



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Εκτίμηση Σεισμικής Επιτελεστικότητας Πολυώροφου Κτιρίου από Χάλυβα με Ασύμμετρη Κάτοψη



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Ι. Φραντζεσκάκης

Επιβλέπων: Δημήτριος Βαμβάτσικος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

ΕΜΚ ΜΕ 2016/03

Φραντζεσκακης Ε. Ι. (2016).
Εκτίμηση σεισμικής επιτελεστικότητας πολυώροφου κτιρίου από χάλυβα με ασύμμετρη
κάτοψη
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2016/03
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Frantzeskakis E. I. (2016).
Seismic performance assessment of multi-storey steel building with nonsymmetrical
floor plan
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2016/03
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
1 Εισαγωγή.....	7
1.1 Γενικά.....	7
1.1.1 Ιστορική αναδρομή	7
1.1.2 Η διαδικασία σχεδιασμού.....	8
1.2 Η εκτίμηση της επιτελεστικότητας	10
1.3 Η μεθοδολογία.....	13
2 Ανάλυση της Κατασκευής.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Ο τυπικός σχεδιασμός του κτιρίου	17
2.3 Η επεξεργασία των σεισμικών δονήσεων	18
2.4 Η προσομοίωση.....	20
2.5 Η ανάλυση.....	24
3 Εκτίμηση Σεισμικής Επιτελεστικότητας	27
3.1 Εισαγωγή.....	27
3.2 Τα στοιχεία της κατασκευής	27
3.3 Η εισαγωγή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης	33
3.4 Η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.....	35
4 Αποτελέσματα	37
4.1 Εισαγωγή.....	37
4.2 Τα αποτελέσματα για το κόστος επισκευής	37
4.3 Τα αποτελέσματα για τον χρόνο επισκευής	43
4.4 Τα αποτελέσματα για τις απώλειες ζώων.....	47
4.5 Τα αποτελέσματα για τους τραυματισμούς.....	50
5 Συμπεράσματα.....	55
6 Βιβλιογραφία	57
Παράρτημα Α. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης	58
Παράρτημα Β. Σχέδια	63

Εκτίμηση Σεισμικής Επιτελεστικότητας Κτιρίου από Χάλυβα με Ασύμμετρη Κάτοψη

Φραντζεσκάκης Ε. Ι. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

Περίληψη

Κατά την τυπική διαδικασία σχεδιασμού ενός κτιρίου, οι μηχανικοί επιλέγουν και διαστασεολογούν το κτίριο έτσι ώστε αυτό να ικανοποιεί τα κριτήρια λειτουργικότητας και ασφάλειας σε αστοχία του εκάστοτε ισχύοντος κανονισμού. Οι κανονισμοί αυτοί είναι συνήθως γραμμένοι με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται κάποιο ελάχιστο επίπεδο επιτελεστικότητας για το κτίριο. Ωστόσο η επιθυμητή απόδοση του κτιρίου συχνά δεν είναι προφανής και η ικανότητα του τελικού σχεδιασμού να παρέχει το επιθυμητό επίπεδο επιτελεστικότητας σπάνια αξιολογείται ή κατανοείται πλήρως. Προκειμένου ο μελετητής, ο ιδιοκτήτης καθώς και οι πιθανοί επενδυτές να έχουν καλύτερη εικόνα για την απόκριση του κτιρίου σε μελλοντικούς σεισμούς είναι δυνατό μαζί με την τυπική διαδικασία σχεδιασμού να γίνεται και σχεδιασμός βασισμένος στην επιτελεστικότητά του. Έτσι είναι δυνατόν να προσδιοριστούν καλύτερα και να ποσοτικοποιηθούν ο βαθμός και το είδος των αστοχιών που μπορεί να εμφανιστούν στο κτίριο λόγω κάποιου σεισμού καθώς και οι επιπτώσεις τους.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζει βήμα προς βήμα τον σχεδιασμό με βάση την επιτελεστικότητα ενός πολυώροφου μεταλλικού κτιρίου γραφείων. Αρχικά παρουσιάζεται η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται κατά τον σχεδιασμό όπως αυτή ορίζεται στις οδηγίες FEMA P-58. Αναλύεται το ποιές πληροφορίες για το κτίριο και την περιοχή του κτιρίου χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό. Επίσης ορίζονται οι παράμετροι απόκρισης με βάση τις οποίες γίνεται η τελική εκτίμηση της επιτελεστικότητας του κτιρίου.

Στην συνέχεια γίνεται προσομοίωση και ανάλυση του κτιρίου. Στο κτίριο γίνεται ανελαστική στατική ανάλυση και ανελαστική δυναμική ανάλυση. Κατά την ανελαστική δυναμική ανάλυση το κτίριο υποβάλλεται σε σεισμικές δονήσεις από πραγματικές καταγραφές κατάλληλα κλιμακωμένες. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε συνδυασμό με τα μορφολογικά και τα δυναμικά του κτιρίου, όπως και τα σεισμικά στοιχεία για την περιοχή εισάγονται στο λογισμικό PACT. Με την βοήθεια του λογισμικού εξάγονται καμπύλες επιτελεστικότητας για το κτίριο σε τέσσερις κατηγορίες: απώλειες ζώων, τραυματισμοί, κόστος επισκευής και χρόνος επισκευής. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται και τελικά παρατίθενται τα συμπεράσματα της ανάλυσης.

**Seismic Performance Assessment of a Multi-storey Steel Building with
Nonsymmetrical Floor Plan**

Frantzeskakis E. I. (supervised by Vamvatsikos D.)

Abstract

During the typical design process of a building, engineers select and proportion a building in accordance to criteria as these are defined in the codes in effect. These codes are usually developed to guarantee a minimum performance level for the building. Although this is the case, the desired performance of the building is usually not obvious and the ability of the final design to provide the desired performance level is rarely evaluated or fully understood. In order for the designer, the owner and any potential investors to have a clearer picture about the response of the building during future earthquakes it is essential to perform a performance mode assessment along with the typical design. This way the designer can effectively determine and quantify the degree and the nature of the failures that can appear in a building due to an earthquake along with their consequences.

This thesis presents, step by step, the performance-based assessment of a steel multi-storey office building. Initially the methodology which is used for the performance assessment is presented, as it is described in the FEMA P-58 guidelines. In addition, the necessary building and site information, together with the appropriate engineering demand parameters are also discussed. Then, the building is modeled and analyzed.

Both pushover analysis and nonlinear dynamic analyses are performed. During the nonlinear dynamic analyses the building is subjected to real seismic recordings that is properly tuned. The results of the analysis along with the shape and dynamic characteristics of the building and the seismic data of the site are input to the PACT software. The software's output consists of performance functions about the building, regarding four categories: deaths, injuries, total repair cost and repair time. The results are evaluated and the final conclusions are presented.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον Επικ. Καθηγητή κ. Δημήτριο Βαμβάτσικο για την πολύτιμη καθοδήγησή και υποστήριξη του από την πρώτη μέρα εκπόνησης αυτής της εργασίας.

1 Εισαγωγή

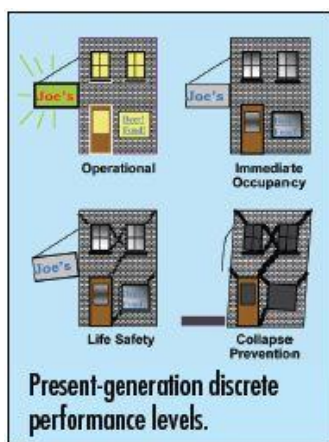
1.1 Γενικά

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση την επιτελεστικότητα είναι μία διαδικασία σχεδιασμού νέων κτιρίων ή ενίσχυσης υπαρχόντων, η οποία έχει ως σκοπό να επιτευχθεί μία επιθυμητή συμπεριφορά σε μελλοντικούς σεισμούς. Η συμπεριφορά αυτή αξιολογείται ως προς το μέγεθος και την ποσότητα των αστοχιών που μπορεί να εμφανιστούν σε μία κατασκευή λόγω κάποιας σεισμικής δόνησης, καθώς και ως προς τις επιπτώσεις τους.

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση την επιτελεστικότητα στην τωρινή του μορφή ξεκίνησε την δεκαετία του 1990. Οι σύγχρονες διαδικασίες που αφορούν στην επιτελεστικότητα βασίζονται στον FEMA 273 (1997), ο οποίος αφορά στην αντισεισμική ενίσχυση υπαρχόντων κτιρίων και ο οποίος έθεσε τις βάσεις για τον συσχετισμό των επιπέδων επιτελεστικότητας με την τρωτότητα και τα διαφορετικά επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας. Οι FEMA 356 (2000) και ASCE-SEI 41-06 (2007) ήταν η επόμενη γενιά κανονισμών και καθόρισαν την σύγχρονη πρακτική για την εκτίμηση της σεισμικής επιτελεστικότητας.

Στις σύγχρονες διαδικασίες, η επιτελεστικότητα εκφράζεται σε όρους διακριτών επιπέδων επιτελεστικότητας που ορίζονται ως: λειτουργικό, άμεση χρήση, προστασία ζωής και αποφυγή κατάρρευσης (Σχήμα 1.1.). Τα επίπεδα αυτά αφορούν τόσο τα δομικά όσο και τα μη δομικά στοιχεία μίας κατασκευής και αξιολογούνται για συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας. Με τον τρόπο αυτό, ορίστηκε ένα λεξιλόγιο και δόθηκε η δυνατότητα στους μηχανικούς να ποσοτικοποιήσουν και να παρουσιάσουν την σεισμική συμπεριφορά μιας κατασκευής στον ιδιοκτήτη και τους επενδυτές. Ωστόσο στην πράξη προέκυψαν περιορισμοί στην εφαρμογή τους με αποτέλεσμα να διαπιστωθεί ότι χρειαζόνταν κάποιος εμπλουτισμός.



Σχήμα 1.1: Τα τέσσερα επίπεδα επιτελεστικότητας.

Οι περιορισμοί που προέκυψαν περιλαμβάνουν:

1. Την αβεβαιότητα για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των διαθέσιμων αναλυτικών διαδικασιών στην πρόβλεψη της πραγματικής απόκρισης της κατασκευής
2. Την αβεβαιότητα του επιπέδου του συντηρητισμού που διέπει τα κριτήρια αποδοχής
3. Την ανικανότητα να εφαρμόσει κανείς με αξιοπιστία και οικονομικά, μεθόδους σχεδιασμού νέων κτιρίων με βάση την επιτελεσματικότητα
4. Την ανάγκη για εναλλακτικούς τρόπους προκειμένου να παρουσιαστεί η συμπεριφορά του κτιρίου στους επενδυτές, με τρόπο που να είναι χρήσιμος στην λήψη αποφάσεων.

Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα του σχεδιασμού με βάση την επιτελεσματικότητα, η FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) ξεκίνησε τον σχεδιασμό της νέας γενιάς διαδικασιών. Αρχικά συντάχτηκε ο FEMA 349 (2000) ο οποίος αργότερα ανανεώθηκε και οδήγησε στην έκδοση του FEMA 445 (2006).

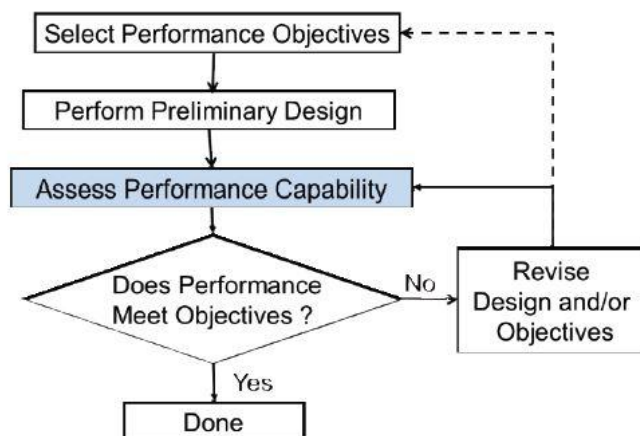
Στόχος των οδηγιών είναι:

1. Να αναπτύξουν ένα πλαίσιο για την εκτίμηση επιτελεσματικότητας λαμβάνει υπόψη και φροντίζει να γίνει κατανοητό στους ιδιοκτήτες ότι υπάρχουν περιορισμοί στην δυνατότητα των μηχανικών να προβλέψουν την απόκριση της κατασκευής. Το ίδιο ισχύει και για την αβεβαιότητα που υπάρχει για την ένταση της σεισμικής επικινδυνότητας.
2. Να αναμορφώσουν τα διακριτά επίπεδα επιτελεσματικότητας όπως αυτά ορίζονται από τους σύγχρονους κανονισμούς, δημιουργώντας νέα μέτρα επιτελεσματικότητας που ταιριάζουν καλύτερα στις ανάγκες των ιδιοκτητών.
3. Να δημιουργήσουν μεθόδους προσδιορισμού αυτών των νέων μέτρων επιτελεσματικότητας για νέες αλλά και υπάρχουσες κατασκευές.
4. Να διευρύνει τις διαδικασίες που αφορούν τα μη δομικά στοιχεία έτσι ώστε να υπάρχει σαφής εκτίμηση για την τρωτότητά τους και την κατάστασή τους μετά τον σεισμό.
5. Να τροποποιήσουν τις υπάρχουσες διαδικασίες σχεδιασμού έτσι ώστε να εκτιμούνται γενικές παράμετροι απόκρισης και να μην εξαρτάται η αξιολόγηση της γενικής συμπεριφοράς της κατασκευής από μεμονωμένα στοιχεία.

1.1.2 Η διαδικασία σχεδιασμού

Στον σχεδιασμό με βάση την επιτελεσματικότητα οι μηχανικοί, οι ιδιοκτήτες και οι επενδυτές αναγνωρίζουν από κοινού ότι η επιτελεσματικότητα του κτιρίου είναι η βάση με την οποία γίνεται ο σχεδιασμός του. Κατά τον σχεδιασμό παίρνονται αποφάσεις και έπειτα αυτές αξιολογούνται προκειμένου να διαπιστωθεί αν ο τελικός σχεδιασμός της κατασκευής ικανοποιεί τα κριτήρια επιτελεσματικότητας. Η διαδικασία σχεδιασμού με αυτή την μέθοδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2..

Η διαδικασία ξεκινά με την επιλογή ενός ή περισσότερων στόχων απόδοσης της κατασκευής. Κάθε στόχος ορίζει την αβεβαιότητα που αποδεχόμαστε στο ότι θα εμφανιστούν αστοχίες ή στο ότι θα υπάρξει απώλεια της κατασκευής για δεδομένη σεισμική επικινδυνότητα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να λάβει υπόψη τις ανάγκες και τις επιθυμίες διαφόρων ομάδων όπως: ένοικοι, δανειστές, ασφαλιστές και το ευρύ κοινό. Οι ανάγκες και οι απόψεις αυτών μπορεί να επηρεάσουν τον σχεδιασμό ενός κτιρίου παρά το γεγονός ότι δεν έχουν άμεση συμμετοχή στην διαδικασία του σχεδιασμού.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού κατασκευών.

Αφού γίνει επιλογή των στόχων απόδοσης, πρέπει να ξεκινήσει ο σχεδιασμός και να καθοριστεί συμπεριφορά της κατασκευής. Κατ' ελάχιστο, ο βασικός σχεδιασμός κτιρίων συμπεριλαμβάνει: την τοποθεσία και τα χαρακτηριστικά του οικοπέδου, το μέγεθος, την οργάνωση και την χρήση του κτιρίου, τον τύπο, την μορφή και την δυσκαμψία του δομικού συστήματος και, τέλος, τον τύπο, την θέση και την σύσταση των μη δομικών στοιχείων. Για τα νέα κτίρια θα πρέπει να γίνεται προκαταρκτικός σχεδιασμός με αρκετά υψηλό επίπεδο λεπτομερειών προκειμένου να γίνει εκτίμηση της συμπεριφοράς τους. Για τα υπάρχοντα κτίρια οι βασικές πληροφορίες είναι γνωστές, ωστόσο μπορεί να χρειάζεται να γίνει προκαταρκτικός σχεδιασμός για τυχόν ενισχύσεις που θα χρειαστούν.

Η εκτίμηση της απόδοσης μιας κατασκευής είναι η διαδικασία κατά την οποία καθορίζεται το επίπεδο επιτελεσματικότητας για έναν δεδομένο σχεδιασμό της κατασκευής. Κατά την διαδικασία αυτή οι μηχανικοί κάνουν δομικές αναλύσεις με σκοπό να προβλέψουν την απόκριση του κτιρίου σε κάποιο σεισμό, να εκτιμήσουν τον πιθανό αριθμό και ένταση των αστοχιών και να καθορίσουν τις πιθανές επιπτώσεις.

Στην συνέχεια, οι μηχανικοί συγκρίνουν την προβλεπόμενη συμπεριφορά της κατασκευής με την επιθυμητή. Αν η προβλεπόμενη συμπεριφορά είναι αντίστοιχη ή καλύτερη από την επιθυμητή, ο σχεδιασμός θεωρείται επαρκής. Αν από την άλλη η συμπεριφορά δεν ικανοποιεί τα κριτήρια που έχουν οριστεί τότε αλλάζει ο σχεδιασμός της κατασκευής και επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου η συμπεριφορά της κατασκευής είναι τουλάχιστον η επιθυμητή.

Η σεισμική επιτελεσματικότητα εκφράζεται σε όρους πιθανών απωλειών, κόστους επισκευών και αντικατάστασης, χρόνου επισκευών και χαρακτηρισμού του κτιρίου ως μη ασφαλές λόγω ζημιών από έναν σεισμό. Η μεθοδολογία μπορεί να εμπλουτιστεί προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη επιπλέον επιπτώσεις όπως ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος. Ακόμη μπορεί να προσαρμοστεί στο να αξιολογεί το επίπεδο επιτελεσματικότητας για άλλα τυχηματικά φορτία ή και ακραίες φορτίσεις. Ωστόσο, τέτοιου είδους εμπλουτισμοί είναι εκτός των δυνατοτήτων της παρούσας έκδοσης της μεθοδολογίας αυτής. Προκειμένου να εφαρμοστεί η μεθοδολογία αυτή χρειάζονται δεδομένα για την τρωτότητα των δομικών και μη δομικών στοιχείων που απαρτίζουν την κατασκευή (Πίνακας 1.1)

Πίνακας 1.1: Δομικά συστήματα και στοιχεία για τα οποία παρέχονται δεδομένα τρωτότητας.

Σύστημα	Σχόλια
Πλαίσια ροπής	Πλήρως πακτωμένα, με ειδικό, μέσο ή τυπικό επίπεδο λεπτομερειών
Σύνδεσμοι κεντρικά συνδεδεμένοι	Σε σχήμα X, Λ, με μονές διαγώνιους με ειδικό, μέσο ή τυπικό επίπεδο λεπτομερειών
Σύνδεσμοι έκκεντρα συνδεδεμένοι	Με στρεπτικούς ή διατμητικούς συνδέσμους στο μέσο του ανοίγματος ή με συνδετήριες δοκούς
Τοίχοι με ελαφρά πλαίσια	Με επικάλυψη από πανέλο, από χάλυβα ή με διαγώνιες ενισχύσεις
Τυπικά πλαίσια πατωμάτων	Σύμμικτες πλάκες, χαλύβδινα πατώματα ή πατώματα με ξύλινη επικάλυψη

1.2 Η εκτίμηση της επιτελεστικότητας

Το μέτρο επιτελεστικότητας είναι ένα μέσο με τον οποίο μπορεί να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις λόγω μιας σεισμικής δόνησης σε ένα κτίριο με τρόπο τέτοιο που να βγάζει νόημα για όσους έχουν να λάβουν αποφάσεις σχετικά με το κτίριο αυτό. Στο παρελθόν όσοι χρειάζονταν να λάβουν αποφάσεις έχουν χρησιμοποιήσει πλήθος από διαφορετικά μέτρα επιτελεστικότητας. Μετά την έκδοση του ASCE/SEI 31-03 και του ASCE/SEI 41-06 οι ιδιοκτήτες κτιρίων και οι μηχανικοί χρησιμοποιούν από κοινού διακριτά επίπεδα επιτελεστικότητας. Αυτά είναι τα: Λειτουργικό, Άμεση χρήση, Ασφάλεια Ζωής, Αποφυγή κατάρρευσης. Έχουν ως σκοπό να χαρακτηρίσουν την αναμενόμενη συμπεριφορά του κτιρίου. Αυτά τα επίπεδα επιτελεστικότητας καθορίζονται από αποδεκτά διαστήματα αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης, για δομικά και μη δομικά στοιχεία και έχουν μία ποιοτική σχέση με το πιθανό επίπεδο των βλαβών, των απωλειών και των επισκευών.

Πολλά οικονομικά ινστιτούτα συμπεριλαμβανομένων δανειστών, επενδυτικών κεφαλαίων και ασφαλιστών χρησιμοποιούν δείκτες όπως Probable Maximum Loss (PML), Scenario Expected Loss (SEL) και Scenario Upper Loss (SUP) ως μέτρα επιτελεστικότητας. Αυτά είναι η ποσοτικοποίηση του πιθανού κόστους επισκευής, συνήθως εκφρασμένου ως ποσοστό του συνολικού κόστους αντικατάστασης του κτιρίου. Κάποιοι ιδιοκτήτες και ένοικοι έχουν χρησιμοποιήσει αυτούς τους δείκτες για να ποσοτικοποιήσουν την σεισμική απόκριση ενός κτιρίου.

Σε αυτή την μεθοδολογία, η επιτελεστικότητα εκφράζεται ως οι πιθανές ζημιές και οι επιπτώσεις τους που σχετίζονται με σεισμικές δονήσεις και χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μέτρα: Απώλειες, Κόστος επισκευής, Χρόνος επισκευής και χαρακτηρισμός του κτιρίου ως μη ασφαλές. Στις απώλειες εντάσσονται οι θάνατοι ή οι σοβαροί τραυματισμοί για τους οποίους χρειάζεται εισαγωγή σε νοσοκομείο και αφορούν μόνο όσα άτομα βρίσκονται στο εσωτερικό του κτιρίου. Το κόστος επισκευής ορίζεται σε δολάρια τα οποία απαιτούνται για να επανέλθει το κτίριο στην αρχική του κατάσταση. Σε περίπτωση απώλειας του κτιρίου το κόστος επισκευής είναι ίσο με το κόστος αντικατάστασής του με ένα παρόμοιο. Ο χρόνος επισκευής μετράται σε εβδομάδες οι οποίες απαιτούνται για να επισκευαστεί το κτίριο και να βρεθεί στην κατάσταση που ήταν πριν τον σεισμό.

Για πολλούς λόγους δεν είναι δυνατό να προβλέψουμε με ακρίβεια τις σεισμικές δονήσεις, τις επακόλουθες ζημιές και τις επιπτώσεις από αυτές. Για τον λόγο αυτό, η μεθοδολογία αυτή εκφράζει την απόδοση με την μορφή πιθανών επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη τις εγγενείς αβεβαιότητες που υπάρχουν. Αυτή η προσέγγιση έχει πολλά πλεονεκτήματα. Η πιθανή συμπεριφορά σε όρους απωλειών, κόστους επισκευής και

χρόνου επισκευής έχει περισσότερο νόημα για όσους χρειάζεται να λάβουν αποφάσεις και είναι πιο χρήσιμες στην λήψη αποφάσεων σε σύγκριση με τα συνήθη, διακριτά επίπεδα επιτελεστικότητας. Επιπρόσθετα, οι PML, SEL και SUL μπορούν να εξαχθούν άμεσα και αντικειμενικά χρησιμοποιώντας μία πιθανοτική μέθοδο. Τέλος, η αβεβαιότητα στην μέθοδο αυτή είναι ξεκάθαρα εμφανής. Αν χρησιμοποιηθεί σωστά, η αβεβαιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους σχεδιαστές στην επικοινωνία με τους διαχειριστές ενός έργου έτσι ώστε να αποφεύγεται η αίσθηση ότι ο σχεδιασμός εγγυάται 100% την συμπεριφορά της κατασκευής εντός συγκεκριμένων ορίων.

Το επίπεδο των βλαβών που εμφανίζονται σε ένα κτίριο σε έναν σεισμό και οι επιπτώσεις τους εξαρτώνται από έναν αριθμό από παράγοντες. Αυτοί συμπεριλαμβάνουν:

1. Την ένταση της κίνησης του εδάφους και άλλων επιπτώσεων του σεισμού στο κτίριο.
2. Την απόκριση του κτιρίου στην εδαφική κίνηση και την δύναμη, την παραμόρφωση, την επιτάχυνση και την ταχύτητα που αναπτύσσονται στα δομικά και μη δομικά στοιχεία καθώς και τους χρήστες του κτιρίου.
3. Την ευαισθησία των συστατικών, των συστημάτων και των περιεχομένων του κτιρίου.
4. Τον αριθμό των ανθρώπων, το είδος, την τοποθεσία και τον αριθμό των περιεχομένων του κτιρίου την ώρα του σεισμού.
5. Την ερμηνεία των εμφανών βλαβών από τους ελεγκτές που κάνουν την αυτοψία μετά τον σεισμό.
6. Τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τις επισκευές.
7. Την διαθεσιμότητα εργατών και υλικών, την αποτελεσματικότητα των εργαλάβων και την επιθυμία τους για κέρδος σε ένα μετασεισμικό περιβάλλον.

Η παρούσα μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη της κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που σχετίζονται με τις πράξεις των ανθρώπων προκειμένου να προφυλαχτούν από μελλοντικούς σεισμούς. Αυτοί δεν λαμβάνονται υπόψη λόγω της εγγενούς αβεβαιότητάς τους. Οι παράγοντες οι οποίοι δεν λαμβάνονται υπόψη αλλά μπορεί να επηρεάσουν την ένταση των επιπτώσεων ενός σεισμού συμπεριλαμβάνουν:

1. Την ταχύτητα και την ποιότητα με την οποία παρέχεται περίθαλψη στα τραυματισμένα άτομα
2. Την ταχύτητα με την οποία οι ιδιοκτήτες απευθύνονται σε επαγγελματίες και βγάζουν τις άδειες για να ξεκινήσουν οι επισκευές, και
3. Την απόφαση για το αν θα γίνουν επισκευές όσο το κτίριο χρησιμοποιείται ή αν θα εκκενωθεί το κτίριο μέχρι το πέρας των εργασιών.

Κάθε παράγοντας που επηρεάζει την σεισμική επιτελεστικότητα εμπεριέχει σημαντική αβεβαιότητα. Ποιό ρήγμα θα δώσει τον επόμενο σεισμό, σε ποιό σημείο κατά μήκος του ρήγματος θα ξεκινήσει ο σεισμός, η ένταση και το μέγεθος του σεισμού δεν μπορούν να είναι γνωστά με κανένα βαθμό βεβαιότητας. Ως αποτέλεσμα, η ένταση, το φασματικό περιεχόμενο ή η κυματική μορφή κάποιου μελλοντικού σεισμού δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί.

Χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από δομικές αναλύσεις σε συνδυασμό με παρατηρήσεις από την συμπεριφορά παρόμοιων στοιχείων σε εργαστήρια ή σε παλιότερους σεισμούς, είναι δυνατό να προβλέψουμε το επίπεδο των βλαβών στα δομικά και τα μη δομικά στοιχεία μιας κατασκευής. Ωστόσο, τα στοιχεία που εξετάζονται στο εργαστήριο μπορεί να μη είναι ίδια με τα στοιχεία ενός κτιρίου, και οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις που ασκούνται στα στοιχεία στο εργαστήριο μπορεί να μην είναι οι ίδιες με αυτές που προβλέπονται από την ανάλυση ή με αυτές που εμφανίζονται λόγω του σεισμού. Έτσι οι προβλέψεις αυτού του τύπου είναι πιθανό να είναι ανακριβείς.

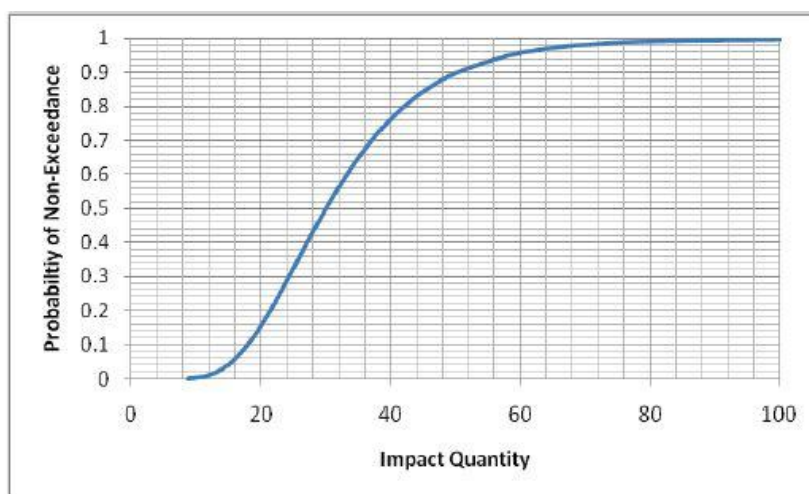
Παρόμοια, δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί ποιά ώρα της μέρας ή ποιά μέρα της εβδομάδας θα συμβεί ένας σεισμός. Ούτε είναι δυνατό να προβλεφθεί ο αριθμός των ατόμων ή τα περιεχόμενα που θα βρίσκονται σε μία κατασκευή όταν συμβεί ένας σεισμός. Ακόμη, αφού προβλεφθούν οι βλάβες, είναι δύσκολο να ξέρουμε με ποιά τεχνική θα γίνουν οι επισκευές ή το πόσο αποτελεσματικές θα είναι.

Λόγω των παραπάνω και άλλων αβεβαιοτήτων δεν είναι δυνατό να εκτιμήσουμε με ακρίβεια την σεισμική επιτελεστικότητα ενός κτιρίου, με όποιο τρόπο και αν μετράται αυτή. Είναι ωστόσο δυνατό να εκφράσουμε τα μέτρα επιτελεστικότητας μέσω συναρτήσεων επιτελεστικότητας (Σχήμα 1.3.). Οι συναρτήσεις επιτελεστικότητας είναι στατιστικές κατανομές που ορίζουν την πιθανότητα μη υπέρβασης μιας τιμής για ένα μέγεθος υπό εξέταση.

Σε αυτή την μεθοδολογία είναι δυνατόν να γίνουν τρεις τύποι εκτίμησης επιτελεστικότητας: βασισμένη στην ένταση, βασισμένη σε σενάρια και βασισμένη στο χρόνο. Οι εκτιμήσεις βασισμένες στην ένταση αξιολογούν την πιθανή συμπεριφορά ενός κτιρίου θεωρώντας πως αυτό υποβάλλεται σε έναν σεισμό με συγκεκριμένη ένταση. Η ένταση αυτή καθορίζεται για ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης με ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης $\zeta = 5\%$. Αυτός ο τρόπος εκτίμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η συμπεριφορά ενός κτιρίου σε μία σεισμική δόνηση σύμφωνη με το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού ή για σεισμικές δομήσεις με διαφορετικό φάσμα επιταχύνσεων.

Οι εκτιμήσεις βασισμένες σε σενάρια, αξιολογούν την πιθανή συμπεριφορά ενός κτιρίου θεωρώντας ότι αυτό υποβάλλεται σε έναν συγκεκριμένο σεισμό με συγκεκριμένο επίκεντρο ως προς την θέση του κτιρίου. Τέτοιου τύπου εκτιμήσεις είναι χρήσιμες για κτίρια που βρίσκονται κοντά σε γνωστά ενεργά ρήγματα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του κτιρίου σε περίπτωση που επαναληφθεί κάποιος παρόμοιος σεισμός.

Οι εκτιμήσεις με βάση τα σενάρια είναι παρόμοιες με τις εκτιμήσεις με βάση την ένταση με την μόνη διαφορά ότι οι πρώτες δεν λαμβάνουν ως δεδομένη την ένταση του σεισμού. Τα αποτελέσματα για εκτιμήσεις με βάση σενάρια είναι συναρτήσεις παρόμοιες με αυτές στο Σχήμα 1.3 με την διαφορά ότι η απόδοση εξαρτάται από την εμφάνιση του συγκεκριμένου σεισμού και όχι από μία συγκεκριμένη ένταση σεισμού.



Σχήμα 1.3: Υποθετική καμπύλη επιτελεστικότητας για κτίριο.

Οι εκτιμήσεις με βάση τον χρόνο αξιολογούν την πιθανή απόκριση του κτιρίου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (π.χ. 50 χρόνια). Λαμβάνει υπόψη όλους τους σεισμούς που μπορεί να συμβούν την συγκεκριμένη χρονική περίοδο καθώς και την πιθανότητα να εμφανιστούν οι σεισμοί αυτοί. Οι εκτιμήσεις αυτές αποδέχονται πως υπάρχει αβεβαιότητα στην ένταση και την θέση μελλοντικών σεισμών καθώς και της προκύπτουσας εδαφικής κίνησης.

Από αυτού του είδους τις εκτιμήσεις προκύπτουν καμπύλες παρόμοιες με αυτές στο Σχήμα 1.3 με την διαφορά ότι ο κατακόρυφος άξονας εκφράζει την πιθανότητα μη υπέρβασης της έντασης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 1 χρόνο). Αφού γίνει ο υπολογισμός της καμπύλης για έναν χρόνο είναι έπειτα εύκολη η μετατροπή της για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα.

1.3 Η μεθοδολογία

Το πρώτο βήμα για την εκτίμηση της επιτελεστικότητας του κτιρίου είναι η δημιουργία του μοντέλου του κτιρίου. Τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο συμπεριλαμβάνουν τον καθορισμό:

1. Των δομικών στοιχείων που μπορεί να εμφανίσουν βλάβες λόγω της δόνησης του κτιρίου. Τα δεδομένα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν πληροφορίες για τον τύπο των βλαβών που μπορεί να εμφανιστούν στα στοιχεία αυτά, οι φορτίσεις που προκαλούν τις βλάβες αυτές και οι επιπτώσεις σε όρους απωλειών, τρόπος επισκευής, κόστους επισκευής και χρόνου επισκευής.
2. Των μη δομικών συστημάτων και στοιχείων που δεν προβάλλουν σημαντική αντίσταση σε βαρυτικά ή σεισμικά φορτία, αλλά μπορεί να εμφανίσουν βλάβες ως αποτέλεσμα της απόκρισης του κτιρίου στο σεισμό. Τα δεδομένα για αυτά τα στοιχεία πρέπει να περιλαμβάνουν πληροφορίες για την θέση τους στο κτίριο, την τρωτότητά του σε διάφορους τύπους βλαβών και τις επιπτώσεις τους σε όρους απωλειών, τρόπος επισκευής, κόστους επισκευής και χρόνου επισκευής.
3. Της χρήσης, συμπεριλαμβανόμενης της κατανομής των χρηστών μέσα στο κτίριο και της διακύμανσης της κατανομής αυτής ατά την διάρκεια της μέρας και του χρόνου.

Τα ευπαθή στοιχεία του κτηρίου κατηγοριοποιούνται σε ομάδες τρωτότητας και ομάδες απόδοσης. Οι ομάδες τρωτότητας είναι σύνολα με παρόμοια συστατικά που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και όρους τρωτότητας και επιπτώσεων. Οι ομάδες απόδοσης είναι υποσύνολα μίας ομάδας τρωτότητας που θα υποβληθούν στην ίδια καταπόνηση λόγω ενός σεισμού.

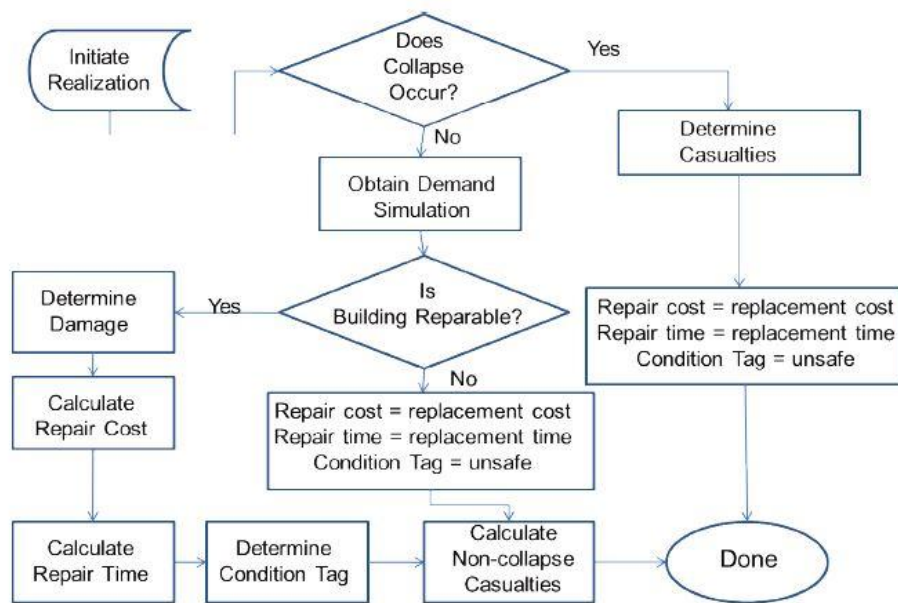
Στην συνέχεια ορίζεται η σεισμική επικινδυνότητα. Τα αποτελέσματα του σεισμού συμπεριλαμβάνουν δόνηση του εδάφους, άνοιγμα ρηγμάτων, ρευστοποίηση του εδάφους, κατολισθήσεις και την δημιουργία παλιρροϊκών κυμάτων. Κάθε ένα από τα παραπάνω μπορεί να συμβεί με διαφορετική δριμύτητα ή ένταση, που κυμαίνονται από ανεπαίσθητο ως εξαιρετικά επιζήμιο. Η σεισμική επικινδυνότητα είναι η ποσοτικοποίηση της έντασης και της πιθανότητας εμφάνισης της για μια συγκεκριμένη. Η παρούσα μεθοδολογία πραγματεύεται τις επιπτώσεις μόνο λόγω εδαφικής κίνησης, ωστόσο μπορεί να επεκταθεί προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη και άλλα παράγωγα της σεισμικής δόνησης.

Έπειτα γίνεται ανάλυση της απόκρισης του κτιρίου. Προκειμένου να προβλεφθεί η απόκριση του κτιρίου σε μία δόνηση γίνεται δομική ανάλυση στο κτίριο αυτό. Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν ποσότητες που συσχετίζονται με βλάβες τόσο στα δομικά όσο και στα μη δομικά στοιχεία του κτιρίου. Αυτές είναι συνήθως μέγιστες τιμές για την ανηγμένη μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση κάθε ορόφου και την εναπομένονσα ανηγμένη μετατόπιση. Είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν άλλες

παράμετροι, όπως η αντοχή κάθε στοιχείου ή η παραμόρφωση, αν το κτίριο περιέχει στοιχεία των οποίων η απόδοση αξιολογείται καλύτερα με την χρήση αυτών των παραμέτρων.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η απόδοση του κτιρίου. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι εγγενείς αβεβαιότητες που επηρεάζουν την συμπεριφορά ενός κτιρίου στο σεισμό, η μεθοδολογία χρησιμοποιεί την μέθοδο Monte Carlo για να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία η απόδοση του κτιρίου υπολογίζεται σε εκατοντάδες ή χιλιάδες προσομοιώσεις. Κάθε προσομοίωση αντιπροσωπεύει ένα πιθανό αποτέλεσμα για την απόδοση του κτιρίου, θεωρώντας έναν συγκεκριμένο συνδυασμό δυνατών τιμών για κάθε ποσότητα που είναι αβέβαιη.

Για εκτιμήσεις με βάση την ένταση ή με βάση σενάρια, ο υπολογισμός της απόδοσης είναι σχεδόν πανομοιότυπος. Για κάθε τύπο εκτίμησης, οι πιθανές επιπτώσεις στην απόδοση του κτιρίου (απώλειες, κόστος επισκευών, χρόνος επισκευών) υπολογίζονται πολλές φορές λόγω της αβεβαιότητας του προκύπτοντος αποτελέσματος. Κάθε επανάληψη ορίζεται ως προσομοίωση και αντιπροσωπεύει ένα πιθανό αποτέλεσμα της εκτίμησης για μια συγκεκριμένη ένταση σεισμού ή έναν συγκεκριμένο σεισμό. Στο Σχήμα 1.4. παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής για την διαδικασία εκτίμησης του αποτελέσματος κάθε προσομοίωσης.



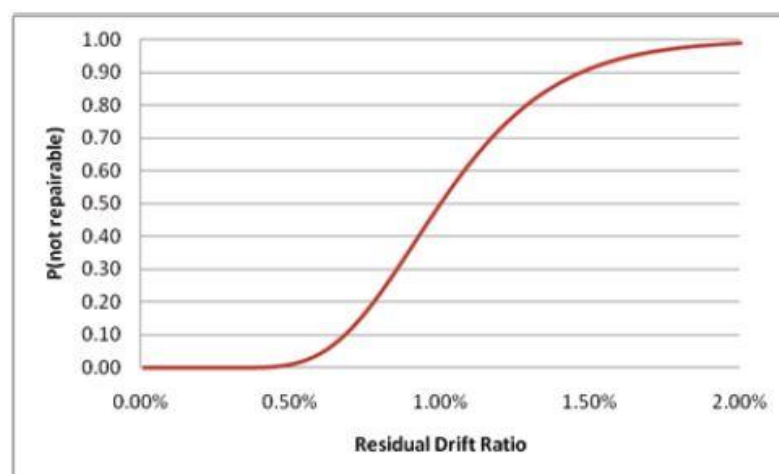
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα ροής για την εκτίμηση κάθε αποτελέσματος για κάθε προσομοίωση.

Η παραπάνω διαδικασία γίνεται σε 7 βήματα:

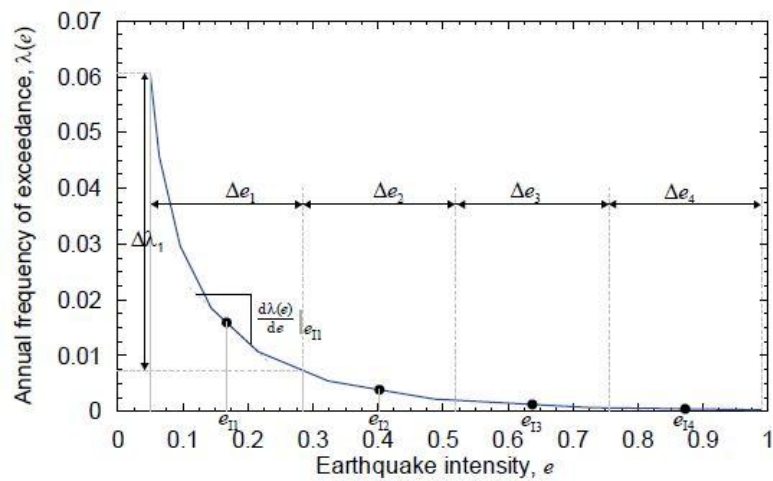
1. Καθορίζεται το πόσες προσομοιώσεις θα γίνουν.
2. Καθορίζεται αν θα συμβεί κατάρρευση. Αν τελικά συμβεί κατάρρευση, το κτίριο θεωρείται μη επισκευάσιμο και το κόστος επισκευής και ο χρόνος επισκευής παίρνουν τις τιμές που σχετίζονται με την αντικατάσταση του κτιρίου.
3. Καθορίζονται οι απώλειες λόγω κατάρρευσης. Για να υπολογιστούν οι απώλειες είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν πρώτα η ώρα της μέρας και η μέρα του μήνα. Η μεθοδολογία αυτή δεν προβλέπει απώλειες που θα μπορούσαν να συμβούν εκτός του κτιρίου ως αποτέλεσμα της πτώσεως μπάζων στα διπλανά οικοπέδα.
4. Καθορίζονται οι τιμές των απαιτήσεων σχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει αν το κτίριο δεν καταρρεύσει σε κάποια προσομοίωση.
5. Καθορισμός του αν το κτίριο είναι επισκευάσιμο. Κάθε προσομοίωση συμπεριλαμβάνει μία εκτίμηση του λόγου εναπομένουσας μετατόπισης. Σε συνδυασμό με μια συνάρτηση τρωτότητας επισκευών προσδιορίζεται αν είναι πρακτικό να το γίνει επισκευή του κτιρίου. Η συνάρτηση τρωτότητας επισκευών είναι μια αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας λογαριθμοκανονικής κατανομής. Στο Σχήμα 1.5. παρουσιάζεται μία τυπική συνάρτηση τρωτότητας επισκευών.
6. Καθορισμός των βλαβών. Αν σε μία προσομοίωση το κτίριο δεν έχει καταρρεύσει και θεωρείται και επισκευάσιμο, τότε καθορίζονται οι βλάβες για κάθε στοιχείο του.
7. Καθορισμός των επιπτώσεων. Στον υπολογισμό αυτό λαμβάνεται υπόψη ο όγκος των επισκευών που πρέπει να γίνουν καθώς και οι αβεβαιότητες για τον τρόπο επισκευής, της αποτελεσματικότητας του εργολάβου και τις τιμές.

Για εκτιμήσεις με βάση τον χρόνο, χρησιμοποιείται μια πιο σύνθετη διαδικασία. Υπολογίζεται η πιθανή απόδοση του κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές εντάσεις σεισμών που μπορεί να λάβουν χώρα κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Τα αποτελέσματα σταθμίζονται για κάθε ένταση με την πιθανότητα να εμφανιστεί η ένταση αυτή.

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός αυτός είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για την τοποθεσία του κτιρίου. Στο Σχήμα 1.6. παρουσιάζεται μια τέτοια καμπύλη δείχνοντας την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της έντασης εδαφικής κίνησης e .

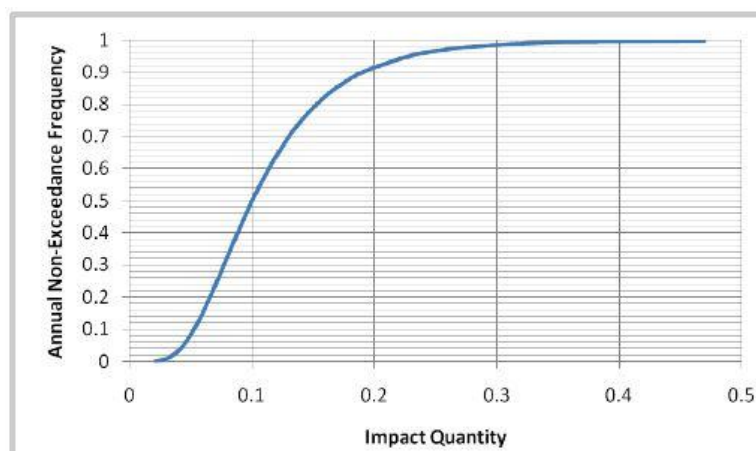


Σχήμα 1.5: Διάγραμμα συνάρτησης τρωτότητας επισκευών



Σχήμα 1.6: Καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.

Η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας χωρίζεται σε διαστήματα Δe . Η ετήσια πιθανότητα να συμβεί μια εδαφική κίνηση με ένταση η οποία συμπεριλαμβάνεται σε ένα διάστημα είναι ίση με την διαφορά ανάμεσα στις πιθανότητες υπέρβασης στα άκρα του διαστήματος. Τα αποτελέσματα στην συνέχεια σταθμίζονται με την ετήσια πιθανότητα εμφάνισης στο μέσο του διαστήματος. Τα αποτελέσματα από αυτές τις εκτιμήσεις προστίθενται για όλα τα διαστήματα και προκύπτει μια καμπύλη επιτελεστικότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Καμπύλη συνάρτησης επιτελεστικότητας που βασίζεται στον χρόνο για ένα υποθετικό κτίριο.

2 Ανάλυση της Κατασκευής

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσομοίωση και η ανάλυση ενός επταώροφου μεταλλικού κτιρίου γραφείων με ασύμμετρη κάτοψη. Η προσομοίωση και η ανάλυση έγινε με την βοήθεια των λογισμικών SAP2000 και Seismosignal. Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή και αιτιολόγηση των επιλογών που έγιναν κατά την διαδικασία του τυπικού σχεδιασμού της κατασκευής.

Έπειτα περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν ένα προς ένα για την κατάλληλη στάθμιση των σεισμικών δονήσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζεται πως έγινε η προσομοίωση του κτιρίου και ποιες επιλογές έγιναν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης και της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης.

2.2 Ο τυπικός σχεδιασμός του κτιρίου

Ο σχεδιασμός του κτιρίου με τις τυπικές μεθόδους σχεδιασμού όπως αυτές περιγράφονται στους ισχύοντες κανονισμούς δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής της εργασίας. Ωστόσο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού του κτιρίου προκειμένου ο αναγνώστης της παρούσας εργασίας να έχει μια καλύτερη εικόνα για την μορφή του φέροντος οργανισμού του κτιρίου και τους βασικούς λόγους που επιλέχθηκε η μορφή αυτή.

Το κτίριο έχει ασύμμετρη κάτοψη. Το κάτω αριστερά μέρος της κάτοψής του είναι σχεδόν ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με τις μακριές του πλευρές παράλληλες στον οριζόντιο άξονα. Το πάνω αριστερό μέρος είναι μια πολυγωνική εξοχή με σύνθετο σχετικά σχήμα. Το δεξιό κομμάτι της κάτοψης είναι περίπου ένα ισοσκελές τρίγωνο. Η μη κανονικότητα της κάτοψης δημιουργεί διάφορα προβλήματα κατά την διαδικασία του σχεδιασμού του κτιρίου διότι καθιστά σχεδόν υποχρεωτική τη χρήση τρισδιάστατων μοντέλων για την ανάλυση.

Για τα κτίρια με συμμετρική κάτοψη η συμπεριφορά ανά διεύθυνση X και Y μπορεί να θεωρηθεί ασύζευκτη. Έτσι είναι δυνατό να γίνουν αναλύσεις σε επίπεδα πλαίσια, ξεχωριστά για κάθε διεύθυνση, και τα τελικά αποτελέσματα να έχουν αρκετά καλή ακρίβεια ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό. Σε μια ασύμμετρη κατασκευή ωστόσο οι εκκεντρότητες είναι έντονες και οι κινήσεις του κτιρίου γύρω από τον άξονά του κυρίως όταν αυτό υποβάλλεται σε δυναμικές φορτίσεις καθιστούν τις τρισδιάστατες αναλύσεις υποχρεωτικές. Το πρόβλημα είναι εξίσου έντονο και στις μη γραμμικές αναλύσεις διότι οι παραμορφώσεις είναι πολύ πιο μεγάλες σε σχέση με τις γραμμικές. Έτσι η συνεισφορά της εκτός επιπέδου παραμόρφωσης είναι πολύ μεγάλη στο τελικό αποτέλεσμα και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Για τον λόγο αυτό τόσο η στατική όσο και η δυναμική ανάλυση του κτιρίου έγινε με την χρήση τρισδιάστατων προσομοιωμάτων και με την βοήθεια του λογισμικού STAAD.

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου χωρίζεται σε δύο βασικές ομάδες. Η μία είναι τα στοιχεία που φέρουν μόνο τα κατακόρυφα φορτία και η άλλη είναι τα στοιχεία που φέρουν τα οριζόντια φορτία (κυρίως σεισμικά φορτία και φορτία ανέμου). Το σύστημα ανάλυσης κατακόρυφων φορτίων αποτελείται από υποστυλώματα διατομής HE450B, κύριες δοκούς

διατομής HE550B και δευτερεύουσες δοκούς διατομής IPE180. Οι κύριες δοκοί είναι αρθρωμένες στα υποστυλώματα, ενώ οι δευτερεύουσες εδράζονται πάνω στις κύριες. Οι πλάκες της οροφής κάθε ορόφου είναι σύμμικτες με χαλυβδόφυλλο στην κάτω πλευρά τους και οπλισμένες με πλέγμα T141 στην πάνω. Οι δευτερεύουσες δοκοί φέρουν διατμητικούς ήλους.

Το σύστημα ανάλιψης κατακόρυφων φορτίων αποτελείται από πλαίσια ανάλιψης ροπής και από πλαίσια με χιαστί συνδέσμους. Τα πλαίσια με χιαστί συνδέσμους είναι αυτά τα οποία προσφέρουν την μέγιστη δυσκαμψία, ωστόσο δεν ήταν δυνατή η χρήση τους σε όλα τα ανοίγματα για αρχιτεκτονικούς λόγους. Τόσο στην πρόσοψη όσο και στην πίσω όψη υπάρχουν μεγάλα ανοίγματα που οδηγούν σε εξώστες με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η τοποθέτηση χιαστί συνδέσμων σε αυτές τις περιοχές. Προκειμένου να παραμείνουν τα ανοίγματα αυτά κενά, προτιμήθηκε η χρήση πλαισίων ανάλιψης ροπής σε αυτά. Τα υποστυλώματα όλων των πλαισίων είναι διατομής HE450B. Οι δοκοί των πλαισίων ανάλιψης ροπής είναι διατομής HE320B. Οι δοκοί των πλαισίων με χιαστί συνδέσμους είναι διατομής HE260B και οι χιαστί σύνδεσμοι είναι διατομής SHS 100x100x8. Οι διατομές των διαφόρων δομικών στοιχείων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.1. Το αρχιτεκτονικό σχέδιο καθώς και το σχέδιο ξυλότυπου για τον τυπικό όροφο παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 2.1: Οι διατομές των στοιχείων ανάλιψης οριζόντιων και κατακόρυφων φορτίων.

Στοιχείο	Διατομή
Υποστυλώματα ανάλιψης κατακόρυφων φορτίων	HE450B
Δοκοί συστήματος ανάλιψης κατακόρυφων φορτίων	HE550B
Δευτερεύουσες δοκοί	IPE180
Υποστυλώματα πλαισίων ροπής	HE450B
Δοκοί πλαισίων ροπής	HE320B
Υποστυλώματα πλαισίων με χιαστί συνδέσμους	HE450B
Δοκοί πλαισίων με χιαστί συνδέσμους	HE260B
Χιαστί σύνδεσμοι	SHS 100x100x8

2.3 Η επεξεργασία των σεισμικών δονήσεων

Κατά την ανελαστική δυναμική ανάλυση που έγινε στο κτίριο, η κίνηση του εδάφους προσομοιώθηκε μέσω των επιταχυνσιογραφημάτων της κάθε σεισμικής δόνησης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε δόνηση μεγεθύνθηκε κατάλληλα, προκειμένου η φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1)$, για ιδιοπερίοδο T_1 ίση με την πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής, να είναι η ίδια για όλες τις σεισμικές δονήσεις. Αυτό έγινε προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα από κάθε σεισμική δόνηση. Επιλέχθηκαν δύο τιμές φασματικής επιτάχυνσης: $S_{a1}(T_1) = 0,6g$ και $S_{a2}(T_1) = 1,2g$. Οι τιμές αυτές καλύπτουν το μεγαλύτερο εύρος επιταχύνσεων που μπορεί να εμφανιστούν σε μία πολυώροφη μεταλλική κατασκευή στην πράξη.

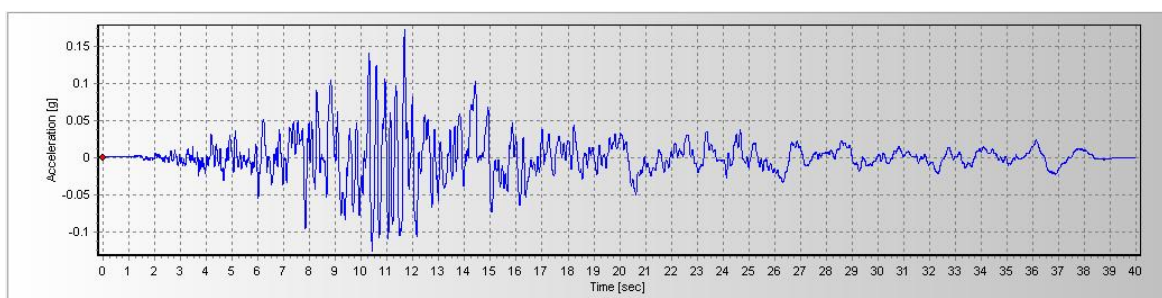
Κάθε σεισμική δόνηση περιγράφεται από δύο επιταχυνσιογραφήματα. Κάθε ένα από αυτά αφορά μία από δύο συνολικά διευθύνσεις (διεύθυνση 1 και διεύθυνση 2) κάθετες μεταξύ τους. Προκειμένου η φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1)$ να είναι ίδια για όλες τις

σεισμικές δονήσεις, τα επιταχυνσιογραφήματα κάθε δόνησης πολλαπλασιάζονται με έναν κατάλληλο συντελεστή f . Για κάθε επιταχυνσιογράφημα που αφορά την διεύθυνση 1 ο συντελεστής f υπολογίζεται ως $f_1=0,6/S_a(T_1)$ και $f_2=1,2/S_a(T_1)$ για φασματική επιτάχυνση 0,6g και 1,2g αντίστοιχα και χρησιμοποιείται και για τις δύο διευθύνσεις. Αυτό γίνεται προκειμένου η εδαφική κίνηση να παραμένει η ίδια με την αρχική όταν γίνει ο συνδυασμός των δύο επιταχυνσιογραφημάτων. Αν χρησιμοποιούνταν διαφορετικός συντελεστής για κάθε διεύθυνση, τότε από τον συνδυασμό των δύο επιταχυνσιογραφημάτων θα προέκυπτε εδαφική κίνηση διαφορετική από την αρχική

Η μεγέθυνση των επιταχυνσιογραφημάτων έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Seismosignal. Αρχικά, εισήχθησαν τα σειсмоγραφήματα στο λογισμικό (Σχήμα 2.1.). Έπειτα, για τα σειсмоγραφήματα της διεύθυνσης 1, εξήχθησαν φάσματα επιτάχυνσης για ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης $\zeta=4\%$ ¹ (Σχήμα 2.2.). Από τα φάσματα αυτά υπολογίστηκαν οι συντελεστές f_1 και f_2 (Πίνακας 2.2.). Με τους συντελεστές αυτούς πολλαπλασιάστηκαν τα επιταχυνσιογραφήματα κάθε δόνησης και το τελικό αποτέλεσμα είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά την μη γραμμική δυναμική ανάλυση.

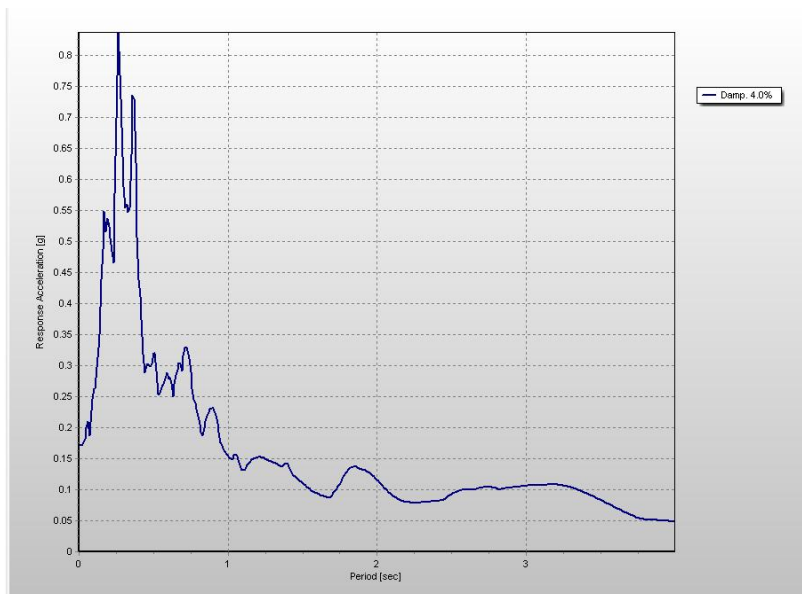
Πίνακας 2.2: Δομικά συστήματα και στοιχεία για τα οποία παρέχονται δεδομένα τρωτότητας.

Κωδικός σεισμικής δόνησης	AGW	AND	B-BRA	B-ICC	CEN	CLD	CNP	FAR	HDA	HVR
f_1	3.36	2.81	32.43	2.27	30.61	6.67	7.79	38.96	1.78	6.94
f_2	6.72	5.61	64.86	4.55	61.22	13.33	15.58	77.92	3.57	13.89



Σχήμα 2.1: Σειсмоγράφημα πραγματικής σεισμικής δόνησης

¹ Η τιμή του ποσοστού κρίσιμης απόσβεσης είναι η προτεινόμενη από τον ΕΑΚ2000 για μεταλλικά κτίρια με κοχλιώσεις.

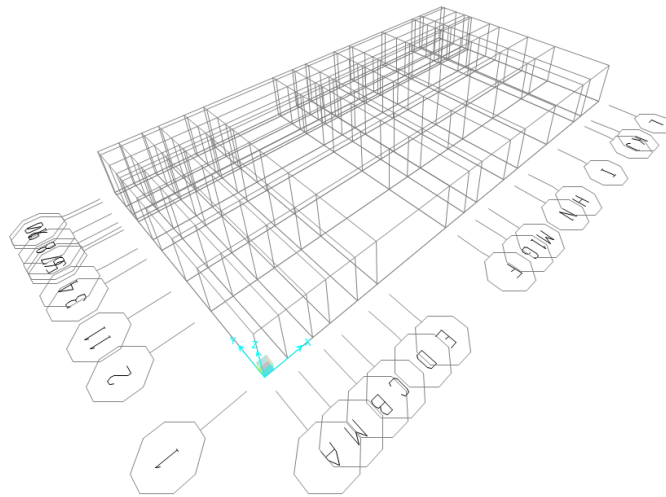


Σχήμα 2.2: Φάσμα επιταχύνσεων ενός σειсмоγραφήματος για τιμή ποσοστού κρίσιμης απόσβεσης $\zeta = 4\%$

2.4 Η προσομοίωση

Η προσομοίωση και η ανάλυση της κατασκευής έγινε με την βοήθεια του λογισμικού SAP2000. Προσομοιώθηκαν μόνο τα στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα ανάληψης οριζόντιων φορτίων καθώς οι φορτίσεις που ασκούνται στην κατασκευή για τις αναλύσεις που γίνονται για αυτή την εργασία καταπονούν την κατασκευή μόνο με οριζόντια φορτία. Τα στοιχεία του συστήματος ανάληψης κατακόρυφων φορτίων προσομοιώθηκαν μέσω ενός υποστυλώματος από χάλυβα, ορθογωνικής διατομής με αδρανειακά χαρακτηριστικά ίσα με το άθροισμα των αδρανειακών χαρακτηριστικών όλων των υποστυλωμάτων του συστήματος ανάληψης κατακόρυφων φορτίων. Το υποστυλόμετρο αυτό τοποθετήθηκε στο κέντρο μάζας της κατασκευής.

Αρχικά ορίστηκε τρισδιάστατος κάρναβος αξόνων με ακρίβεια εκατοστού (Σχήμα 2.3.). Στην συνέχεια ορίστηκε το υλικό των δομικών στοιχείων. Στο στάδιο αυτό ορίζονται όλες οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού/υλικών των στοιχείων κατασκευής (Σχήμα 2.4.). Το λογισμικό διαθέτει έτοιμες βιβλιοθήκες με τυποποιημένους χάλυβες τόσο για την Αμερική όσο και για την Ευρώπη. Ο χάλυβας των στοιχείων της κατασκευής είναι S275 με μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa και λόγο Poisson $\nu=0,3$. Έπειτα ορίζονται οι διατομές των μελών του προσομοιώματος (Σχήμα 2.5.). Υπάρχουν διαθέσιμες βιβλιοθήκες με τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά τυποποιημένων διατομών για την Αμερική την Ευρώπη και το Ηνωμένο Βασίλειο. Οι γεωμετρικές ιδιότητες των διατομών καθορίζονται με ακρίβεια χιλιοστού. Στο στάδιο αυτό ορίστηκε και μία μη τυποποιημένη διατομή με σκοπό να προσομοιωθούν τα στοιχεία ανάληψης κατακόρυφων φορτίων. Ως υλικό για τα στοιχεία με αυτές τις διατομές επιλέχθηκε ο χάλυβας S275 του οποίου οι ιδιότητες καθορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα.



Σχήμα 2.3: Κάναβος σε 3 διαστάσεις για τον καθορισμό της γεωμετρίας των στοιχείων του προσομοιώματος.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: S275 ■

Material Type: Steel

Material Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.697E-08

Mass per Unit Volume: 7.849E-12

Units: KN, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 210

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 80.7692

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 0.275

Minimum Tensile Stress, Fu: 0.43

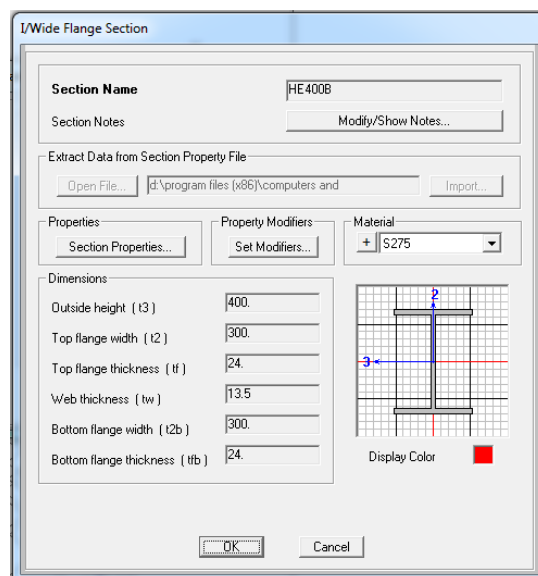
Effective Yield Stress, Fye: 0.3025

Effective Tensile Stress, Fue: 0.473

☐ Switch To Advanced Property Display

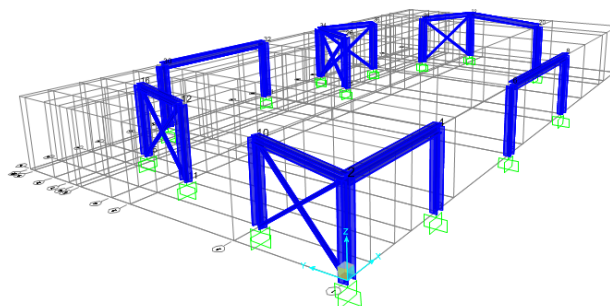
OK Cancel

Σχήμα 2.4: Το μενού επιλογής και καθορισμού μηχανικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών.

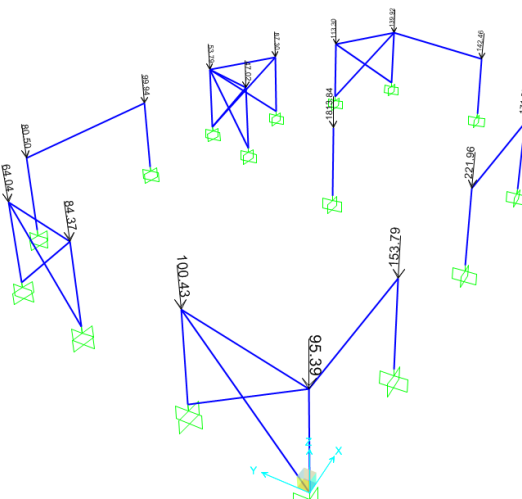


Σχήμα 2.5: Το μενού επιλογής και καθορισμού γεωμετρικών ιδιοτήτων των διατομών των στοιχείων.

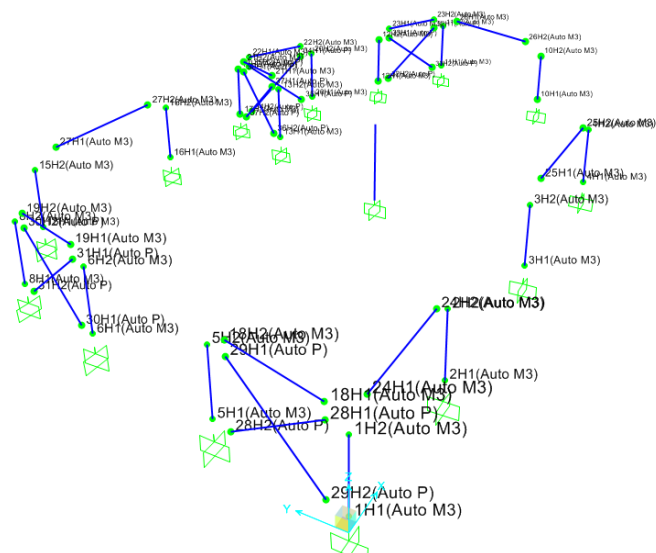
Στην συνέχεια ορίστηκε η γεωμετρία του φορέα για τον πρώτο όροφο με την βοήθεια του καννάβου που έχει ήδη σχεδιαστεί (Σχήμα 2.6.). Έπειτα συνδέθηκαν μεταξύ τους οι κόμβοι της στάθμης του πρώτου ορόφου με ένα διάφραγμα προκειμένου να προσομοιωθεί η διαφραγματική λειτουργία που προσφέρει η σύμμικτη πλάκα. Αμέσως μετά προσδιορίστηκαν τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή λόγω μόνιμων και κινητών φορτίων. Τα φορτία αυτά εφαρμόστηκαν ως συγκεντρωμένα φορτία σε κάθε κόμβο ξεχωριστά (Σχήμα 2.7.). Έπειτα προσδιορίστηκαν οι θέσεις στις οποίες είναι πιθανό να εμφανιστούν πλαστικές αρθρώσεις όταν το κτίριο περάσει σε ανελαστική συμπεριφορά (Σχήμα 2.8.). Τα δεδομένα για την συμπεριφορά των πλαστικών αρθρώσεων ανά στοιχείο είναι αυτά που περιγράφονται στην FEMA 356 (2000). Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τους υπόλοιπους έξι ορόφους του κτιρίου και έτσι προέκυψε το τελικό μοντέλο της κατασκευής (Σχήμα 2.9.).



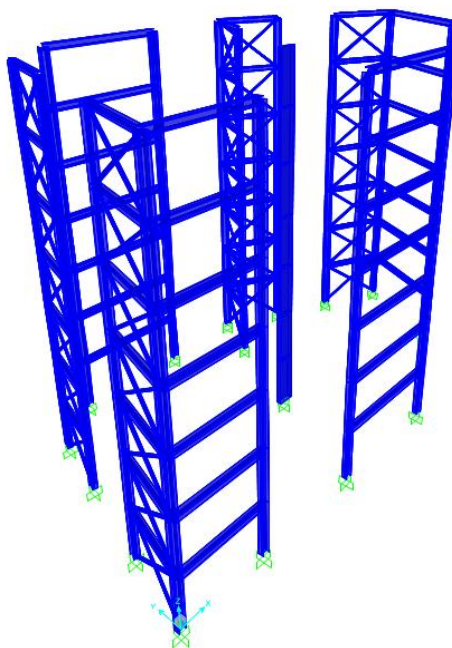
Σχήμα 2.6: Το μονώροφο προσομοίωμα των πλαισίων ανάληψης οριζοντίων δυνάμεων του κτιρίου.



Σχήμα 2.7: Τα επιβαλλόμενα ανά κόμβο μόνιμα φορτία.



Σχήμα 2.8: Οι περιοχές στις οποίες μπορεί να δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις κατά την ανελαστική ανάλυση του κτιρίου.

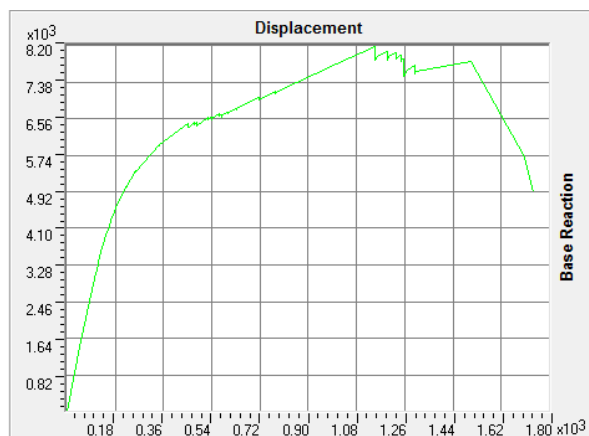


Σχήμα 2.9: Το τελικό επτάώροφο προσομοίωμα του κτιρίου

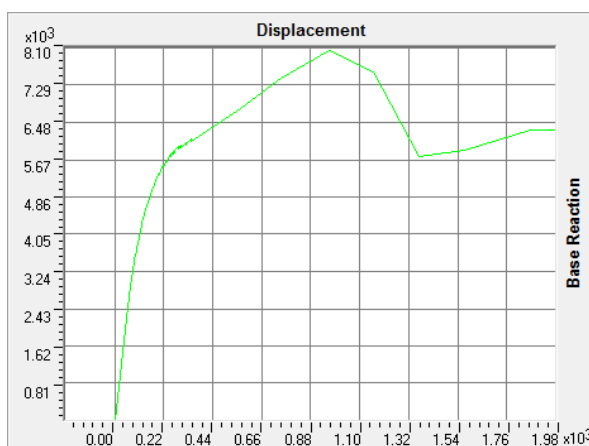
2.5 Η ανάλυση

Μετά το πέρας της προσομοίωσης ακολούθησε η ανάλυση της κατασκευής. Στην κατασκευή έγινε ανελαστική στατική ανάλυση και ελαστική στατική ανάλυση. Η ανελαστική στατική ανάλυση έγινε με φορτίο επιβεβλημένης μετατόπισης κατανεμημένης καθ' ύψος σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή για κάθε κατεύθυνση. Το φορτίο επιβλήθηκε στο υποστύλωμα που τοποθετήθηκε στο κέντρο μάζας του κτιρίου.

Η μέγιστη επιβεβλημένη μετατόπιση ορίστηκε στα 2m. Ο υπολογισμός της απόκρισης της κατασκευής έγινε με συνδυασμό των επαναληπτικών μεθόδων Newton-Raphson και Line-Search. Ο ελάχιστος αριθμός βημάτων ορίστηκε στα 10, ο μέγιστος αριθμός βημάτων στα 100, ο μέγιστος αριθμός μηδενικών βημάτων στα 100, και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ανά βήμα στις 50. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονταν ανά βήμα και στο τέλος της ανάλυσης προέκυψαν καμπύλες μετατόπισης - αντίδρασης (Σχήμα 2.10., Σχήμα 2.11.). Από τις καμπύλες αυτές φαίνεται ότι η ελαστική μετατόπιση του κτιρίου είναι της τάξης μεγέθους των 20cm και για τις δύο διευθύνσεις. Η μετατόπιση κατάρρευσης είναι της τάξης του 1m (~5%) και για τις δύο διευθύνσεις και εμφανίζεται για τέμνουσα $V=8.000$ KN περίπου και για τις δύο διευθύνσεις.

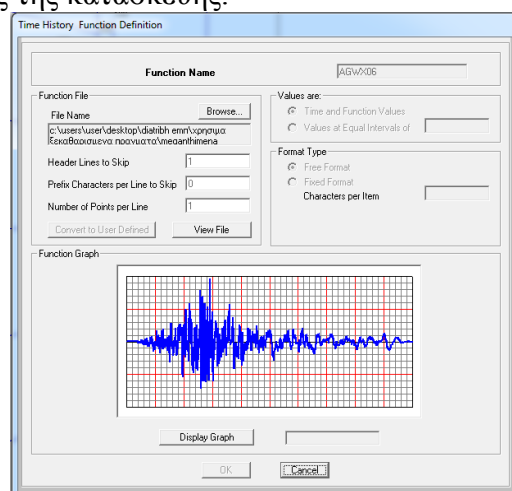


Σχήμα 2.10: Η καμπύλη της υπερωθητικής ανάλυσης για την διεύθυνση 1.



Σχήμα 2.11: Η καμπύλη της υπερωθητικής ανάλυσης για την διεύθυνση 2.

Για να γίνει η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρειάστηκε να οριστούν τα επιταχυνσιογραφήματα, καταλλήλως μεγεθυμένα. Αυτό έγινε μέσω συναρτήσεων χρονοϊστορίας (Σχήμα 2.12.). Από την ανάλυση αυτή εξήχθησαν αποτελέσματα για την απόλυτη μέγιστη μετατόπιση και την απόλυτη μέγιστη επιτάχυνση, ανά κατεύθυνση, κάθε επιπέδου στο κέντρο μάζας της κατασκευής.



Σχήμα 2.12: Το μενού καθορισμού συναρτήσεων χρονοϊστορίας

3 Εκτίμηση Σεισμικής Επιτελεστικότητας

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία έγινε η εκτίμηση της σεισμικής επιτελεστικότητας του κτιρίου. Η διαδικασία έγινε με την βοήθεια του λογισμικού PACT (*Performance Assessment Calculation Tool*). Η εκτίμηση της επιτελεστικότητας του κτιρίου είναι δυνατό να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Μπορεί να γίνει βασισμένη στην ένταση των φορτίων, βασισμένη σε σενάρια με πραγματικές σεισμικές δονήσεις είτε βασισμένη στην συμπεριφορά του κτιρίου σε βάθος χρόνου.

Η εκτίμηση που βασίζεται στην ένταση των φορτίων αξιολογεί την συμπεριφορά του κτιρίου όταν αυτό υποβάλλεται σε μία σεισμική δόνηση με συγκεκριμένη ένταση. Η ένταση αυτή ορίζεται από ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης για κρίσιμο ποσοστό απόσβεσης $\zeta=5\%$. Αυτός ο τρόπος αξιολόγησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η απόκριση ενός κτιρίου σε μία δόνηση συνεπή με τα φάσματα σχεδιασμού του κανονισμού ή με κάποιο άλλο φάσμα.

Η εκτίμηση με βάση διάφορες σεισμικές δονήσεις εκτιμά την απόκριση του κτιρίου θεωρώντας ότι αυτό υπόκειται σε κάποιο συγκεκριμένο σεισμό, ορισμένης έντασης, που συμβαίνει σε μία τοποθεσία ορισμένη ως προς την θέση της κατασκευής. Αυτός ο τύπος εκτίμησης είναι χρήσιμος για κατασκευές που βρίσκονται κοντά σε γνωστά ρήγματα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να εκτιμηθεί η επιτελεστικότητα του κτιρίου σε περίπτωση που γίνει ένας παρόμοιος σεισμός.

Η εκτίμηση με βάση τον χρόνο, αξιολογεί την πιθανή συμπεριφορά του κτιρίου κατά την διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (π.χ. 50 χρόνια) λαμβάνοντας υπόψη όλους τους σεισμούς που μπορεί να γίνουν στην χρονική περίοδο αυτή καθώς και την πιθανότητα να συμβούν οι σεισμοί αυτοί. Οι εκτιμήσεις αυτού του τύπου λαμβάνουν υπόψη τους την αβεβαιότητα που υπάρχει για το μέγεθος και το επίκεντρο μελλοντικών σεισμών. Στην εργασία αυτή γίνεται εκτίμηση της επιτελεστικότητας του κτιρίου με βάση πραγματικές σεισμικές δονήσεις και με βάση τον χρόνο.

Προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα, εισάγονται στο λογισμικό δεδομένα για τα δομικά και μη δομικά στοιχεία της κατασκευής, αποτελέσματα της ανάλυσης αναφορικά με την μέγιστη απόλυτη ανηγμένη μετατόπιση ορόφου και την μέγιστη απόλυτη επιτάχυνση και για την καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για την περιοχή. Το λογισμικό κάνει ένα πλήθος προσομοιώσεων με τον μέθοδο Monte Carlo και τελικά προκύπτουν αποτελέσματα για τέσσερεις κατηγορίες: απώλειες ζωών, τραυματισμοί, κόστος επισκευής και χρόνος επισκευής.

3.2 Τα στοιχεία της κατασκευής

Προκειμένου να εκτιμηθεί το κόστος αλλά και ο χρόνος επισκευής του κτιρίου σε έναν υποτιθέμενο σεισμό χρειάζεται να γίνει μία καταγραφή της βασικής μορφολογίας του κτιρίου αλλά και των στοιχείων που το αποτελούν. Τα στοιχεία αυτά είναι δομικά και μη δομικά. Δεν γίνεται καταγραφή όλων των στοιχείων της κατασκευής. Αυτά που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση είναι αυτά που μπορεί να εμφανίσουν βλάβες λόγω ενός σεισμού.

Αρχικά συμπληρώνονται κάποια βασικά στοιχεία για την γεωμετρία και το κόστος αντικατάστασης του κτιρίου (Σχήμα 3.1.). Καθορίζεται το μεικτό εμβαδόν και το ύψος κάθε ορόφου. Ορίζεται για κάθε όροφο επίσης ένας συντελεστής ύψους, ένας συντελεστής επικινδυνότητας υλικών και ένας συντελεστής χρήσης. Ο συντελεστής ύψους χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τυχόν δυσκολίες στην επισκευή βλαβών σε έναν όροφο λόγω της απόστασης που έχει από την στάθμη του εδάφους (π.χ. μπορεί να χρειάζονται μεγαλύτεροι γερανοί για να ανυψωθούν υλικά στον 7ο όροφο από ότι στον 2ο). Ο συντελεστής επικινδυνότητας υλικών λαμβάνει υπόψη του την ύπαρξη υλικών όπως ισχυρά χημικά, ραδιενεργά απόβλητα κ.α. των οποίων η διαρροή σε περίπτωση σεισμού μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις. Ο συντελεστής χρήσης χρησιμοποιείται προκειμένου να ληφθούν υπόψη τυχόν διαφορές στον μέσο αριθμό χρηστών ανά όροφο (για παράδειγμα ένας όροφος μπορεί να μην χρησιμοποιείται καθόλου).

Για την κατασκευή υπό ανάλυση, το ύψος κάθε ορόφου ορίστηκε στα 3m και το μεικτό εμβαδό στα 410,51m². Ο συντελεστής ύψους για τους πρώτους τέσσερις ορόφους ορίστηκε ίσος με 1, ενός για τους υπόλοιπους τρεις και την οροφή του κτιρίου ίσος με 1,08. Δεδομένου ότι στο κτίριο δεν χρησιμοποιούνται ούτε αποθηκεύονται επικίνδυνα υλικά, ο συντελεστής επικινδυνότητας υλικών είναι ίσος με 1 για όλες τις στάθμες της κατασκευής. Η χρήση του κτιρίου θεωρείται πως είναι η ίδια για όλους τους ορόφους, και πως χρησιμοποιείται όλη η επιφάνεια του ορόφου. Έτσι ο συντελεστής χρήσης είναι ίσος με 1 για όλες τις στάθμες του κτιρίου.

Στο στάδιο αυτό καθορίζεται επίσης ο μέγιστος αριθμός εργατών ανά τετραγωνικό μέτρο και ο συνολικός χρόνος αντικατάστασης του κτιρίου. Ο χρόνος αυτός περιλαμβάνει τον χρόνο που χρειάζεται για να κατεδαφιστεί το υπάρχον κτίριο, να απομακρυνθούν τα μπάζα και να χτιστεί το νέο κτίριο. Τέλος καθορίζονται το κόστος της αντικατάστασης του πυρήνα και του κελύφους του κτιρίου, το συνολικό κόστος αντικατάστασης του κτηρίου και το κόστος επισκευών πέρα από το οποίο θα προτιμηθεί να γίνει αντικατάσταση αντί για επισκευή. Στο κόστος αντικατάστασης του πυρήνα συμπεριλαμβάνεται το κόστος κατεδάφισης του υπάρχοντος και της απομάκρυνσης των μπάζων. Το συνολικό κόστος αντικατάστασης του κτιρίου υπολογίζεται ως το κόστος αντικατάστασης του πυρήνα συν την αξία του εξοπλισμού των γραφείων (H/Y, γραφεία, βιβλιοθήκες κ.α.). Το όριο κόστους επισκευής ορίζεται ως ποσοστό του συνολικού κόστους αντικατάστασης.

Το κόστος αντικατάστασης του πυρήνα του κτιρίου θεωρήθηκε προσεγγιστικά ίσο με 1000\$/m² ενώ το κόστος εξοπλισμού των γραφείων έγινε μια εκτίμηση (Πίνακας 3.1.). Το συνολικό κόστος της κατασκευής προέκυψε ίσο με 5,000,000\$. Επίσης θεωρήθηκε ότι προτιμάται να γίνει αντικατάσταση αντί για επισκευή του κτιρίου όταν το κόστος επισκευής ξεπεράσει το 90% του κόστους αντικατάστασης.

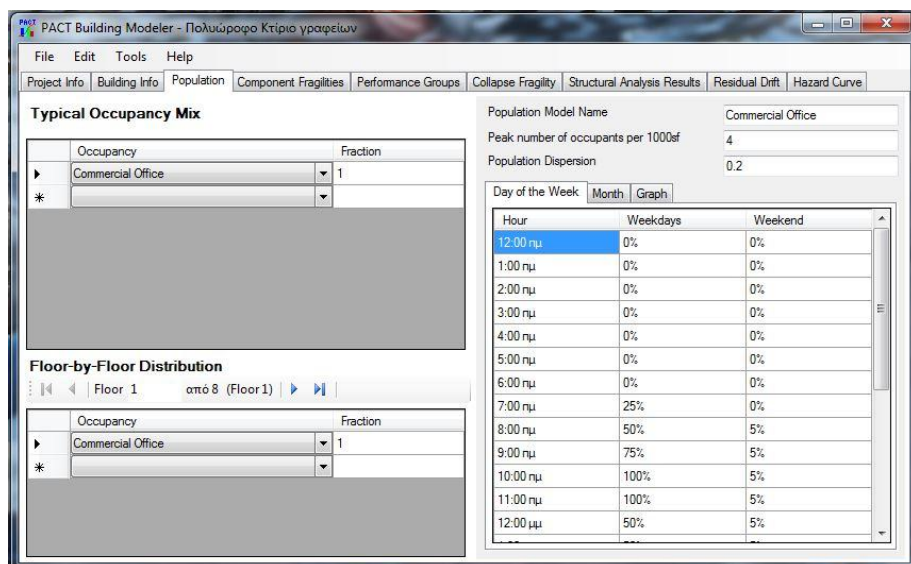
Floor Num	Floor Name	Story Height (m.)	Area (sq. m.)	Height Factor	Hazmat Factor	Occupancy Factor
1	Floor 1	3.00	410.51	1	1	1
2	Floor 2	3.00	410.51	1	1	1
3	Floor 3	3.00	410.51	1	1	1
4	Floor 4	3.00	410.51	1	1	1
5	Floor 5	3.00	410.51	1.08	1	1
6	Floor 6	3.00	410.51	1.08	1	1
7	Floor 7	3.00	410.51	1.08	1	1
8	Floor 2		410.51	1.08	1	1

Σχήμα 3.1: Το μενού καθορισμού των πληροφοριών του κτιρίου.

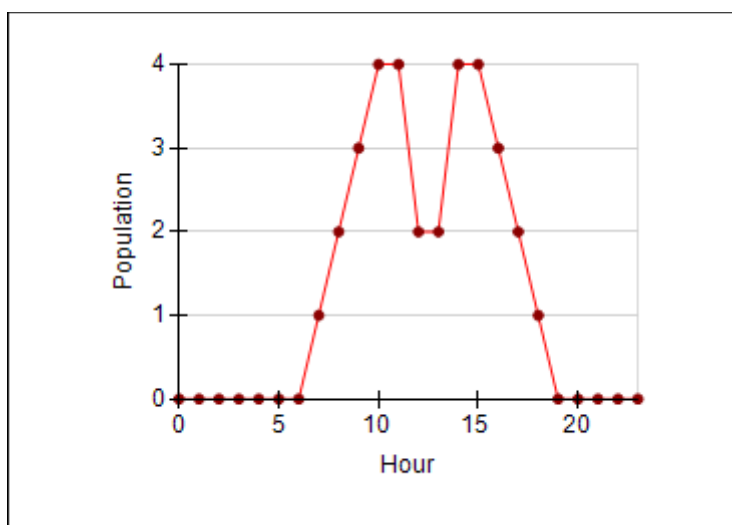
Πίνακας 3.1: Αξίες περιεχομένων ανά 100m² σε τυπικά κτίρια γραφείων.

Περιεχόμενα	Αξία(\$)
Γραφεία	200
Εκτυπωτές/Fax/Scanners	140
Υπολογιστές/Laptops	600
Οθόνες	120
Βιβλιοθήκες, 6 ράφια	200
Κατακόρυφα ντουλάπια, 4 ράφια	80
Οριζόντια ντουλάπια, 4 ράφια	80

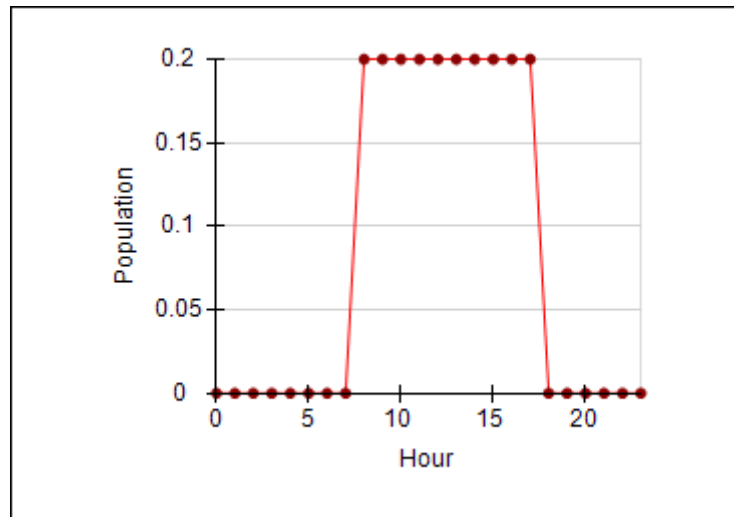
Μετά από τις πληροφορίες για το κτίριο χρειάζεται να προσδιοριστούν τα πληθυσμιακά μοντέλα για το κτίριο. Το PACT έχει βιβλιοθήκη πληθυσμιακών μοντέλων ανά κτιριακή χρήση όπως αυτά παρουσιάζονται στην FEMA P-58 (2012). Καθορίζονται για κάθε όροφο κτιρίου οι χρήσεις του, ως ποσοστό της συνολικής επιφάνειας κάθε ορόφου (Σχήμα 3.2.), καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται ο αριθμός των ατόμων που το χρησιμοποιούν κατά την διάρκεια τη εβδομάδας (Σχήμα 3.3.) και του Σαββατοκύριακου(Σχήμα 3.4.). Επίσης, καθορίζεται και η μεταβολή της ποσότητας των χρηστών του κτιρίου κατά την διάρκεια του χρόνου (Σχήμα 3.5.)



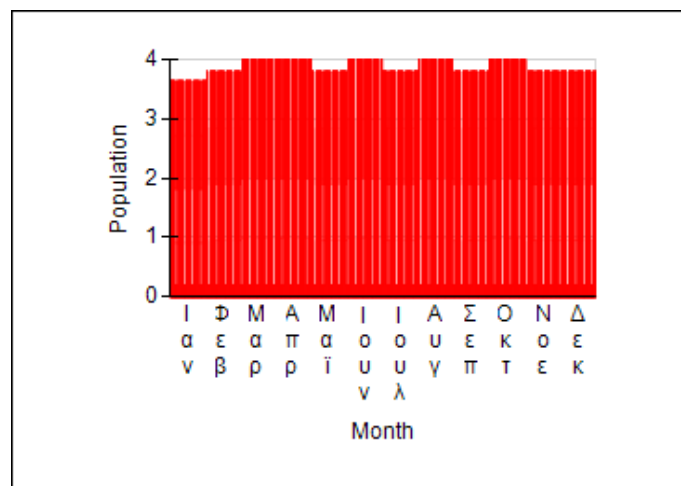
Σχήμα 3.2: Το μενού καθορισμού του πληθυσμιακού μοντέλου του κτιρίου για λειτουργία ως κτίριο γραφείων.



Σχήμα 3.3: Η μεταβολή του αριθμού των χρηστών του κτιρίου ανά 1000 τετραγωνικά πόδια κατά την διάρκεια των εργάσιμων ημερών.



Σχήμα 3.4: Η μεταβολή του αριθμού των χρηστών του κτιρίου ανά 1000 τετραγωνικά πόδια κατά την διάρκεια του Σαββατοκύριακου.

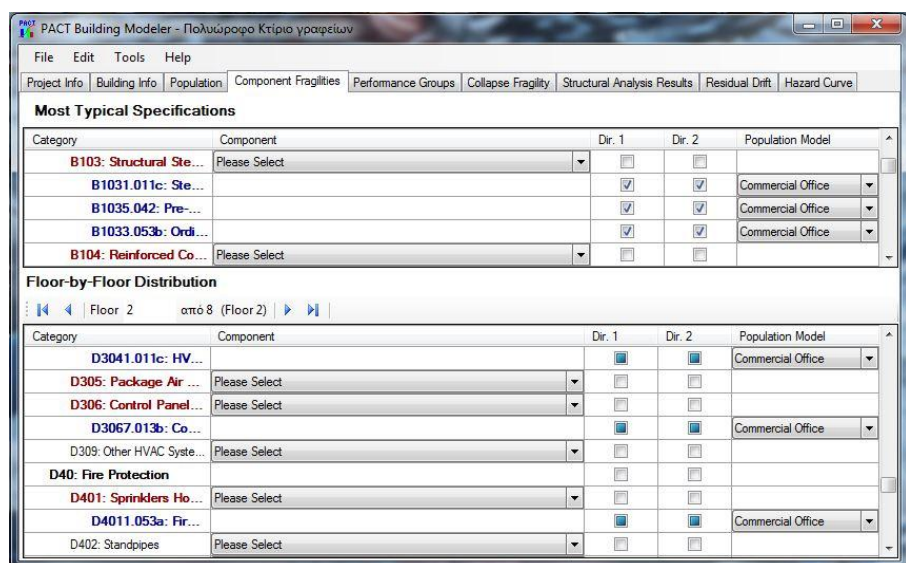


Σχήμα 3.5: Η μεταβολή του αριθμού των χρηστών του κτιρίου ανά 1000 τετραγωνικά πόδια ανά μήνα κατά την πάροδο ενός χρόνου.

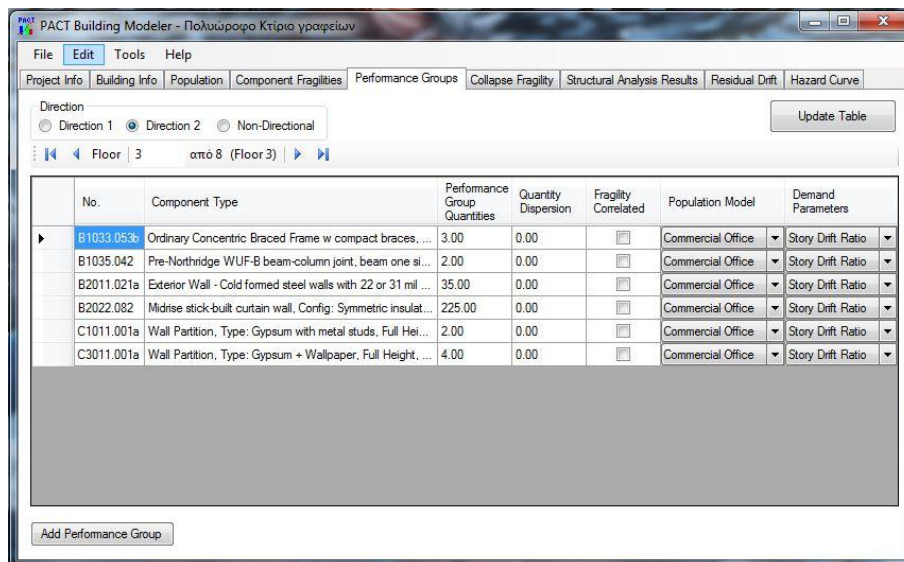
Στην συνέχεια καθορίζονται οι ομάδες τρωτότητας για το κτίριο. Οι ομάδες αυτές αποτελούνται από δομικά ή μη δομικά στοιχεία της κατασκευής που μπορεί να παρουσιάσουν βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Για κάθε μία από αυτές τις ομάδες ορίζεται βάσει ποιιάς παραμέτρου αξιολογείται το αν θα εμφανιστούν βλάβες. Οι παράμετροι αυτοί είναι η ανοιγμένη μετατόπιση, η ταχύτητα ή η επιτάχυνση του κάθε ορόφου. Επίσης ορίζεται αν η κάθε ομάδα είναι ευαίσθητη στην διεύθυνση X, την διεύθυνση Y, και τις δύο διευθύνσεις ή σε καμία από τις δύο (Σχήμα 3.6.). Στον Πίνακα 3.2. καταγράφονται οι ομάδες τρωτότητας που χρησιμοποιήθηκαν στο κτίριο αυτό. Έπειτα ορίζεται η ποσότητα των στοιχείων ανά όροφο και ανά διεύθυνση (Σχήμα 3.7.)

Πίνακας 3.2: Ομάδες τρωτότητας.

Περιγραφή	Κωδικός
Πλάκες βάσης μεταλλικών υποστυλωμάτων με $W > 300 \text{ plf}$	B1031.011c
Σύνδεση πάκτωσης δοκού-υποστυλώματος με κοχλίες για πλάτος δοκού μεγαλύτερο από W30	B1035.042
Τυπικό πλαίσιο με χιαστί συνδέσμους με πλάτος συνδέσμου $41 \text{ PLF} < W < 99 \text{ PLF}$	B1033.053b
Εξωτερικοί τοίχοι με πλαίσια από χάλυβα μορφωμένο εν ψυχρώ	B2011.021a
Πανέλα με τζάμια	B2022.082
Περιμετρικό στηθαίο οροφής από άοπλο σκυρόδεμα	B3041.001
Εσωτερικά διαχωριστικά - Γυψοσανίδες	C1011.001a
Επικάλυψη εσωτερικών διαχωριστικών - ταπετσαρία	C3011.001a
Ψευδοροφή - μόνο κατακόρυφη στήριξη	C3032.001a
Ανελκυστήρες	D1014.021
Ψύκτης	D3031.011b
Ηλεκτρομηχανολογικός Πίνακας	D3067.013b
Ψεκαστήρες Οροφής	D4011.053a



Σχήμα 3.6: Το μενού καθορισμού δομικών και μη δομικών στοιχείων, ανά στάθμη και ανά κατεύθυνση, που μπορεί να παρουσιάσουν βλάβες λόγω σεισμού.



Σχήμα 3.7: Το μενού καθορισμού της ποσότητας ανά στάθμη των δομικών και μη δομικών στοιχείων που μπορεί να παρουσιάσουν βλάβες λόγω σεισμού.

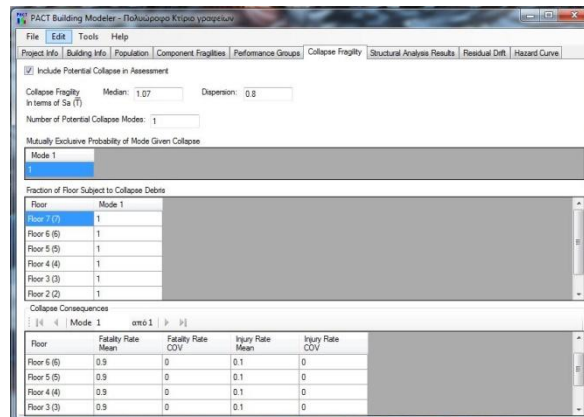
3.3 Η εισαγωγή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης

Προκειμένου να εξαχθούν τα αποτελέσματα για την συμπεριφορά του κτηρίου θα πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι που προέκυψαν από την ανάλυση. Αρχικά γίνεται ο καθορισμός της ευαισθησίας του κτηρίου σε κατάρρευση (Σχήμα 3.8.). Ένα κτίριο μπορεί να θεωρηθεί πως έχει καταρρεύσει όταν έχουν καταρρεύσει είτε κάποιιοι είτε όλοι οι όροφοί του. Για παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί πως έχει συμβεί κατάρρευση αν υπάρχουν σοβαρές αστοχίες μόνο στον 2ο ή μόνο στον 3ο όροφο. Ακόμη κάθε μορφή κατάρρευσης έχει διαφορετική πιθανότητα να εμφανιστεί, όμως το άθροισμα των πιθανοτήτων όλων των μορφών κατάρρευσης πρέπει να είναι ίσο με την μονάδα. Το πόσες πιθανές μορφές κατάρρευσης υπάρχουν, το ποιές είναι αυτές και ποιά είναι η πιθανότητα να εμφανιστεί η κάθε μια απαιτεί ειδική ανάλυση η οποία δεν γίνεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε πως η μοναδική μορφή κατάρρευσης του κτηρίου είναι το να καταρρεύσουν όλοι οι όροφοι.

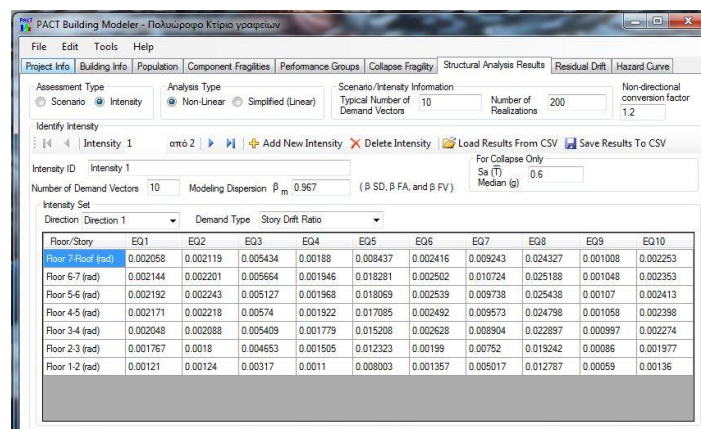
Επιπρόσθετα προσδιορίζεται η μέση τιμή και η διασπορά της εδαφικής επιτάχυνσης για την οποία η κατασκευή αστοχεί. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με βάση τον ΕΑΚ2000 (2001) χωρίς να ληφθεί υπόψη το συντελεστής μετελαστικής συμπεριφοράς q . Επίσης, για κάθε όροφο ορίστηκαν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του ποσοστού τραυματισμών και θανάτων σε περίπτωση κατάρρευσης. Χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες τιμές, οι οποίες είναι 90% για τον μέσο ποσοστό θανάτων και 10% για το μέσο ποσοστό τραυματισμών αντίστοιχα. Οι τυπικές αποκλίσεις και των δύο ποσοστών θεωρήθηκαν μηδενικές.

Στην συνέχεια, ορίζεται η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή ανηγμένη μετατόπιση και η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή επιτάχυνση σε κάθε όροφο. Δίνονται στοιχεία για κάθε μία από τις 10 σεισμικές δομήσεις που προσομοιώθηκαν για κάθε διεύθυνση και για ένταση μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης $S_{a1}(T_1) = 0,6g$ και $S_{a2}(T_1) = 1,2g$ (Σχήμα 3.9.). Οι τιμές τους παρατίθενται στους Πίνακες Α.1.-Α.8. στο Παράρτημα Α. Προκειμένου να αξιολογηθεί αν κάποιος από τους ορόφους έχει καταρρεύσει σε κάποιες από τις προσομοιώσεις, προσδιορίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της εναπομένουσας ανηγμένης μετατόπισης κατάρρευσης. Ακόμη ορίζεται η μέγιστη απόλυτη εναπομένουσα

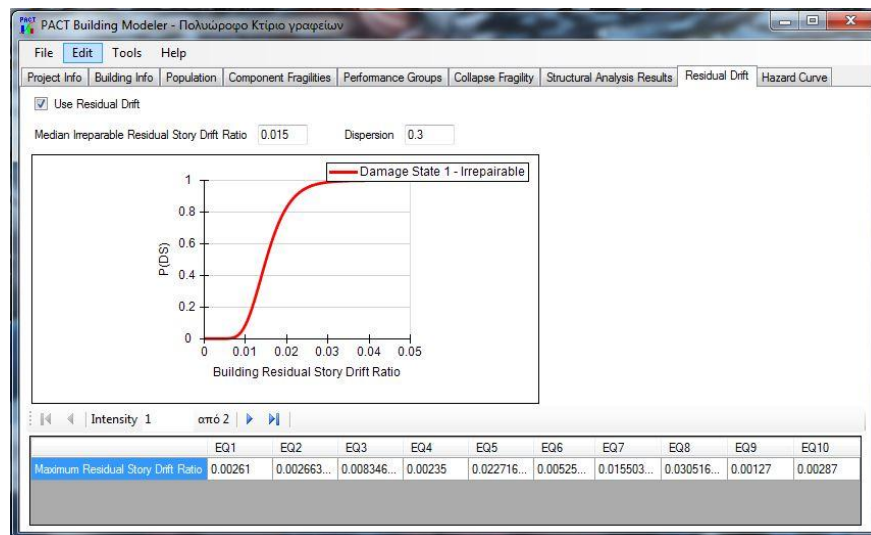
ανηγμένη μετατόπιση για κάθε σεισμική δόνηση και για κάθε ένταση μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης (Σχήμα 3.10.).



Σχήμα 3.8: Το μενού καθορισμού των μορφών κατάρρευσης του κτιρίου.



Σχήμα 3.9: Το μενού καθορισμού της σχετικής μετατόπισης και της επιτάχυνσης κάθε ορόφου για κάθε σεισμική διέγερση.

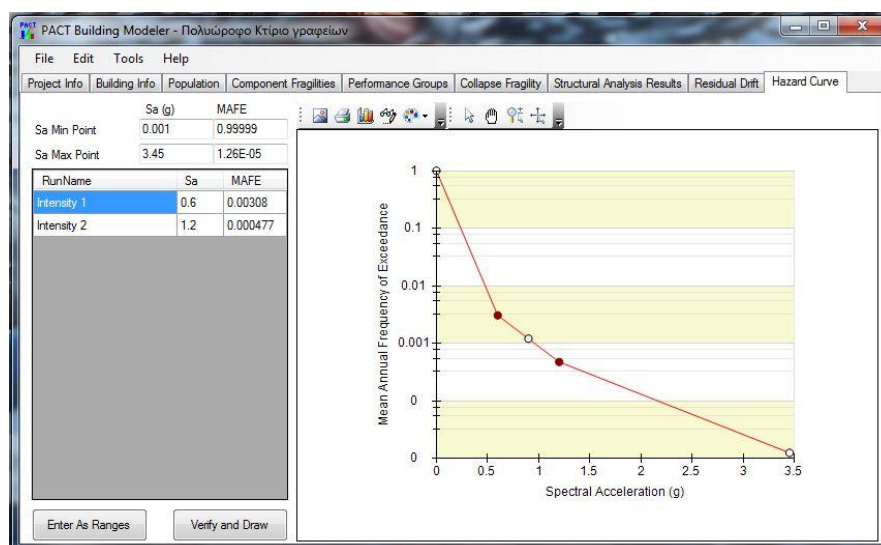


Σχήμα 3.10: Το μενού καθορισμού του εναπομένουσα πέραν του οποίου το κτίριο θεωρείται μη επισκευάσιμο.

3.4 Η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας

Προκειμένου να γίνει εκτίμηση της επιτελεστικότητας του κτιρίου με βάση τον χρόνο, πρέπει να οριστεί η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για την περιοχή της κατασκευής. Ο καθορισμός της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας της κατασκευής ορίζεται σε τμήματα. Τα τμήματα αυτά είναι όσες και οι διαφορετικές εντάσεις μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κτιρίου.

Για το συγκεκριμένο κτίριο ο καθορισμός της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας έγινε σε δύο τμήματα. Ένα τμήμα από $S_a = 10^{-3}g$ έως $S_a = 0,9g$ και ένα δεύτερο τμήμα από $S_a = 0,9g$ έως $S_a = 3,45g$. Κάθε τμήμα προσεγγίστηκε με 3 σημεία: τα δύο άκρα του και ένα εσωτερικό σημείο. Για το πρώτο τμήμα το εσωτερικό σημείο ήταν αυτό με φασματική επιτάχυνση $S_a = 0,6g$ και για το δεύτερο τμήμα το εσωτερικό σημείο ήταν αυτό με $S_a = 1,2g$ (Σχήμα 3.11.)



Σχήμα 3.11: Το μενού καθορισμού της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας για το κτίριο.

4 Αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με το λογισμικό PACT. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε 4 κατηγορίες: απώλεια ζών, τραυματισμοί, κόστος επισκευής και χρόνο επισκευής. Ακόμη, για κάθε κατηγορία τρωτότητας υπολογίζεται η πιθανότητα να επισημανθεί ως μη ασφαλής. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία ολόκληρου ή μέρους του κτιρίου θα πρέπει να διακοπεί μέχρι να επιδιορθωθεί διότι η χρήση του κτιρίου είναι επικίνδυνη.

Οι κατηγορίες της απώλειας ζωής και των τραυματισμών αφορούν μόνο χρήστες του κτιρίου και όχι άτομα έξω από το κτίριο που μπορεί να τραυματιστούν από αντικείμενα που πέφτουν, όπως για παράδειγμα γυαλιά από τις προσόψεις. Το κόστος επισκευών υπολογίζεται σε δολάρια που απαιτούνται για να επανέλθει το κτίριο στην κατάσταση που βρίσκονταν πριν τον σεισμό. Σε περίπτωση ολικής απώλειας του κτιρίου το κόστος είναι αυτό της αντικατάστασης του παλιού κτιρίου με ένα κτίριο παρόμοιας κατασκευής. Ο χρόνος επισκευής είναι αυτός ο οποίος απαιτείται προκειμένου να επανέλθει το κτίριο στην κατάσταση που βρίσκονταν πριν από τον σεισμό. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από το αν το κτίριο θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια των επισκευών ή αν θα σταματήσει η λειτουργία του μέχρι το πέρας τους.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με διάφορες μορφές. Παρατίθενται καμπύλες επιτελεστικότητας και για τις τέσσερις κατηγορίες αποτελεσμάτων για ένταση σεισμών με φασματική επιτάχυνση $S_{a1}(T_1)=0,6g$ (Ένταση 1) και $S_{a2}(T_1)=1,2g$ (Ένταση 2). Οι καμπύλες επιτελεστικότητας ορίζουν την πιθανότητα μη υπέρβασης μιας τιμής του μεγέθους που εξετάζεται. Παρουσιάζονται επίσης καμπύλες επιτελεστικότητας σε 3 διαστάσεις όπου γίνεται γραμμική παρεμβολή για εντάσεις σεισμών ενδιάμεσες στην Ένταση 1 και την Ένταση 2. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται και σταθμισμένες με βάση την καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για την περιοχή του κτιρίου. Με χρήση της καμπύλης επιτελεστικότητας υπολογίζονται για την κατασκευή και:

1. Η μέση ετήσια πιθανότητα κατάρρευσης $P_c=1.11 \times 10^{-3}$.
2. Η μέση ετήσια πιθανότητα το κτίριο να χαρακτηριστεί ως μη ασφαλές $P_{UP}=2.6 \times 10^{-3}$.
3. Η μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας του κτιρίου λόγω μετακίνησης $P_{rd}=4.4 \times 10^{-4}$.

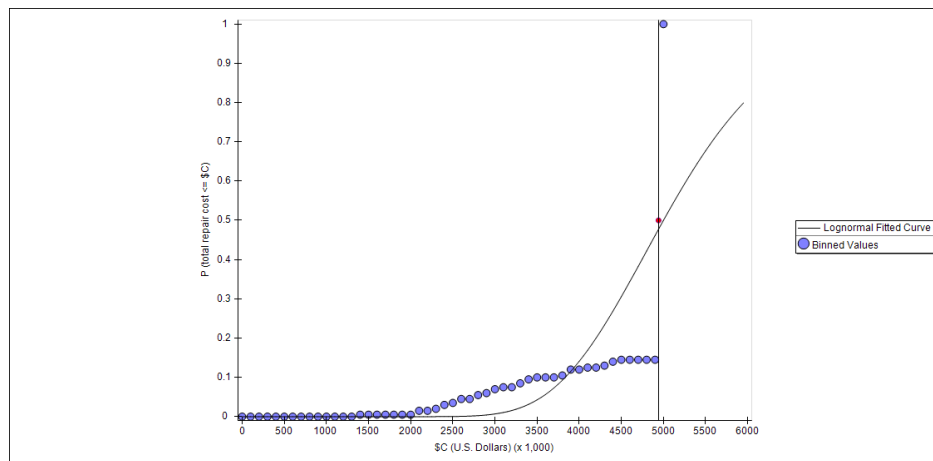
Για το συνολικό κόστος επισκευής και τον συνολικό χρόνο επισκευής παρατίθεται και η συμβολή κάθε ομάδας τρωτότητας σε αυτά, ξεχωριστά ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά.

4.2 Τα αποτελέσματα για το κόστος επισκευής

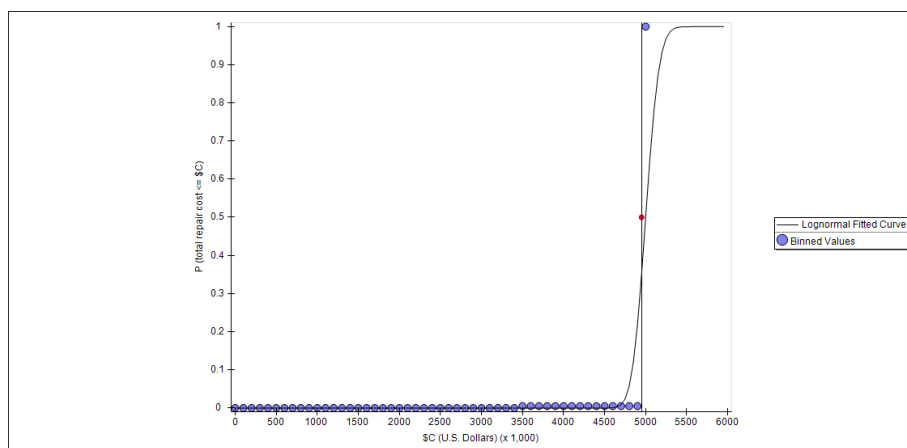
Στο Σχήμα 4.1. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για το κόστος επισκευής του κτιρίου για την Ένταση 1. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για πιθανότητα μη υπέρβασης 50%, το κόστος επισκευής της κατασκευής είναι λίγο λιγότερο από 5.000.000\$, δηλαδή όσο το κόστος της αντικατάστασης του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι, στατιστικά, τις μισές φορές που το κτίριο θα δονείται από έναν σεισμό με μέγιστη φασματική επιτάχυνση $S_a(T_1) \approx 0,6g$ το κτίριο είτε θα καταρρέει είτε το κόστος επισκευής θα είναι τόσο μεγάλο που θα

είναι ασύμφορο να επισκευαστεί. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά του κόστους επισκευής είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό σημαίνει πως υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις του υπολογισμένου κόστους κατασκευής ανά προσομοίωση και άρα η ακρίβεια των προβλέψεων είναι μειωμένη.

Στο Σχήμα 4.2. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για το κόστος επισκευής του κτιρίου για την Ένταση 2. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για πιθανότητα μη υπέρβασης 50%, το κόστος επισκευής της κατασκευής είναι 5.000.000\$, δηλαδή όσο το κόστος της αντικατάστασης του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι, στατιστικά, τις μισές φορές που το κτίριο θα δονείται από έναν σεισμό με μέγιστη φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1) \approx 1,2g$ το κτίριο είτε θα καταρρέει είτε το κόστος επισκευής θα είναι τόσο μεγάλο που θα είναι ασύμφορο να επισκευαστεί. Σε αντίθεση με την καμπύλη επιτελεστικότητας για την Ένταση 1 από αυτή την καμπύλη φαίνεται πως η διασπορά του κόστους επισκευής του κτιρίου είναι πάρα πολύ μικρή. Αυτό σημαίνει πως είναι πρακτικά βέβαιο πως αν η κατασκευή υποβληθεί σε ένα σεισμό με αυτή την ένταση είτε θα καταρρεύσει είτε θα χρειαστεί να αντικατασταθεί.



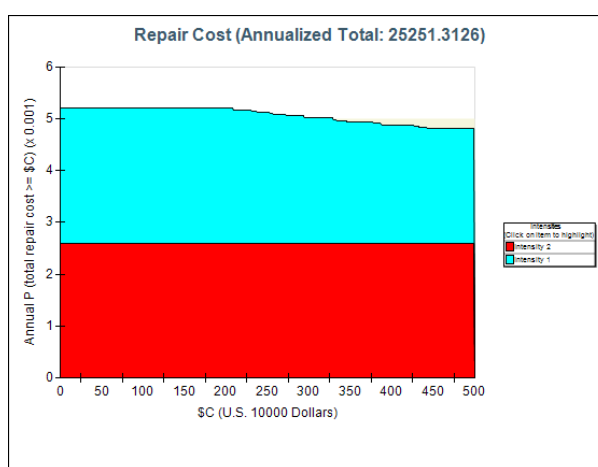
Σχήμα 4.1: Η καμπύλη επιτελεστικότητας για το κόστος επισκευής του κτιρίου για την σεισμική Ένταση 1.



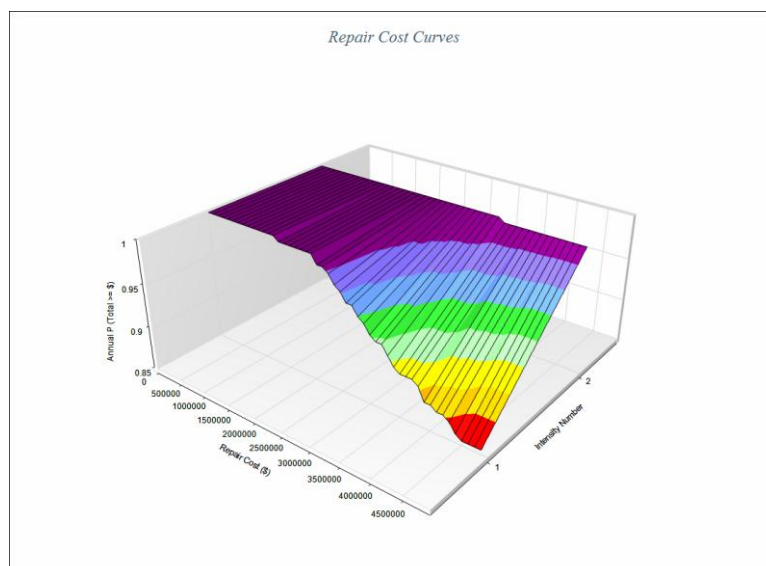
Σχήμα 4.2: Η καμπύλη επιτελεστικότητας για το κόστος επισκευής του κτιρίου για την σεισμική Ένταση 2.

Το Σχήμα 4.3. δείχνει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του κόστους επισκευής του κτιρίου για τις Εντάσεις 1&2. Η πιθανότητα για την Ένταση 2 είναι σταθερή το οποίο είναι αναμενόμενο διότι πρακτικά όλοι αυτοί οι σεισμοί οδηγούν σε ανάγκη αντικατάστασης της κατασκευής και άρα το κόστος επιδιόρθωσης είναι σταθερό και ίσο με το κόστος αντικατάστασης. Φαίνεται επίσης πως η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης για την Ένταση 1 είναι μεγαλύτερη από αυτή για την Ένταση 2. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ πιο πιθανό μέσα σε έναν χρόνο να εμφανιστεί ένας σεισμός με την Ένταση 1 από ότι ένας σεισμός με την Ένταση 2. Από αυτές τις καμπύλες προκύπτει το ετήσιο κόστος επισκευών για την κατασκευή το οποίο είναι ίσο με 25.250\$.

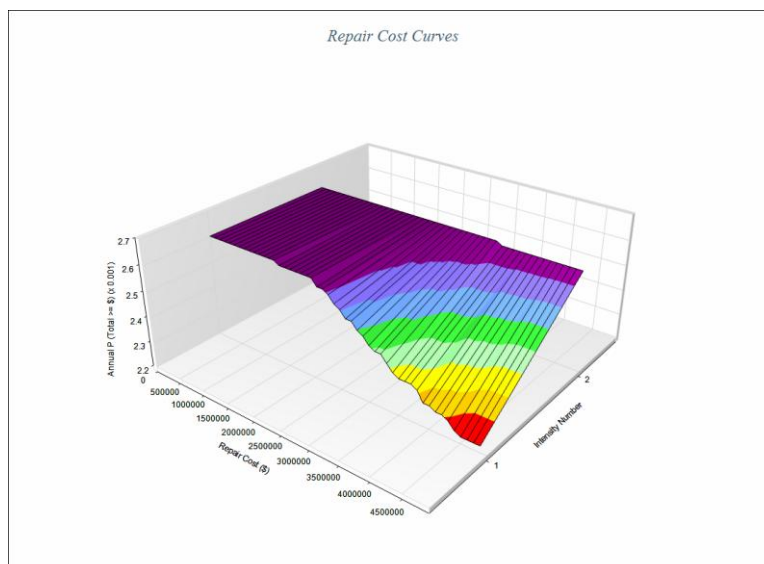
Στο Σχήμα 4.4. και στο Σχήμα 4.5. παρουσιάζονται τρισδιάστατες καμπύλες πιθανότητας μη υπέρβασης κόστους επισκευής. Η πρώτη είναι αστάθμιστη ενώ η δεύτερη είναι προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής της κατασκευής. Οι καμπύλες αυτές δείχνουν την διακύμανση τις πιθανότητας μη υπέρβασης του κόστους για Εντάσεις ανάμεσα στην 1 και στην 2.



Σχήμα 4.3: Η ετήσια πιθανότητα μη υπέρβασης κόστους επισκευής του κτιρίου.



Σχήμα 4.4: Μη προσαρμοσμένη καμπύλη επιτελεστικότητα για το κόστος επισκευής του κτιρίου για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2.

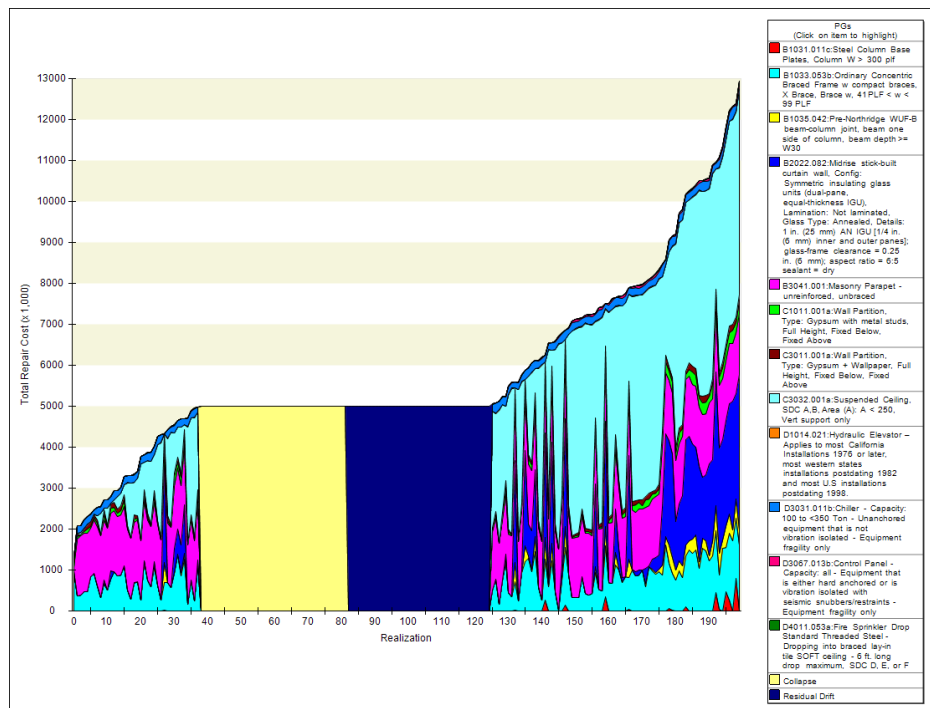


Σχήμα 4.5: Καμπύλη επιτελεστικότητας για το κόστος επισκευής του κτιρίου για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2 προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.

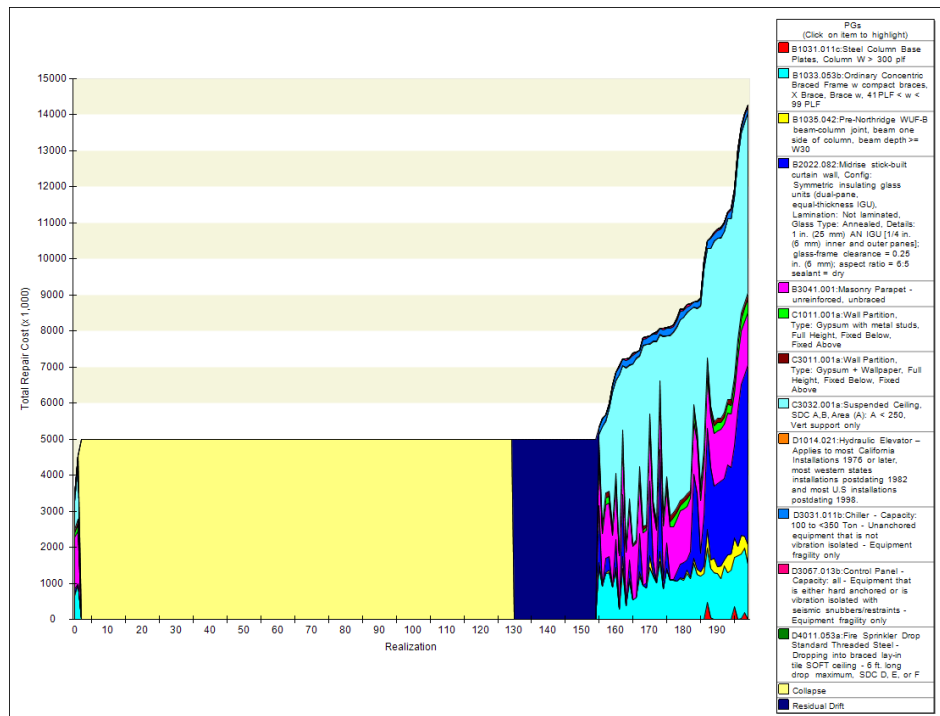
Στο Σχήμα 4.6. παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε ομάδας τρωτότητας στο συνολικό κόστος επισκευής ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 1. Παρατηρείται ότι σε ένα σημαντικό αριθμό από προσομοιώσεις το κτίριο καταρρέει, σε ένα επίσης σημαντικό αριθμό η παραμόρφωση του κτιρίου είναι τόσο μεγάλη ώστε αυτό να μη είναι επισκευάσιμο και σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων το κόστος των επισκευών είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος αντικατάστασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για τις περισσότερες προσομοιώσεις το τελικό κόστος για την επισκευή του κτιρίου να είναι ίσο με το κόστος της αντικατάστασής του. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του κόστους επισκευών οφείλεται σε επισκευές στα πλαίσια με χιαστί συνδέσμους, στην ψευδοροφή και στο περιμετρικό στηθαίο στο δώμα του κτιρίου.

Στο Σχήμα 4.7. παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε ομάδας τρωτότητας στο συνολικό κόστος επισκευής ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 2. Παρατηρείται ότι σε πάνω από τις μισές προσομοιώσεις το κτίριο καταρρέει, σε ένα επίσης σημαντικό αριθμό η παραμόρφωση του κτιρίου είναι τόσο μεγάλη ώστε αυτό να μη είναι επισκευάσιμο και σε σχεδόν όλες τις άλλες προσομοιώσεις το κόστος των επισκευών είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος αντικατάστασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για σχεδόν όλες τις προσομοιώσεις το τελικό κόστος για την επισκευή του κτιρίου να είναι ίσο με το κόστος της αντικατάστασής του. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του κόστους επισκευών οφείλεται σε επισκευές στα πλαίσια με χιαστί συνδέσμους, στην ψευδοροφή και στο περιμετρικό στηθαίο στο δώμα του κτιρίου.

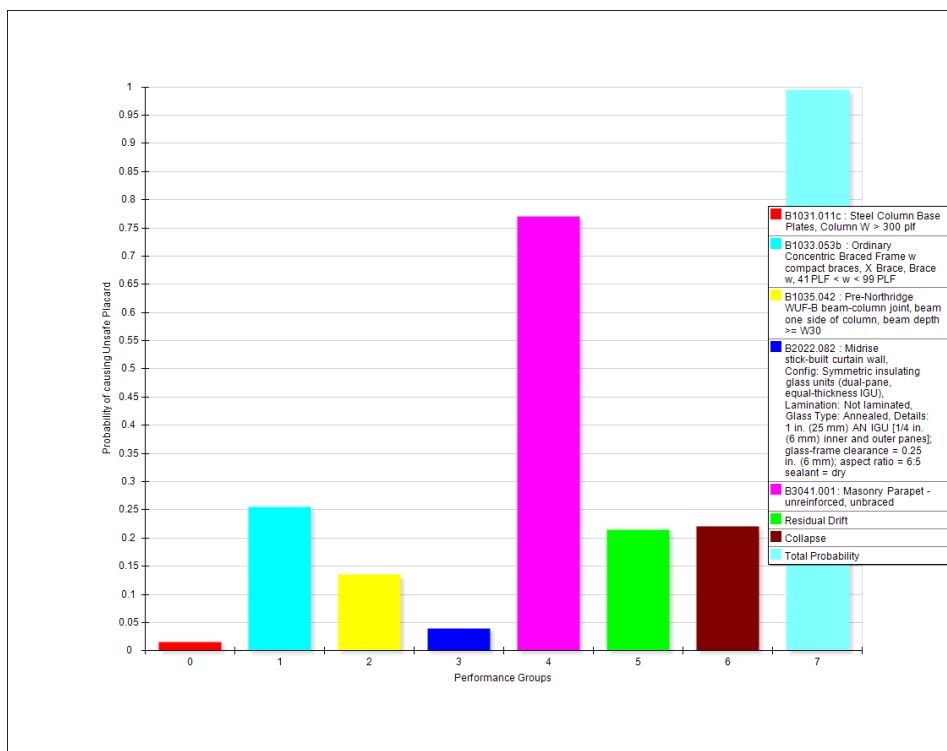
Ως αποτέλεσμα ενός σεισμού, το κτίριο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη ασφαλές λόγω αστοχιών που έχουν συμβεί σε κάποιο δομικό ή μη δομικό στοιχείο του. Έτσι όλο το κτίριο ή μέρος του μπορεί να μη είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μέχρι να γίνουν οι κατάλληλες επισκευές. Εκτός όλων των άλλων αποτελεσμάτων εξάγονται και ραβδόγραμμα τα οποία παρουσιάζουν την πιθανότητα να χαρακτηριστεί το κτίριο ως μη ασφαλές λόγω βλαβών σε κάποιο στοιχείο, για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Στο Σχήμα 4.8. φαίνεται το ραβδόγραμμα για την Ένταση 1 και στο Σχήμα 4.9. φαίνεται το ραβδόγραμμα για την Ένταση 2.



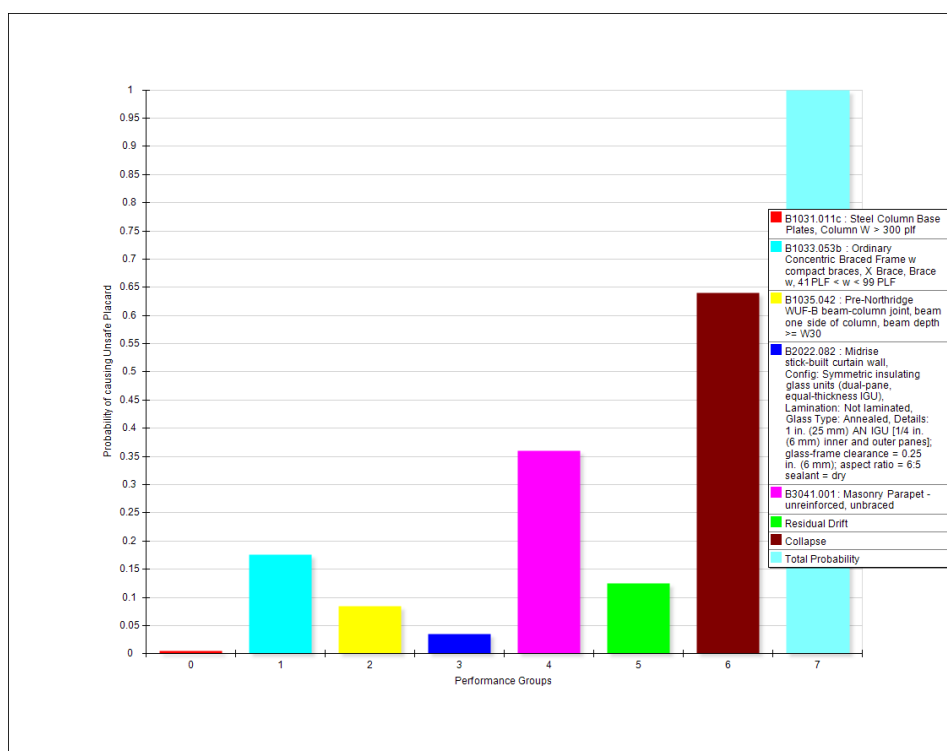
Σχήμα 4.6: Το Η συνεισφορά στο κόστος επισκευής του κτιρίων ανά ομάδα δομικών και μη δομικών στοιχείων ανά προσομοίωση για την Ένταση 1.



Σχήμα 4.7: Το Η συνεισφορά στο κόστος επισκευής του κτιρίων ανά ομάδα δομικών και μη δομικών στοιχείων ανά προσομοίωση για την Ένταση 2.



Σχήμα 4.8: Η πιθανότητα ανά στοιχείο να κριθεί η κατασκευή μη ασφαλής λόγω βλάβης σε αυτό για την Ένταση 1.

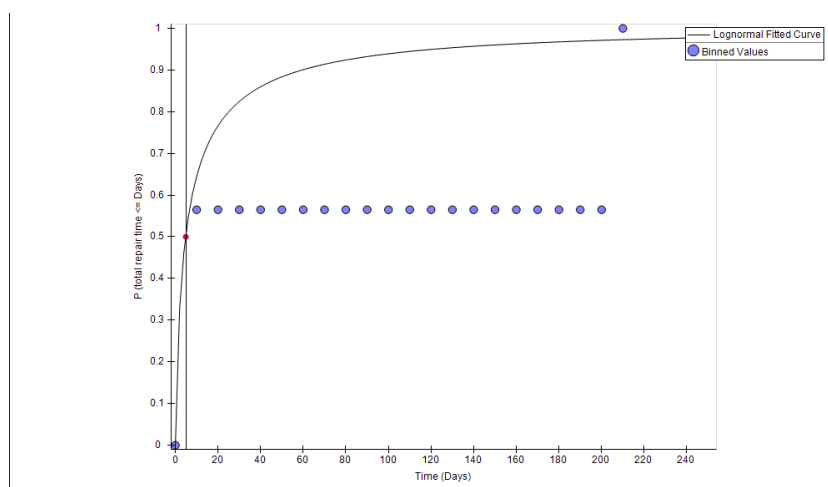


Σχήμα 4.9: Η πιθανότητα ανά στοιχείο να κριθεί η κατασκευή μη ασφαλής λόγω βλάβης σε αυτό για την Ένταση 2.

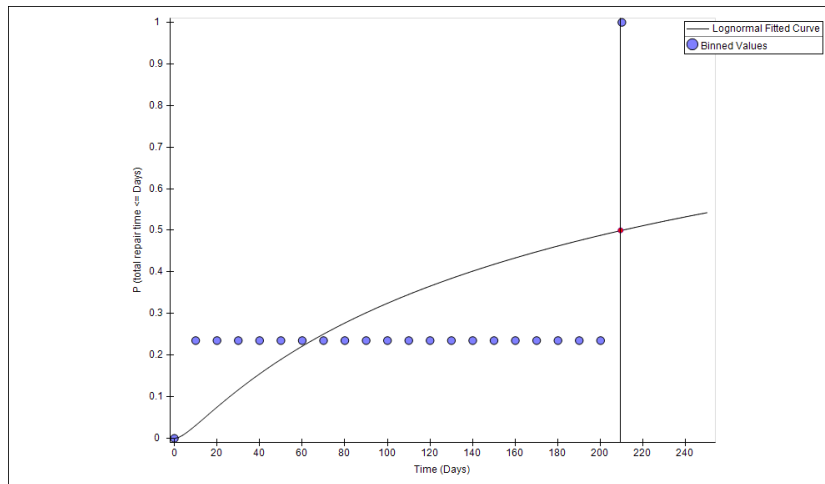
4.3 Τα αποτελέσματα για τον χρόνο επισκευής

Στο Σχήμα 4.10. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον χρόνο επισκευής του κτιρίου για την Ένταση 1. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για πιθανότητα μη υπέρβασης 50%, χρόνος επισκευής της κατασκευής είναι 8 μέρες. Γενικά οι χρόνοι επισκευής δεν είναι πολύ μεγάλοι το οποίο σημαίνει οι βλάβες είναι περιορισμένες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι δυνατό να συνεχίσει να λειτουργεί το υπόλοιπο κτίριο όσο γίνονται οι επισκευές. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά του κόστους επισκευής είναι αρκετά μικρή. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στον χρόνο που θα χρειάζεται κάθε φορά προκειμένου να επιστρέψει η κατασκευή στην κατάσταση που ήταν πριν τον σεισμό.

Στο Σχήμα 4.11. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον χρόνο επισκευής του κτιρίου για την Ένταση 2. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για πιθανότητα μη υπέρβασης 50%, χρόνος επισκευής της κατασκευής είναι 210 μέρες, δηλαδή ίσος με τον εκτιμώμενο χρόνο αντικατάστασης της κατασκευής. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά του κόστους επισκευής είναι πολύ μεγάλη. Αυτό σημαίνει πως υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στον χρόνο που θα χρειάζεται κάθε φορά προκειμένου να επιστρέψει η κατασκευή στην κατάσταση που ήταν πριν τον σεισμό. Αυτό κάνει πολύ δύσκολο το να προβλεφθεί το για πόσο μεγάλο χρονικό διάστημα η κατασκευή δεν θα είναι διαθέσιμη προς χρήση λόγω ενός σεισμού Έντασης 2.



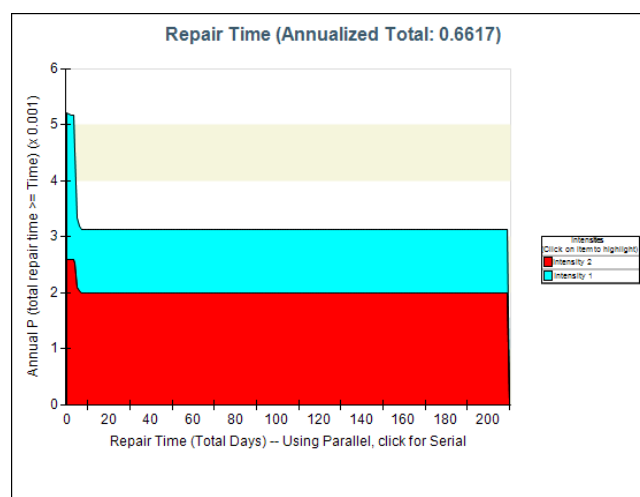
Σχήμα 4.10: Η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον χρόνο επισκευής για την Ένταση 1.



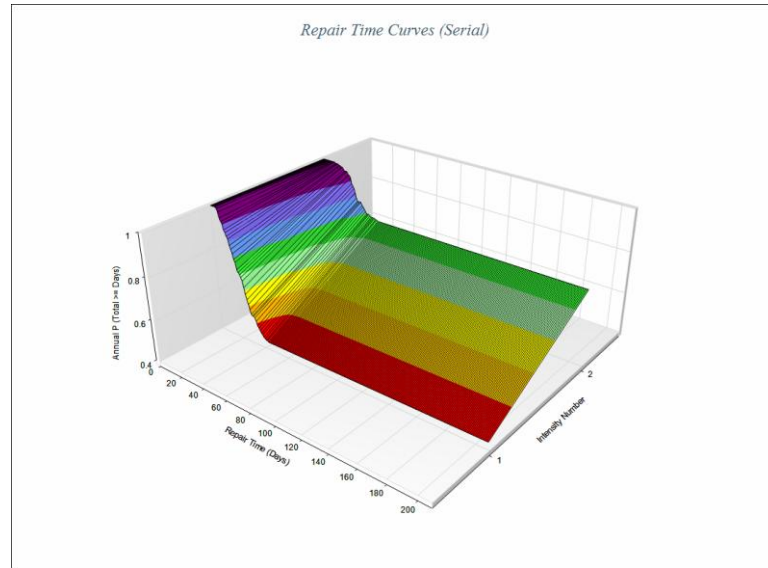
Σχήμα 4.11: Η καμπύλη επιτελεστικότητα για τον χρόνο επισκευής για την Ένταση 2.

Το Σχήμα 4.12. δείχνει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του χρόνου επισκευής του κτιρίου για τις Εντάσεις 1&2. Φαίνεται πιθανό η διάρκεια επισκευής του κτιρίου να είναι μικρή (μέχρι 10 μέρες περίπου), ενώ για μεγαλύτερη διάρκεια επισκευών η πιθανότητα φαίνεται να είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά αβέβαιο το πόσο θα διαρκέσει η επισκευή του κτιρίου αφού οποιαδήποτε διάρκεια φαίνεται εξίσου πιθανή. Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης για την Ένταση 1 είναι μεγαλύτερη από αυτή για την Ένταση 2. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ πιο πιθανό μέσα σε έναν χρόνο να εμφανιστεί ένας σεισμός με την Ένταση 1 από ότι ένας σεισμός με την Ένταση 2. Από αυτές τις καμπύλες προκύπτει ο μέσος ετήσιος χρόνος επισκευών για την κατασκευή ο οποίος είναι 0,66 εβδομάδες.

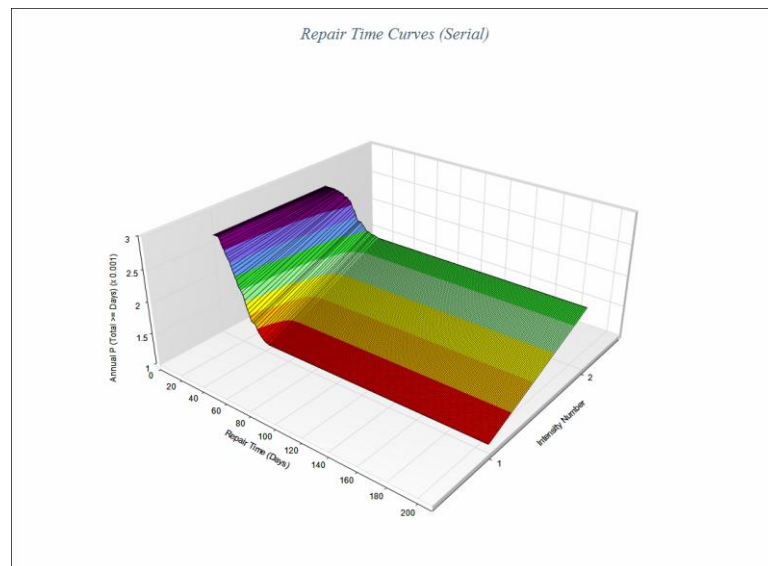
Στο Σχήμα 4.13. και στο Σχήμα 4.14. παρουσιάζονται τρισδιάστατες καμπύλες πιθανότητας μη υπέρβασης χρόνου επισκευής. Η πρώτη είναι αστάθμιστη ενώ η δεύτερη είναι προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής της κατασκευής. Οι καμπύλες αυτές δείχνουν την διακύμανση τις πιθανότητας μη υπέρβασης του χρόνου επισκευής για Εντάσεις ανάμεσα στην 1 και στην 2.



Σχήμα 4.12: Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του χρόνου επισκευής του κτιρίου ανά προσομοίωση.



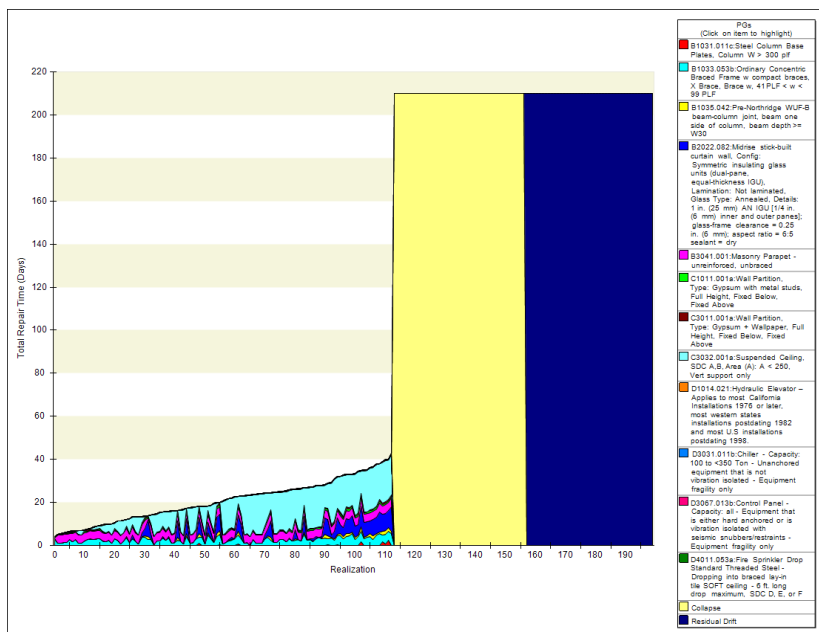
Σχήμα 4.13: Μη προσαρμοσμένη καμπύλη επιτελεστικότητα για τον χρόνο επισκευής του κτιρίου για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2.



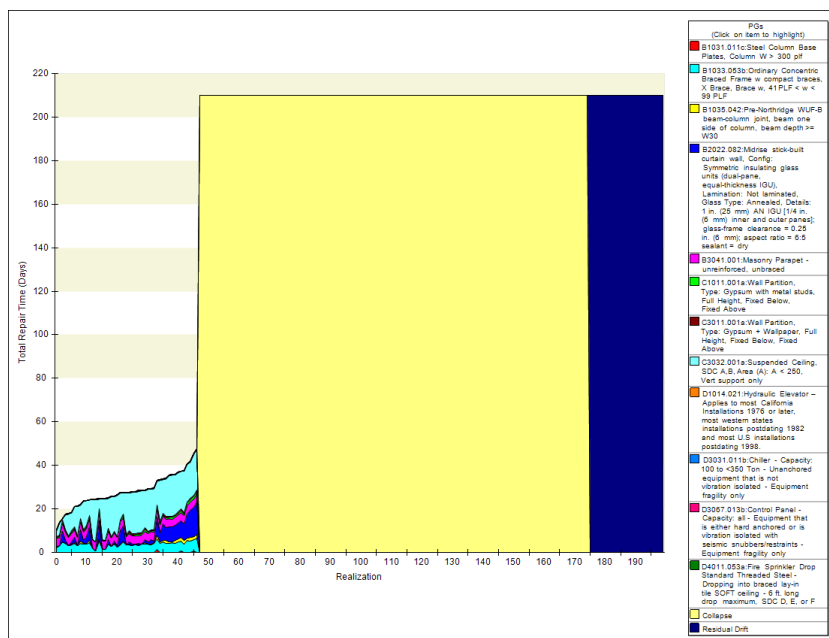
Σχήμα 4.14: Καμπύλη επιτελεστικότητα για τον χρόνο επισκευής του κτιρίου για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2 προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.

Στο Σχήμα 4.15. παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε ομάδας τρωτότητας στο συνολικό χρόνο επισκευής ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 1. Παρατηρείται ότι σε ένα σημαντικό αριθμό από προσομοιώσεις το κτίριο καταρρέει, σε ένα επίσης σημαντικό αριθμό η παραμόρφωση του κτιρίου είναι τόσο μεγάλη ώστε αυτό να μη είναι επισκευάσιμο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για τις περισσότερες προσομοιώσεις ο συνολικός χρόνος για την επισκευή του κτιρίου να είναι ίσος με τον χρόνο της αντικατάστασής του. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού χρόνου επισκευής καταναλώνεται για την επισκευή τριών ομάδων στοιχείων: της ψευδοροφής, των χιαστί συνδέσμων και του στηθαίου στο δώμα.

Στο Σχήμα 4.16. παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε ομάδας τρωτότητας στο συνολικό χρόνο επισκευής ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 2. Παρατηρείται ότι στις περισσότερες προσομοιώσεις το κτίριο καταρρέει, ενώ επίσης σε αρκετές η παραμόρφωση του κτιρίου είναι τόσο μεγάλη ώστε αυτό να μη είναι επισκευάσιμο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για σχεδόν όλες τις προσομοιώσεις ο συνολικός χρόνος για την επισκευή του κτιρίου να είναι ίσος με τον χρόνο της αντικατάστασής του.



Σχήμα 4.15: Η συμβολή ανά στοιχείο στον συνολικό χρόνο που απαιτείται για την επισκευή του κτιρίου για την Ένταση 1.



Σχήμα 4.16: Η συμβολή ανά στοιχείο στον συνολικό χρόνο που απαιτείται για την επισκευή του κτιρίου για την Ένταση 2.

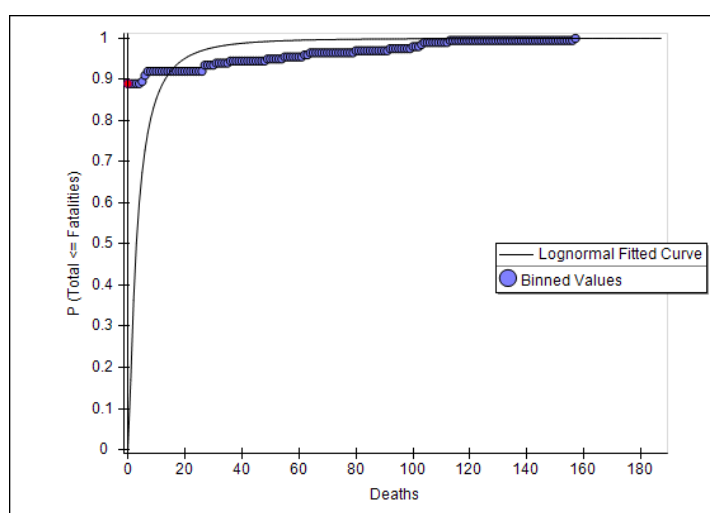
4.4 Τα αποτελέσματα για τις απώλειες ζώων

Στο Σχήμα 4.17. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον αριθμό των θανάτων για την Ένταση 1. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η πιθανότητα να μην υπάρξουν απώλειες ανθρώπινων ζώων είναι πολύ υψηλή. Αυτό σημαίνει ότι, στατιστικά, όσες φορές το κτίριο θα δονείται από έναν σεισμό με μέγιστη φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1) \approx 0,6g$ οι χρήστες του κτιρίου δεν θα κινδυνεύουν. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά είναι αρκετά μικρή. Αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά σίγουρο πως δεν θα υπάρξει μεγάλος αριθμός θανάτων.

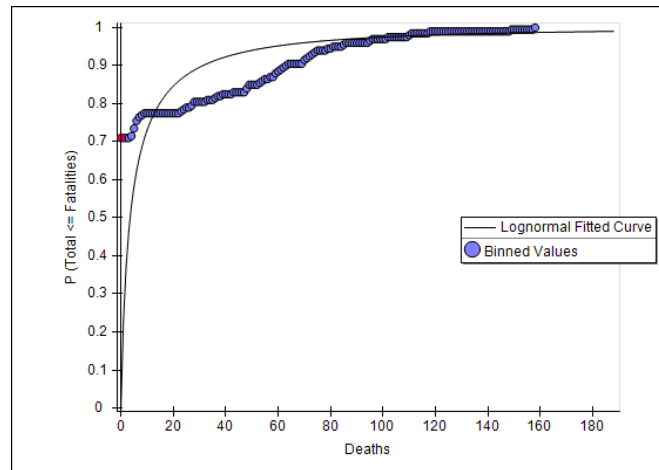
Στο Σχήμα 4.18. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον αριθμό των θανάτων για την Ένταση 2. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η πιθανότητα να μην υπάρξουν απώλειες ανθρώπινων ζώων είναι πολύ υψηλή αν και σαφώς χαμηλότερη από αυτή της Έντασης 1. Αυτό σημαίνει ότι, στατιστικά, όσες φορές το κτίριο θα δονείται από έναν σεισμό με μέγιστη φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1) \approx 1,2g$ οι χρήστες του κτιρίου δεν θα κινδυνεύουν. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά είναι αρκετά μικρή. Αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά σίγουρο πως δεν θα υπάρξει μεγάλος αριθμός θανάτων.

Το Σχήμα 4.19. δείχνει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης αριθμού θανάτων για τις Εντάσεις 1&2. Παρατηρείται ότι η πιθανότητα και για τις δύο εντάσεις μειώνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό όσο αυξάνεται ο αριθμός των θανάτων. Αυτό σημαίνει πως το κτίριο προσφέρει επαρκή προστασία στους χρήστες του. Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης για την Ένταση 1 είναι μεγαλύτερη από αυτή για την Ένταση 2. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ πιο πιθανό μέσα σε έναν χρόνο να εμφανιστεί ένας σεισμός με την Ένταση 1 από ότι ένας σεισμός με την Ένταση 2. Από αυτές τις καμπύλες προκύπτει ο μέσος αριθμός θανάτων ανά χρόνο, ο οποίος είναι 0,054 θάνατοι τον χρόνο.

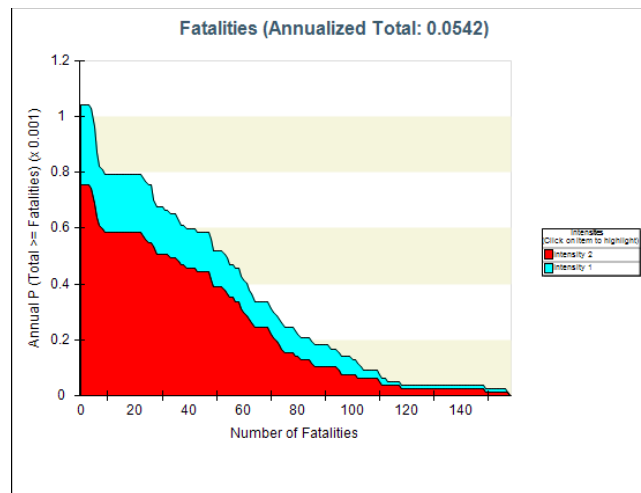
Στο Σχήμα 4.20. και στο Σχήμα 4.21. παρουσιάζονται τρισδιάστατες καμπύλες πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού θανάτων. Η πρώτη είναι αστάθμιστη ενώ η δεύτερη είναι προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής της κατασκευής. Οι καμπύλες αυτές δείχνουν την διακύμανση της πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού θανάτων για Εντάσεις ανάμεσα στην 1 και στην 2.



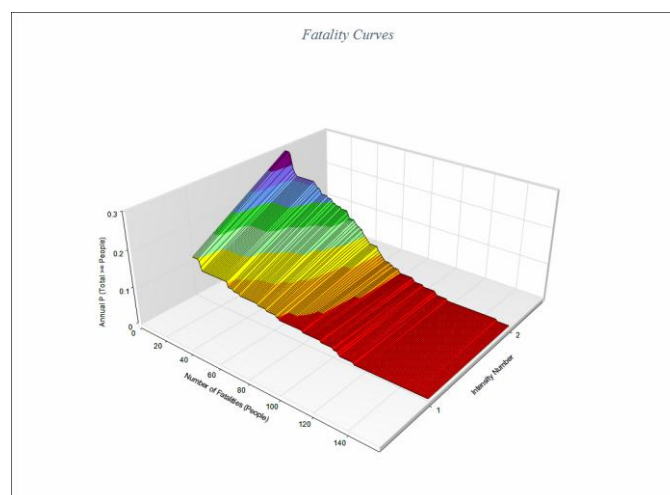
Σχήμα 4.17: Καμπύλη επιτελεστικότητας απώλειας ανθρώπινων ζώων για την Ένταση 1.



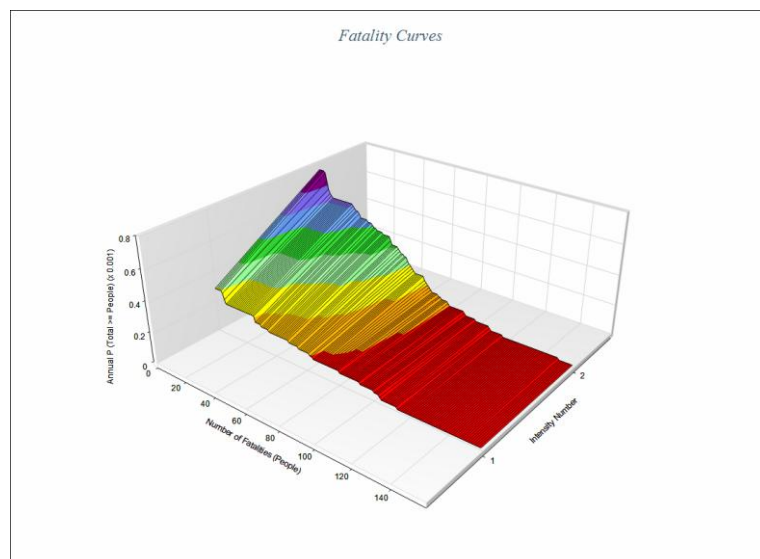
Σχήμα 4.18: Καμπύλη επιτελεσματικότητας απώλειας ανθρώπινων ζωών για την Ένταση 2.



Σχήμα 4.19: Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του αριθμού θανάτων ανά προσομοίωση.

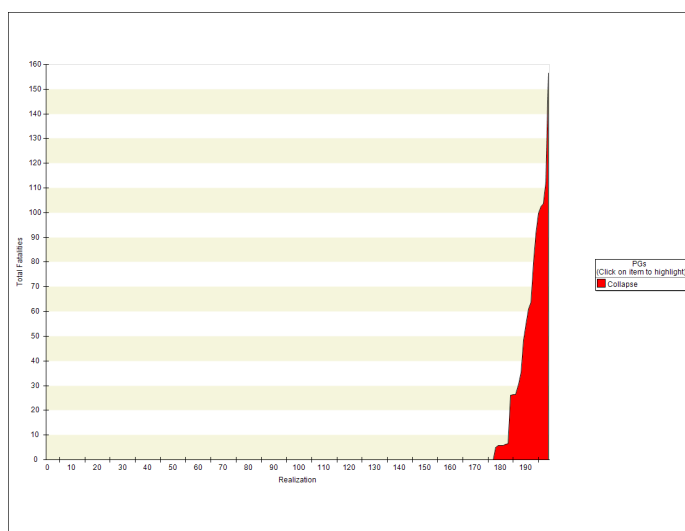


Σχήμα 4.20: Μη προσαρμοσμένη καμπύλη επιτελεσματικότητας για την απώλεια ανθρώπινων ζωών για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2.

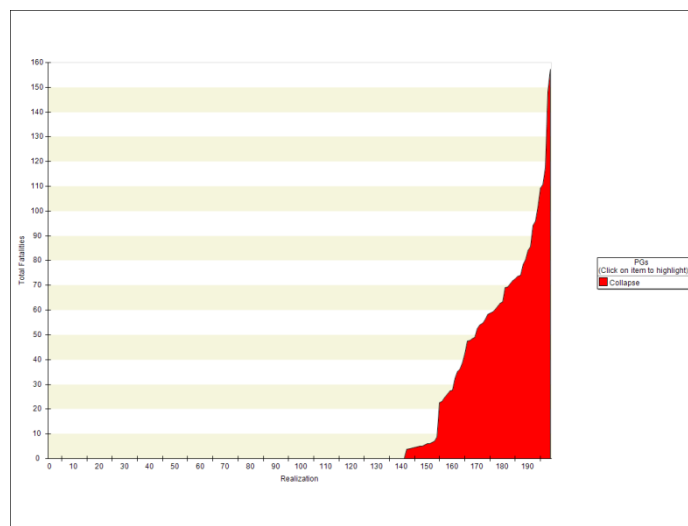


Σχήμα 4.21: Καμπύλη επιτελεσματικότητας για την απώλεια ανθρώπινων ζώων για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2 προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.

Στο Σχήμα 4.22. και στο Σχήμα 4.23. παρουσιάζεται ο αριθμός των θανάτων ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 1 και την Ένταση 2 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για την Ένταση 1 υπάρχουν απώλειες ανθρώπινων ζώων σε σχετικά μικρό αριθμό από τις προσομοιώσεις. Για την Ένταση 2 υπάρχουν απώλειες ανθρώπινων ζώων σε σημαντικά περισσότερες προσομοιώσεις, ωστόσο το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό για έναν σεισμό με τόσο μεγάλη ένταση.



Σχήμα 4.22: Ο υπολογισμένος αριθμός θανάτων ανά προσομοίωση για την Ένταση 1.



Σχήμα 4.23: Ο υπολογισμένος αριθμός θανάτων ανά προσομοίωση για την Ένταση 2.

4.5 Τα αποτελέσματα για τους τραυματισμούς

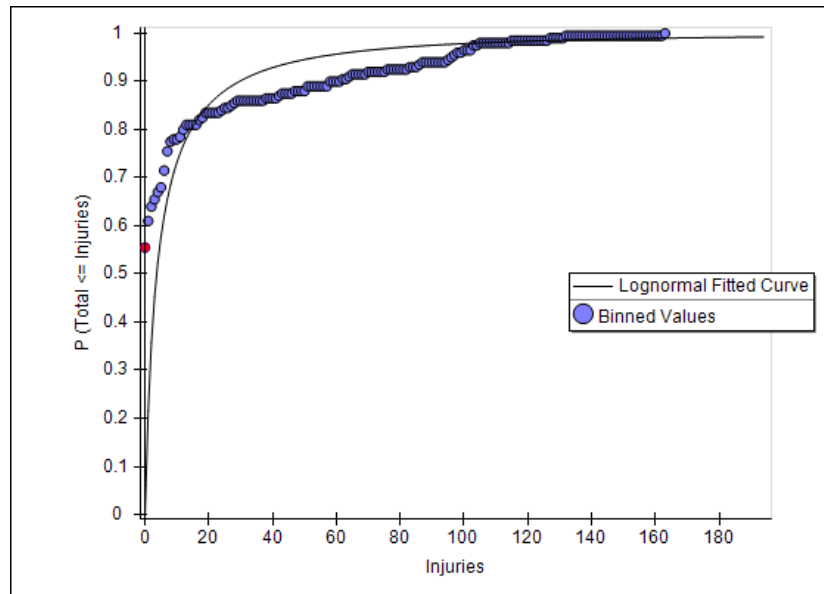
Στο Σχήμα 4.24. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον αριθμό των τραυματισμών για την Ένταση 1. Στους τραυματισμούς προσμετρούνται αυτοί για τους οποίους απαιτείται έλεγχος από γιατρό ή ακόμη και νοσηλεία. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η πιθανότητα να μην υπάρξουν τραυματισμοί είναι πολύ υψηλή. Αυτό σημαίνει ότι, στατιστικά, όσες φορές το κτίριο θα δονείται από έναν σεισμό με μέγιστη φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1) \approx 0,6g$ οι χρήστες του κτιρίου δεν θα κινδυνεύουν από τραυματισμούς. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά είναι αρκετά μικρή. Αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά σίγουρο πως δεν θα υπάρξει μεγάλος αριθμός τραυματισμών.

Στο Σχήμα 4.25. παρατίθεται η καμπύλη επιτελεστικότητας για τον αριθμό των τραυματισμών για την Ένταση 2. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η πιθανότητα να μην υπάρξουν τραυματισμοί είναι πολύ υψηλή αν και σαφώς χαμηλότερη από αυτή της Έντασης 1. Αυτό σημαίνει ότι, στατιστικά, όσες φορές το κτίριο θα δονείται από έναν σεισμό με μέγιστη φασματική επιτάχυνση $S_d(T_1) \approx 1,2g$ οι χρήστες του κτιρίου δεν θα κινδυνεύουν από τραυματισμούς. Επίσης από την μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η διασπορά είναι αρκετά μικρή. Αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά σίγουρο πως δεν θα υπάρξει μεγάλος αριθμός τραυματισμών.

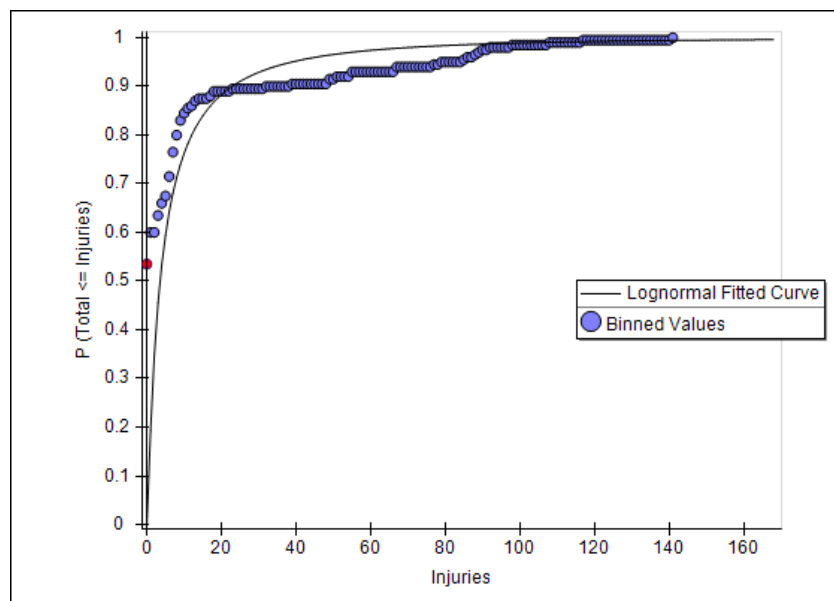
Το Σχήμα 4.26. δείχνει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης αριθμού τραυματισμών για τις Εντάσεις 1&2. Παρατηρείται ότι η πιθανότητα και για τις δύο εντάσεις μειώνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό όσο αυξάνεται ο αριθμός των τραυματισμών. Αυτό σημαίνει πως το κτίριο προσφέρει επαρκή προστασία στους χρήστες του. Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης για την Ένταση 1 είναι μεγαλύτερη από αυτή για την Ένταση 2. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ πιο πιθανό μέσα σε έναν χρόνο να εμφανιστεί ένας σεισμός με την Ένταση 1 από ότι ένας σεισμός με την Ένταση 2. Από αυτές τις καμπύλες προκύπτει ο μέσος αριθμός τραυματισμών ανά χρόνο, ο οποίος είναι 0,063 τραυματισμοί τον χρόνο.

Στο Σχήμα 4.27. και στο Σχήμα 4.28. παρουσιάζονται τρισδιάστατες καμπύλες πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού τραυματισμών. Η πρώτη είναι αστάθμιστη ενώ η δεύτερη είναι προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής της

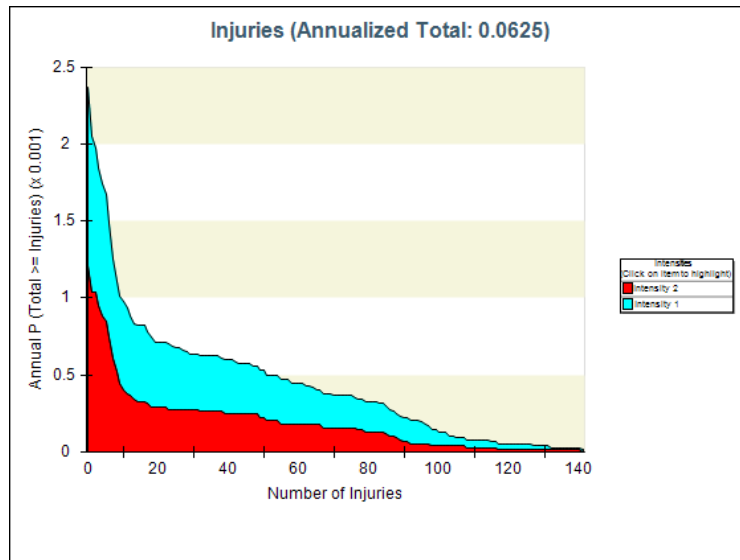
κατασκευής. Οι καμπύλες αυτές δείχνουν την διακύμανση τις πιθανότητας μη υπέρβασης αριθμού τραυματισμών για Εντάσεις ανάμεσα στην 1 και στην 2.



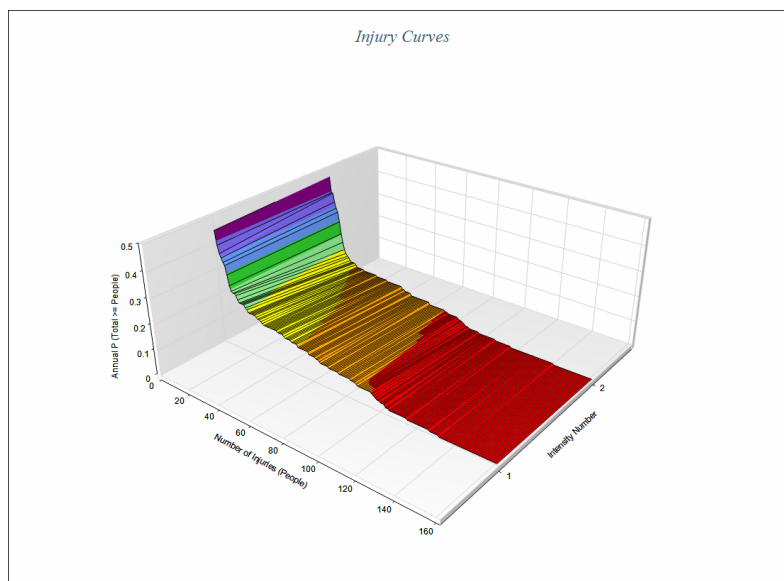
Σχήμα 4.24: Καμπύλη επιτελεστικότητας τραυματισμών για την Ένταση 1.



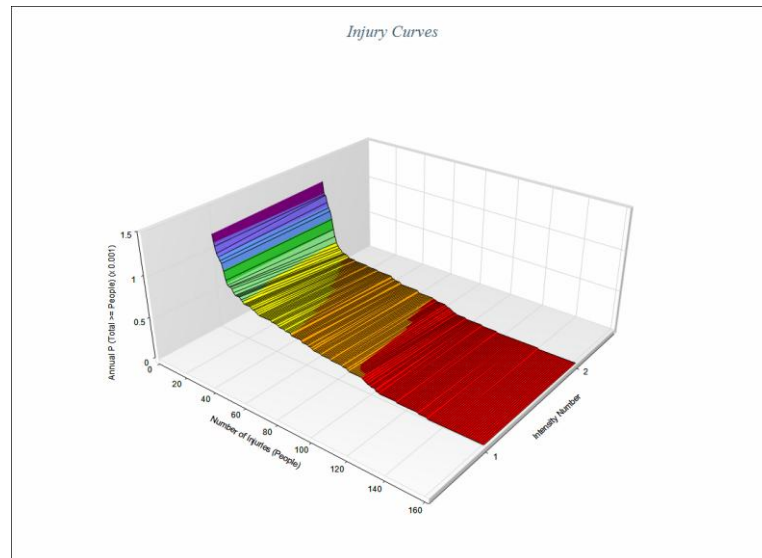
Σχήμα 4.25: Καμπύλη επιτελεστικότητας τραυματισμών για την Ένταση 2.



Σχήμα 4.26: Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης τραυματισμών ανά προσομοίωση.

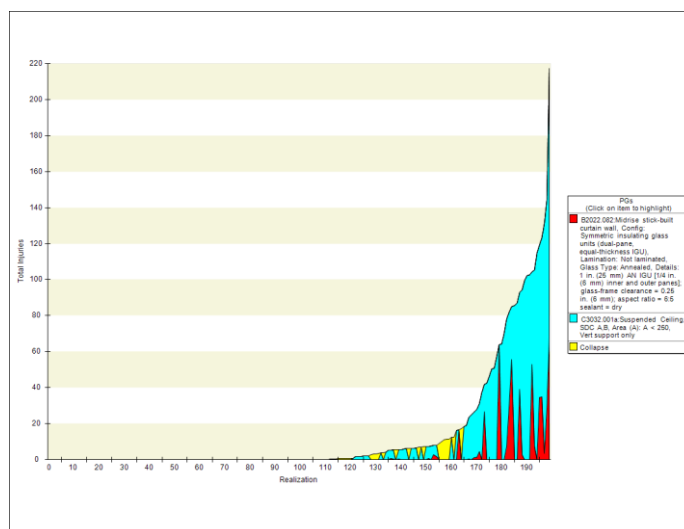


Σχήμα 4.27: Μη προσαρμοσμένη καμπύλη επιτελεστικότητα για τραυματισμών για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2.

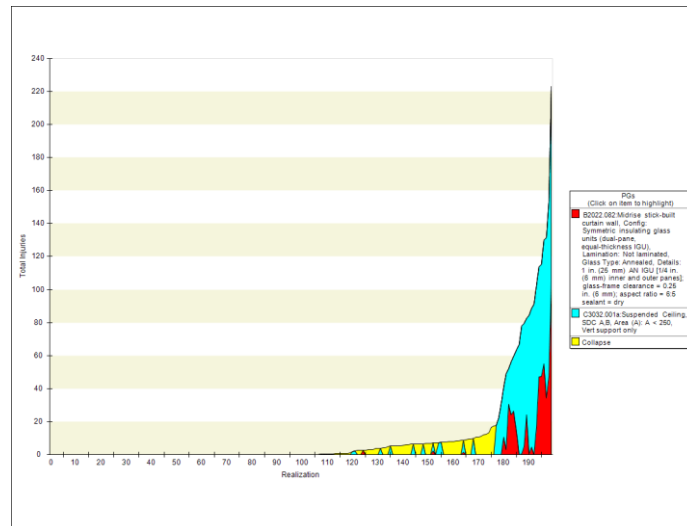


Σχήμα 4.28: Καμπύλη επιτελεστικότητας τραυματισμών για τιμές έντασης ανάμεσα στην Ένταση 1 και 2 προσαρμοσμένη στην καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας.

Στο Σχήμα 4.29. παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε ομάδας τρωτότητας στο συνολικό αριθμό τραυματισμών ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 1. Παρατηρείται ότι για τον τραυματισμό των χρηστών είναι υπεύθυνες μόνο δύο ομάδες στοιχείων του κτιρίου: η ψευδοροφή και οι υαλοπίνακες των όψεων. Ο τρίτος λόγος τραυματισμών είναι από την κατάρρευση του κτιρίου, αλλά αυτό ευθύνεται για μικρό ποσοστό τους. Με πολύ μεγάλη διαφορά η πιο συχνή αιτία τραυματισμού και αυτή στην οποία οφείλονται οι περισσότεροι είναι η πτώση της ψευδοροφής. Στο Σχήμα 4.30. παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε ομάδας τρωτότητας στο συνολικό αριθμό τραυματισμών ανά προσομοίωση και σε αύξουσα σειρά για την Ένταση 2. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά για την Ένταση 1 με την μόνη διαφορά να είναι ότι προκαλούνται περισσότεροι τραυματισμοί λόγω κατάρρευσης του κτιρίου.



Σχήμα 4.29: Ο αριθμός τραυματισμών λόγω βλάβης σε στοιχείο ανά στοιχείο ανά προσομοίωση για την Ένταση 1.



Σχήμα 4.30: Ο αριθμός τραυματισμών λόγω βλάβης σε στοιχείο ανά στοιχείο ανά προσομοίωση για την Ένταση 2.

5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτίμηση της επιτελεστικότητας του κτιρίου. Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του κτιρίου γίνεται σε 4 κατηγορίες: κόστος επισκευής, χρόνος επισκευής, απώλειες και χαρακτηρισμός του κτιρίου ως μη ασφαλές. Επίσης υπολογίστηκαν η μέση ετήσια πιθανότητα κατάρρευσης, η μέση ετήσια πιθανότητα το κτίριο να χαρακτηριστεί ως μη ασφαλές και η μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας λόγω μεγάλων μετατοπίσεων. Οι τιμές τους είναι $P_c = 1.11 \times 10^{-3}$, $P_{UP} = 2.6 \times 10^{-3}$ και $P_{rd} = 4.4 \times 10^{-4}$. Και οι τρεις τιμές θεωρούνται ικανοποιητικές για το κτίριο.

Αναφορικά με το κόστος επισκευής, αυτό όταν εξεταστεί ανά ένταση σεισμού τότε φαίνεται εξαιρετικά υψηλό. Ωστόσο και οι δύο εντάσεις σεισμών οι οποίες εξετάστηκαν ήταν αρκετά υψηλές και δύσκολο να εμφανιστούν σε ένα κτίριο σαν αυτό. Αυτό συμβαίνει διότι τα ψηλά μεταλλικά κτίρια έχουν μεγάλες ιδιοπεριόδους οι οποίες συνήθως δεν περιέχονται στο φασματικό περιεχόμενο των τυπικών σεισμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα κτίρια αυτά να μην εμφανίζουν τόσο μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι ενώ το μέσο ετήσιο κόστος όταν είναι αστάθμιστο είναι εξαιρετικά υψηλό, αφού γίνει στάθμιση με την καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας για το κτίριο το μέσο ετήσιο κόστος επισκευών γίνεται περίπου 25.000\$, το οποίο είναι ικανοποιητικό.

Παρατηρείται επίσης ότι την μεγαλύτερη συνεισφορά στο κόστος επισκευής την έχουν τα πλαίσια με χιαστί συνδέσμους, η ψευδοροφή και το περιμετρικό στηθαίο του δώματος. Αν ο μελετητής επιθυμεί να μειώσει το κόστος κατασκευής μπορεί να επιλέξει να χρησιμοποιήσει στην ψευδοροφή και εγκάρσιες εξασφαλίσεις, προκειμένου να εμφανίζονται λιγότερες βλάβες στην κατασκευή. Αυτό βέβαια αυξάνει το κόστος κατασκευής και το κόστος αντικατάστασης ανά μονάδα. Για το περιμετρικό στηθαίο, μπορεί να επιλεγεί είτε κάποιο με μεγαλύτερες αντοχές είτε κάποιο με μικρότερο κόστος αντικατάστασης. Στηθαίο από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από αλουμινένια κιγκλιδώματα είναι εύλογες εναλλακτικές.

Αναφορικά με τον χρόνο επισκευής του κτιρίου, στις περισσότερες προσομοιώσεις το κτίριο χαρακτηρίζεται ως μη επισκευάσιμο με αποτέλεσμα στις περισσότερες από αυτές ο χρόνος επισκευής να είναι ίσος με τον χρόνο αντικατάστασης του κτιρίου. Ωστόσο και πάλι, λόγω της μεγάλης ιδιοπεριόδου του, όταν τα αποτελέσματα σταθμίζονται βάση της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας για την κατασκευή ο μέσος ετήσιος χρόνος επισκευών προκύπτει 0,66 εβδομάδες, δηλαδή περίπου 4,5 μέρες.

Την μεγαλύτερη συνεισφορά στον χρόνο επισκευής της κατασκευής την έχουν και πάλι η ψευδοροφή, οι χιαστί σύνδεσμοι και το στηθαίο στο δώμα. Δεδομένου ότι δημιουργείται πρόβλημα και λόγω του χρόνου που χρειάζεται να αντικατασταθούν είναι προφανές ότι θα πρέπει να γίνει κάποια άλλη επιλογή. Οι χιαστί σύνδεσμοι είναι λογικό να έχουν υψηλό κόστος αντικατάστασης και αρκετό χρόνο επισκευής γιατί η λειτουργικότητά τους ως δομικά στοιχεία έγκειται στο ότι καταστρέφουν ενέργεια με το να παραμορφώνονται έντονα. Η χρήση τους μπορεί να έχει χρηματικό κόστος και κόστος σε χρόνο αλλά έχει και πολλά άλλα παράπλευρα πλεονεκτήματα.

Αναφορικά με τις απώλειες, στις περισσότερες προσομοιώσεις δεν υπήρχαν ούτε θάνατοι ούτε τραυματισμοί, παρά το γεγονός ότι η κατασκευή κατέρρεε σε πολλές από αυτές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην χρήση του κτιρίου. Το κτίριο, ως κτίριο γραφείων

μένει άδειο για πάρα πολλές ώρες της μέρας και πρακτικά άδειο σε όλη την διάρκεια των Σαββατοκύριακων. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα να γίνει ένας σεισμός όταν δεν υπάρχει κανείς στο κτίριο είναι υψηλή, το οποίο μεταφράζεται και στον χαμηλό ετήσιο αριθμό θανάτων και τραυματισμών. Ο ετήσιος αριθμός θανάτων υπολογίστηκε ίσος με 5×10^{-2} και ο ετήσιος αριθμός τραυματισμών υπολογίστηκε ίσος με $6,2 \times 10^{-2}$.

Η πιθανότητα να χαρακτηριστεί το κτίριο ως μη ασφαλές είναι σχεδόν 100% και για τις δύο εντάσεις σεισμικής διέγερσης που εξετάζονται. Αυτό όπως προαναφέρθηκε εξισορροπείται από την πολύ χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης που έχουν οι σεισμοί αυτής έντασης για ένα τέτοιο κτίριο. Για την ένταση 1 το κτίριο είναι πιο πιθανό, και με μεγάλη διαφορά, να κριθεί ως μη ασφαλές λόγω επισκευών που χρειάζεται να γίνουν στο στηθαίο στο δώμα. Αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα διότι η μόνη περιοχή που θα κριθεί μη ασφαλής είναι το δώμα, το οποίο σημαίνει πως όλο το υπόλοιπο κτίριο θα μπορεί να χρησιμοποιείται κανονικά. Ωστόσο, αυτή είναι η τρίτη κατηγορία στην οποία η απόδοση της συγκεκριμένης ομάδα τρωτότητας δεν είναι η επιθυμητή. Ο μελετητής θα έπρεπε να σκεφτεί πολύ σοβαρά να κάνει κάποια άλλη επιλογή για το στηθαίο. Για την ένταση 2, το στηθαίο έχει και πάλι μεγάλη συμβολή αλλά την μεγαλύτερη συμβολή την έχει η κατάρρευση του κτιρίου. Αυτό όμως είναι αναμενόμενο για μια σεισμικές δονήσεις με τόσο μεγάλη ένταση και το πρόβλημα αντισταθμίζεται από την χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων δονήσεων.

6 Βιβλιογραφία

1. EAK2000 (2001). «Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000». Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
2. ASCE/SEI 31-03 (2003). "Seismic Evaluation of Existing Buildings". American Society of Civil Engineers (ASCE).
3. ASCE/SEI 41-06 (2007). "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings". American Society of Civil Engineers (ASCE).
4. FEMA P-58 (2014a). "Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 - Methodology". Federal Emergency Management Agency (FEMA).
5. FEMA P-58 (2014b). "Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 2 - Implementation". Federal Emergency Management Agency (FEMA).
6. FEMA 273 (1997). "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings". Federal Emergency Management Agency (FEMA).
7. FEMA 349 (2000). "Action Plan for Performance Based Seismic Design". Federal Emergency Management Agency (FEMA).
8. FEMA 356 (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". Federal Emergency Management Agency (FEMA).
9. FEMA 455 (2006). "Handbook for Rapid Visual Screening of Buildings to Evaluate Terrorism Risks". Federal Emergency Management Agency (FEMA).

Παράρτημα Α. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης

Πίνακας Α.1: Μέγιστη ανοιγμένη μετατόπιση κατά την διεύθυνση X για την ένταση 1.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	0.0021	0.0021	0.0054	0.0019	0.0084	0.0024	0.0092	0.0243	0.0010	0.0023
Στάθμη 6	0.0021	0.0022	0.0057	0.0019	0.0018	0.0025	0.0107	0.0252	0.0010	0.0024
Στάθμη 5	0.0022	0.0022	0.0051	0.0020	0.0181	0.0025	0.0097	0.0254	0.0011	0.0024
Στάθμη 4	0.0022	0.0022	0.0057	0.0019	0.0171	0.0025	0.0096	0.0248	0.0011	0.0024
Στάθμη 3	0.0020	0.0021	0.0054	0.0018	0.0152	0.0026	0.0089	0.0229	0.0010	0.0023
Στάθμη 2	0.0018	0.0018	0.0047	0.0015	0.0123	0.0020	0.0075	0.0192	0.0009	0.0020
Στάθμη 1	0.0012	0.0012	0.0032	0.0011	0.0080	0.0014	0.0050	0.0128	0.0006	0.0014

Πίνακας Α.2: Μέγιστη ανοιγμένη μετατόπιση κατά την διεύθυνση Y για την ένταση 1.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	0.0019	0.0017	0.0054	0.0013	0.0141	0.0025	0.0034	0.0166	0.0010	0.0019
Στάθμη 6	0.0019	0.0017	0.0054	0.0013	0.0144	0.0021	0.0065	0.0169	0.0010	0.0019
Στάθμη 5	0.0019	0.0017	0.0054	0.0013	0.0145	0.0020	0.0064	0.0167	0.0010	0.0019
Στάθμη 4	0.0018	0.0017	0.0051	0.0012	0.0143	0.0020	0.0062	0.0161	0.0009	0.0018
Στάθμη 3	0.0016	0.0016	0.0047	0.0011	0.0136	0.0018	0.0058	0.0148	0.0009	0.0017
Στάθμη 2	0.0014	0.0014	0.0040	0.0010	0.0122	0.0016	0.0050	0.0143	0.0008	0.0014
Στάθμη 1	0.0010	0.0011	0.0029	0.0008	0.0097	0.0013	0.0037	0.0091	0.0006	0.0011

Πίνακας Α.3: ΔΜέγιστη ανοιγμένη μετατόπιση κατά την διεύθυνση X για την ένταση 2.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	0,0041	0,0042	0,0109	0,0038	0,0359	0,0048	0,0185	0,0487	0,0020	0,0045
Στάθμη 6	0,0043	0,0044	0,0113	0,0039	0,0366	0,0050	0,0192	0,0503	0,0021	0,0047
Στάθμη 5	0,0044	0,0045	0,0116	0,0039	0,0361	0,0051	0,0195	0,0569	0,0021	0,0048
Στάθμη 4	0,0043	0,0044	0,0115	0,0039	0,0342	0,0050	0,0191	0,0496	0,0021	0,0048
Στάθμη 3	0,0041	0,0042	0,0108	0,0036	0,0304	0,0047	0,0179	0,0458	0,0020	0,0046
Στάθμη 2	0,0035	0,0036	0,0093	0,0030	0,0246	0,0039	0,0150	0,0385	0,0017	0,0040
Στάθμη 1	0,0025	0,0025	0,0063	0,0020	0,0160	0,0027	0,0100	0,0256	0,0012	0,0027

Πίνακας Α.4: Μέγιστη ανοιγμένη μετατόπιση κατά την διεύθυνση Y για την ένταση 2.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	0,0038	0,0034	0,0108	0,0026	0,0281	0,0040	0,0127	0,0331	0,0020	0,0037
Στάθμη 6	0,0038	0,0035	0,109	0,0025	0,0288	0,0041	0,0129	0,0337	0,0020	0,0038
Στάθμη 5	0,0038	0,0034	0,0107	0,0025	0,029	0,0041	0,0129	0,0335	0,0020	0,0037
Στάθμη 4	0,0039	0,0033	0,0103	0,0025	0,0294	0,0039	0,0124	0,0322	0,0020	0,0036
Στάθμη 3	0,0033	0,0030	0,0094	0,0023	0,0271	0,0036	0,0115	0,0296	0,0018	0,0033
Στάθμη 2	0,0028	0,0028	0,0081	0,0020	0,024	0,0032	0,0099	0,0252	0,0016	0,0029
Στάθμη 1	0,0021	0,0021	0,0058	0,0015	0,0195	0,0025	0,0073	0,0181	0,0012	0,0022

Πίνακας Α.5: Μέγιστη επιτάχυνση (σε g) κατά την διεύθυνση X για την ένταση 1.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	1,84	1,95	7,76	1,77	25,61	2,68	6,96	24,45	0,92	1,84
Στάθμη 6	1,67	1,81	6,17	1,39	20,45	2,22	6,19	20,31	0,82	1,73
Στάθμη 5	1,51	1,64	4,71	1,23	14,09	1,82	5,87	15,19	0,70	1,59
Στάθμη 4	1,30	1,41	4,88	1,01	6,65	1,52	5,12	12,71	0,61	1,42
Στάθμη 3	1,05	1,11	4,90	0,76	7,76	1,18	4,19	10,53	0,54	1,22
Στάθμη 2	0,76	0,77	3,60	0,65	6,38	0,99	2,74	8,93	0,49	1,01
Στάθμη 1	0,50	0,68	3,02	0,67	5,14	1,01	1,99	9,41	0,55	0,89
Έδαφος	0,47	0,66	2,27	0,66	6,43	1,05	1,63	10,06	0,42	0,89

Πίνακας Α.6: Μέγιστη επιτάχυνση (σε g) κατά την διεύθυνση Y για την ένταση 1.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	2,11	1,97	7,09	1,26	15,76	2,43	7,33	17,42	1,35	1,80
Στάθμη 6	1,79	1,73	5,05	1,12	12,73	2,12	5,90	15,59	1,18	1,59
Στάθμη 5	1,43	1,50	3,78	0,97	13,35	1,93	4,68	12,99	1,00	1,37
Στάθμη 4	1,05	1,30	3,52	0,80	12,81	1,72	3,84	12,78	0,82	1,11
Στάθμη 3	0,79	1,10	3,42	0,63	10,71	1,52	2,82	13,06	0,64	0,83
Στάθμη 2	0,59	0,90	3,32	0,54	12,68	1,33	2,62	11,20	0,55	0,74
Στάθμη 1	0,54	0,70	1,92	0,52	13,35	1,16	2,49	7,38	0,49	0,70
Έδαφος	0,49	0,57	2,71	0,54	8,49	1,19	2,43	6,51	0,44	0,67

Πίνακας Α.7: Μέγιστη επιτάχυνση (σε g) κατά την διεύθυνση X για την ένταση 2.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	3,68	3,90	15,51	3,56	51,21	5,35	13,92	48,90	1,85	3,69
Στάθμη 6	3,35	3,63	12,35	2,79	40,89	4,43	12,38	40,62	1,65	3,46
Στάθμη 5	3,01	3,29	9,43	2,47	28,19	3,64	11,73	30,39	1,42	3,19
Στάθμη 4	2,60	2,83	9,75	2,03	13,30	3,03	10,46	25,42	1,21	2,84
Στάθμη 3	2,09	2,23	9,79	1,52	76,67	2,36	8,96	21,07	1,08	2,44
Στάθμη 2	1,53	1,54	7,19	1,31	12,77	1,99	5,48	17,85	0,98	2,03
Στάθμη 1	0,99	1,37	6,05	1,34	10,29	2,01	3,98	18,84	0,89	1,78
Έδαφος	0,94	1,32	5,07	1,33	12,86	2,102	3,26	20,12	0,84	1,77

Πίνακας Α.8: Μέγιστη επιτάχυνση (σε g) κατά την διεύθυνση Y για την ένταση 2.

Δόνηση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Στάθμη 7	4,22	3,96	12,96	2,53	31,51	4,86	14,67	34,83	2,71	3,60
Στάθμη 6	3,58	3,46	10,10	2,23	25,47	4,22	11,81	31,18	2,37	3,20
Στάθμη 5	2,90	3,01	7,55	1,94	26,69	3,85	9,36	25,98	2,00	2,74
Στάθμη 4	2,41	2,60	7,03	1,61	25,62	3,44	7,69	25,57	1,64	2,22
Στάθμη 3	1,58	2,20	6,85	1,26	21,42	3,03	5,64	26,12	1,29	1,66
Στάθμη 2	1,19	1,80	6,65	1,09	25,36	2,65	5,24	22,39	1,10	1,47
Στάθμη 1	1,08	1,41	6,33	1,04	26,71	2,31	4,99	14,75	0,99	1,39
Έδαφος	0,98	1,13	5,41	1,07	16,99	2,39	4,87	13,14	0,93	1,34

Παράρτημα Β. Σχέδια



