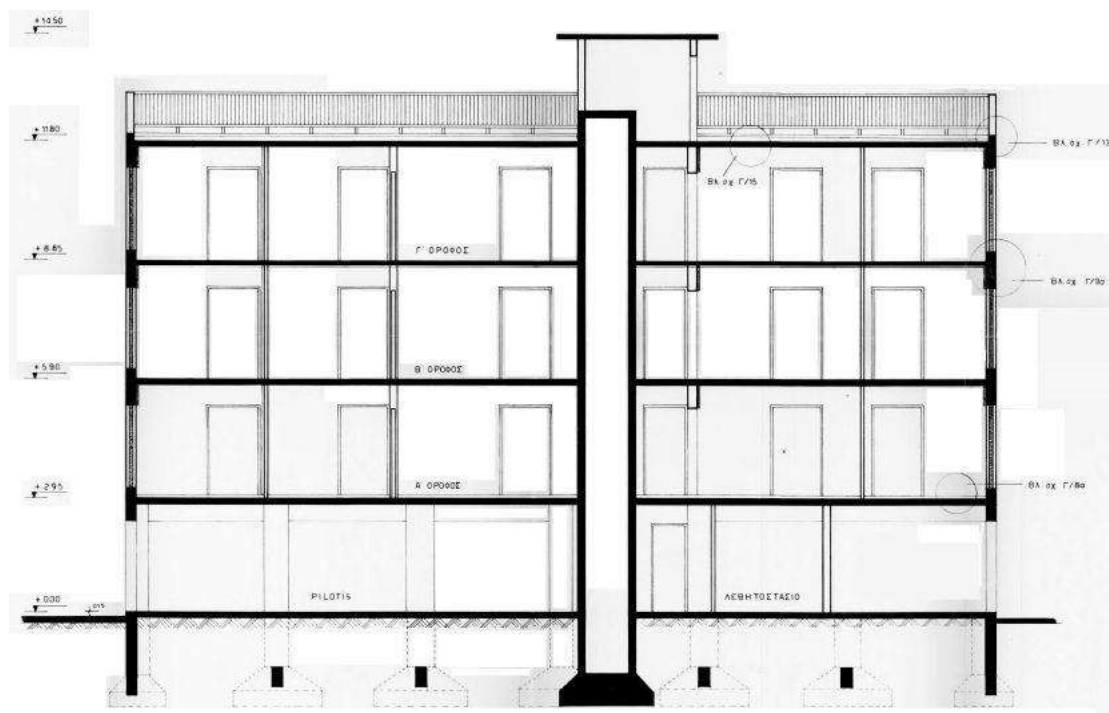
Στα κεφάλαια 1 και 2 έγινε η παράθεση των αρχών με βάση τις οποίες γίνεται ο προσδιορισμός των τρωτοτήτων όσον αφορά την υποδομή ή σε γεωγραφικό επίπεδο, αφού οι πιθανές βλάβες που μπορεί να προκληθούν στις κτηριακές υποδομές οδηγούν σε ενδεχόμενες απώλειες. Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια πειραματική δοκιμή μιας μελέτης περίπτωσης ενός υπαρκτού κτηρίου. Το εν λόγω κτήριο θα αποτιμηθεί με βάση τις αρχές της μεθοδολογίας FEMA και θα αναλυθεί με το ελεύθερο λογισμικό PACT, ούτως ώστε να γίνει εκτίμηση των ενδεχόμενων απωλειών εάν αυτό εκτεθεί σε σεισμική καταπόνηση.



Εικόνα 14: Κάτοψη – Τυπικός Όροφος.

(Πηγή: Προσωπικό Αρχείο Συγγραφέα)

Το υπό εξέταση κτήριο είναι ένα εκ των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων πρότυπης μελέτης η οποία διεξήχθη από την Διεύθυνση Μελετών Έργων από τον Οργανισμό Εργατικής Κατοικίας (ΟΕΚ και πλέον αντικατεστημένος από τον ΟΑΕΔ, Οργανισμό Απασχόλησης Εργατικού Δυναμικού) προκειμένου να εξυπηρετηθούν σκοποί που αφορούν την οργάνωση των κρατικών δομών. Από πλευράς μορφολογίας το εν λόγω κτήριο αποτελεί μια παραλλαγή υπ. αριθ. 3.12B(α) και ισοδυναμεί με κτηριακή δομή χρήσης κατοικίας. Το κτήριο συμπεριλαμβάνει υπόγειο, ισόγειο (ύπαρξη pilotis), 3 ορόφους ίδιας κάτοψης (τυπικοί), απόληξη κλιμακοστασίου στο δώμα αλλά και μια πληθώρα βοηθητικών χώρων.



Εικόνα 15: Κατά μήκος τομή.

(Πηγή: Προσωπικό Αρχείο Συγγραφέα)

Στις ακόλουθες υποενότητες γίνεται μια πιο αναλυτική παρουσίαση των δομικών ιδιοτήτων της κατασκευής αλλά και των παραδοχών που λαμβάνονται υπόψιν για να εκτελεσθεί η ανάλυση.

### 3.2. Διαδικασία προσομοίωσης κτηρίου

Γενικά, ένα κτηριακό προσομοίωμα (στατικό μοντέλο) είναι μια περιγραφή με οργανωμένο τρόπο όλων των στοιχείων που το απαρτίζουν (παράδειγμα αποτελεί η περιγραφή του στατικού συστήματος, των δομικών αλλά και των μη δομικών μελών του, η χρήση του κτηρίου κ.ο.κ.) Σε καθένα εξ αυτών των στοιχείων συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετες πληροφορίες που έχουν σχέση με την τρωτότητα του, τις απαιτήσεις που οφείλουν να ικανοποιούνται σε ενδεχόμενο σεισμικής του καταπόνησης, αλλά και κάθε μορφή βλαβών που μπορεί να εμφανισθούν αν δεν είναι εφικτή η εκπλήρωση των προαναφερθείσων απαιτήσεων, όπως και ποιες είναι οι συνεπακόλουθες συνέπειες που θα έχουν οι βλάβες αυτές.

Πιο συγκεκριμένα, η αναλυτική καταγραφή των στοιχείων του κτηρίου που αναλύεται οφείλει για σκοπούς αυξημένης ακρίβειας ως προς την πρόγνωση των βλαβών και γενικότερης πληρότητας, να συμπεριλαμβάνει την συνολική περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, μια λίστα με τα μέλη του (είτε είναι δομικά, είτε μη δομικά), την αναλυτική καταγραφή των ομάδων τρωτότητας και την βέλτιστη εφικτή εκτίμηση του πληθυσμού του κτηρίου και της εξέλιξής του (χρήση συγκεκριμένων προγνωστικών μοντέλων), και τέλος την καταγραφή των χρήσεών του. Τα συγκεκριμένα στοιχεία συλλέγονται κατά κύριο λόγο από το φάκελο μελέτης της οικοδομής και η συμπλήρωσή τους γίνεται κατά την κρίση του μελετητή μηχανικού, ενώ η επιλογή των παραδοχών που απαιτούνται γίνεται με βάση τις οδηγίες που δίνονται από το εγχειρίδιο χρήσης (FEMA, 2018b).

Με βάση τα προαναφερθέντα στοιχεία, για να δημιουργηθεί το προσομοίωμα, υιοθετείται η πορεία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην εν λόγω περίπτωση, η τμηματική διαδικασία συμπεριλαμβάνει τις ενέργειες που θα αναλυθούν ακολούθως και τα στοιχεία που απαιτούνται θα εισαχθούν με διαδοχικό τρόπο στα εκάστοτε πεδία, με υιοθέτηση της σειράς που εμφανίζονται οι αντίστοιχοι παράμετροι στις καρτέλες που έχει το πρόγραμμα.



### 3.2.1. Δεδομένα Κτηριακού Έργου

The screenshot shows the PACT Building Modeler software interface. The title bar reads "PACT Building Modeler - Εκτίμηση σεισμικών απωλειών στον Ελλαδικό χώρο". The menu bar includes "File", "Edit", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a tabbed interface with tabs for "Project Info", "Building Info", "Population", "Component Fragilities", "Performance Groups", "Collapse Fragility", "Structural Analysis Results", "Residual Drift", and "Hazard Curve". The "Project Info" tab is active, showing the following fields:

- 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: (empty field)
- Engineer: Μαρία Ζιμηή
- Cost Multipliers:
  - Region Cost Multiplier: 1,00
  - Date Cost Multiplier: 1,00
 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:** Το πεδίο λαμβάνει τιμές που καθορίζονται σε σχέση με τα μοναδικά χαρακτηριστικά της περιοχής του κτηρίου, ούτως ώστε να αποτυπώνει το ρεαλιστικό κόστος για να επισκευαστεί κατά τη χρονική εποχή που διενεργείται η ανάλυση. Εν προκειμένω, συνυπολογίζοντας το στοιχείο πως ο κτηριακός τύπος της οικοδομής που αναλύεται, είναι ευρύτατα χρησιμοποιούμενος σε μια πληθώρα περιοχών της Ελλάδας, για να απλοποιηθεί η ανάλυση επιλέγουμε να αγνοήσουμε τις ενδεχόμενες διαφορές που εμφανίζονται στα επισκευαστικά κόστη από περιοχή σε περιοχή. Δίνουμε στην εν λόγω παράμετρο τιμή μονάδα.

**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:** Το πεδίο αφορά μια χρησιμοποιούμενη παράμετρο που σχετίζεται με τη διεργασία της αποτίμησης του κτηρίου. Γίνεται η πρόταση από τα εγχειρίδια του προγράμματος να λάβει μη μηδενική τιμή προκειμένου τούτο να εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα θα έχουν ομοιογένεια σε κάθε επανάληψη των αναλύσεων. Ως εκ τούτου, για να αποφύγουμε πιθανά αποτελέσματα που δεν έχουν λογική ερμηνεία, γίνεται η επιλογή της τιμής 5.0, όπως μάλιστα αυτή είναι default από το ίδιο το λογισμικό.

### 3.2.2.Κτηριακά δεδομένα

PACT Building Modeler - Εκτίμηση σεισμικών απωλειών στον Ελλαδικό χώρο

File Edit Tools Help

Project Info Building Info Population Component Fragilities Performance Groups Collapse Fragility Structural Analysis Results Residual Drift Hazard Curve

**Number of Stories:** 4

Total Replacement Cost (\$): 867,593 Replacement Time (days): 100.00 Total Loss Threshold (As Ratio of Total Replacement Cost)

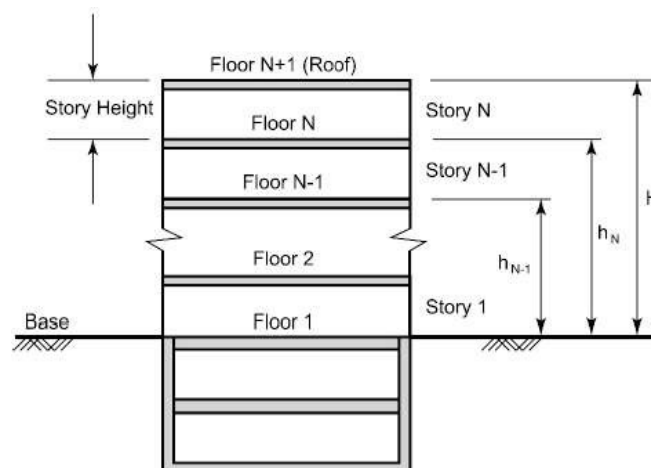
Core and Shell Replacement Cost (\$): 347,037 Max Workers per sq. m. 0.001 1

Most Typical Defaults:

Floor Area (sq. m.): 193.50 Story Height (m.): 2.95

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	Dwma		193.50	1	1	1.2

**Number of Stories:** Με τον όρο storey (στάθμη) αναφέρεται το λογισμικό στον κτηριακό όγκο που καθορίζεται μεταξύ των ανώτερων επιπέδων δύο διαδοχικών ορόφων άνωθεν του εδάφους. Συμπεριλαμβάνονται τα τρωτά στοιχεία που εισάγονται στο μοντέλο. Για τη μελέτη περίπτωσης μας όπου το κτήριο είναι τυπολογίας 3.12B(α) και έχει ισόγειο και 3 ορόφους ίδιας κάτοψης, τίθεται number of stories = 4. Στο σημείο αυτό γίνεται η επισήμανση πως δεν τίθεται στον αριθμό σταθμών το υπόγειο για να δημιουργηθεί το μοντέλο αφού εκτιμάται ως πλήρως πακτωμένο και δεν εμπεριέχονται σε αυτό εν δυνάμει τρωτά στοιχεία.



Εικόνα 16: Αριθμός σταθμών και αντίστοιχο ύψος του σύμφωνα με το λογισμικό PACT. (Πηγή: FEMA, 2018b)

**Story Height:** Με τον τρόπο που διατυπώθηκε ο ανωτέρω ορισμός και σύμφωνα με τα συμπεριληφθέντα στοιχεία στο μελετητικό φάκελο, το μικτό ύψος ισογείου (pilotis) είναι 2.85 μέτρα, τα μικτά ύψη των τυπικών ορόφων ισούνται με 2.95 μέτρα και το σύνολο του κτηρίου έχει ύψος ίσο με 11.70 μέτρα (μέτρηση από τη βάση του κτηρίου μέχρι τη στάθμη του δώματος).

**Floor Area:** Το κτήριο της μελέτης περίπτωσης έχει κάτοψη ορθογωνικής μορφής. Οι διαστάσεις της είναι 21.5m μήκος και 9.00m πλάτος. Το μικτό εμβαδόν της κάτοψης ανέρχεται στα 193.50 τ.μ. και εντός αυτής συμπεριέχονται 2 διαμερίσματα που έχουν εμβαδόν 100 τ.μ. και 80 τ.μ. αντιστοίχως. Οι κοινόχρηστοι χώροι κάθε ορόφου ανέρχονται στα 13.5 τ.μ.

**Total Replacement Cost:** Το πεδίο αυτό συμπεριέχει το κόστος για να αντικατασταθεί το κτηριακό κέλυφος και ο κτηριακός πυρήνας, όπως επίσης και το κόστος για να αντικατασταθεί το σύνολο των στοιχείων του κτηρίου (δομικά και μη δομικά μέλη) ευρισκόμενα σε χώρους που δεν είναι κοινόχρηστοι. Με βάση πρόσφατα δεδομένα και εκτιμήσεις από τον κατασκευαστικό κλάδο, για κτήρια με χρήση κατοικίας και συμβατικά υλικά, το κόστος αυτό ανέρχεται κατ'εκτίμηση στα 1000 ευρώ ανά τ.μ. Ως εκ τούτου το συνολικό κόστος για να αντικατασταθεί το κτήριο φτάνει τα 774 χιλιάδες ευρώ (ή σε δολάρια με την τρέχουσα ισοτιμία τα 905 χιλιάδες).

**Core and Shell Replacement Cost:** Το εν λόγω πεδίο συμπεριλαμβάνει το κόστος που έχει η κύρια δομή και η κτηριακή επένδυση, ενώ εμπεριέχονται σε αυτό και όλα τα μη δομικά στοιχεία εντός των κοινοχρήστων χώρων. Επιπλέον, συνυπολογίζεται το κόστος για να κατεδαφιστεί το κτήριο και να συλλεχθούν τα μπάζα από τη διαδικασία. Μια εκτίμηση είναι το 40% από το total replacement cost, όπως αναφέρεται και στα αντίστοιχα παραδείγματα του manual του λογισμικού. Για το κτήριο της μελέτης περιπτώσεώς μας, το κόστος φτάνει τα 309.6 χιλιάδες ευρώ ή τα 362.23 χιλιάδες δολάρια.

**Replacement Time:** Ο χρόνος αντικατάστασης υπολογίζεται προσεγγιστικά για το κτήριο εν συνόλω με βάση τα ελάχιστα απαιτητά ημερομίσθια που λαμβάνονται ανά εργασία από το άρθρο 38 του Κανονισμού Ασφαλίσεων (Πίνακες 1 και 2). Εν προκειμένω, για το κτήριο που αναλύεται, και βάζοντας εκτίμηση πως θα απασχοληθεί συνεργείο δυναμικότητας 9 ή 10 ατόμων από κάθε ειδικότητα, γίνεται

προσδιορισμός του χρόνου αντικατάστασης σε περίπου 100 ημερολογιακές μέρες. **Maximum Workers per Square Foot:** Πρακτικά, το πόσοι εργάτες έχουν απασχόληση εντός του κτηρίου όσο διαρκούν οι επισκευαστικές εργασίες, εμπεριέχει μεγάλες διακυμάνσεις, που έχουν σχέση με τους οικονομικούς και χρονικούς πόρους που διατίθενται. Ως εκ τούτου, επιλέγεται η διεξαγωγή της ανάλυσης με χρήση της τιμής default από το λογισμικό (0.001) αφού αυτή εκτιμάται πως αποδίδει λογικό επισκευαστικό χρόνο (και λογικό κόστος επισκευών) τέτοιο που να είναι εφικτή η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση του κτηρίου από τους κατοίκους του όσο διαρκούν οι εργασίες επισκευών.

**Total Loss Threshold (as Ratio of Total Replacement Cost):** Κατά παρόμοιο τρόπο, για την ανάλυση που πρόκειται να διεξαχθεί, κρατάμε την default τιμή του λογισμικού (μονάδα). Η τιμή αυτή δηλώνει ότι: σε περίπτωση που τα επισκευαστικά κόστη υπερβούν το 35% από το σύνολο του κόστους της αντικατάστασης του κτηρίου, θα πρέπει να ληφθεί η απόφαση το κτήριο να κατεδαφιστεί και να κτιστεί στη θέση του μια νέα οικοδομή.

**Height Factor:** Ο παράγοντας αυτός κάνει συσχέτιση της αύξησης του κόστους που σχετίζονται με τα μεταφορικά των υλικών που απαιτούνται και της ολοκλήρωσης των επισκευαστικών εργασιών ανά όροφο, με την κατά αντιστοιχία αύξηση της δυσκολίας εξαιτίας του μεγαλύτερου ύψους που έχει η κάθε στάθμη όσο κινούμαστε από κάτω προς τα πάνω στο κτήριο. Όπως αναφέρεται στο manual του software, και με βάση το πόσες στάθμες έχει το κτήριο της μελέτης περίπτωσης, ο συντελεστής αυτός παίρνει εν προκειμένω τιμή 1.0.

**Hazmat Factor:** Ο δείκτης αυτός κάνει προσαρμογή του επισκευαστικού εξόδου σε αναλογία με το αν υπάρχουν επικίνδυνα υλικά στο κτήριο. Εν προκειμένω, αν συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι δεν έχει το κτήριο κάποιο χώρο για να αποθηκευτούν επικίνδυνα υλικά, ούτε και διαθέτουμε κάποια δεδομένα από τα στοιχεία που συλλέχθηκαν εκ του μελετητικού φακέλου, τίθεται η τιμή μονάδα.

**Occupancy Factor:** Ο δείκτης αυτός κάνει επαύξηση του κόστους επισκευών σε αναλογία με το πόσο αυξημένος είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του κτηρίου όσο διαρκούν οι κατασκευαστικές εργασίες επισκευών. Στο δείκτη αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το ποια είναι η πληρότητα των χώρων που είναι επιθυμητή στο διάστημα αυτό. Αν συνυπολογίσουμε το γεγονός πως το κτήριο της μελέτης

περίπτωσης είναι κατοικίες, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 2-2 του manual του λογισμικού, βάζουμε στο πεδίο αυτό την τιμή 1.2 (κτήριο που βρίσκεται σε χρήση ενώ διενεργούνται δονήσεις με χαμηλή ένταση).

### 3.2.3. Δεδομένα πληθυσμού

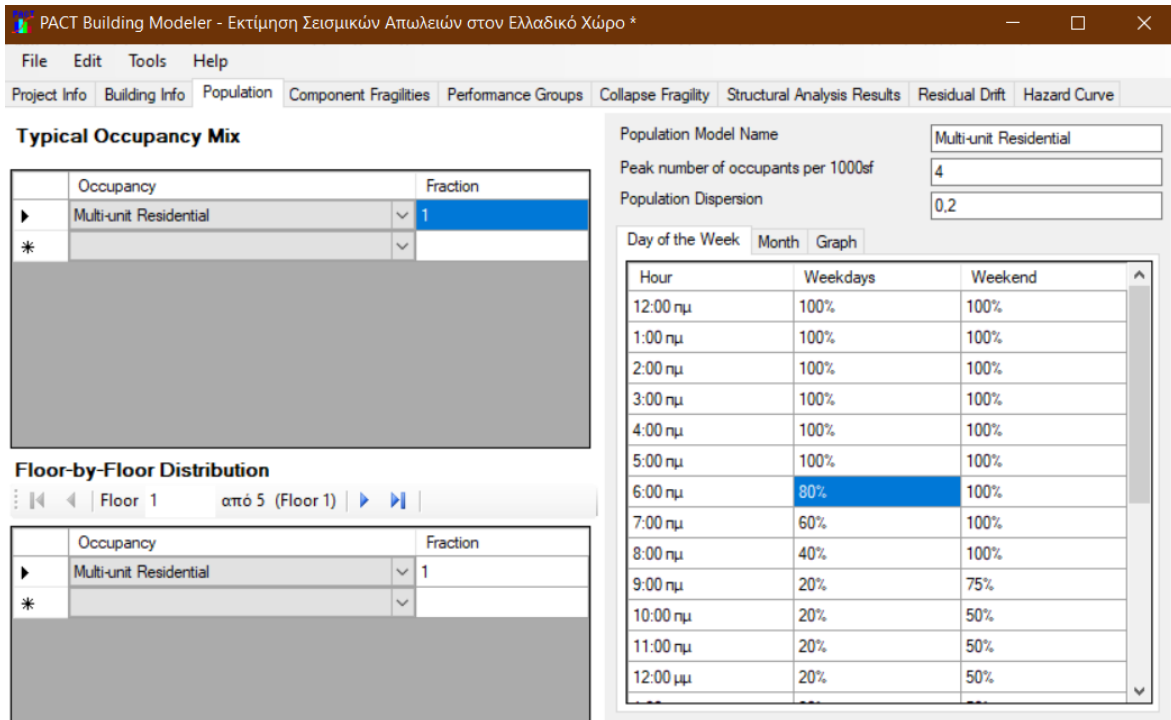
**Typical Occupancy Mix:** Το κτήριο που αναλύεται έχει πολλούς ορόφους και η μελέτη του έχει διενεργηθεί από τον Οργανισμό Εργατικής Κατοικίας προκειμένου να καλυφθούν ανάγκες στέγασης ατόμων εργατικής τάξης. Το κτήριο είναι αμιγώς με χρήση κατοικίας. Ως εκ τούτου γίνεται χρήση του σχετιζόμενου με τα στοιχεία αυτά πληθυσμιακού μοντέλου που δίδεται από το πρόγραμμα, και τίθεται η σχετική με το μοντέλο αυτό ωριαία κατανομή πληθυσμού.

**Floor-by-Floor Distribution:** Κατά παρόμοιο τρόπο κάνουμε υιοθέτηση του προηγούμενου μοντέλου πληθυσμού για όλες τις στάθμες της κατασκευής.

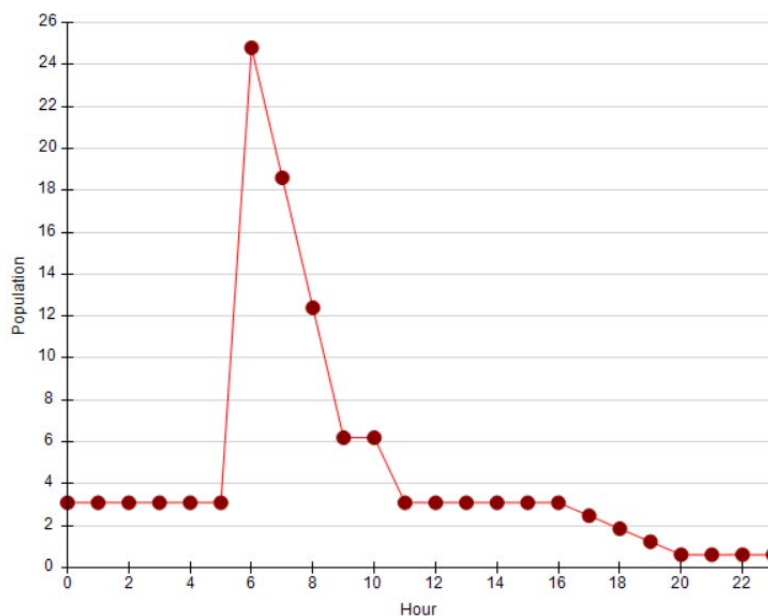
**Population Model Name:** Εξαιτίας της κτηριακής διαρρύθμισης, της χρήσης και της μορφολογίας του, επιλέγουμε σαν μοντέλο πληθυσμού το Multi-unit Residential.

**Peak number of occupants per 1000sf:** Έχοντας ως δεδομένο πως τα 2 διαμερίσματα κάθε στάθμης έχουν διαφορετική επιφάνεια, επιλέγουμε ως μέσο όρο την τιμή που δίνεται ως default από το πρόγραμμα (4 άτομα σε κάθε 1000 square feet ή περίπου 95 τετραγωνικά μέτρα). Η τιμή αυτή έχει προσεγγιστική αντιστοιχία με μια τυπική οικογένεια 2 παιδιών σε κάθε διαμέρισμα του κτηρίου.

**Population Dispersion:** Κρατάμε την default variance value από το λογισμικό που είναι ίση με 0.2. Αν εξετάσουμε πώς κατανέμονται οι κάτοικοι του κτηρίου ανά μήνα και ανά ημέρα, λαμβάνουμε τον ακόλουθο πίνακα:



Εικόνα 17: Κατανομή κατοίκων κτηρίου ανά ημέρα και ανά ώρα σε κάθε τυπικό όροφο



Εικόνα 18: Σχήμα ωριαίας κατανομής κατοίκων κτηρίου μελέτης ανά τυπικό όροφο

**Typical Occupancy Mix**

Occupancy	Fraction
Multi-unit Residential	1

**Floor-by-Floor Distribution**

Floor 4 από 5 (Floor 4)

Occupancy	Fraction
Multi-unit Residential	1

Population Model Name: Multi-unit Residential  
 Peak number of occupants per 1000sf: 4  
 Population Dispersion: 0.2

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 19: Κατανομή κατοίκων κτηρίου ανά μήνα για τυπικό έτος ανά τυπική στάθμη

### 3.2.4. Ορισμός τρωτοτήτων δομικών μελών

<b>B10: Super Structure</b>				
B101: Floor Construction	Please Select			
B102: Roof Construction	Please Select			
<b>B103: Structural Steel Elements</b>				
B103: Structural Steel Elements	Please Select			
<b>B104: Reinforced Concrete Elements</b>				
B1041.05 lb: ACI 318 OMF with weak beam...	Please Select	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multi-unit Residential
B1041.06 lb: ACI 318 OMF with weak colum...	Please Select	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multi-unit Residential
<b>B105: Masonry Vertical Elements</b>				
B105: Masonry Vertical Elements	Please Select			
<b>B106: Cold-Formed Steel Structural Elements</b>				
B106: Cold-Formed Steel Structural Elements	Please Select			
<b>B107: Wood Light Frame Structural Elements</b>				
B107: Wood Light Frame Structural Elements	Please Select			
<b>or-by-Floor Distribution</b>				
Floor 1 από 5 (Floor 1)				
<b>Category</b>	<b>Component</b>	<b>Dir. 1</b>	<b>Dir. 2</b>	<b>Population Model</b>
<b>Infrastructure</b>				
<b>A10: Foundations</b>				
A101: Standard Foundations	Please Select			
A102: Special Foundations	Please Select			
A103: Slab on Grade	Please Select			
<b>A20: Basement Construction</b>				
A202: Basement Walls	Please Select			
<b>Shell</b>				
<b>B10: Super Structure</b>				
B101: Floor Construction	Please Select			
B102: Roof Construction	Please Select			
<b>B103: Structural Steel Elements</b>				
B103: Structural Steel Elements	Please Select			
<b>B104: Reinforced Concrete Elements</b>				
B104: Reinforced Concrete Elements	Please Select			
B1041.05 lb: ACI 318 OMF with weak beam...	Please Select	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multi-unit Residential
B1041.06 lb: ACI 318 OMF with weak colu...	Please Select	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Multi-unit Residential

**Most Typical Specifications:** Το πεδίο αυτό αφορά τις πληροφορίες για το κτήριο εν συνόλω σε σχέση με τις ιδιότητες που καθορίζουν τις τρωτότητες κάθε μέλους που είναι πιθανό να πάθει βλάβη εξαιτίας μιας σεισμικής διέγερσης. Οι ανωτέρω πληροφορίες συνεκτιμούν τις περιγραφές των παραμέτρων που καθορίζουν τη στάθμη βλάβης κάθε μέλους, το ποιες μορφές βλάβης είναι

πιθανότερες, αλλά και συναρτήσεις πιθανοτικού υπολογισμού για το ποια είναι η τρωτότητα του μέλους καθώς και ποιες οι σχετιζόμενες συνέπειές της. Επιπροσθέτως, για την παράμετρο καθορισμού της βλάβης που έχει επιλεχθεί, πρέπει παράλληλα να γίνει επιλογή και της διεύθυνσης που εμφανίζεται αυξημένη ευπάθεια (τρωτότητα) για κάθε μέλος.

**Floor-by-Floor Distribution:** Στο πεδίο αυτό γίνεται καταχώρηση ανά στάθμη των προαναφερθείσων πληροφοριών, όπως αυτές έχουν προκύψει με ποσοτικό και ποιοτικό τρόπο από τα στοιχεία της κτηριακής μελέτης από τον αντίστοιχο φάκελο.

Τα μέλη (είτε πρόκειται για δομικά ή για μη δομικά μέλη) αναγνωρίζονται από το λογισμικό σε κάθε όροφο του κτηρίου, κινούμενοι από τη βάση ως το δώμα. Η καταχώρηση των δεδομένων με αυτήν την ακολουθία γίνεται με επιλογή από τις βιβλιοθήκες του λογισμικού σχετικά με τις ομάδες τρωτότητας. Τα δεδομένα αυτά είναι τα εξής:

### **ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ**

- **Θεμελίωση:** Δεν έχουμε εδώ καταχώρηση ομάδας τρωτότητας, καθώς έχει γίνει θεώρηση πλήρους πάκτωσης στη θεμελίωση του κτηρίου και συνεπακόλουθα δεν είναι εφικτή η πιθανότητα ύπαρξης βλαβών.
- **Υπόγειο:** Κατά παρόμοια λογική με πριν, δεν καταχωρούμε ομάδα τρωτότητας. Άρα στην ανάλυση που θα διενεργηθεί δεν εμπεριέχονται τρωτά στοιχεία στην υπόγεια στάθμη.
- **Ισόγειο – Τυπικός όροφος:** Έχουμε τις παρακάτω ομάδες τρωτότητας για κάθε τύπο δομικού μέλους:
  - **Πλάκες:** Εκτιμάται πως οι πλάκες στην οροφή και στο δάπεδο δεν λαμβάνουν αξονικές παραμορφώσεις καθώς εξασφαλίζεται η διαφραγματική λειτουργία κάθε στάθμης. Άρα δεν έχουν τα στοιχεία αυτά τρωτότητα.
  - **Υπόλοιπα μέλη από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα:** Το επιλεγμένο κτήριο έχει στατικό σύστημα που αποτελείται από επάλληλα πλαίσια ανά κάθε διεύθυνση. Ως εκ τούτου, για τις περιοχές των κόμβων μεταξύ υποστυλώματος και πλάκας, και έχοντας συμπεριλάβει στην ανάλυση τις



αναπτυχθείσες στρεπτικές ροπές που αναπτύσσονται, εκ της ομάδας τρωτότητας με κωδικό B104: Reinforced Concrete Elements γίνεται η επιλογή των B1041.051b και B1041.061b, για κόμβους που έχουν συντρέχουσες δοκούς εκατέρωθεν της εκάστοτε διεύθυνσης. Για τις κατηγορίες αυτές για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια με το δυσμενέστερο εφικτό σενάριο, επιλεγουμε έλεγχο τρωτότητας και στην y και στην x διεύθυνση του κόμβου.

### **ΜΗ ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ**

Για να προσδιοριστεί η κατηγορία αλλά και το ποσοστό των μη δομικών μελών, χρησιμοποιείται το add on του λογισμικού PACT επ' ονόματι *Normative Quantity Estimation Tool*. Σε κάθε όροφο του κτηρίου γίνεται η εισαγωγή του ολικού εμβαδού αλλά και τι χρήση έχει σε λογιστικό φύλλο μορφής Microsoft Excel. Εν συνεχεία αποδίδονται με μορφή λίστας τα μη δομικά μέλη και γίνεται η εκτίμηση των αντιπροσωπευτικών τους ποσοστών. Γίνεται εν προκειμένω η επισήμανση πως μια πιθανή παρέκκλιση των ποσοστών αυτών σε σχέση με την πραγματικότητα (αυτό πάντα φυσικά ανά μεμονωμένη περίπτωση) μπορεί να θεωρηθεί ως αποδεκτή, αφού η database που διαθέτει το add on είναι βασισμένη σε μελέτες και παραδοχές ειδικών εμπειρογνομόνων. Επιπροσθέτως, και τα στοιχεία που δεν αποτελούν τμήμα του φέροντος οργανισμού, γίνεται η επιλογή του ελέγχου κατά την x και κατά την y διεύθυνση (δυσμενέστερο σενάριο υπέρ της ασφαλείας). Εν κατακλείδι, δεν έχουμε αναγνώριση κάποιων εξ αυτών των στοιχείων ως τρωτά (για παράδειγμα τα πακτωμένα στο κτήριο στοιχεία όπως είναι πόρτες, παράθυρα κ.ο.κ.)

Το add on του λογισμικού εκτίμησε κάποια προκαταρκτικά αποτελέσματα για τα μη δομικά μέλη. Οι τιμές αυτές εξετάστηκαν και κατά περίπτωση τροποποιήθηκαν ώστε να υπάρχει ικανοποιητική αντιστοιχία (όσο είναι αυτό εφικτό) με τα πραγματικά κτηριακά δεδομένα. Κατόπιν αυτής της αναπροσαρμογής προέκυψαν τα παρακάτω δεδομένα.

Πίνακας 3: Ομάδες τρωτότητας για τα μη δομικά μέλη του κτηρίου.

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 UB94	100 SF	--	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	100 LF	0,23	--	Story Drift Ratio	NO
APARTMENT	4th	193,5	C3011.001a	Wall Partition, 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 Partition, 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 Partition, 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 Partition, 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 Partition, 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 Partition, 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 Partition, 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

Direction  
 Direction 1  Direction 2  Non-Directional

Update Table

Floor 1 από 5 (Floor 1)

No.	Component Type	Performance Group Quantities	Quantity Dispersion	Fragility Correlated	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	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio
B1041.051b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	25.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio
B1051.001	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated, 4" to 6" thick, up to 12 foot tall	15.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio
B2022.011	Midrise stick-built curtain wall, Config: Asymmetric insulating glass units (duof-pane, unequal-thickness IGI), Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) inner AN / 1/2 in. (13...	45.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio
C1011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	46.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio
C2011.021b	Monolithic cast-in-place and precast concrete stairs with no seismic joints - replace in kind if replacement is required	72.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio
C3011.002a	Wall Partition, Type: Gypsum + Ceramic Tile, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/o returns (friction connection)	14.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Multiunit Residential	Story Drift Ratio

Κατόπιν της αναγνώρισης των μελών του κτηρίου (δομικά ή μη δομικά) που έχουν τρωτότητα, καταχωρούνται οι ποσότητες αυτών σε κάθε όροφο. Η συμπλήρωση των δεδομένων σχετίζεται με το σύνολο των μελών, όπως αυτά προέκυψαν από την ταυτόχρονη επεξεργασία από το add on του προγράμματος (*Normative Quantity Estimation Tool*) και την αντιπαραβολή του μελετητή με τα στοιχεία του φακέλου μελέτης.

Επιπλέον στο λογισμικό καταχωρούμε τα δεδομένα σε κάθε διεύθυνση τρωτότητας. Κατά παρόμοιο τρόπο, γίνεται καταχώρηση σε συγκεκριμένο πεδίο και των στοιχείων που δεν έχουν τρωτότητα παράλληλη προς κάποια δεδομένη κατεύθυνση. Εν πάσει περιπτώσει, κάνουμε την απλοποιητική παραδοχή πως οι όγκοι του κάθε τύπου μέλους δεν είναι οι μέσοι αλλά είναι εκτιμώμενοι με ικανοποιητικό ποσοστό ακρίβειας, ως εκ τούτου θέτουμε μηδενική διασπορά στο αντίστοιχο πεδίο (Quantity Dispersion = 0,00).

## ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΛΗ

**Πίνακας 4: Δομικά μέλη. Performance Groups.**

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

### 3.2.6.Ορισμός της τρωτότητας στο επίπεδο της κατάρρευσης

Ο ορισμός της τρωτότητας στο επίπεδο της κατάρρευσης διενεργείται με βάση στοιχεία που προέρχονται από τα αποτελέσματα μιας μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (ενώ έχει ήδη δημιουργηθεί το επιθυμητό μαθηματικό μοντέλο της κατασκευής). Τα στοιχεία αυτά εμπεριέχονται στο φάκελο του έργου απ' όπου λαμβάνουμε τη μέση τιμή για την επιτάχυνση εδάφους ( $a_g=1.5 \text{ m/s}^2$ ) στην οποία έχουμε κτηριακή κατάρρευση.

PACT Building Modeler - Εκτίμηση σεισμικών απωλειών στον Ελλαδικό χώρο

File Edit Tools Help

Project Info Building Info Population Component Fragilities Performance Groups Collapse Fragility Structural Analysis Results Residual Drift Hazard Curve

Include Potential Collapse in Assessment

Collapse Fragility Median: 1.5 Dispersion: 0.4  
In terms of  $S_a(T)$

Number of Potential Collapse Modes: 3

Mutually Exclusive Probability of Mode Given Collapse

Mode 1	Mode 2	Mode 3
0.6	0.2	0.2

Fraction of Floor Subject to Collapse Debris

Floor	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Τυπικός ορόφος 3 ...	1	0.1	0.1
Τυπικός ορόφος 2 ...	1	0.1	0.1
Τυπικός ορόφος 1 ...	1	0.2	0.8
Pilotis (1)	1	0.6	0.1

Collapse Consequences

Mode 1 of 3

Floor	Fatality Rate Mean	Fatality Rate COV	Injury Rate Mean	Injury Rate COV
Τυπικός ορόφος 3 ...	0.9	0	0.1	0
Τυπικός ορόφος 2 ...	0.9	0	0.1	0
Τυπικός ορόφος 1 ...	0.9	0	0.1	0
Pilotis (1)	0.9	0	0.1	0

Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την μη γραμμική δυναμική ανάλυση (προκύπτουν 3 πιθανές ιδιομορφές κατάρρευσης) γίνεται ο ορισμός των τιμών των συντελεστών που ζητά το λογισμικό PACT. (Mutually Exclusive Probability of Mode Given Collapse, Fraction of Floor Subject to Collapse Debris). Εν προκειμένω, για τις χαρακτηριστικές τιμές θανάτων και τραυματισμών κρατάμε τις τιμές που είναι by default συμπληρωμένες από το πρόγραμμα με μέσες πιθανότητες αντιστοίχως 0.9 και 0.1 και μηδενικές τυπικές αποκλίσεις. Εν τέλει, επιλέγουμε τιμή διασποράς ίση με 0.4.

### 3.3.Αποτελέσματα δομικής ανάλυσης

Κατόπιν της εισαγωγής όλων των προαναφερθείσων τιμών, γίνεται η συμπλήρωση όλων των υπολοίπων κρίσιμων πληροφοριών που σχετίζονται με το είδος της εκτίμησης απωλειών σε σχέση με το ποια ήταν η ένταση της σεισμική διέγερσης

(Assessment Type = Intensity) και του καθορισμού του τύπου της ανάλυσης ως Non Linear. (Analysis Type = Non-Linear). Παραμένουν οι default τιμές που δίνονται από το λογισμικό και αφορούν το πόσες επαναλήψεις θα λάβουν χώρα κατά την ανάλυση (Number of Realizations = 200) και της εισαγωγής ενός συντελεστή μετατροπής που αντιστοιχεί σε μη κατευθυντικότητα του σεισμού διέγερση. (Non-directional conversion factor = 1,2).

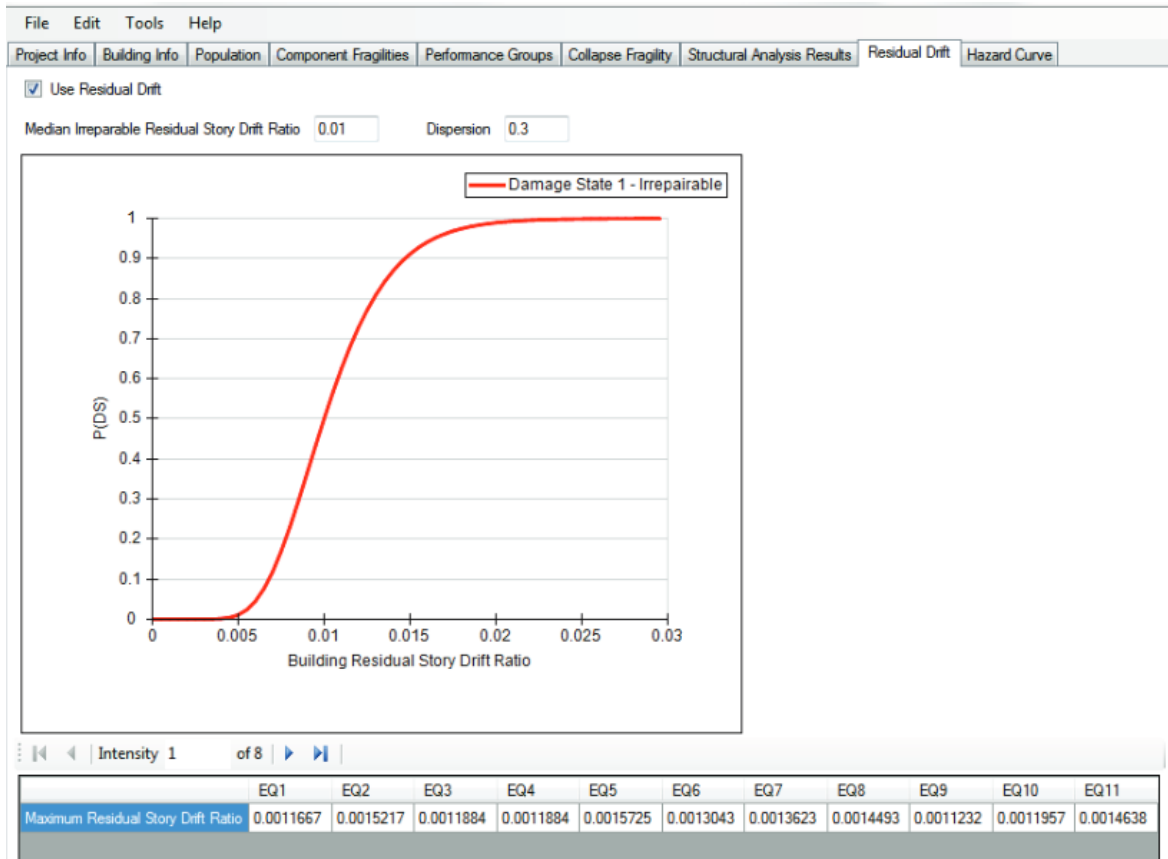
Floor/Story	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11
Floor 3-Roof (rad)	0.00529	0.006667	0.005652	0.00529	0.007101	0.00587	0.006522	0.006377	0.005217	0.005507	0.007101
Floor 2-3 (rad)	0.005725	0.00587	0.00558	0.005652	0.005435	0.00587	0.005725	0.005362	0.005652	0.00558	0.005725
Floor 1-2 (rad)	0.003155	0.003631	0.00369	0.002976	0.002321	0.003274	0.003214	0.003274	0.003452	0.002857	0.004107

Έχουμε σύνολο 8 φορτίσεων που εξετάζονται. Για κάθε μία από αυτές (έχουμε δυναμική ανάλυση και κατά τη διεύθυνση x και κατά τη διεύθυνση y φόρτισης) γίνεται εισαγωγή των σχετικών μετακινήσεων των σταθμών και των επιταχύνσεων που προέρχονται από τα αποτελέσματα των 11 αναλύσεων (Typical Number of Demand Vectors = 11) στις οποίες δεν παρουσιάζεται κτηριακή κατάρρευση. Επιπροσθέτως, σε κάθε περίπτωση φόρτισης κάνουμε εισαγωγή της αντίστοιχης τιμής της μέσης επιτάχυνσης φάσματος σχεδιασμού και παράλληλα θέτουμε ως σχετική διασπορά μια μηδενική τιμή. (Modeling Dispersion  $\beta_m = 0$ ).

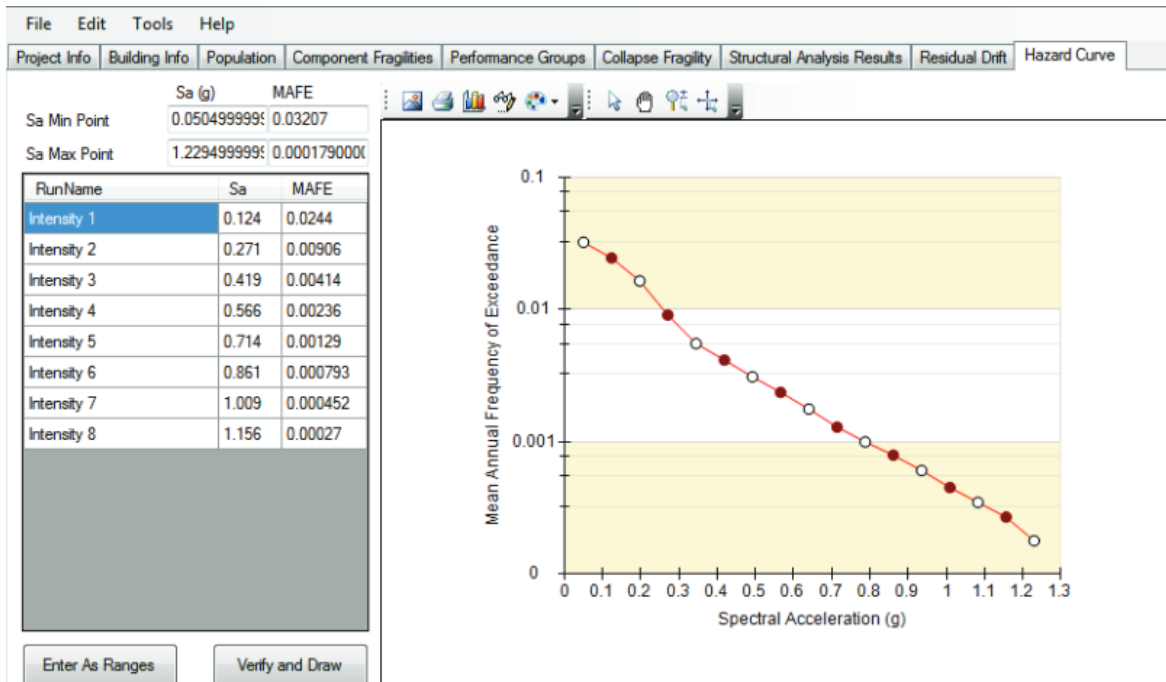
### 3.4. Απομένουσες σχετικές μετακινήσεις ανώτερης στάθμης κτηρίου (*Residual Drift*)

Για να διαμορφωθεί η αντίστοιχη καμπύλη επιλέγουμε να διατηρήσουμε τις default τιμές του λογισμικού PACT που σχετίζονται με τις απομένουσες σχετικές μετακινήσεις κάθε στάθμης (κατά μέσο όρο) πέραν των οποίων η κατασκευή μπορεί να κριθεί ως κατεδαφιστέα. Έχουμε συγκεκριμένα Median Irreparable Residual Story Drift Ratio = 0,01 και τη διασπορά της Dispersion = 0,3.

Επιπλέον, για όλες τις φορτίσεις γίνεται η εισαγωγή των τιμών των αντίστοιχων απομενουσών μετακινήσεων, όπως αυτές προήλθαν από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων.



### 3.5.Χάραξη καμπύλων επικινδυνότητας (*Hazard Curve*)



Για να χαραχτεί η καμπύλη επικινδυνότητας, γίνεται χρήση των μέσων τιμών φασματικών επιταχύνσεων που έχουν αντιστοιχία σε κάθε φόρτιση. Σε όλες τις φορτίσεις γίνεται η καταχώρηση της τιμής της κατά μέσο όρο ετήσιας συχνότητας υπέρβασης. (MAFE). Ταυτοχρόνως, προβαίνουμε σε καθορισμό των ορίων για την κατασκευή της καμπύλης. Τα όρια αυτά παρέχονται από τις τιμές μέγιστης και ελάχιστης επιτάχυνσης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται από τη MAFE.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.Γενικά Σχόλια

Κατόπιν της εισαγωγής των βασικών πληροφοριών, δεδομένων και τιμών που αφορούν το κτήριο της μελέτης περίπτωσης, όπως αυτή διενεργήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακολουθεί η ολοκλήρωση της βασικής ανάλυσης. Το λογισμικό, μόλις ολοκληρωθεί η ανάλυση, παραθέτει τις ενδεχόμενες απώλειες στο κτήριο κατόπιν μιας σεισμικής διέγερσης με δεδομένη ένταση. Οι απώλειες αυτές αποδίδονται με μορφή επισκευών και κόστους τους, με μορφή χρόνου επισκευών, θυμάτων ή τραυματιών και παρουσίας μη ασφαλών δομικών στοιχείων.

Μια γενική υπενθύμιση στο σημείο αυτό είναι πως οι προαναφερθείσες απώλειες αφορούν το εσωτερικό του κτηρίου. Το λογισμικό στον ενσωματωμένο του αλγόριθμο δεν εκτιμάει απώλειες σε εξωτερικούς χώρους του κτηρίου αφού, ούτως ή άλλως δεν υπάρχει κάποια σχετική πρόβλεψη στους κανονισμούς της μεθοδολογίας FEMA P-58.

### 4.2.Κριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Προκειμένου τα αποτελέσματα να παρουσιασθούν με τρόπο κατανοητό και να είναι καλή η εποπτεία τους, οφείλουμε να αναφέρουμε τα ακόλουθα σημαντικά στοιχεία:

- Τα προκύπτοντα αποτελέσματα θα απεικονίζονται σε διαγράμματα, σε συμφωνία με τις default ρυθμίσεις του λογισμικού και η παρουσίασή τους θα γίνεται κατά ενδεικτικό τρόπο για τη δυσμενέστερη φόρτιση εκ των 8. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτό να παρουσιαστούν με συγκεντρωτικό τρόπο τα αποτελέσματα για το σύνολο των φορτίσεων.
- Τα σχήματα που έχουν σχέση με τις δομικές τρωτότητες κάθε τύπου μέλους, θα παρουσιαστούν, όταν αυτό είναι εφικτό, και κατά ομάδα (σύμφωνα με το διαχωρισμό που διενεργήθηκε στη μεθοδολογία του προηγούμενου κεφαλαίου) και με ενιαίο τρόπο, όπου συμπεριλαμβάνονται οι ομάδες τρωτότητας εν συνόλω.
- Λόγω των προδιαγραφών του PACT, τα στοιχεία που αφορούν τα οικονομικά μεγέθη θα δίνονται σε αμερικάνικα δολάρια και σε κάποιες περιπτώσεις θα

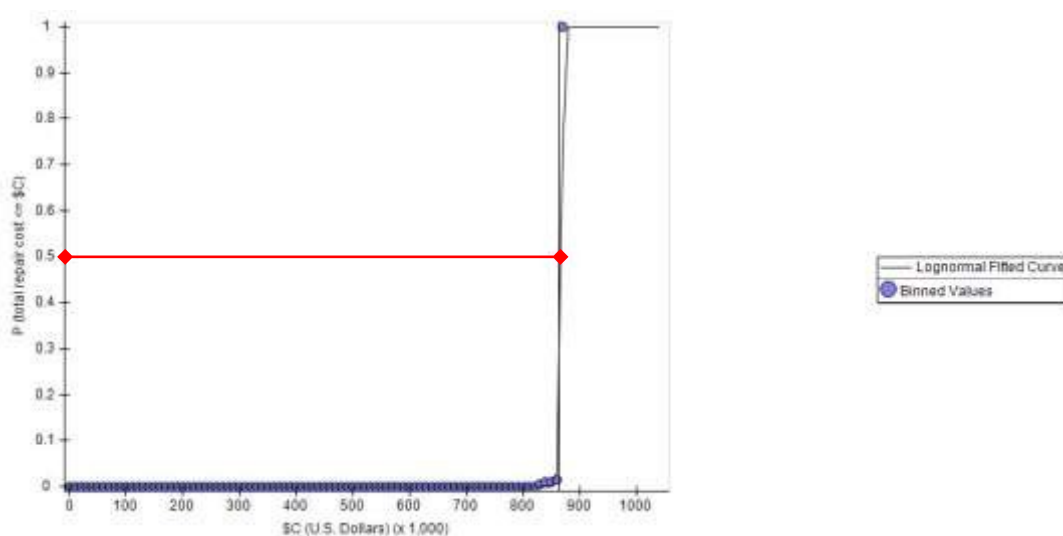
υφίστανται την κατάλληλη στρογγυλοποίηση.

- Τα επισκευαστικά κόστη έχουν σχέση με το να επανέλθει το κτήριο στην κατάσταση που ήταν πριν ασκηθεί σε αυτό η σεισμική διέγερση. Κατά αντιστοιχία, αν το κτήριο καταρρεύσει, το αντίστοιχο κόστος αφορά την εξ ολοκλήρου κατασκευή του εκ νέου, με ακριβώς τις ίδιες προδιαγραφές που είχε και το κτήριο αρχικά.
- Ο επισκευαστικός χρόνος αποδίδεται στις περιπτώσεις που έχουμε μερική χρήση του κτηρίου, όπως αυτή προσδιορίστηκε στους συντελεστές και στις παραδοχές στη μεθοδολογία.
- Εν τέλει, γίνεται η επισήμανση πως ο χρόνος αυτός δεν εμπερικλείει εργασίες που σχετίζονται με στατική ή σεισμική αναβάθμιση στον γέροντα οργανισμό, αλλά σχετίζεται μόνο με αποκατάσταση του κτηρίου και επαναφορά των δομικών μελών με φθορές στην προτινή τους κατάσταση (πριν δηλαδή εξασκηθεί στο φορέα η εδαφική σεισμική διέγερση).

Αφού έγινε η διευκρίνιση των παραπάνω στοιχείων, σε σχέση με τα αντιπροσωπευτικά μεγέθη του φορέα και των δεδομένων παραδοχών της μεθοδολογίας, και για συγκεκριμένο μέγεθος εξεταζόμενης εδαφικής διέγερσης, ακολουθούν ανά κατηγορία τα πατακάτω αποτελέσματα.

#### 4.2.1. Κόστος επισκευής (*Repair Cost*)

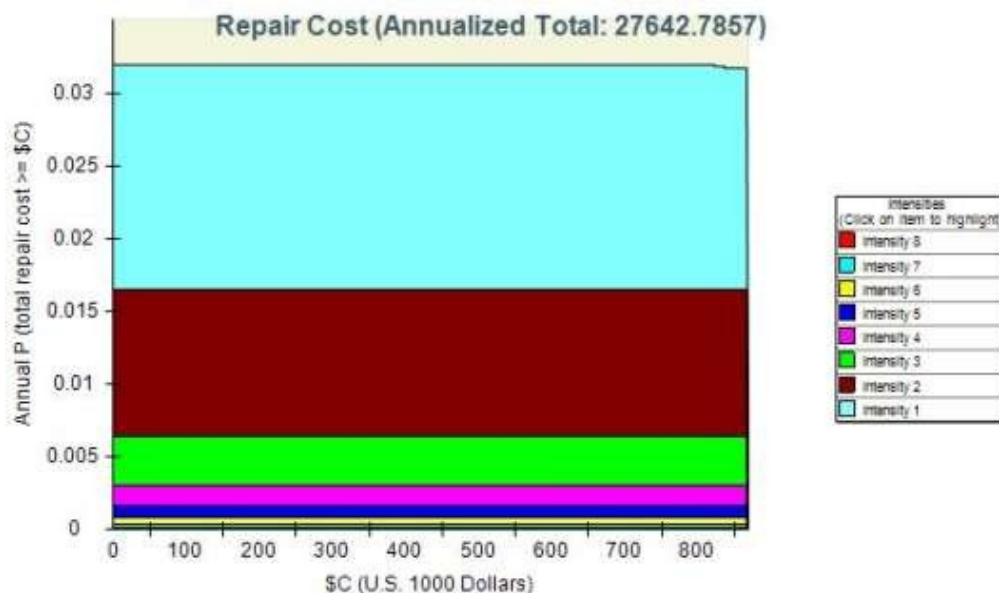
Το σχήμα που αφορά το υπολογισθέν μέσο κόστος, για τις ομάδες απόδοσης του φέροντος οργανισμού εν συνόλω, εμφανίζεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Συγκεντρωτικό μέσο κόστος για τις ομάδες απόδοσης του φέροντος οργανισμού

Από το παραπάνω σχεδιάγραμμα προκύπτει η διαπίστωση πως για τη στάθμη πυκνότητας πιθανότητα 0.5, το μέσο κόστος κατ' εκτίμηση που αφορά τις επισκευές είναι ίσο με 860 χιλιάδες αμερικάνικα δολάρια και πρακτικά είναι ίσο κατά αντιστοιχία με το σύνολο (100%) του κόστους για να κατασκευασθεί εξ ολοκλήρου το κτήριο από την αρχή (είχε προκύψει στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας περίπου ίσο με 867 χιλιάδες δολάρια). Ως εκ τούτου, για όλες τις περιπτώσεις σεισμικής διέγερσης που έχουν τη δεδομένη ένταση, στο 50% εξ αυτών κατά μέσο όρο, θα είναι απαραίτητο να εξετάσουμε το εναλλακτικό σενάριο να κατεδαφιστεί ο φέροντας οργανισμός εξαιτίας των εκταταμένων φθορών που έχουν τα δομικά του μέλη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από την ελάχιστη διασπορά που εμφανίζει η πιθανοτική καμπύλη στο μέσο όρο των επισκευαστικών εξόδων, κάτι που πρακτικά συνηγορεί στην αυξημένη ακρίβεια των παραδοχών που έγιναν και των τελικών μας εκτιμήσεων.

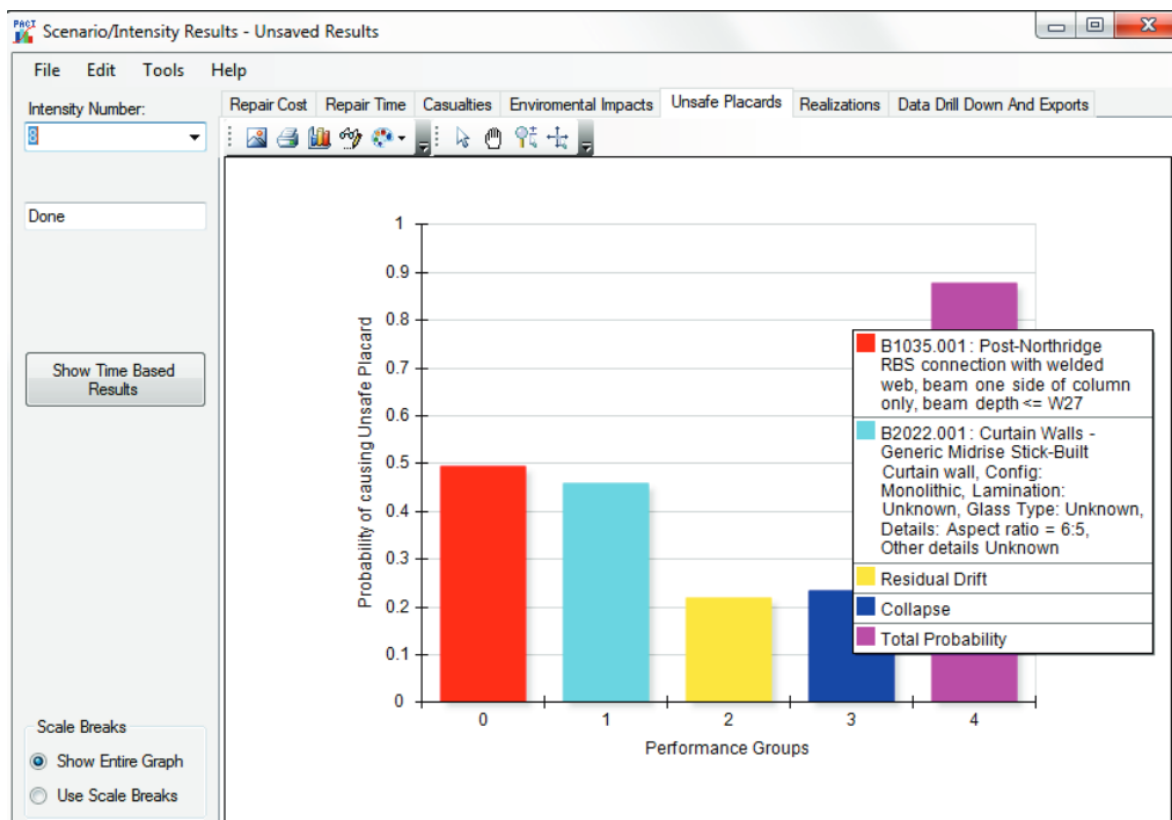
Η συνεισφορά που έχει κάθε φόρτιση στο να διαμορφωθεί το επισκευαστικό κόστος είναι με διακριτό τρόπο εμφανής στο διάγραμμα που ακολουθεί παρακάτω.



Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης του ενδεχόμενου υπέρβασης στα κατασκευαστικά έξοδα για κάθε φόρτιση

Το παραπάνω σχήμα αποτυπώνει πως στο σύνολο των οκτώ σεισμικών φορτίσεων που αναλύθηκαν, η φόρτιση με αύξοντα αριθμό 7 έχει και την πιο αυξημένη πιθανότητα υπέρβασης και ουσιαστικά έχει το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στη συνεισφορά της στο συνολικό επισκευαστικό κόστος. Επιπλέον, από το σχήμα τεκμαίρεται το γεγονός ότι το επισκευαστικό κόστος κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση είναι περίπου ίσο με 27.5 χιλιάδες δολάρια.

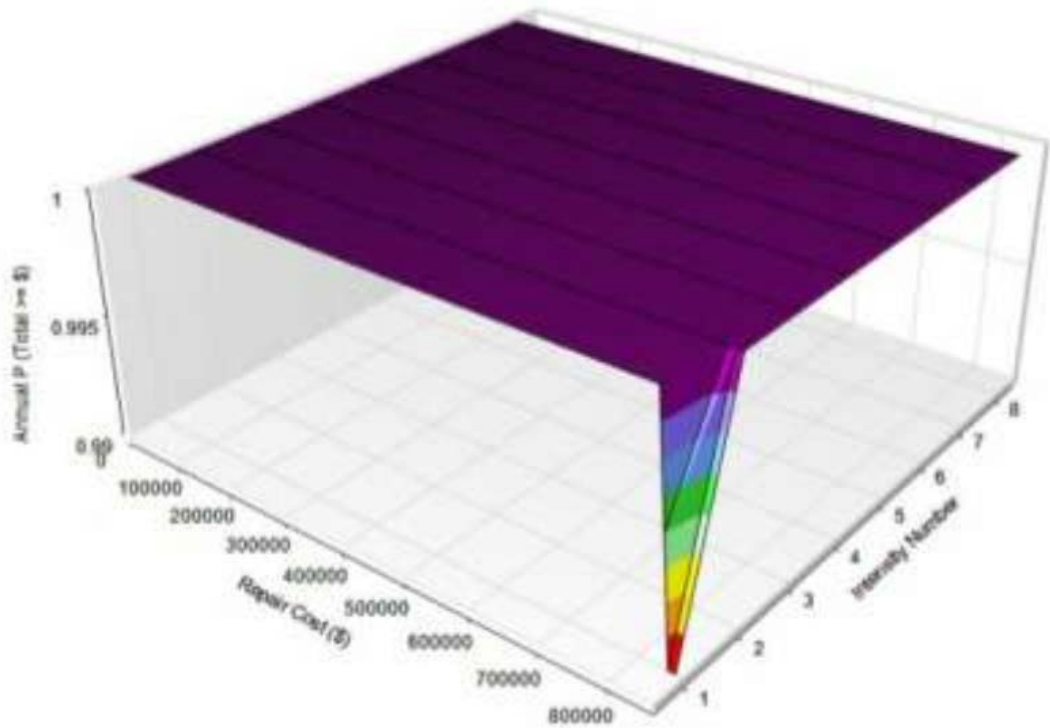
Τα σχήματα που αφορούν τις ομάδες απόδοσης ανά κατηγορία και υποκατηγορία απόδοσης εμφανίζονται ακολούθως:



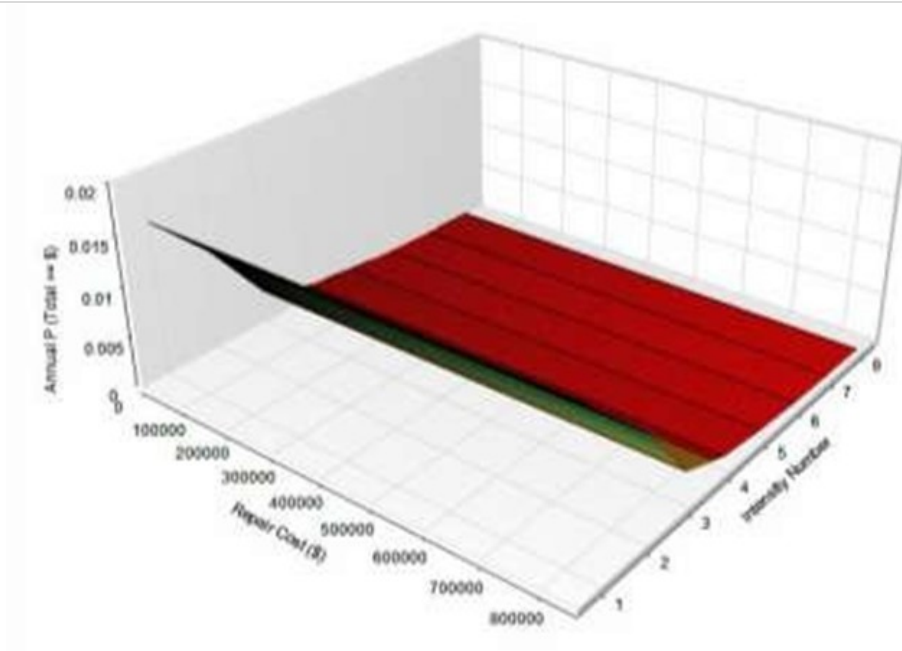
Εικόνα 21: Σχήμα επισκευαστικού κόστους ταξινομημένο για κάθε βασική υποομάδα απόδοσης

Εκ των προηγούμενων σχημάτων είναι φανερό το συμπέρασμα πως τα μη δομικά στοιχεία στο εσωτερικό του κτηρίου έχουν και το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στο ολικό επισκευαστικό κόστος, αν εμφανιστούν βλάβες λόγω σεισμικής διέγερσης.

Η πιθανότητα να μην έχουμε υπέρβαση στο υπολογισθέν μέσο ετήσιο επισκευαστικό κόστος για όλες τις σεισμικές φορτίσεις, εμφανίζεται στα παρακάτω 3d σχεδιαγράμματα. Η δεύτερη καμπύλη είναι η σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

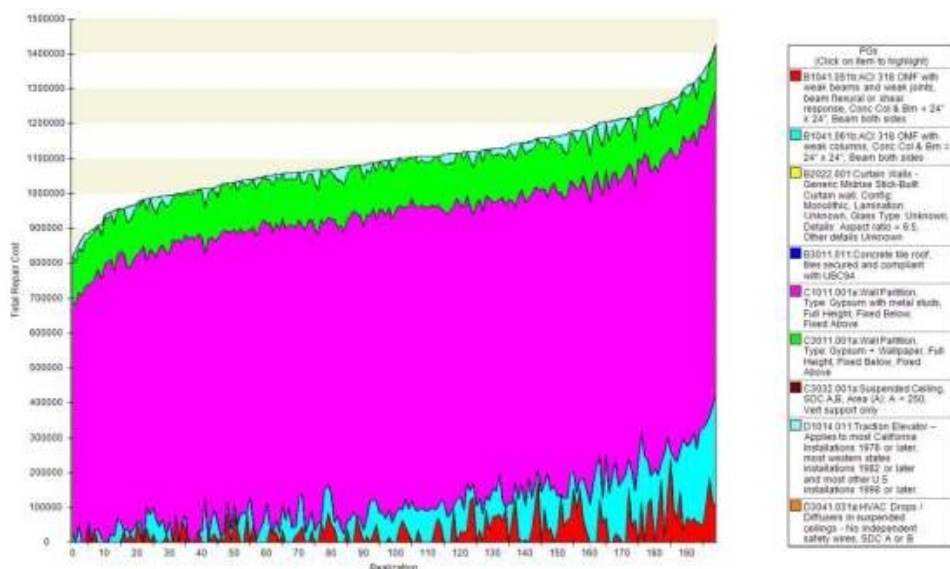


Εικόνα 22: Τρισδιάστατη καμπύλη απεικόνισης ετήσιας πιθανότητας σχετικά με τη μη υπέρβαση των ετησίων επισκευαστικών εξόδων



Εικόνα 23: Τρισδιάστατη καμπύλη πιθανότητας σε ετήσια βάση για τη μη υπέρβαση επισκευαστικών εξόδων (σταθμισμένη καμπύλη)

Εν τέλει στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται το μέσο κατ εκτίμηση επισκευαστικό κόστος όπως προκύπτει σε κάθε επανάληψη της αλγοριθμικής διαδικασίας υπολογισμού (ορισμός 200 επαναλήψεων όπως αναφέρεται στη μεθοδολογία)

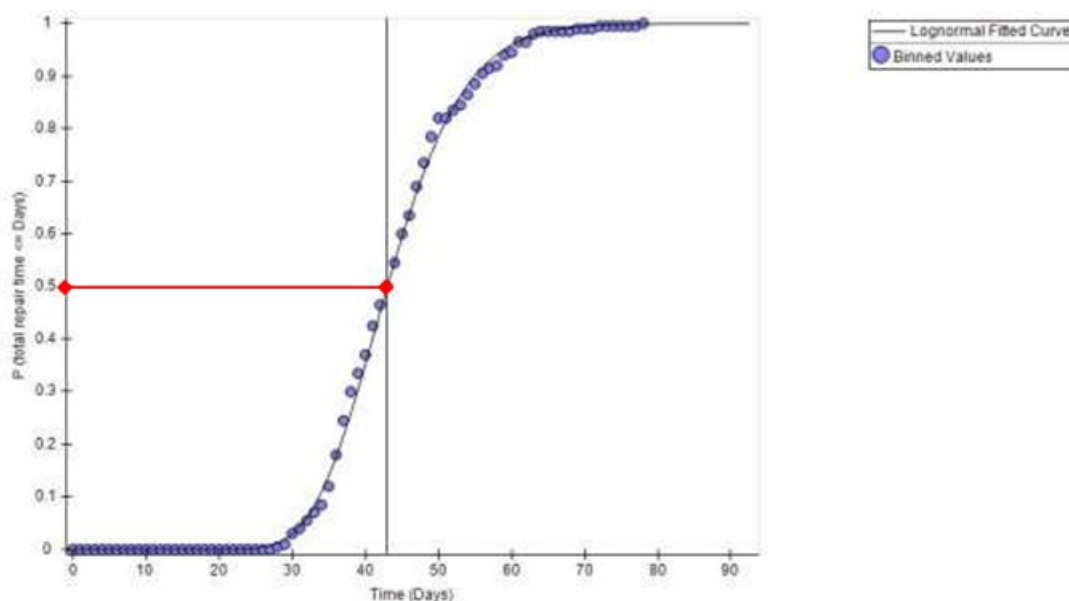


Εικόνα 24: Διαμόρφωση επισκευαστικού κόστους σε κάθε επανάληψη υπολογισμού

Από την καμπύλη που προέκυψε παραπάνω γίνεται η διαπίστωση πως η βαρύτητα που έχει το μη δομικό στοιχείο ονόματι C1011.001a (Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above) είναι και η μεγαλύτερη αφού προξενεί την ολική κατάρρευση του κτηρίου για την πλειονότητα από τις 200 επαναλήψεις του αλγορίθμου.

#### 4.2.2.Επισκευαστικοί χρόνοι

Η καμπύλη που σχετίζεται με τον εκτιμώμενο μέσο επισκευαστικό χρόνο για την οικοδομή εμφανίζεται ακολούθως.

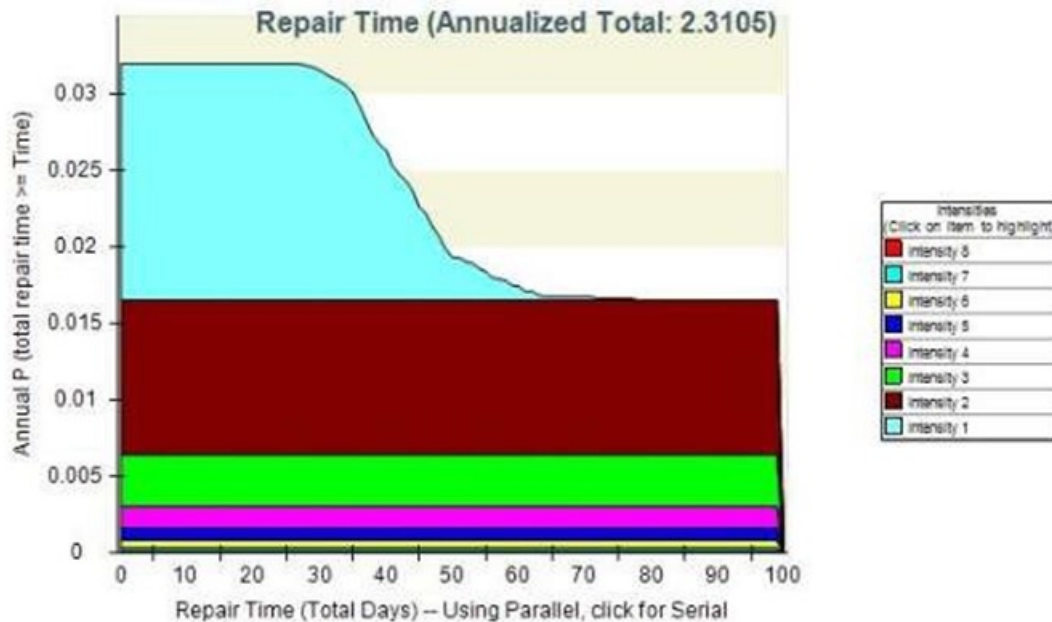


Εικόνα 25: Καμπύλη υπολογισθείσας μέσης διάρκειας επισκευών

Από το παραπάνω διάγραμμα βγαίνει η διαπίστωση πως για ενδεχόμενο να μην υπάρξει υπέρβαση ίσο με 50%, ο υπολογισθείς χρόνος για τις επισκευές είναι ίσος με περίπου 43 ημερολογιακές ημέρες και έχει αντιστοιχία σε ποσοστό 43% για τον ολικό χρόνο που αφορά την αποκατάσταση του κτηρίου και είναι εξ ορισμού προσδιορισμένος στις 100 ημερολογιακές ημέρες. Η προαναφερθείσα διάρκεια για να ολοκληρωθούν οι επισκευαστικές εργασίες καταδεικνύει ότι τα δομικά μέλη ενδεχομένως να εμφανίσουν φθορές μεσαίας έκτασης ή αριθμητικά να είναι το 50% του συνόλου των μελών. Επιπροσθέτως, από το διάγραμμα παρατηρείται πως έχουμε αυξημένη διασπορά στον υπολογισθέντα χρόνο επισκευών, κάτι που μπορεί να εμνηυθεί ως στοιχείο μεγάλης αβεβαιότητας σε σχέση με το πόσο ακριβείς είναι οι εκτιμήσεις μας. Ως εκ τούτου, κρίνεται πολύ πιθανό το να γίνει

υπέρβαση του χρονικού διαστήματος των επισκευαστικών εργασιών, κάτι που δυσκολεύει τη δυνατότητα το κτήριο να επαναχρησιμοποιηθεί από τους ιδιοκτήτες του στην εν λόγω περίοδο.

Στην παρακάτω καμπύλη εμφανίζεται το ενδεχόμενο να έχουμε υπέρβαση στον μέσο χρόνο (ετήσιο) στις επισκευές του κτηρίου.



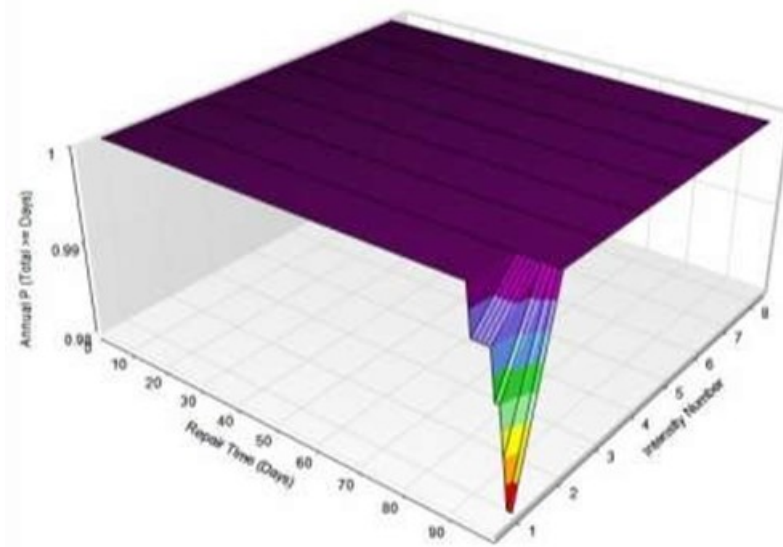
**Εικόνα 26: Καμπύλη πιθανότητας να υπάρχει υπέρβαση επισκευαστικών χρόνων σε κάθε περίπτωση φόρτισης**

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι φανερό πως για την σεισμική φόρτιση με αύξων αριθμό 7 έχουμε αυξημένες πιθανότητες για επισκευαστικούς χρόνους που ξεπερνούν τους 2.5 μήνες (80 μέρες) κάτι που καθιστά δύσκολη τη διαμονή των ιδιοκτητών των διαμερισμάτων μέχρι να αποπερατωθούν οι επισκευαστικές εργασίες. Επιπροσθέτως, για το σύνολο των υπολοίπων φορτίσεων έχουμε μια περίπου σταθερή πιθανότητα όσον αφορά το πόσο θα διαρκέσουν οι επισκευαστικές εργασίες. Επιπλέον, από την καμπύλη τεκμαίρεται το γεγονός ότι ο μέσος επισκευαστικός χρόνος ανά έτος φτάνει στις 2.5 εβδομάδες, ήτοι περίπου 17-18 μέρες.

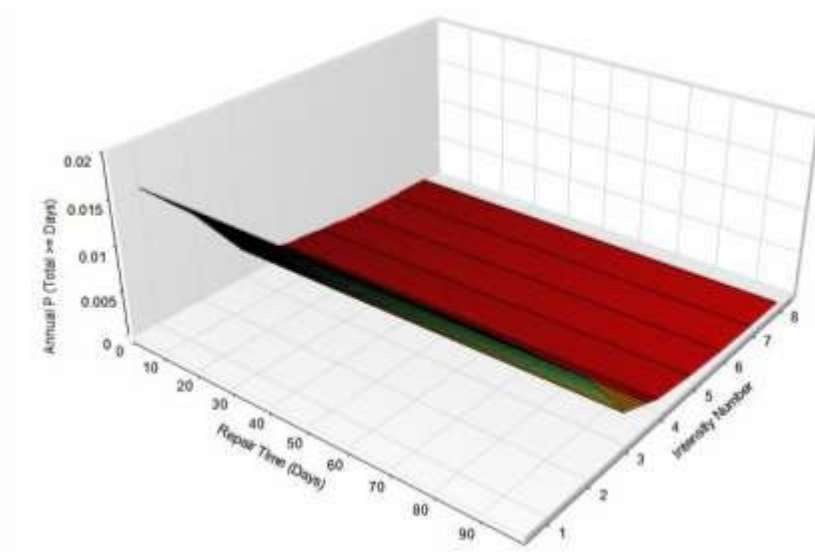
Η πιθανότητα να μην έχουμε υπέρβαση στο υπολογισθέν μέσο ετήσιο επισκευαστικό χρόνο για όλες τις σεισμικές φορτίσεις, εμφανίζεται στα παρακάτω 3d σχεδιαγράμματα. Η δεύτερη καμπύλη είναι η σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια



συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

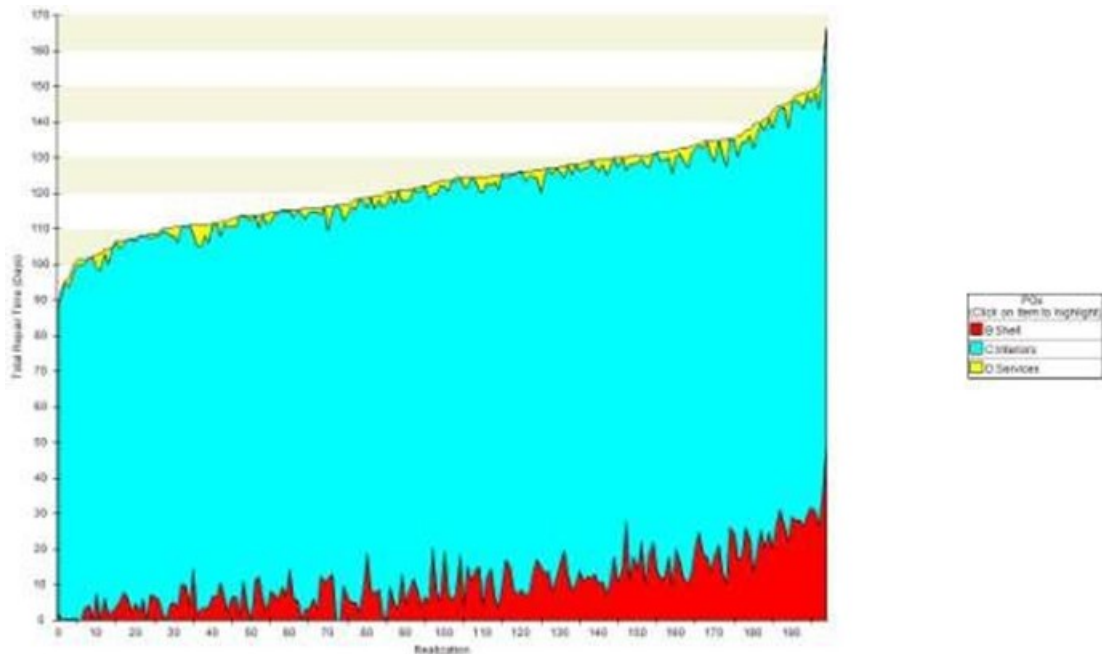


Εικόνα 27: Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης της πιθανότητας ανά έτος για την μη υπέρβαση στη διάρκεια των επισκευαστικών εργασιών



Εικόνα 28: Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης της πιθανότητας ανά έτος για την μη υπέρβαση στη διάρκεια των επισκευαστικών εργασιών (σταθμισμένη μορφή)

Εν τέλει, στην παρακάτω εικόνα είναι εμφανής ο μέσος χρόνος υπολογιστικά του επισκευαστικού χρόνου σε κάθε επανάληψη του υπολογιστικού αλγορίθμου όπως ορίστηκε στο λογισμικό.



Εικόνα 29: Επισκευαστικοί χρόνοι δομικών στοιχείων σε κάθε υπολογιστική επανάληψη

Από το παραπάνω σχήμα βγαίνει και η επιβεβαίωση πως τα εσωτερικά μέλη που δεν ανήκουν στον φέροντα οργανισμό είναι εκείνα που πιθανότατα θα έχουν τις περισσότερες φθορές και συνεπώς θα είναι απαραίτητο σε αυτά να πέσει το μεγαλύτερο ποσοστό εκ του συνόλου του επισκευαστικού χρόνου. Αντίθετα, βλέπουμε πως έχουμε μια σχετικά αυξημένη αντοχή των δομικών μελών, κάτι που μπορεί να ερμηνευθεί ως στοιχείο τήρησης αυξημένων συντελεστών ασφαλείας κατά τη μελέτη και εφαρμογή της μελέτης του κτηρίου.

#### 4.2.3.Θύματα

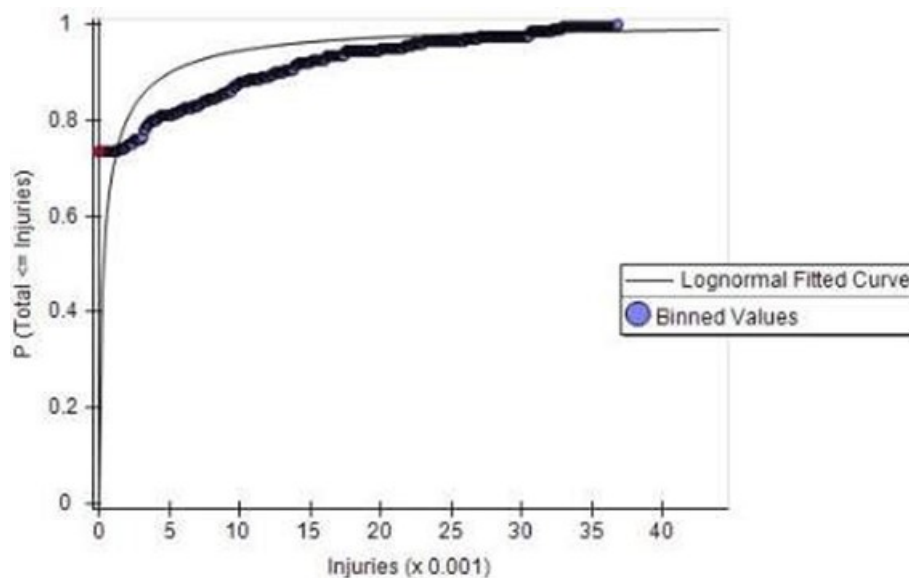
Η ανάλυση δίνει αποτελέσματα που σχετίζονται με ανθρώπινα θύματα λόγω της σεισμικής διέγερσης. Με τον όρο ανθρώπινα θύματα περιλαμβάνονται στο λογισμικό θάνατοι και τραυματισμοί που μπορεί να συμβούν μέσα στην οικοδομή

και διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

### **ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΙ (Injuries)**

Για να ερμηνευτούν με σωστό τρόπο τα αποτελέσματα πρέπει να διευκρινιστεί πως ο ορισμός του «τραυματισμού» σύμφωνα με το λογισμικό επεκτείνεται σε όλο το φάσμα σοβαρότητας των τραυμάτων (από τα πλέον βαριά μέχρι τα πιο ελαφρά) και, εν πάσει περιπτώσει, συμπεριλαμβάνονται τα τραύματα στα οποία πρέπει να λάβει το άτομο ιατρική περίθαλψη μέσα ή έξω από μια μονάδα νοσηλείας.

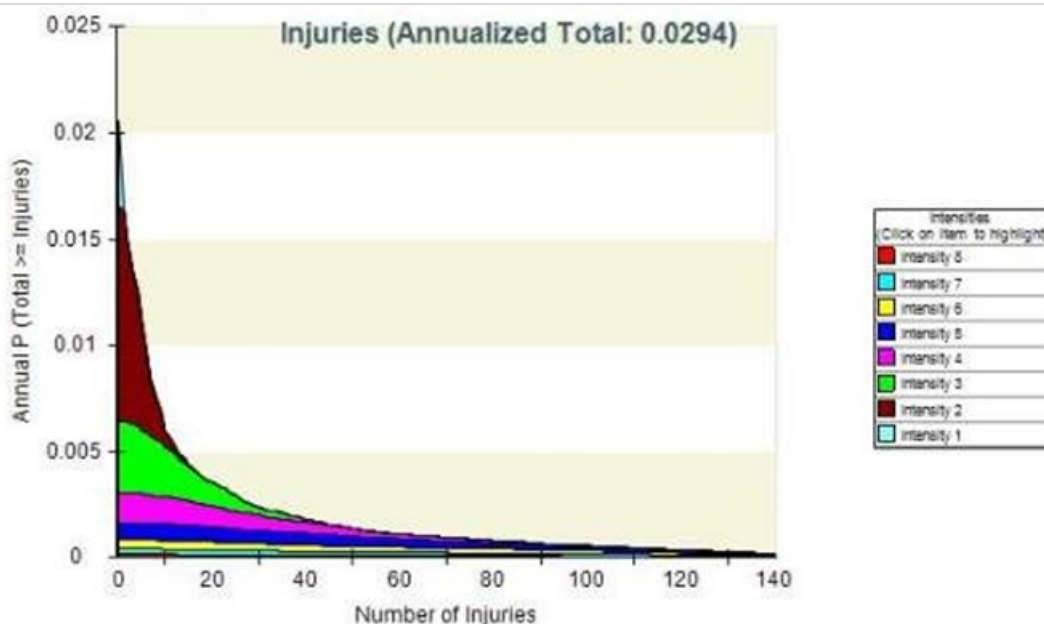
Η καμπύλη που αφορά τον υπολογισθέντα μέσο αριθμό τραυματισμών είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 30: Καμπύλη εκτίμησης μέσου αριθμού τραυματισμών.

Εκ της ανωτέρω καμπύλης γίνεται η διαπίστωση πως ο υπολογισθείς μέσος αριθμός τραυματισμών είναι στην πράξη μηδεν. (υφίσταται μεγάλη πιθανότητα μη υπέρβασης στο αποτέλεσμα αυτό). Το στοιχείο τούτο καταδεικνύει πως για σεισμικές διεγέρσεις που έχουν την συγκεκριμένη ένταση δεν περιμένουμε να δούμε καταγραφή τραυματισμών. Επιπροσθέτως, το διάγραμμα αυτό δείχνει και κάτι άλλο. Έχουμε μια μικρή διασπορά στον μέσω υπολογισθέντα αριθμό τραυματισμών, κάτι που εκτιμάται ως στοιχείο μιας αρκετά καλής εκτιμητικής ακρίβειας.

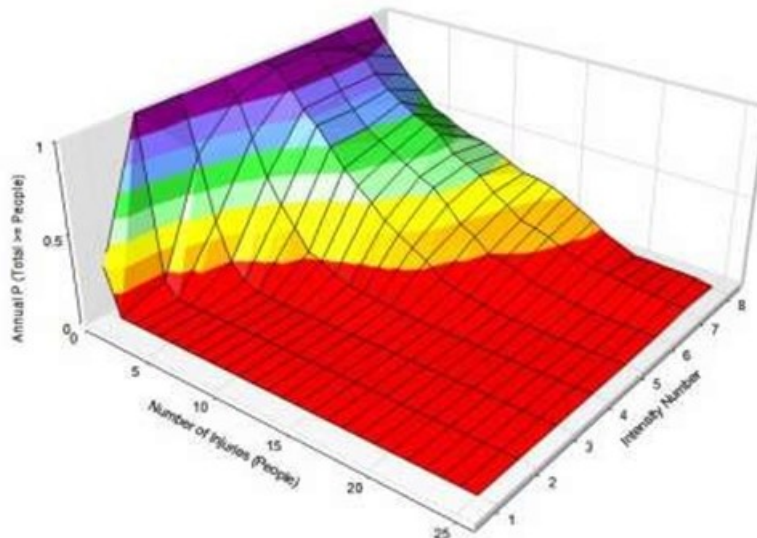
Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται το ενδεχόμενο να υπερβούμε το μέσο αριθμό τραυματισμών ανά έτος ο οποίος είναι κατ' εκτίμηση περίπου ίσος με 0.028 άτομα.



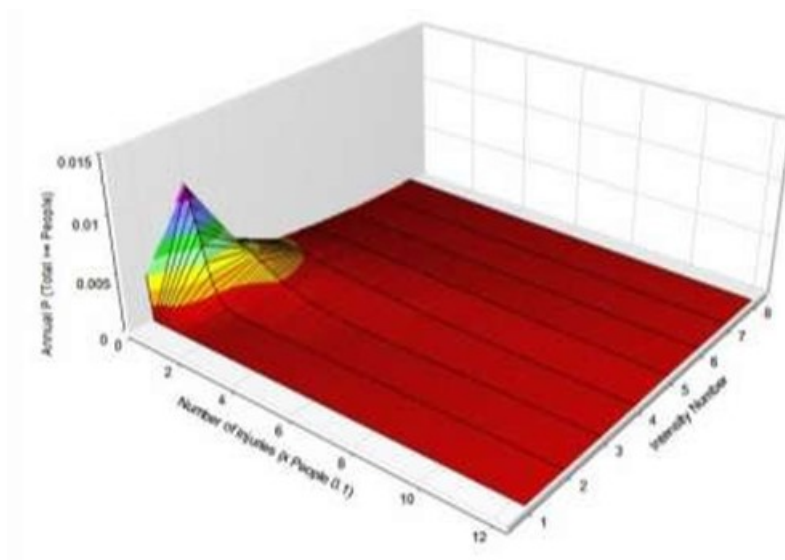
Εικόνα 31: Καμπύλη πιθανότητας να υπάρξει υπέρβαση στον απόλυτο αριθμό τραυματιών σε κάθε φόρτιση

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πως η πιθανότητα υπέρβασης έχει μεγάλη κλίση και επιπέδον είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των τραυματιών. Το στοιχείο αυτό οδηγεί στην επιβεβαίωση του προαναφερθέντος συμπεράσματος σε σχέση με το γεγονός ότι μελετητικά έχουν υιοθετηθεί στο κτήριο αυξημένοι συντελεστές ασφαλείας, κάτι που συμβάλλει σε ικανοποιητικό επίπεδο στο να προστατευθεί η ζωή των μόνιμων κατοίκων.

Το ενδεχόμενο να μην έχουμε υπέρβαση στον υπολογισθέντα μέσο αριθμό ανά έτος στους τραυματισμούς και για τις 8 φορτίσεις, εμφανίζεται στις παρακάτω 3d καμπύλες εκ των οποίων η δεύτερη αποτελεί τη σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:

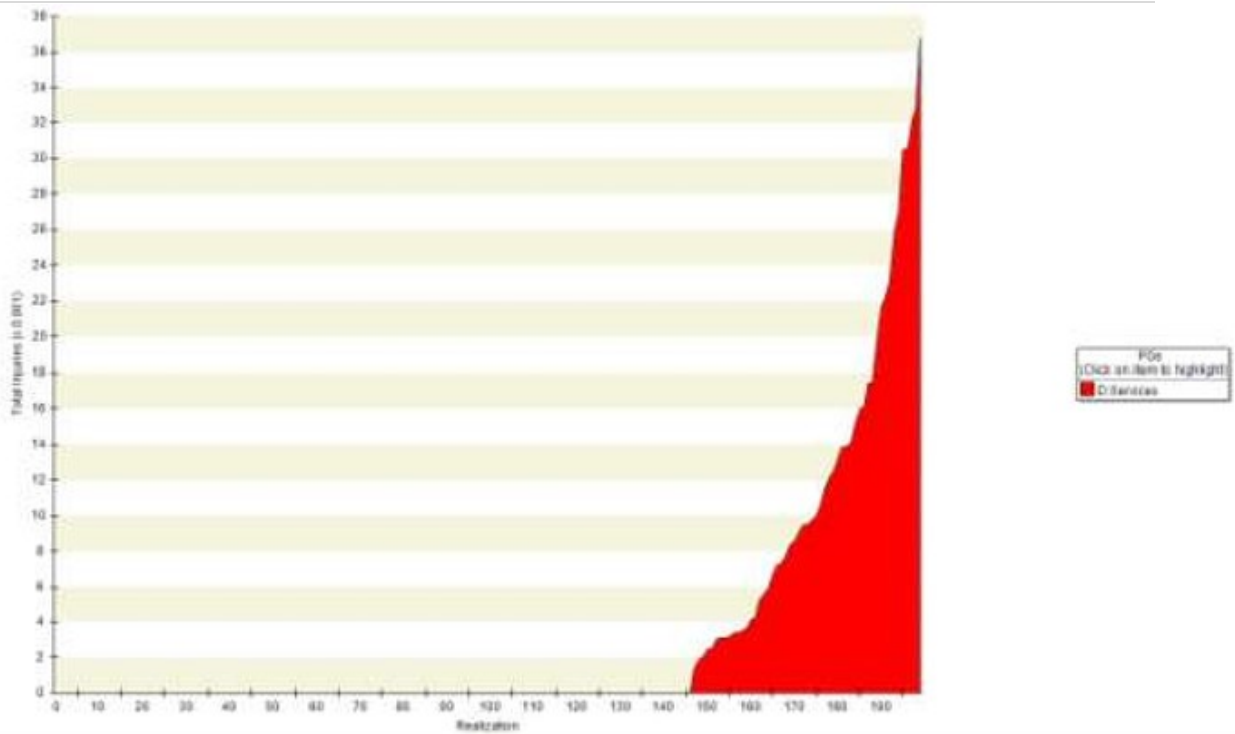


Εικόνα 32: Διάγραμμα πιθανότητας σε ετήσια βάση για την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού ατόμων που τραυματίστηκαν



Εικόνα 33: Διάγραμμα πιθανότητας σε ετήσια βάση για την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού ατόμων που τραυματίστηκαν

Εν τέλει, στην παρακάτω καμπύλη παρουσιάζεται ο μέσος υπολογισθείς αριθμός τραυματιών σε κάθε επανάληψη του υπολογιστικού αλγορίθμου.

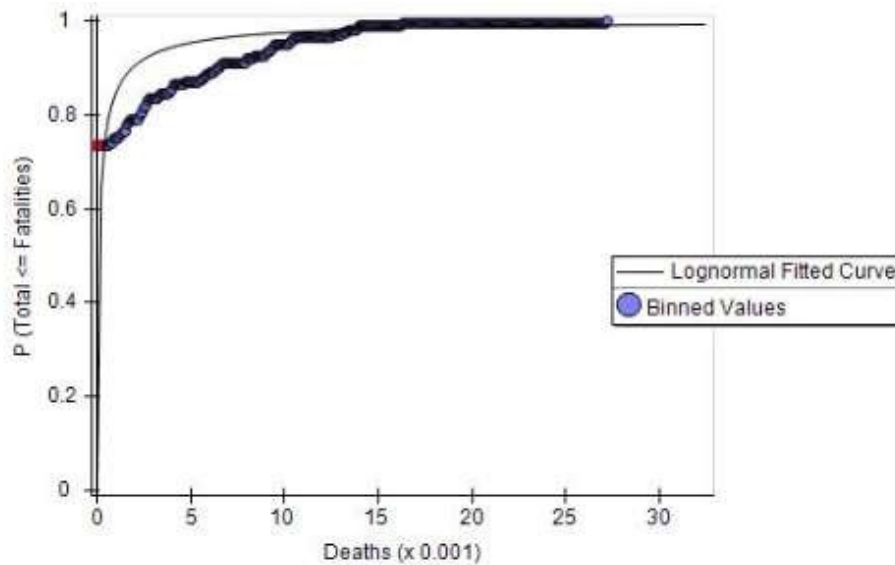


**Εικόνα 34: Τραυματίες σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου**

Από το παραπάνω σχήμα είναι προφανές αν καταγραφούν οι τραυματισμοί η εκτίμηση είναι πως θα οφείλονται σε στοιχεία του κτηρίου που δεν είναι τμήματα του φέροντος οργανισμού σε ποσοστό που θα ανέρχεται στο 25.5% στις περισσότερες από τις 200 επαναλήψεις της διαδικασίας.

### **ΘΑΝΑΤΟΙ (Fatalities)**

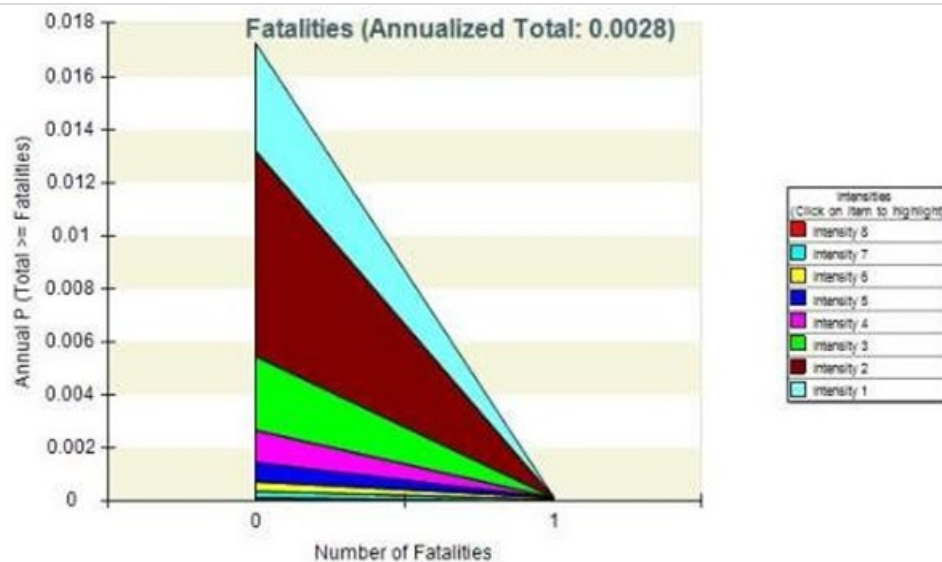
Κατά αντιστοιχία με τους τραυματισμούς, η καμπύλη εκτίμησης του μέσου αριθμού θανάτων είναι η παρακάτω.



**Εικόνα 35: Καμπύλη εκτίμησης μέσου αριθμού θανάτων**

Από το παραπάνω διάγραμμα βγαίνει η διαπίστωση πως ο υπολογισθείς αριθμός θανάτων (με αυξημένο ενδεχόμενο μη υπέρβασης) είναι πρακτικά ίσος με μηδέν. Το στοιχείο αυτό καταδεικνύει πως για σεισμικές διεγέρσεις με το συγκεκριμένο μέγεθος δεν αναμένονται θάνατοι. Επιπροσθέτως, από το διάγραμμα εμφανίζεται πως έχουμε πολύ μικρή διασπορά στον υπολογισθέντα αριθμό θανάτων κατά μέσο όρο, κάτι που μπορεί να ερμηνευτεί ως στοιχείο μιας αρκετά καλής εκτιμητικής ακρίβειας.

Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται το ενδεχόμενο να υπάρξει υπέρβαση στο μέσο αριθμός θανάτων ανά έτος, μια τιμή που κατ εκτίμηση φτάνει στους 0.003 θανάτους.

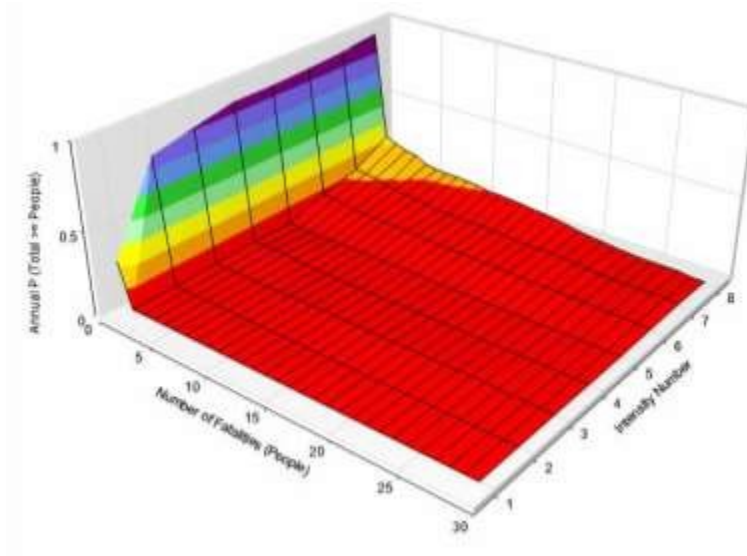


**Εικόνα 36: Καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης αριθμού θανάτων με ταξινόμηση για κάθε φόρτιση**

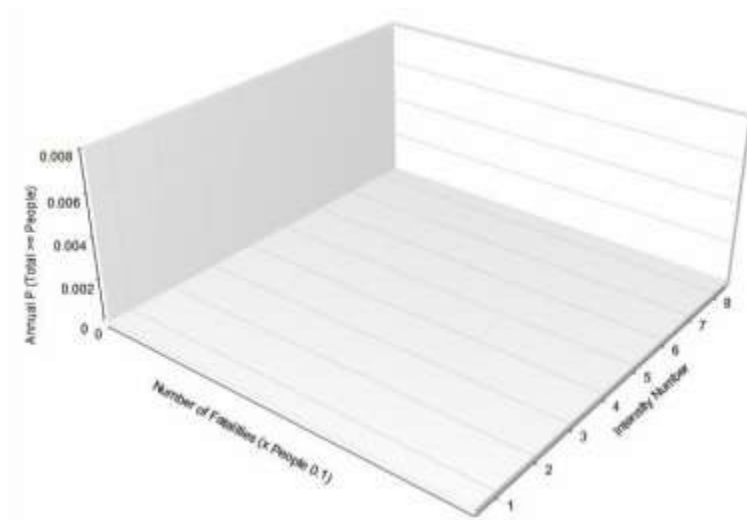
Και το παραπάνω διάγραμμα δείχνει ποιο είναι το ενδεχόμενο υπέρβασης σε ετήσια βάση και φαίνεται πως αυτό είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού των νεκρών και επιπλέον έχει πολύ μεγάλη κλίση. Το στοιχείο αυτό συνηγορεί στο γεγονός πως η κτηριακή μελέτη έχει υιοθετήσει αυξημένους συντελεστές ασφαλείας και τούτο συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στο να προστατευτεί η ζωή των κατοίκων αυτού (όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και με τους τραυματισμούς).

Το ενδεχόμενο να μη έχουμε υπέρβαση στον υπολογισθέντα μέσο αριθμό νεκρών ανά έτος για όλες τις φορτίσεις εμφανίζεται στις παρακάτω 3d καμπύλες, εκ των οποίων η δεύτερη αποτελεί τη σταθμισμένη κατά τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAFE) εκδοχή της πρώτης:



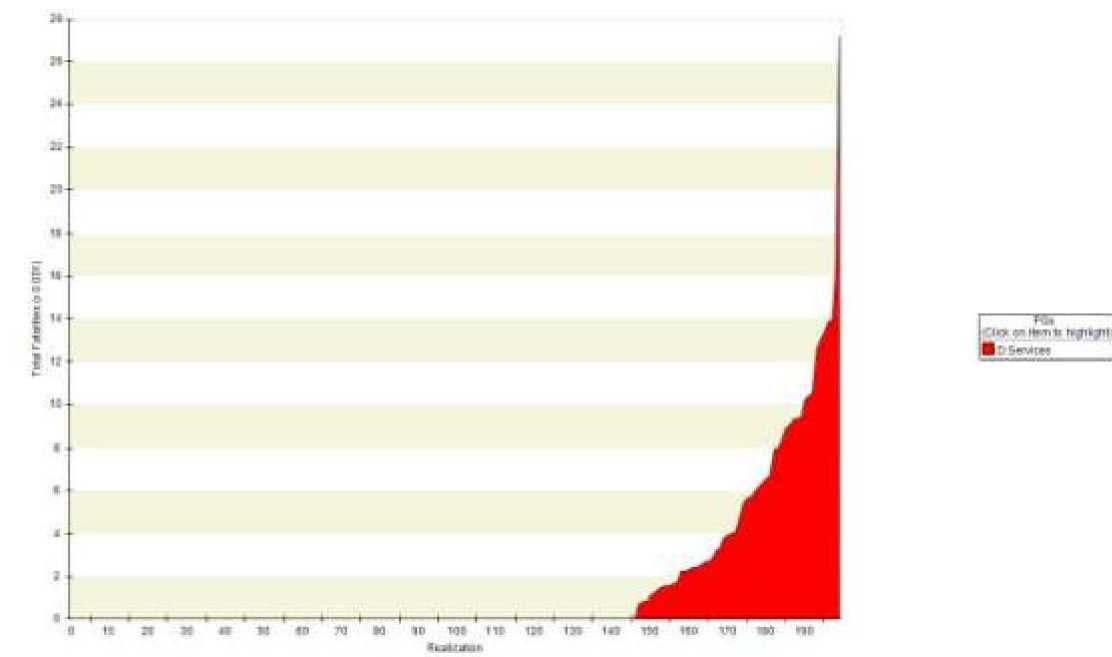


Εικόνα 37: Διάγραμμα ετήσιου ενδεχομένου σχετικό με την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού νεκρών



Εικόνα 38: Διάγραμμα ετήσιου ενδεχομένου σχετικό με την μη υπέρβαση του απολύτου αριθμού νεκρών (σταθμισμένη μορφή)

Τελικά, στην καμπύλη που ακολουθεί παρουσιάζεται ο μέσος όρος των νεκρών σε κάθε επανάληψη του υπολογιστικού αλγορίθμου.

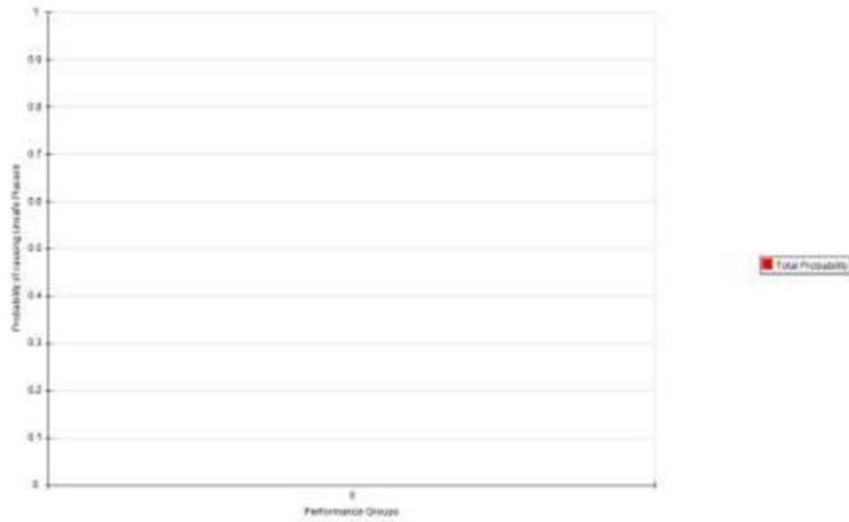


Εικόνα 39: Αριθμός νεκρών σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι προφανές πως στο ενδεχόμενο που γίνει απαρίθμηση των θανάτων, υπολογίζεται ότι αυτοί προξενούνται αποκλειστικά σε μη φέροντα στοιχεία σε ποσοστό που ανέρχεται στο 25.7% στο σύνολο των 200 επαναλήψεων του αλγορίθμου.

#### 4.2.4.Επισφαλή στοιχεία (*Unsafe Placards*)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις εκτίμησης απωλειών και αναλύσεις τρωτότητας δεν οδήγησαν σε στοιχεία να εμφανιστούν με μεγάλη πιθανότητα επισφαλή δομικά μέλη στο κτήριο και αυτό ισχύει για το σύνολο των εξεταζομένων σεισμικών φορτίσεων (8 στον αριθμό). Ως εκ τούτου το παρακάτω σχήμα αποτυπώνεται αποκλειστικά για να αποδωθεί στην εργασία η απαραίτητη πληρότητα.



**Εικόνα 40: Καμπύλη παρουσίας επισφαλών μελών για κάθε ομάδα απόδοσης**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1. Γενικά συμπεράσματα

Βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε ο υπολογισμός απωλειών σε ενδεχόμενο σεισμικό συμβάν σε πολυώροφο κτίριο κατοικία με Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, βασιζόμενοι στα αποτελέσματα σχετικής μελέτης, η οποία υλοποιήθηκε από τον πρώην Οργανισμό Εργατικής Κατοικίας. Το μελετώμενο κτίριο επελέγη εξαιτίας του γεγονότος πως αποτελεί μια αντιπροσωπευτική περίπτωση χρησιμοποιούμενου κτιρίου, το οποίο απαντάται τόσο με τη μορφή με την οποία παρουσιάζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, όσο και με μικροτροποποιήσεις, σε αστικές περιοχές όλης της Ελλάδας.

Τα διαθέσιμα στοιχεία τα οποία συμπεριλαμβάνονταν στον φάκελο του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν προς προσδιορισμό των μορφολογικών του χαρακτηριστικών και προς απομόνωση πληροφοριών σχετικά με τη διαμόρφωση τόσο των μη δομικών και δομικών μελών, όσο και του στατικού του συστήματος.

Με τη χρήση των παραπάνω στοιχείων κατέστη δυνατή η διαμόρφωση μαθηματικού προσομοιώματος, που υπεβλήθη σε μη γραμμική δυναμική ανάλυση, με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού. Τα διαθέσιμα στοιχεία από την ανάλυση αυτή ενσωματώθηκαν στο εργαλείο PACT για τη διενέργεια ανάλυσης υπολογισμού απωλειών και τρωτότητας.

Τα δεδομένα των δομικών και μη δομικών στοιχείων τα οποία εισήχθησαν για τις ανάγκες της διενεργηθείσας ανάλυσης δεν είναι στο σύνολο των περιπτώσεων πανομοιότυπα με τα αυτούσια χαρακτηριστικά του μελετώμενου κτιρίου. Επελέχθη να καταχωρηθούν τα αντίστοιχα στοιχεία της βάσης δεδομένων του λογισμικού PACT, προς διαμόρφωση μιας πλήρους εικόνας της ανάλυσης αναμενόμενων απωλειών στο μελετώμενο κτίριο.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της αναλύσεως, όπως αυτά αναλύθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 4, οφείλουν να αναφερθούν τα εξής:

**1. Αναφορικά με το αναμενόμενο κόστος επισκευής:**

Στις μισές περιπτώσεις εκδήλωσης σεισμικού γεγονότος, με την εξεταζόμενη ένταση, η εκτίμηση του κόστους επισκευής ανέρχεται σε 860 χιλιάδες δολάρια Αμερικής, ποσό το οποίο προσεγγίζει περίπου το συνολικό κόστος ανέγερσης του κτιρίου (867.5 χιλιάδες δολάρια Αμερικής). Σε παρόμοιες λοιπόν περιπτώσεις, δεν είναι δυνατόν ως το μόνο κριτήριο λήψης αποφάσεων να τίθεται το κόστος επισκευής, αντιθέτως οφείλεται να ακολουθείται μια μέθοδος λήψης αποφάσεων με πρόσθετα κριτήρια προς επιλογή της καλύτερης δυνατής απόφασης.

**2. Όσον αφορά στο χρόνο επισκευής:**

Στις μισές περιπτώσεις σεισμικής δόνησης της, εν προκειμένω, εξεταζόμενης εντάσεως ο μέσος όρος ο οποίος εκτιμάται πως θα χρειαστεί για την επισκευή ποσοστιαία προσεγγίζει το 43 % του συνολικού χρόνου ανέγερσης του κτιρίου εξαρχής. Το εν λόγω στοιχείο αποκαλύπτει την ανάκυψη βλαβών μέτριας εκτάσεως για περίπου το 50% των σεισμικών δονήσεων. Είναι δόκιμο να αναφερθεί πως οι υπερβάσεις του χρόνου επισκευών καθιστούν δύσκολο τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου αποκατάστασης, εξαιτίας του γεγονότος πως υφίσταται σταθερό ενδεχόμενο εκδήλωσης, ως εκ τούτου είναι πρακτικώς αδύνατη η χρησιμοποίηση της κατασκευής από τους διαμένοντες σε αυτή, παράλληλα με την εξέλιξη των επισκευαστικών έργων.

**3. Όσον αφορά στα θύματα:**

Ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων και τραυματισμών εντός του κτιριακού περιγράμματος διαπιστώνεται κατόπιν της διενέργειας των αναλύσεων πως είναι ιδιαίτερα χαμηλός. Οι επιπλέον πιθανοί θάνατοι και τραυματισμοί θα προέρχονται κατ' εκτίμηση σχεδόν εξολοκλήρου από μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής για το 25% περίπου εκ του συνόλου των 200 επαναλήψεων του αλγορίθμου της ανάλυσης.

**4. Όσον αφορά στα επισφαλή στοιχεία:**

Εκτιμάται πως δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν τρωτά δομικά μέλη στη κατασκευή σε κανέναν από τους συνδυασμούς φόρτισης των αναλύσεων. Το εν λόγω στοιχείο, συνδυαστικά με τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις για

κάθε δείκτη απώλειας και εξαιτίας της καλής προσέγγισης που είχαν τα αποτελέσματα (κάτι που είναι εμφανές στις αντίστοιχες καμπύλες), δίνει την επιβεβαίωση πως έχουν υιοθετηθεί αυξημένοι συντελεστές ασφαλείας κατά την αρχική διενέργεια της μελέτης του κτιρίου. Ως εκ τούτου, εκ των αποτελεσμάτων της μελέτης δεν είναι εμφανής κάποιος σημαντικός κίνδυνος για τους διαμένοντες στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης.

## **5.2. Συστάσεις προς μελλοντική διερεύνηση**

Εκτός από την ερευνητική σημασία που έχουν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, παρόμοιο βαθμό σημαντικότητας θα μπορούσε να έχει και η αξιοποίησή τους σε πρακτικό επίπεδο εκ μέρους διαφόρων ιδιωτικών ή δημοσίων φορέων και οργανισμών. Εν τούτοις, στο παρόν κεφάλαιο, είναι άξιο επισήμανσης πως το να προσαρμοστούν τα αποτελέσματα με αξιόπιστο και πλήρες τρόπο στα δεδομένα των υφισταμένων κτιρίων στην Ελλάδα, είναι μια περίπλοκη διαδικασία που ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας που έχει κυρίως ακαδημαϊκό προσανατολισμό.

Το προαναφερθέν στοιχείο κρίνεται εύλογο, αφού κατά βάση τεκμαίρεται από την ίδια την προέλευση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Σε προηγούμενη ενότητα έχει γίνει αναφορά πως το εν λόγω λογισμικό αναπτύχθηκε στις Η.Π.Α. με συνδρομή ευρείας διεπιστημονικής ομάδας που έχει συντάξει και τους κανονισμούς ATC και FEMA. Η τεκμηρίωση του λογισμικού βασίζεται σε στατιστικές αναλύσεις και παραρτήματα και σε εθνικά προσαρτήματα κανονισμών. Συνεπώς, τα δεδομένα που συμπεριλήφθηκαν στην αντίστοιχη βάση του λογισμικού έχουν σχέση με μορφές φορέων και δομικά υλικά που ναι μεν είναι τυπικά για την Αμερική (γυψοσανίδες διαμόρφωσης εσωτερικών διαζωμάτων) δεν είναι όμως σύνηθη στις ελληνικές οικοδομές στην ίδια μεγάλη συχνότητα. Επιπροσθέτως, συνηθισμένα υλικά και μεθοδολογίες κατασκευής σε ελληνικά κτίρια, όπως για παράδειγμα παραδοσιακές κατασκευές από αργολιθοδομή, δεν έχουν συμπεριληφθεί στη βάση δεδομένων του λογισμικού, καθώς είναι μορφές κατασκευής που σε καμία περίπτωση δεν απαντώνται στην Αμερικανική επικράτεια.

Ως εκ τούτου, το να χρησιμοποιήσει ο εκάστοτε μελετητής το λογισμικό PACT εντός του στενού γεωγραφικού πλαισίου της χώρας μας, έχει σαν θεμελιώδη προϋπόθεση το να τροποποιηθούν οι τιμές των παραμέτρων στην Database, ώστε να εισαχθούν εντός αυτής επιπλέον στοιχεία και διάφορα καινούρια δομικά χαρακτηριστικά που συναντώνται στα ελληνικά κτίρια. Επιπλέον, αν συμπεριλάβουμε στην εκτίμησή μας το γεγονός πως οι υπολογισθείσες απώλειες αφορούν μόνο το εσωτερικό των κτιρίων της μελέτης περίπτωσης, μια μελλοντική εξέλιξη του αλγορίθμου του λογισμικού, θα ήταν η εφικτότητα εκτίμησης απωλειών στους περιβάλλοντες χώρους των κτιρίων αυτών.

Με γνώμονα το παραπάνω στοιχείο θα ήταν εφικτός ο έλεγχος της συνεργασίας με την ΕΛ.ΣΤΑΤ. για να μορφωθεί μια ξεχωριστή Database με δεδομένα ελληνικών κτιρίων, που θα μπορούσαν να εισαχθούν στις βιβλιοθήκες του λογισμικού PACT, ώστε να εκτιμηθούν χωρικές απώλειες και να δημιουργηθούν πιο στοχευμένοι γεωγραφικά χάρτες.

Εν τέλει, μεγάλο ενδιαφέρον από πρακτικής άποψης παρουσιάζεται στο να εξεταστεί πως διαφέρει η εκτίμηση σεισμικών απωλειών μεταξύ των διαθέσιμων λογισμικών που διενεργούν τέτοιου είδους αναλύσεις, όπως αυτά εμφανίστηκαν στη θεωρητική ανασκόπηση του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Εν τοιαύτη περιπτώσει, θα ήταν δυνατό να συγκριθούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με παρόμοια αποτελέσματα εκτίμησης απωλειών για τον ίδιο κτιριακό φορέα τα οποία προέρχονται από αναλύσεις που έλαβαν χώρα με άλλα λογισμικά, όπως π.χ. το HAZUS ή το ELER. Ακολούθως, αν είναι διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία των τελευταίων δεκαετιών για τις σεισμικές φορτίσεις τις οποίες δέχτηκε το κτίριο με μορφή εδαφικής επιτάχυνσης, αυτά θα μπορούσαν να τύχουν αξιοποίησης για να εξελιχθεί ο εσωτερικός αλγόριθμος του PACT και έτσι να γίνει ένα βήμα προς τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών του και την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων 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, 1<sup>st</sup> 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, 8<sup>th</sup> 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, 1<sup>st</sup> 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, 2<sup>nd</sup> 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.