

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ  
ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

---

ΤΗΣ

ΑΣΠΑΣΙΑΣ ΦΕΛΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών και θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν σε αυτή την προσπάθεια.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Μιχαήλ Φραγκιαδάκη, για την ουσιαστική και συνεχή καθοδήγηση του, όπως και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας .

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Αλίκη και Ηρακλή, για την έμπρακτη στήριξη και ενθάρρυνση τους σε όλα τα σχολικά και φοιτητικά μου χρόνια, και κυρίως στον αδερφό μου Θάνο, που πάντα μου δίνει κίνητρο να συνεχίσω.

Ολοκληρώνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες μου, για την κατανόηση και την συμπαράσταση τους και κυρίως την Έλενα, για την πολύτιμη στήριξη της σε όλη τη φοιτητική μας ζωή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται σε παγκόσμια κλίμακα, έντονο ενδιαφέρον για κατανόηση της συμπεριφοράς των κατασκευών όταν υποβληθούν σε σεισμική δόνηση. Η αβεβαιότητα η οποία καθιστά την πρόβλεψη μελλοντικών σεισμών αδύνατη, αποτελεί μια σημαντική δυσχέρεια στην ανάπτυξη προσομοιώσεων που θα περιγράψουν με ακρίβεια τις συνέπειες μιας μελλοντικής ισχυρής σεισμικής δόνησης στα κτίρια μιας περιοχής. Ως εκ τούτου, καταβάλλονται προσπάθειες, για να αναπτυχθούν προηγμένα μοντέλα προσομοίωσης για τον πιθανοτικό προσδιορισμό μετασεισμικών βλαβών. Σημαντική πτυχή στη διαδικασία εκτίμησης της επιτελεστικότητας των κατασκευών, αποτελεί η εκτίμηση των βλαβών και του κόστους αποκατάστασης των κατασκευών σε σεισμό, στοιχεία απαραίτητα για την καλύτερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς με τρόπο κατανοητό ακόμη και από μη μηχανικούς.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η εξέλιξη της μεθοδολογίας για αξιολόγηση των σεισμικών βλαβών σε συνάρτηση με την παράμετρο του κόστους μετασεισμικής αποκατάστασης των κτιρίων. Παράλληλα, αναπτύσσεται λογισμικό, βασισμένο στη διασύνδεση του πλαισίου εκτίμησης σεισμικών βλαβών το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center σε συνδυασμό με άλλα πιθανοτικά μοντέλα εκτίμησης στατιστικών στοιχείων (μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo), με γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς (Matlab). Μέσω της διαδικασίας αυτής, παρέχεται πλήρης εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός κτιρίου έξι ορόφων, από οπλισμένο σκυρόδεμα για διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης που μπορεί να απαντηθούν σε συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο. Οι γεωμετρικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων της κατασκευής, συνδυάζονται με τα αποτελέσματα της στατικής απόκρισης της κατασκευής κατά την υποβολή της σε στατική μη γραμμική ανάλυση Pushover. Μέσω της εξαγωγής των αντιστοιχούντων πιθανοτικών κατανομών και της αναπαραγωγής των κατάλληλων καμπυλών τρωτότητας γίνεται προσομοίωση όλων των πιθανών σεναρίων βλαβών.

Αποτέλεσμα των αριθμητικών αυτών υπολογισμών, αποτελεί ο υπολογισμός του κόστους αποκατάστασης ανά στοιχείο, ομάδα στοιχείων, όροφο και κτίριο σε διάφορα επίπεδα έντασης. Συνεκτιμώντας την επιστημική αβεβαιότητα στις χρησιμοποιούμενες τιμές,

επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός όχι μόνο της κεντρικής τιμής αλλά και της διασποράς του ζητούμενου κόστους επισκευής με τελικό αποτέλεσμα την εξαγωγή της καμπύλης πιθανότητας υπέρβασης του συνολικού κόστους κατασκευής για κάθε δυνατή τιμή σεισμικής έντασης στην υπό μελέτη περιοχή.

Συνεπώς, παρέχεται η δυνατότητα σε μηχανικούς και εργολάβους, να δημιουργήσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη σεισμική συμπεριφορά ενός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, η οποία γίνεται εύκολα κατανοητή από μη μηχανικούς ιδιοκτήτες, πελάτες ή μετόχους. Στο σύνολό της, πρόκειται για μια πρακτική και χρήσιμη μέθοδο για Σεισμική Μηχανική βάσει Επιτελεστικότητας η οποία μπορεί εύκολα να αποτελέσει τη βάση νέων λογισμικών δομικής ανάλυσης.

## **ABSTRACT**

In recent years, intense interest is observed worldwide for comprehending the behaviour of structures under seismic excitation. The uncertainty that makes the forecast of future earthquakes impossible constitutes an important hindrance in the development of simulations which will precisely describe the consequences of a future powerful earthquake on the buildings in a specified area. Consequently, engineers have long strived for improvements, in order to develop advanced simulation models for probabilistic post-earthquake damage assessment. An important aspect in the building performance assessment process is the estimation of the losses and the calculation of post-earthquake rehabilitation cost. This information is essential for the better understanding of seismic behaviour even by non-engineers.

Subject of this thesis, is the development of a methodology for the integrated and automated seismic damage assessment and cost estimating for post-earthquake building rehabilitation. The methodology relies on the development of software based on the integration of tools currently available to the Architectural, Engineering and Construction industry, a relational database management system and construction management tools within the framework for seismic damage assessment developed by the Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, in combination with other probabilistic statistical assessment models (Monte Carlo simulation method), with fourth generation programming language (Matlab). This process provides a full assessment of the behaviour of a reinforced concrete six storey building, subjected to various levels of seismic intensity that can be answered in a particular seismic scenario. The geometrical properties of the structural elements of construction are combined with the results of the static response of the structure, resulting from the static nonlinear Pushover analysis. Through the combination of the extracted probabilistic distributions with the appropriate vulnerability curves, all possible damage scenarios are simulated.

These numerical calculations provide the repair cost estimation per element, element group, story and building at different intensity levels. Considering the epistemic uncertainty in the unit prices, the complete repair cost distribution is determined rather than just its mean value

and dispersion, and ultimately it is provided the loss curve that defines the possibility of exceedance of the total repair cost for all possible seismic intensity levels in the study area.

Therefore, it allows engineers and contractors, to create a complete picture of the seismic behaviour of a reinforced concrete building, which is easily understood by non-engineers, owners, customers or shareholders. On the whole, it is a practical and useful method for Performance-Based Earthquake Engineering that can easily form the basis for new structural analysis software.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>I</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>VI</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	<b>4</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>11</b>
3.1.1 Αποτελέσματα σεισμών σε τεχνικά έργα.....	11
3.1.2 Ορισμός σεισμικής τρωτότητας .....	12
<b>3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ</b> .....	<b>14</b>
3.2.1 Τυχαίες Μεταβλητές .....	14
3.2.2 Πιθανοτικές κατανομές .....	16
3.2.3 Θεώρημα ολικής πιθανότητας.....	19
<b>3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ</b> .....	<b>20</b>
3.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι .....	20
3.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι .....	22
3.3.3 Μέθοδοι βάσει εμπειρογνομώνων .....	24
3.3.4 Υβριδικές μέθοδοι.....	24

<b>3.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>26</b>
3.4.1 Μέτρα έντασης (Intensity Measures) .....	26
3.4.2 Επίπεδα Βλαβών (Damage States) .....	27
3.4.3 Παράμετροι σεισμικής απαίτησης (Engineering Demand Parameter) .....	28
<b>3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>30</b>
3.5.1 Πιθανολογικό μοντέλο σεισμικής τρωτότητας .....	30
3.5.2 Εφαρμογή ανάλυσης σεισμικής τρωτότητας - Κατασκευή καμπυλών τρωτότητας ..	31
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΛΑΒΩΝ .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ .....</b>	<b>49</b>
<b>4.6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ .....</b>	<b>52</b>
<b>4.7 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ MONTE CARLO .....</b>	<b>55</b>
4.7.1 Δημιουργία δείγματος κατά την Τυπική Κανονική Κατανομή .....	55
4.7.2 Δημιουργία δείγματος κατά την Λογαριθμοκανονική Κατανομή .....	56
<b>4.8 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....</b>	<b>56</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>61</b>
5.1.1 Γενική περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης.....	61
5.1.2 Στατική ανάλυση Pushover σε Πρόγραμμα Seismostruct .....	63
<b>5.2 ΑΡΧΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....</b>	<b>66</b>
5.2.1 Hazard Analysis .....	66
5.2.2 Structural Analysis .....	67
5.2.3 Damage Analysis.....	71



5.2.4 Loss Analysis .....	77
<b>5.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΒΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....</b>	<b>81</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>91</b>
6.1 Σύνοψη μεθοδολογίας και αποτελεσμάτων .....	91
6.2 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα.....	92
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>94</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη σεισμική μηχανική έχουν οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση στους κώδικες αντισεισμικού σχεδιασμού, που μεταφράζεται σε καλύτερη απόκριση των σύγχρονα σχεδιασμένων κτιρίων σε σύγκριση με υφιστάμενες κατασκευές, όταν υποβάλλονται σε σεισμικές διεγέρσεις. Ωστόσο, ακόμη παρουσιάζονται σημαντικές ελλείψεις στον παρών αντισεισμικό κώδικα, καθώς η τρέχουσα πρακτική στηρίζεται σε απλοποιημένες μεθόδους και κριτήρια ανάλυσης και σχεδιασμού, χωρίς να υπάρχει σαφής ποσοτικοποίηση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών. Σύγχρονες μέθοδοι σχεδιασμού (Krawinkler and Miranda (2004), Aslani and Miranda (2005), Mitrani – Reiser and Beck (2007)) που έχουν πλέον αρχίσει να καθιερώνονται, ενσωματώνουν την ποσοτικοποίηση της σεισμικής απόκρισης στη μελέτη τους χρησιμοποιώντας ως δείκτη την οικονομική απώλεια, ώστε να μετρήσουν πόσο επιτυχής είναι η απόκριση του δομικού συστήματος, όταν υποβάλλεται σε σεισμική εδαφική κίνηση.

Η προστασία της ανθρώπινης ζωής σε έναν επικείμενο σεισμό παραμένει βασική ανησυχία της κοινωνίας και των μηχανικών, και αποτελεί το κύριο μέλημα του αντισεισμικού κανονισμού. Όμως, υπάρχουν και άλλοι κίνδυνοι συνδεδεμένοι με τη εμφάνιση ενός σεισμού, που δεν λαμβάνονται υπόψη στον υφιστάμενο αντισεισμικό κώδικα και συνδέονται με τη διαχείριση της οικονομικής απώλειας, όπως και με τη διατήρηση της λειτουργικότητας του κτιρίου μετά την σεισμική καταπόνηση. Η κλασική φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού επιτρέπει το σχεδιασμό κατασκευών που μπορούν να αντέξουν σε λιγότερο ή περισσότερο συχνούς σεισμούς παρέχοντας την επιθυμητή επιτελεστικότητα, όπως για παράδειγμα, να παραμένουν πλήρως λειτουργικές για χαμηλής έντασης συνήθεις σεισμούς, να παρουσιάζουν χαμηλό επίπεδο βλαβών για λιγότερο συχνούς σεισμούς και να απαιτούν σοβαρές επισκευές ή και αντικατάσταση (αν κρίνεται οικονομικά πιο συμφέρουσα από την επισκευή) για ισχυρότερους σεισμούς, χωρίς όμως να καταρρέουν. Ωστόσο, υπάρχει πλήθος σεισμικών γεγονότων στα οποία οι κατασκευές συμμορφώθηκαν με τους υπάρχοντες κανονισμούς, έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλος αριθμός θυμάτων ή τραυματισμών, όμως οι απαιτήσεις για την επιδιόρθωση και αναστήλωση των κατασκευών ώστε να επαναφερθούν στην πρότερα κατάσταση ήταν ιδιαίτερα υψηλές, αφού παρουσιάστηκαν εκτεταμένες

βλάβες, με αποτέλεσμα την σημαντική οικονομική επιβάρυνση των ιδιοκτητών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, οι σεισμοί του Northridge (1994) και του Kobe(1995), όπου παρόλο που οι κατασκευές πληρούσαν τις κανονιστικές διατάξεις του αντισεισμικού σχεδιασμού, το επίπεδο των βλαβών και ακολούθως το κόστος επανακατασκευής ήταν ιδιαίτερα υψηλό. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως οι ανάγκες και οι απαιτήσεις των ιδιοκτητών των κατασκευών πρέπει να αποτελούν σημαντικό γνώμονα στην ανάπτυξη των σύγχρονων μοντέλων σχεδιασμού. Η τρέχουσα πρακτική περιορίζει τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ μηχανικών και ιδιοκτητών, με αριθμούς και όρους που δεν γίνονται εύκολα αντιληπτοί από τους μη μηχανικούς. Συνεπώς, δυσχεραίνεται η επικοινωνία μεταξύ τους και δεν υπάρχει σωστή αξιολόγηση των διαφοροποιήσεων μεταξύ των εναλλακτικών τρόπων σχεδιασμού και της πραγματικής απόδοσης σε σεισμό.

Οι πρώτες μελέτες που εκπονήθηκαν (Vision 2000, FEMA 273& FEMA 356) χρησιμοποίησαν στοιχεία από σεισμικά γεγονότα στα οποία παρουσιάστηκαν σημαντικές βλάβες, οικονομικές επιπτώσεις και απώλεια της λειτουργικότητας των κτιρίων, ώστε να παρέχουν καθοδήγηση για την επίτευξη διαφορετικών επιπέδων απόκρισης των κατασκευών και να ευνοήσουν την σύμπραξη των στόχων μηχανικών και ιδιοκτητών. Καθώς, όμως, αποτέλεσαν τα πρώτα βήματα εκσυγχρονισμού των αντισεισμικών μεθόδων σχεδιασμού, στηρίχθηκαν σε ποιοτική περιγραφή, με αποτέλεσμα να μην έχουν ορισθεί σαφώς τα επίπεδα βλάβης και να στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στην υποκειμενικότητα του χρήστη-μηχανικού.

Σε πιο σύγχρονες έρευνες (PEER PBEE) έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες αναβάθμισης των μελετών πρώτης γενιάς, προκειμένου να υπάρξει σαφής υπολογισμός των δεικτών απόδοσης του συστήματος (όπως είναι οι οικονομικές απώλειες, το διάστημα μη λειτουργίας του κτιρίου και οι ανθρώπινες απώλειες) σε όρους που είναι κατανοητοί και ενδιαφέρουν άμεσα τους ιδιοκτήτες των κτιρίων. Σε αυτές τις μεθόδους, χρησιμοποιείται μια πιθανοτική προσέγγιση που στηρίζεται τόσο στο σεισμικό κίνδυνο όσο και στην απόκριση του δομικού συστήματος, ώστε να γίνει η εκτίμηση των βλαβών και των επιπτώσεων τους στη ζωή των ενδιαφερόμενων με ρεαλιστικούς δομικούς, οικονομικούς και χρονικούς όρους. Καθίσταται, λοιπόν σαφές ότι προκειμένου να υπάρξει σημαντική πρόοδος στο αντικείμενο απαιτείται η δημιουργία κτιριακών μοντέλων πληροφοριών που θα επικεντρώνονται στην ποσοτικοποίηση των κριτηρίων απόκρισης των κατασκευών, αξιοποιώντας τα σύγχρονα προγράμματα εξομοίωσης των κατασκευών και την ανάπτυξη κατάλληλων λογισμικών, τα οποία θα αποτελούν κύριο εργαλείο στην επικοινωνία μεταξύ μηχανικών και ιδιοκτητών.

## **1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Οι σύγχρονες μέθοδοι προσέγγισης του αντισεισμικού σχεδιασμού οδηγούν στη σύνδεση της μελέτης του μηχανικού με τις απαιτήσεις των ιδιοκτητών, με κοινό στόχο την αύξηση της απόδοσης της συμπεριφοράς των κτιρίων σε σεισμική καταπόνηση. Αυτή η διαδικασία εμπεριέχει την περιγραφή των δεικτών που σχετίζονται με τον αντισεισμικό σχεδιασμό, σε ρεαλιστικούς όρους που αφορούν άμεσα τους ιδιοκτήτες. Οι όροι αυτοί, αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης, και μπορεί να είναι το κόστος επισκευής του κτιρίου, η χρονική διάρκεια που απαιτείται για να λάβει χώρα η αποκατάσταση της κατασκευής ή οι ανθρώπινες απώλειες.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιαστεί μια ποσοτική προσέγγιση για την εκτίμηση των βλαβών και του κόστους αποκατάστασης των κτιρίων, όταν αυτά έχουν υποβληθεί σε σεισμική καταπόνηση. Έχει δοθεί έμφαση στην υιοθέτηση μιας απλοποιημένης προσέγγισης για την εκτίμηση της απώλειας, με ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης υπολογιστικής διαδικασίας και με άμεση σύνδεση της απόκρισης της κατασκευής σε σεισμική διέγερση με τις οικονομικές απώλειες, δείκτης που αποτελεί την κύρια μεταβλητή απόφασης που χρησιμοποιείται. Πιο αναλυτικά, το μοντέλο που υιοθετήθηκε στην παρούσα μελέτη, αναπτύσσεται για ένα εξάωροφο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα για 100 επίπεδα σεισμικής έντασης. Συγκεκριμένα, αξιοποιούνται τα αποτελέσματα από την επιβολή στατικής ανάλυσης Pushover, μέσω της χρήσης κατάλληλου λογισμικού (Seismostruct), και μέσω πιθανοτικών κατανομών και της δημιουργίας των κατάλληλων καμπυλών τρωτότητας γίνεται εκτίμηση των πιθανοτήτων τα στοιχεία-μέλη να υποστούν βλάβες που θα απαιτήσουν επισκευή ή αντικατάσταση.

Η συγκεκριμένη διαδικασία, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιεί ένα πιθανοτικό πλαίσιο που ενσωματώνει τα αποτελέσματα του σεισμικού κινδύνου και της προσομοίωσης της απόκρισης της κατασκευής, προκειμένου να εκτιμήσει το επίπεδο των βλαβών και την οικονομική απώλεια, που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια ενός τυχαίου σεισμού. Σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση των ζημιών και τον υπολογισμό του κόστους διαδραματίζουν οι αβεβαιότητες των οποίων η διαδικασία περιορισμού παραμένει ιδιαίτερα περίπλοκη, χρονοβόρα, ίσως και αδύνατη. Εκτός των άλλων, μικρές παρεκκλίσεις από τις αναμενόμενες διαφοροποιούν τα υπολογιζόμενα κόστη, γεγονός που υπογραμμίζει πως απαιτείται να δοθεί μεγάλη προσοχή κατά την πραγματοποίηση της διαδικασίας. Η τελική πιθανοτική κατανομή κόστους που προκύπτει είναι σε συνάρτηση αυτών των παραμέτρων

και είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη, αφού προσφέρει μια καλή εκτίμηση του αναμενόμενου κόστους και της μετασεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Η αξία της αναδεικνύεται ακόμα περισσότερο σε περιπτώσεις κτιρίων, που φιλοξενούν μεγάλο αριθμό ανθρώπων και εργασιών, αφού τυχόν βλάβες έχουν ως συνέπεια την εκκένωση τους, με άμεσες και σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις στον ιδιοκτήτη τους.

### **1.3 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση παλαιότερων μελετών, που αφορούν την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου και τις μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την διασύνδεση του σεισμικού κινδύνου με το οικονομικό κόστος. Επιπρόσθετα, συνοψίζεται το πεδίο εφαρμογής και οι περιορισμοί που παρουσιάστηκαν στις προγενέστερες μελέτες, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ασαφειών και κενών στην έρευνα, που όμως αποτέλεσαν κίνητρο για την περαιτέρω έρευνα του αντικειμένου.

Στο *Κεφάλαιο 3* αναλύεται η έννοια της σεισμικής τρωτότητας (fragility), που αποτελεί κομβικό σημείο στην εφαρμογή της παρούσας μεθοδολογίας. Γίνεται αναφορά στις επιπτώσεις της σεισμικής διέγερσης στις τεχνικές κατασκευές, ώστε να γίνει κατανοητή η ανάγκη για κατηγοριοποίηση των ζημιών σε επίπεδα βλαβών και στη συνέχεια παρουσιάζεται η έννοια της τρωτότητας των κατασκευών και πως είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν μέσω της ανάπτυξης συναρτήσεων τρωτότητας που παρουσιάζονται με τη μορφή των καμπυλών τρωτότητας (*fragility curves*).

Στο *Κεφάλαιο 4* αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη παρούσα μελέτη, με αναλυτική παρουσίαση κάθε βήματος της διαδικασίας. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται τα στάδια σεισμικού κινδύνου (hazard analysis), απόκρισης της κατασκευής (structural analysis), βλαβών (damage analysis) και απωλειών - κόστους (loss analysis), όπως και οι παράμετροι που επηρεάζουν κάθε στάδιο.

Στο *Κεφάλαιο 5* γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας εκτίμησης ζημιών και κόστους επισκευής, όπως έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, μέσω λογισμικού το οποίο έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς και συγκεκριμένα Matlab. Επίσης, παρέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την προσομοίωση του εξάωροφου κτιρίου μέσω του προγράμματος Seismostruct, όπως και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή στατικής ανάλυσης Pushover. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναλυτική παρουσίαση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

των αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν από τις αναλύσεις για κάθε βήμα της μεθοδολογίας για σενάριο σεισμού το οποίο αντιστοιχεί στο αναμενόμενο επίπεδο σεισμικής έντασης για την περιοχή μελέτης, και τα οποία αφορούν τις πιθανές ζημιές και το συνολικό κόστος επισκευής της κατασκευής, καθώς και των μεμονωμένων δομικών στοιχείων, σύμφωνα με την κατηγορία στοιχείων.

Στο *Κεφάλαιο 6* γίνεται σύνοψη της μεθοδολογίας και των κυριότερων συμπερασμάτων τα οποία προκύπτουν μέσα από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της διαδικασίας. Επίσης, επισημαίνονται τα πεδία που προσφέρονται για μελλοντική έρευνα η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί για να βελτιωθεί η παρούσα, όπως και να προχωρήσει σε πιο εξελιγμένο στάδιο.

Στο τέλος παρουσιάζεται η βιβλιογραφία η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στην έρευνα αυτή και τα Παραρτήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

Η εκτίμηση απωλειών αποτελεί ένα αντικείμενο που έχει απασχολήσει πολλούς μελετητές τις τελευταίες δεκαετίες, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων μεθοδολογιών, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριους τύπους: μεθοδολογίες που αφορούν την ανά τόπους εκτίμηση απωλειών (regional loss estimation) και μεθοδολογίες που αφορούν την εκτίμηση απωλειών κατά βάση του κτιρίου (building specific loss estimation). Ωστόσο, οι μεθοδολογίες που αφορούν την ανά τόπους εκτίμηση δεν εμπεριέχουν την απαραίτητη ακρίβεια που απαιτείται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό με βάση τις στάθμες επιτελεστικότητας (performance based earthquake engineering), ο οποίος είναι ο κυρίαρχος τρόπος αντισεισμικού σχεδιασμού, επομένως στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση θα δοθεί έμφαση στην αναφορά των μεθοδολογιών που αφορούν την εκτίμηση απωλειών κατά βάση του κτιρίου (building specific loss estimation). Η επιλογή των μεθοδολογιών που παρατίθενται στη συνέχεια, έχει γίνει με κριτήριο τη συνάφεια του περιεχομένου τους με την παρούσα διπλωματική εργασία και όχι με βάση την βαρύτητα των μεθόδων.

Μία από τις πρώτες μεθοδολογίες εκτίμησης απωλειών κατά βάση του κτιρίου που αναπτύχθηκε από τους μελετητές Scholl et al.(1982), περιείχε βελτιώσεις σε προϋπάρχουσες διαδικασίες τόσο εμπειρικών όσο και θεωρητικών μεθόδων για τον υπολογισμό των απωλειών. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης εμπεριείχε μια εις βάθος ανάλυση για τον τρόπο ανάπτυξης συναρτήσεων βλαβών (damage functions) που αφορούν κάθε επιμέρους δομικό μέλος για διαφορετικού τύπου κατασκευές που βασιζόταν σε πειραματικά δεδομένα. Για την δημιουργία των θεωρητικών σχέσεων μεταξύ σεισμικής κίνησης και βλαβών, χρησιμοποιήθηκαν μόνο ελαστικές αναλύσεις σε συνδυασμό με αναλύσεις φάσματος απόκρισης με σκοπό τον προσδιορισμό της στατικής απόκρισης της κατασκευής σε επίπεδο ορόφου για κάθε υπό μελέτη κτίριο. Αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου είναι η δημιουργία σχέσεων που εκτιμούν τις βλάβες σε συνάρτηση με έναν συντελεστή βλάβης, που αποτελεί έναν δείκτη μεταξύ του κόστους επισκευής που προκύπτει λόγω του σεισμού και της αξίας ανακατασκευής του κτιρίου.

Σε συνδυασμό με τη μέθοδο που προτάθηκε από τους Scholl et al. η οποία βασιζόταν στην εκτίμηση των βλαβών σε επίπεδο δομικού στοιχείου, αναπτύχθηκε μια νέα μεθοδολογία που αφορούσε ουρανοξύστες (high rise buildings) από τους μελετητές Kutsu et al.(1982). Ειδικότερα, οι μελετητές άντλησαν τα απαραίτητα δεδομένα από πειραματικά στοιχεία δομικών μελών που βρίσκονται συνήθως σε κτίρια μεγάλου ύψους (high-rise buildings) και

καθόρισαν με στατιστικό τρόπο τις τιμές ροπής και μεταβλητότητας για την υπέρβαση συγκεκριμένων επιπέδων βλάβης για τα υπό μελέτη δομικά στοιχεία. Παράλληλα, εμπειρείχε τον στατιστικό προσδιορισμό του κόστους επισκευής αυτών των δομικών μελών, ο οποίος βασίστηκε σε στοιχεία κόστους που είχαν δημοσιευθεί. Τη συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποίησαν ως δεδομένο οι μελετητές Scholl et al.(1982), ώστε να δημιουργήσουν τις θεωρητικές σχέσεις σεισμικής κίνησης-βλαβών για τρεις συγκεκριμένες κατασκευές (το κτίριο Τραπέζης της Καλιφόρνια (Bank of California Building) και δύο ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις) χρησιμοποιώντας στοιχειώδεις ελαστικές αναλύσεις προκειμένου να υπολογίσουν τις παραμέτρους της στατικής απόκρισης της κατασκευής. Ωστόσο, αυτές οι σχέσεις έχουν περιορισμένο εύρος εφαρμογής, καθώς οι αναλύσεις στις οποίες βασίζονται δεν συνυπολογίζουν την επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών και τις απώλειες εξαιτίας της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

Μια ακόμα μεθοδολογία εκτίμησης απωλειών για την αποκατάσταση κτιρίου, σε όρους χρηματικού κόστους, που λάμβανε υπόψη την απόκριση της κατασκευής για συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο θεμελιώθηκε από τους Gunturi και Shah(1993). Πιο συγκεκριμένα, τα συστατικά μέρη της κατασκευής τα οποία κατηγοριοποιήθηκαν σε δομικά μέλη (structural), μη-δομικά μέλη (nonstructural) και υλικό περιεχόμενο (contents elements), υφίστανται βλάβες οι οποίες είναι δυνατόν να υπολογιστούν σε συνάρτηση με στατικές παραμέτρους απόκρισης που αφορούν κάθε όροφο του κτιρίου και έχουν αποκτηθεί από την εκτέλεση μη-γραμμικών δυναμικών αναλύσεων με σταδιακά αυξανόμενη εδαφική επιτάχυνση. Οι παράμετροι απόκρισης συσχετίζονται με τα επίπεδα βλάβης για κάθε μέλος και το τελικό μέγεθος της χρηματικής απώλειας προέκυψε από το άθροισμα κάθε επιμέρους κόστους ανά όροφο.

Μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά ένα πρόβλημα εκτίμησης της σεισμικής απώλειας αποτελεί η μεταβλητότητα που αφορά τις εδαφικές κινήσεις, γεγονός που απασχόλησε τους μελετητές Singhal και Kiremidjan (1996). Η μελέτη τους αποτέλεσε μια συστηματική προσέγγιση στην ανάπτυξη σχέσεων συσχέτισης της εδαφικής κίνησης και των σεισμικών απωλειών, η οποία επιτεύχθηκε μέσω της υποβολής ενός κτιρίου σε μια σειρά προσομοιώσεων εδαφικής κίνησης και της εξαγωγής της πιθανοτικής απόκρισης της κατασκευής χρησιμοποιώντας την μέθοδο Monte Carlo. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη, αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες για δύο τύπους σχέσεων βλάβης-εδαφικής κίνησης, όπως επίσης δημιουργήθηκαν καμπύλες τρωτότητας ανά τύπο κτιρίου και μητρώα πιθανότητας βλάβης (damage probability matrices-DPMs). Κάθε τύπος σχέσης προέβλεπε την πιθανότητα



υπέρβασης συγκεκριμένων επιπέδων βλάβης, τα οποία ορίζονταν μέσω ενός πλήθους δεικτών βλάβης, που ποσοτικοποιούσαν το επίπεδο βλάβης του κάθε κτιρίου ως τον λόγο μεταξύ κόστους επισκευής και ολικού κόστους ανακατασκευής του κτιρίου. Για τον προσδιορισμό των σεισμικών γεγονότων παράγονταν τεχνητές εδαφικές κινήσεις μέσω υπολογιστικών μοντέλων που περιείχαν το σταθερό μοντέλο κατά Gauss. Η εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας της κατασκευής εκφραζόταν μέσω των καμπυλών τρωτότητας, που χρησιμοποιούσαν την RMS επιτάχυνση και τη φασματική επιτάχυνση για συγκεκριμένο εύρος ιδιοπεριόδων των κατασκευών για να προσδιορίσουν την εδαφική κίνηση κατά το σεισμικό γεγονός, ενώ ως εδαφική παράμετρος απαραίτητη για τη δημιουργία των DPMS είχε επιλεγεί η μακροσεισμική ένταση MMI( Modified Mercalli Intensity).

Επίσης, αναπτύχθηκε από το National Institute of Building Sciences (NIBS) και το Federal Emergency Management Agency (FEMA) μια μεθοδολογία γνωστή ως HAZUS. Πρόκειται για μια σύνθετη συλλογή στοιχείων που λειτουργούν παράλληλα με σκοπό να εκτιμηθούν οι ανθρώπινες απώλειες, η χρονική διάρκεια αποκατάστασης της κατασκευής καθώς και οι οικονομικές επιπτώσεις σε μια περιοχή εξαιτίας ενός σεισμικού σεναρίου. Η μεθοδολογία του HAZUS περιγράφεται λεπτομερώς σε αντίστοιχο εγχειρίδιο και περιλαμβάνει ειδικό ομώνυμο λογισμικό με αρχείο για τις απαραίτητες συναρτήσεις βλαβών και απωλειών. Ένα από τα κύρια μέρη της μεθόδου αποτελεί η εκτίμηση της πιθανότητας για κάθε στάδιο βλάβης, που αφορά τόσο δομικές (structural) όσο και μη δομικές (nonstructural) βλάβες της κατασκευής, ενώ στις συνέχειες αυτές οι πιθανοτικές κατανομές συνδυάζονται με άλλα στοιχεία της κατασκευής, ώστε να υπολογιστούν οι ζητούμενες απώλειες. Τα κτίρια τα οποία είναι σε θέση να λάβουν μέρος στη μελέτη έχουν ομαδοποιηθεί ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής (ύψος, δομικό υλικό κ.λπ.) και αξιολογούνται για ποικίλους συνδυασμούς μεταξύ επιπέδου αντισεισμικού σχεδιασμού και απόκρισης.

Στις επόμενες προσπάθειες εξέλιξης του αντικείμενου της εκτίμησης σεισμικής απωλειών εντάσσεται το πλήρως πιθανοτικό μοντέλο των Porter και Kiremidjan (2001). Η συγκεκριμένη μελέτη ενσωματώνει στη μεθοδολογία της τις αβεβαιότητες που συνδέονται με την εκτίμηση της βλάβης της κατασκευής και του αντίστοιχου κόστους επισκευής, παραμέτρους που δεν είχαν ληφθεί υπόψη σε προγενέστερες μελέτες, αν και ούτε στη παρούσα μελέτη γίνεται προσπάθεια για τον λεπτομερή προσδιορισμό της πιθανότητας κατάρρευσης της κατασκευής. Για την πρόβλεψη των σχέσεων μεταξύ αναμενόμενου κόστους και σεισμικής έντασης (γνωστές ως καμπύλες τρωτότητας) που επιβαρύνουν την κάθε κατασκευή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης Monte Carlo. Παράλληλα, οι

εδαφικές κινήσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας και ήταν απαραίτητες για τον προσδιορισμό της στατικής απόκρισης της κατασκευής παρήχθησαν μέσω του μοντέλου προσομοίωσης ARMA. Πιο συγκεκριμένα, αναλόγως της παραμέτρου στατικής απόκρισης που ενδιέφερε τη μελέτη χρησιμοποιούνταν εξίσου γραμμικές και μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις για τον υπολογισμό των μεγίστων τιμών απόκρισης. Στη συνέχεια, εκτελούνταν μια απλοποιημένη ντετερμινιστική ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να διευκρινιστούν οι «πηγές» αβεβαιοτήτων που ασκούν την μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα του υπολογισμού των απωλειών, από πού προσδιορίστηκε ότι η αβεβαιότητα που συνδέεται με την ένταση της εδαφικής κίνησης ήταν αυτή που είχε καθοριστικό ρόλο.

Στο πλαίσιο της προσπάθειας να δημιουργηθούν μέθοδοι οι οποίες βασίζονταν στην απόκριση της κατασκευής που εκπονήθηκε από το κέντρο μελετών Pacific Earthquake Engineering Research (PEER), οι μελετητές Aslani και Miranda (2005) δημιούργησαν μια μεθοδολογία που βασιζόταν στην απόκριση κάθε δομικού μέλους και ενσωμάτωσαν την επιρροή της κατάστασης ολικής κατάρρευσης της κατασκευής στην εκτίμηση του χρηματικού κόστους, μέσω του υπολογισμού της πιθανότητας κατάρρευσης της κατασκευής σε σταδιακά αυξανόμενα επίπεδα έντασης. Ειδικότερα, και οι δύο περιπτώσεις απώλειας αντοχής της κατασκευής, δηλαδή η πλευρική κατάρρευση και η έλλειψη ικανότητας ανάληψης κατακόρυφων φορτίων, ενσωματώθηκαν μέσω ολοκληρωμάτων στη μελέτη υπολογισμού της αναμενόμενης τιμής του κόστους, παρόλο που η περίπτωση της κατεδάφισης του κτιρίου εξαιτίας των σημαντικών παραμενουσών σχετικών ανηγμένων μετακινήσεων δεν συμπεριλήφθηκε. Το πιο σημαντικό εργαλείο της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι περιλαμβάνει τεχνικές οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα να κατανεμηθούν οι απώλειες στα επιμέρους μέλη, προκειμένου να αναγνωριστούν τα πιο κρίσιμα μέλη που συνεισφέρουν σημαντικά στον προσδιορισμό του τελικού κόστους. Επιπρόσθετα, ανέπτυξαν μια μέθοδο που ενσωμάτωνε την επίδραση της συσχέτισης των απωλειών κάθε συστατικού μέρους της κατασκευής στον σαφή υπολογισμό της διασποράς των απωλειών, γεγονός που απουσίαζε από προηγούμενες σχετικές μελέτες όπου γινόταν προσεγγιστική εκτίμηση των συντελεστών συσχέτισης. Για να είναι εφικτή η χρήση αυτών των τεχνικών, ήταν απαραίτητη η δημιουργία των συναρτήσεων ευθραυστότητας των μελών, οι οποίες εφαρμόστηκαν σε ένα υπάρχον επτάώροφο μη-πλάστιμο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Σε συνδυασμό με τη μεθοδολογία που ανέπτυξαν οι Aslani και Miranda (2005), οι μελετητές Mitrani-Reiser και Beck (2007) ενίσχυσαν με την μελέτη τους την προσπάθεια δημιουργίας

μεθόδων εκτίμησης απωλειών του PEER. Η συγκεκριμένη μελέτη ανέπτυξε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα, το οποίο ονομάζεται MATLAB Damage and Loss Analysis (MDLA), το οποίο ενίσχυσε το πλαίσιο της μεθοδολογίας του PEER με απαραίτητα εργαλεία υπολογισμού των απωλειών. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια, για να αξιολογηθεί η απόκριση πλάστιμων κτιρίων αποκλειστικά τεσσάρων ορόφων από οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο είχαν κατασκευαστεί σύμφωνα με τις σύγχρονες αντισεισμικές διατάξεις. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των απωλειών και του αναμενόμενου κόστους ως συνάρτηση της έντασης της εδαφικής κίνησης για πολλαπλά σενάρια με σκοπό να εξεταστεί πώς επηρεάζουν οι κατασκευαστικές παράμετροι τις χρηματικές απώλειες. Τα δομικά στοιχεία που έλαβαν μέρος στην μελέτη ήταν δοκοί, υποστυλώματα, κόμβοι δοκού-υποστυλώματος, κόμβοι πλάκας-δοκού, διαχωριστικοί τοίχοι και ανελκυστήρες.

Επιπλέον, το πλαίσιο ανάλυσης των κατασκευών με κεντρικό άξονα την απόκριση των κατασκευών ενίσχυσαν οι μελετητές Zareian και Krawinkler (2006), καθώς ανέπτυξαν μια απλοποιημένη έκδοση της μεθοδολογίας που υιοθετείται κατά το PEER. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια ημι-γραφική προσέγγιση προκειμένου να υπολογίσει τις οικονομικές απώλειες ανά συγκεκριμένη κατασκευή, υπολογίζοντας τα χρηματικά κόστη που αφορούν συγκεκριμένες ομάδες δομικών μελών, αντί της διαδικασίας υπολογισμού που είχε ακολουθηθεί σε όλες τις προηγούμενες μελέτες και ανέλυε κάθε επιμέρους συστατικό μέρος της κατασκευής. Η ομαδοποίηση των μελών της κατασκευής γίνεται είτε σε επίπεδο ορόφου είτε σε επίπεδο κατασκευής, με στόχο να δημιουργηθούν υποσυστήματα μελών, στα οποία εντάσσονται στοιχεία που μπορούν να εκφραστούν με κοινή παράμετρο απόκρισης. Παρόλο, που η παρούσα μελέτη παρείχε ένα πλαίσιο ανάλυσης λιγότερο απαιτητικό υπολογιστικά και πιο φιλικό προς τον χρήστη, οι ενδιαφερόμενοι χρήστες έπρεπε να κάνουν υποθέσεις για τις σχέσεις που συνδέουν τη στατική απόκριση της κατασκευής και της οικονομικής απώλειας προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση της κατασκευής, εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας σε οικονομικά δεδομένα και στοιχεία μετασεισμικών βλαβών των κατασκευών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

---

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 3.1.1 Αποτελέσματα σεισμών σε τεχνικά έργα

Τα αποτελέσματα των σεισμών στα κτίρια και στις τεχνικές κατασκευές γενικότερα παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό αλλά και κοινωνικό ενδιαφέρον, εφόσον οι σεισμικές βλάβες μπορούν να προκαλέσουν το θάνατο και τον τραυματισμό ανθρώπων, καθώς και μεγάλες υλικές ζημιές. Οι άμεσες σεισμικές βλάβες οφείλονται στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων από το έδαφος στα θεμέλια, στους τοίχους και στη στέγη των κτιρίων. Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής κίνησης είναι μικρότερη της οριζόντιας με αποτέλεσμα να προκαλεί μικρότερες βλάβες από τη δεύτερη, αφού ένας από τους παράγοντες που μειώνει την επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας είναι η αντίδραση του βάρους της κατασκευής, ενώ δεν υπάρχει αντίστοιχη δύναμη που να αντιδρά στο αποτέλεσμα της οριζόντιας συνιστώσας της σεισμικής κίνησης. Άμεση συνέπεια της δράσης της κατακόρυφης συνιστώσας είναι η ελάττωση της τριβής και της ολίσθησης αντικειμένων που συγκρατούνται με την τριβή (κεραμίδια, καπνοδόχοι). Ακόμη, η κατακόρυφη συνιστώσα είναι η αιτία γένεσης τάσεων συμπίεσης στα κτήρια, με συνέπεια τη θραύση των πάνω γωνιών αυτών και την πτώση της στέγης.

Από την άλλη πλευρά, η οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής κίνησης έχει ως αποτέλεσμα τη διατμητική παραμόρφωση των διαφόρων στοιχείων ενός κτηρίου, με συνέπεια τη δημιουργία τάσεων συμπίεσης και τάσεων εφελκυσμού, που έχουν διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, με άμεση συνέπεια πολλές φορές να παρατηρούνται στα κτίρια διαρρήξεις που σχηματίζουν ορθές γωνίες μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της οριζόντιας συνιστώσας της σεισμικής κίνησης εξαρτώνται από τη διεύθυνση της κίνησης αυτής σε σχέση με τον προσανατολισμό της κατασκευής.

Τα άμεσα αποτελέσματα των σεισμών στα κτίρια θεωρούνταν παλιότερα ότι εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη σεισμική επιτάχυνση. Έτσι, οι συνηθισμένες οικοδομές κατασκευάζονταν έτσι ώστε να αντέχουν σε σεισμικές δονήσεις που αντιστοιχούν σε επιταχύνσεις μέχρι ορισμένη τιμή. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της σεισμικής κίνησης δεν εξαρτάται μόνο από τη σεισμική επιτάχυνση, ακόμη κι αν η κίνηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί

απλή αρμονική. Για να καθοριστούν με ακρίβεια τα αποτελέσματα μιας σεισμικής δόνησης, χρειάζεται και η γνώση της διάρκειας της κίνησης και της συχνότητας των κυμάτων που την αποτελούν, όπως επίσης και τα ιδιαίτερα εδαφικά χαρακτηριστικά που επικρατούν ανά περιοχή. Όλα αυτά συνθέτουν ένα σεισμικό σενάριο άμεσα αλληλένδετο με την καταπόνηση που θα υποστεί η κατασκευή και τις βλάβες που θα προκύψουν κατά την εμφάνιση του σεισμικού γεγονότος. Η σημασία της εκτίμησης αυτών των βλαβών είναι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς επηρεάζει άμεσα το κοινωνικό σύνολο, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών εργαλείων για τον υπολογισμό τους, όπως είναι οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας (fragility functions). Η τρωτότητα των σωμάτων στους σεισμούς εξαρτάται από δύο κύριες παραμέτρους: το μέγεθος τους και την πρωταρχική περίοδο της εδαφικής κίνησης.

### 3.1.2 Ορισμός σεισμικής τρωτότητας

Οι καμπύλες τρωτότητας ενός σώματος ή μίας ολόκληρης κατασκευής αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου τους, καθώς απεικονίζουν την πιθανότητα υπέρβασης μίας καθορισμένης οριακής κατάστασης ικανότητας από την κατασκευή, σε συνάρτηση με την ένταση της εδαφικής κίνησης, η οποία μπορεί να δίνεται ως μία παράμετρος της επιτάχυνσης, της ταχύτητας κτλ.

Ένας ορισμός που μπορεί να δοθεί με μη μηχανικούς όρους για την έννοια της τρωτότητας είναι πως είναι η ιδιότητα που περιγράφει *«πόσο εύκολα θραύεται ή αστοχεί ένα υλικό»*. Πιο συγκεκριμένα, ένας πιο εξειδικευμένος ορισμός που εντάσσεται καλύτερα στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πως σεισμική τρωτότητα (seismic vulnerability) ορίζεται ως μια μαθηματική σχέση που αποτελεί την πιθανοτική έκφραση της αντοχής κάθε δομικού στοιχείου και αντιστοιχίζει την απόκρισή του με διάφορα επίπεδα βλάβης, παράγοντας την πιθανότητα να φτάσει ή να υπερβεί κάθε επίπεδο ζημιάς σε συνάρτηση με μια παράμετρο που συνδέεται με την εδαφική κίνηση. Εναλλακτικά, μια ισοδύναμη έκφραση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι πως οι συνάρτησεις τρωτότητας αντιπροσωπεύουν την συνάρτηση αθροιστικής κατανομής πιθανότητας της ικανότητας αντίστασης της κατασκευής ως προς ένα ανεπιθύμητο οριακό επίπεδο βλάβης, όπου η ικανότητα μετράται σε όρους της εδαφικής σεισμικής διέγερσης κατά την οποία υπερβαίνεται το επίπεδο βλάβης.

Για την εκτίμηση των βλαβών που παθαίνουν τα μέλη ενός κτιρίου μετά από ένα σεισμικό γεγονός, δημιουργούνται πιθανοτικές κατανομές χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα προηγούμενων μελετητών και απόψεις ειδικών. Στην παγκόσμια βιβλιογραφία, για την

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της τρωτότητας αναλόγως του επιπέδου βλάβης στο οποίο βρίσκεται κάθε δομικό στοιχείο της κατασκευής, χρησιμοποιούνται κατά κανόνα λογαριθμοκανονικές κατανομές (π.χ. Naeim et al. (2006), Goulet et al (2007)). Οι καμπύλες οι οποίες προκύπτουν καλούνται καμπύλες σεισμικής τρωτότητας και κατέχουν σημαντική θέση στη σεισμική μηχανική και συγκεκριμένα στη διαδικασία προσομοίωσης του σεισμικού κινδύνου αφού συμβάλλουν στην εκτίμηση του βαθμού βλάβης μιας κατασκευής βάσει μιας δεδομένης σεισμικής διέγερσης ορισμένης έντασης.

## **3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ**

Η έννοια της τρωτότητας των κατασκευών συνδέεται άμεσα με τη θεωρία πιθανοτήτων και την έννοια των τυχαίων μεταβλητών, με αποτέλεσμα η παράθεση των σχετικών όρων καθίσταται αναγκαία, ώστε να είναι εφικτή η κατανοητή περιγραφή της.

### **3.2.1 Τυχαίες Μεταβλητές**

Έστω ότι σε κάθε σημείο ενός δειγματοχώρου αντιστοιχεί ένας αριθμός δημιουργώντας έτσι μια συνάρτηση ορισμένη στο δειγματοχώρο. Η συνάρτηση αυτή καλείται τυχαία μεταβλητή (random variable) ή στοχαστική συνάρτηση και συμβολίζεται με ένα κεφαλαίο γράμμα π.χ.  $X$  ή  $Y$ . Γενικά, τυχαία καλείται η μεταβλητή της οποίας η ακριβής τιμή είναι άγνωστη, αλλά η κατανομή γνωστή (Menun, 2002).

Αυτές οι μεταβλητές μπορούν να είναι διακριτές (discrete) ή συνεχείς (continuous). Διακριτές καλούνται οι τυχαίες μεταβλητές οι οποίες μπορούν να λάβουν πεπερασμένο ή άπειρο αριθμήσιμο πλήθος τιμών, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των σεισμών κατά τη διάρκεια ενός έτους, καθώς μπορεί να λάβει τιμές οι οποίες μπορούν να απεικονιστούν σε υποσύνολο των φυσικών αριθμών  $N$ , π.χ. 0, 1, 2 κ.λπ. Συνεχείς καλούνται οι τυχαίες μεταβλητές οι οποίες μπορούν να λάβουν άπειρο μη αριθμήσιμο πλήθος τιμών και αντιπροσωπεύονται με ένα ή περισσότερα διαστήματα στο σύνολο των πραγματικών αριθμών  $R$ , τα οποία η τυχαία μεταβλητή δύναται να λάβει, όπως για παράδειγμα η ένταση ενός σεισμού, καθώς μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή ακέραια και μη, μεταξύ του 0 και του μέγιστου δυνατού μεγέθους για το δεδομένο ρήγμα. Η συνήθης σύμβαση είναι τα κεφαλαία γράμματα να αντιπροσωπεύουν τις τυχαίες μεταβλητές, ενώ τα μικρά γράμματα να αντιπροσωπεύουν τις πιθανές τιμές τις οποίες μπορούν να λάβουν. Στην περίπτωση την οποία μια μεταβλητή λαμβάνει διάφορες διακριτές τιμές, χρησιμοποιούνται δείκτες. Για παράδειγμα, η διακριτή τυχαία μεταβλητή  $X$  μπορεί να λάβει τιμές  $x_1, x_2, \dots, x_N$ .

Για καλύτερη κατανόηση, θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα, το αντικείμενο μελέτης αυτής της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή, η κατάσταση ενός κτιρίου μετά από ένα σεισμό. Έστω ότι η κατάσταση αυτή μπορεί να διακριτοποιηθεί σε πέντε στάθμες (καταστάσεις ζημιάς) ή τιμές: καθόλου ζημιές, ελαφριές ζημιές, μέτριες ζημιές, σοβαρές ζημιές και ολική κατάρρευση.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

Ορίζοντας ως τυχαία μεταβλητή  $X$ , την άγνωστη μετασεισμική κατάσταση του κτιρίου και θεωρώντας ότι με 0 αντιπροσωπεύεται η κατάσταση του κτιρίου όταν δεν έχει πάθει καθόλου ζημιές, 1 όταν έχει πάθει ελαφριές ζημιές, 2 όταν έχει πάθει μέτριες ζημιές, 3 όταν έχει πάθει σοβαρές ζημιές και 4 όταν έχει καταρρεύσει, τότε ως αποτέλεσμα αυτής της αντιστοίχισης, η μεταβλητή  $X$  θεωρείται διακριτή και μπορεί να λάβει τιμές 0, 1, 2, 3 ή 4. Σε αυτή την περίπτωση, η συνθήκη  $X < 4$  αντιπροσωπεύει την κατάσταση στην οποία το κτίριο δεν έχει καταρρεύσει, ενώ η συνθήκη  $X = 0$  αντιπροσωπεύει την κατάσταση στην οποία το κτίριο δεν έχει πάθει καθόλου ζημιές.

Ορίζοντας ως τυχαία μεταβλητή  $Y$ , ένα μέτρο απόκρισης της κατασκευής, για παράδειγμα την ανηγμένη σχετική μετατόπιση ενός ορόφου (interstorey drift), και επιχειρηθεί μέσω αυτού να διαπιστωθεί η άγνωστη μετασεισμική κατάσταση ζημιάς  $X$ , τότε το  $Y$  είναι μια συνεχής μεταβλητή η οποία κυμαίνεται στο διάστημα  $[0, +\infty)$ . Θέτοντας όρια στη συνεχή μεταβλητή  $Y$ , μπορεί να εκτιμηθεί η διακριτή μεταβλητή  $X$ . Για παράδειγμα, η περίπτωση στην οποία για ένα όροφο ισχύει  $Y \leq 2\%$ , μπορεί να αντιστοιχεί στη συνθήκη  $X \leq 1$ , δηλαδή την κατάσταση στην οποία ο συγκεκριμένος όροφος έχει πάθει καθόλου ή ελαφριές ζημιές.



### 3.2.2 Πιθανοτικές κατανομές

Οι πιθανοτικές κατανομές, χρησιμοποιούνται για την έκφραση των πιο πάνω πιθανοτήτων και την καλύτερη κατανόησή τους στις μαθηματικές αναλύσεις (π.χ. Benjamin & Cornell 1970).

➤ *Κατανομές Διακριτών Μεταβλητών*

Μια διακριτή τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται από τη συνάρτηση μάζας πιθανότητας PMF (probability mass function). Έστω  $X$  μια διακριτή τυχαία μεταβλητή, με πιθανές τιμές:  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Για οποιαδήποτε τιμή  $x$ , ισχύει η σχέση 3.1, όπου γενικώς με  $P(A)$  συμβολίζουμε την πιθανότητα του  $A$ .

$$p(x) = \begin{cases} P(X = x_i), & x = x_i, i = 1, 2, \dots, N \\ 0, & x \neq x_i \end{cases} \quad (3.1)$$

Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής πρέπει να ακολουθεί τις συνθήκες οι οποίες περιγράφονται από τις σχέσεις 3.2 και 3.3.

$$0 \leq p_x(x) \leq 1 \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^N p_x(x_i) = 1 \quad (3.3)$$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (ή συνάρτηση πιθανότητας) CDF (cumulative distribution function) μια τυχαίας μεταβλητής  $X$ , είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης της τιμής  $x$  και εκφράζεται με τη σχέση 3.4. Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής CDF είναι μονότονη, αύξουσα και λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ .

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_k \leq x} p_x(x_k) \quad (3.4)$$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής CDF μια τυχαίας μεταβλητής πρέπει να ακολουθεί τις συνθήκες οι οποίες περιγράφονται από τις σχέσεις 3.5, 3.6 και 3.7.

$$F_x(-\infty) = 0 \quad (3.5)$$

$$F_x(\infty) = 1 \quad (3.6)$$

$$P(a \leq X \leq b) = F_x(b) - F_x(a) \quad (3.7)$$

➤ *Κατανομές Συνεχών Μεταβλητών*

Αν η  $X$  είναι μια συνεχής τυχαία μεταβλητή, η πιθανότητα να πάρει η  $X$  μια ορισμένη τιμή είναι γενικά μηδέν. Συνεπώς δεν μπορεί να οριστεί μια συνάρτηση πιθανότητας με τον ίδιο τρόπο, όπως μια διακριτή μεταβλητή. Ο ορισμός της κατανομής πιθανότητας για μια συνεχή τυχαία μεταβλητή προϋποθέτει ότι η  $X$  βρίσκεται μεταξύ δύο διαφορετικών τιμών.

Οι συνεχείς τυχαίες μεταβλητές χαρακτηρίζονται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF (probability density function), η οποία για τις πλέον συνήθεις κατανομές αντιπροσωπεύεται από μια συνεχή καμπύλη πάνω από το πεδίο ορισμού της. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF εκφράζεται με τη σχέση 3.8.

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f_x(x) dx \leq 1, f_x(x) \geq 0 \quad (3.8)$$

Δηλαδή, η πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή να λάβει τιμές μεταξύ του  $x_1$  και του  $x_2$ , ισούται με το εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ του οριζόντιου άξονα, της καμπύλης και των κάθετων ευθειών στις τιμές  $x_1$  και  $x_2$ . Δεδομένης της σχέσης 3.9, προκύπτει η σχέση 3.10 για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF.

$$P(-\infty \leq X \leq +\infty) = 1 \quad (3.9)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x) dx = 1 \quad (3.10)$$

Μια συνεχής τυχαία μεταβλητή, μπορεί να οριστεί με την αθροιστική συνάρτηση κατανομής CDF, όπως αυτή περιγράφεται από τη σχέση 3.11, η οποία δίνει την πιθανότητα μη υπέρβασης μιας τιμής  $x$ .

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_x(u) du \quad (3.11)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής CDF μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής, συσχετίζονται αφού η κλίση της CDF, είναι η PDF, δηλαδή με παραγωγή της CDF, προκύπτει η PDF όπως περιγράφεται από τη σχέση 3.12.

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} F_x(x) \quad (3.12)$$

Επιπλέον, υπάρχει η συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας CCDF (complemental cumulative distribution function), η οποία περιγράφεται από τη σχέση 3.13, και δίνει την πιθανότητα υπέρβασης μιας δεδομένης τιμής  $x$  από την τυχαία μεταβλητή  $X$ .

$$G(x) = P(X > b) = 1 - P(X \leq x) = 1 - CDF \quad (3.13)$$

➤ *Κανονική Κατανομή*

Η κανονική κατανομή καθορίζεται από τη συνάρτηση PDF, η οποία δίνεται από τη σχέση 3.14, όπου  $\mu_x$  και  $\sigma_x$ , η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κατανομής, αντίστοιχα. Χρησιμοποιείται ο συμβολισμός  $X \sim N(\mu_x, \sigma_x)$ , για να δηλώνεται η κανονική τυχαία μεταβλητή  $X$  η οποία έχει μέση τιμή  $\mu_x$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_x$ . Δεν υπάρχει αναλυτική σχέση για τη συνάρτηση CDF της κανονικής κατανομής (π.χ. Menun 2002).

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right], -\infty \leq x \leq +\infty \quad (3.14)$$

Μια ποσότητα η οποία εκφράζεται ως άθροισμα πολλών ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών, μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζεται προσεγγιστικά από την κανονική κατανομή. Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem) το άθροισμα πολλών ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών, καμία από τις οποίες δεν είναι σημαντικά επικρατέστερη έναντι των άλλων, τείνει προς την κανονική κατανομή καθώς ο αριθμός των τυχαίων μεταβλητών στο άθροισμα, ασχέτως των αρχικών τους κατανομών, αυξάνει χωρίς όριο.

➤ *Λογαριθμοκανονική Κατανομή*

Η λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution) είναι η πιθανοτική κατανομή κάθε τυχαίας μεταβλητής της οποίας ο λογάριθμος ακολουθεί κανονική κατανομή. Εάν θεωρήσουμε ως  $X$  μια τυχαία μεταβλητή,  $X \sim N(\mu_x, \sigma_x)$ , τότε η τυχαία μεταβλητή  $Y = \exp(X)$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Παρομοίως, εάν η  $Y$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή, ο δεκαδικός  $\log(Y)$  ή φυσικός λογάριθμος  $\ln(Y)$  αυτής, ακολουθεί κανονική κατανομή (π.χ. Menun, 2002).

Η λογαριθμοκανονική κατανομή της μεταβλητής  $Y$  έχει τη αθροιστική συνάρτηση κατανομής CDF και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις 3.15 και 3.16, αντίστοιχα.

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = \Phi\left(\frac{\ln(y) - \mu_x}{\sigma_x}\right), y \geq 0 \quad (3.15)$$

$$f_Y(y) = \frac{d}{dy} F_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X y} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(y)-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2\right], y \geq 0 \quad (3.16)$$

Η μέση τιμή  $\mu_Y$ , η διάμεση τιμή  $\mu_{50}$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma_Y$  της τυχαίας μεταβλητής  $Y$ , δίνονται από τις σχέσεις 3.17, 3.18 και 3.19, αντίστοιχα.

$$\mu_Y = \exp\left(\mu_X + \frac{\sigma_X^2}{2}\right) \quad (3.17)$$

$$\mu_{50\%} = \exp(\mu_X) \quad (3.18)$$

$$\sigma_Y = \exp\left(\mu_X + \frac{\sigma_X^2}{2}\right) \sqrt{\exp(\sigma_X^2) - 1} \quad (3.19)$$

### 3.2.3 Θεώρημα ολικής πιθανότητας

Έστω  $A_1, A_2, \dots, A_n$  ξένα ανά δύο ενδεχόμενα των οποίων η ένωση ισούται με το  $\Omega$  (δειγματικός χώρος), δηλαδή αποτελούν μια διαμέριση του  $\Omega$ . Αν το  $B$  είναι ένα ενδεχόμενο του  $\Omega$ , θα ισχύει:

$$B = B \cap \left(\bigcup_{k=1}^n A_k\right) = \bigcup_{k=1}^n (B \cap A_k) \quad (3.20)$$

Επομένως, η προσεταιριστική ιδιότητα μας δίνει:

$$P(B) = \sum_{k=1}^n P(B \cap A_k) \quad (3.21)$$

Όμως,  $P(B \cap A_k) = P(B|A_k)P(A_k)$ . Επομένως, παίρνουμε:

$$P(B) = \sum_{k=1}^n P(B|A_k)P(A_k) \quad (3.22)$$

Η σχέση (3.22) ονομάζεται θεώρημα ολικής πιθανότητας και αποτελεί πολύ χρήσιμη σχέση για τον υπολογισμό των καμπυλών τρωτότητας.

### **3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ**

Η κατασκευή των καμπυλών τρωτότητας δεν έχει οριστεί με μία μονοδιάστατη και σαφή διαδικασία ανάλυσης, καθώς κάθε βήμα της διαδικασίας εμπεριέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιοτήτων. Οι αβεβαιότητες οφείλονται στη μεταβλητότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών, στο αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται, στη φύση των υλικών κατασκευής και στον τρόπο με τον οποίο έχουν οριστεί τα επίπεδα βλάβης.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η εξέλιξη των μεθόδων εξαγωγής των καμπυλών τρωτότητας είναι μεγάλη με ιδιαίτερο ενδιαφέρον να επιδεικνύεται από την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής όπου έχουν εκπονηθεί ποικίλες μελέτες που περιλαμβάνουν έτοιμα μοντέλα καμπυλών τρωτότητας (π.χ. HAZUS, FEMA 2003a). Παρόλα αυτά θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν χρησιμοποιούνται αυτοί οι γενικοί τύποι καμπυλών ώστε να περιγραφεί η σεισμική συμπεριφορά της υπό μελέτη κατασκευής ή η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών που καθορίζουν τις καμπύλες. Αυτό καθίσταται απαραίτητο, διότι είναι δυνατόν οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των διαφορετικών χωρών στον τρόπο κατασκευής του κτιρίου να επηρεάσουν σημαντικά τον τρόπο απόκρισης της κατασκευής, παρότι η μελέτη της στηρίζεται στις ίδιες αντισεισμικές διατάξεις.

Οι μέθοδοι αξιολόγησης της σεισμικής τρωτότητας που περιγράφονται στην παρούσα παράγραφο αφορούν μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για το Ευρωπαϊκό πλαίσιο, με έμφαση σε όσες έχουν αναπτυχθεί για τις χώρες της Μεσογείου. Οι μεθοδολογίες αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες: αναλυτικές μέθοδοι, εμπειρικές μέθοδοι, μέθοδοι βάσει εμπειρογνομώνων και υβριδικές μέθοδοι. Στις ακόλουθες υποπαραγράφους παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή κάθε κατηγορίας, εστιάζοντας, όμως, στις αναλυτικές μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν περαιτέρω στην παρούσα εργασία.

#### **3.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι**

Οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την δημιουργία των καμπυλών τρωτότητας εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο προσεγγίζουν το πρόβλημα της σεισμικής τρωτότητας με μηχανικούς όρους, αναπτύσσοντας μια σαφώς ορισμένη σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών της κατασκευής, της απόκρισης της κατασκευής στη σεισμική διέγερση και των βλαβών που προκύπτουν κατά το σεισμικό γεγονός. Πιο συγκεκριμένα, εμπεριέχουν

σαφείς και λεπτομερείς αλγορίθμους αξιολόγησης της σεισμικής τρωτότητας δίνοντας ταυτόχρονα φυσική σημασία στην έννοια της βλάβης της κατασκευής, με συνέπεια να αποτελούν σημαντικό εργαλείο τόσο για την εκπόνηση μελετών της σεισμικής ευαισθησίας των κατασκευών, όσο και για την άμεση βαθμονόμηση χαρακτηριστικών της κατασκευής που αφορούν τη σεισμική επικινδυνότητα. Η δημιουργία των αναλυτικών καμπυλών έχει ως πρωταρχικό βήμα την στατιστική επεξεργασία των στοιχείων της κατανομής της σεισμικής βλάβης, η οποία προέρχεται από την προσομοίωση των κατασκευών σε στατικά μοντέλα υποβαλλόμενα σε σταδιακά αυξανόμενη σεισμική φόρτιση.

Στο πλαίσιο αυτής της προσέγγισης, οι περισσότερες μεθοδολογίες στηρίζονται σε δύο συγκεκριμένες και διακριτές διαδικασίες: τη συσχέτιση μεταξύ της καμπύλης ικανότητας σε όρους επιτάχυνσης ή μετατόπισης και των φασματικών καμπυλών απόκρισης, όπως για παράδειγμα γίνεται με το HAZUS ή με τη μέθοδο N2( FEMA 2003a, Fajfar 2000), και τη συσχέτιση μεταξύ της καμπύλης ικανότητας και των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης (Rossetto & Elnashai, 2005). Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (τρίτο μέρος) τα αποτελέσματα τις σεισμικής δράσης μπορούν να εκτιμηθούν σύμφωνα με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Γραμμική ανάλυση πλευρικής δύναμης (lateral force analysis)
- Γραμμική ανάλυση φασματικής απόκρισης ( modal response spectrum analysis)
- Μη γραμμική στατική ανάλυση (pushover analysis)
- Μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστοριών (non-linear time history dynamic analysis)
- Μέθοδος προσέγγισης μέσω του συντελεστή q (q-factor approach)

Ο κατάλληλος τρόπος εκτίμησης της σεισμικής απόκρισης καθορίζεται από το επίπεδο απαραίτητων πληροφοριών που έχουμε για την κατασκευή (Knowledge Level, KL), όπως αυτό ορίζεται από τον Ευρωκώδικα 8 (EC-8) ως εξής:

- KL1: περιορισμένη γνώση πληροφοριών
- KL2: κανονική γνώση πληροφοριών
- KL3: πλήρης γνώση πληροφοριών

Οι παράμετροι που είναι απαραίτητο να είναι γνωστές ώστε να οριστεί το επίπεδο πληροφοριών (KL) που έχουμε για την κατασκευή είναι: η γεωμετρία της κατασκευής και κατά επέκταση του στατικού συστήματος και των μη-δομικών μελών, που όμως μπορεί να επηρεάσουν την σεισμική απόκριση της κατασκευής, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες,

όπως για παράδειγμα ο οπλισμός και η σύνδεση των διαφραγμάτων και οι μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών.

Η ανάλυση μπορεί να διεξαχθεί είτε για μονοβάθμιο (SDOF) ή για πολυβάθμιο (MDOF) σύστημα. Στην περίπτωση του μονοβαθμίου συστήματος υπάρχει πλήθος μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα η μέθοδος ικανότητας – φάσματος (Capacity-Spectrum), η μέθοδος N2, οι μέθοδοι DBELA, SP-BELA, ενώ στην περίπτωση πολυβαθμίου συστήματος οι πιο κατάλληλες μέθοδοι είναι η μέθοδος Modal Pushover και η προσαρμοσμένη μέθοδος Φάσματος- Ικανότητας (Adaptive Capacity Spectrum Method). Το μοντέλο της κατασκευής είναι απαραίτητο να προσομοιάζει κατά το δυνατόν περισσότερο στην πραγματική κατασκευή, διότι αυτό είναι που επηρεάζει σημαντικά την αξιοπιστία της μεθόδου. Επίσης, είναι δυνατό να υπάρξει διαχωρισμός των αναλυτικών μοντέλων σε δύο υποκατηγορίες, δηλαδή σε μοντέλο με ύπαρξη πλαστικών αρθρώσεων ή σε μοντέλο κατανεμημένης πλαστικότητας, για την πιο ρεαλιστική προσομοίωση του κτιρίου.

Στην περίπτωση της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, το μοντέλο της κατασκευής υποβάλλεται σε καταπόνηση σύμφωνα με τις εδαφικές καταγραφές (επιταχυνσιογραφήματα), μέσω της δυναμικής ανάλυσης των χρονοϊστοριών. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας προκύπτει μια πιο ρεαλιστική ανάλυση, καθώς λαμβάνεται υπόψη η μεταβλητότητα της σεισμικής απόκρισης όπως αυτή παρουσιάζεται σε κάθε καταγραφή ξεχωριστά. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται για τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ότι είναι ευαίσθητη ως προς το πλήθος και τα χαρακτηριστικά των απαραίτητων για την ανάλυση επιταχυνσιογραφημάτων, όπως επίσης ότι ως διαδικασία απαιτεί πιο επίπονους υπολογισμούς για τον μελετητή.

Οι αναλυτικές μέθοδοι, αν και περιλαμβάνουν τη χρήση αριθμητικών και μηχανικών μοντέλων για την αξιολόγηση της απόκρισης των κατασκευών, λαμβάνοντας υπόψη με άμεσο τρόπο τα χαρακτηριστικά του κτιρίου και συνυπολογίζοντας τις αβεβαιότητες που εμπεριέχονται στη διαδικασία ανάλυσης, απαιτούν ένα σημαντικό πλήθος πληροφοριών και επίπονων υπολογισμών που πρέπει να διεξαχθούν, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για τη χρήση τους.

### 3.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Η αξιολόγηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών σε μεγαλύτερη γεωγραφική κλίμακα άρχισε να αναπτύσσεται στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μέσω της εφαρμογής

εμπειρικών μεθόδων οι οποίες αναπτύχθηκαν και βαθμονομήθηκαν αρχικά ως συναρτήσεις της μακροσεισμικής έντασης (Calvi et al. 2006). Αυτό προέκυψε από το γεγονός ότι εκείνη την εποχή οι χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας σε μεγάλη πλειοψηφία είχαν οριστεί με βάση τα μακροσεισμικά αποτελέσματα που ακολουθούσαν το σεισμικό γεγονός και των κλιμάκων έντασης που είχαν συνταχθεί σύμφωνα με αυτά. Συνεπώς, για πολλές δεκαετίες οι εμπειρικές μέθοδοι αποτελούσαν την κύρια πηγή που τροφοδοτούσε με τα απαραίτητα στοιχεία τις αναλύσεις αξιολόγησης σεισμικού κινδύνου, παρόλο που τα στοιχεία της προέρχονταν μόνο από τις βλάβες που παρατηρούνταν μετά τη σεισμική διέγερση. Έτσι, οι καμπύλες τρωτότητας που αναπτύσσονταν στηρίζονταν κυρίως σε στατιστική ανάλυση δεδομένων που συλλέχτηκαν από έρευνες που διεξήχθησαν μετά το σεισμό. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων έγκεινται ακριβώς στο γεγονός ότι η υποκειμενικότητα του παρατηρητή καθορίζει απόλυτα σε ποιο επίπεδο βλάβης θα κατανεμηθεί η κάθε κατασκευή, όπως επίσης και στο ότι υπάρχει έλλειψη ακρίβειας ως προς την εδαφική κίνηση της περιοχής που μελετάται. Επιπροσθέτως, οι περιοχές παγκοσμίως για τις οποίες υπάρχουν λεπτομερή δεδομένα για τις μετασεισμικές βλάβες και τα κόστη επισκευής σπανίζουν, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκές το δείγμα κατασκευών που απαιτείται για την κατασκευή αξιόπιστων καμπυλών τρωτότητας. Επομένως, η αλληλεξάρτηση μεταξύ προσεισμικής έντασης και βλάβης και τα περιορισμένα, μη ομοιογενή εμπειρικά δεδομένα είναι οι κύριες δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν κατά την διαδικασία βαθμονόμησης μιας εμπειρικής μεθοδολογίας.

Τα αποτελέσματα των εμπειρικών μεθόδων δίνονται συνήθως μέσω δύο διαφορετικών τύπων, είτε μέσω σχέσεων εδαφικής κίνησης – βλάβης, όπως είναι τα μητρώα πιθανοτήτων βλάβης (damage probability matrices-DPM), ή μέσω της μεθοδολογίας των δεικτών τρωτότητας (Vulnerability Index Method). Με τον πρώτο τρόπο η δεσμευμένη πιθανότητα, που οφείλεται σε εδαφική κίνηση δεδομένης έντασης έως ότου η κατασκευή φτάσει ένα επίπεδο έντασης, εκφράζεται μέσω ενός διακριτού τύπου, καθώς εκτιμάται πως εάν ακολουθούνται κοινές δομικές διατάξεις για τις κατασκευές η πιθανότητα για συγκεκριμένο επίπεδο βλάβης για δεδομένη σεισμική ένταση θα είναι η ίδια. Αντιθέτως, με τον δεύτερο τρόπο η πιθανότητα υπέρβασης ενός δεδομένου επιπέδου βλάβης εκφράζεται ως μια συνεχής συνάρτηση της σεισμικής έντασης λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που αφορούν τις σημαντικές παραμέτρους οι οποίες είναι δυνατόν να επηρεάσουν την τρωτότητα της κατασκευής.



### 3.3.3 Μέθοδοι βάσει εμπειρογνομόνων

Οι μέθοδοι βάσει εμπειρογνομόνων στηρίζονται στις πληροφορίες και στην κρίση ειδικών μελετητών, οι οποίοι καλούνται να εκτιμήσουν την πιθανότητα βλάβης για διαφορετικούς τύπους κατασκευής όταν υποβάλλονται σε διαφορετικά επίπεδα σεισμικής έντασης. Αν και ως μέθοδος ανάλυσης φαίνεται ότι κατέχει το μικρότερο επίπεδο αξιοπιστίας, πολλές φορές καθίσταται αναπόφευκτη η επιλογή της, κυρίως σε περιοχές όπου σπανίζουν τα εμπειρικά δεδομένα ή όπου η προσομοίωση καθίσταται δυσχερής. Σε αυτή τη μέθοδο δεν παρουσιάζονται οι περιορισμοί που αφορούν την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων βλάβης και των στατιστικών στοιχείων που απαιτούνται προκειμένου να εξαχθεί το τελικό συμπέρασμα της ανάλυσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι άμεσα συσχετισμένα με την προσωπική εμπειρία και γνώση του εκάστοτε εμπειρογνώμονα που συμμετέχει στην ανάλυση. Παράδειγμα ανάλυσης στην οποία χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι τέτοιου τύπου είναι η μελέτη των Kostov et al. (2007), όπου παρήχθησαν τα μητρώα πιθανότητας βλάβης (DPM) κτιρίων με διαφορετικές ιδιοπεριόδους στη Σόφια, σύμφωνα με το EMS-98, τα οποία έπειτα μετατράπηκαν σε καμπύλες τρωτότητας.

### 3.3.4 Υβριδικές μέθοδοι

Ο τέταρτος τρόπος ανάλυσης της σεισμικής τρωτότητας καλείται υβριδική μέθοδος, καθώς στηρίζεται στο συνδυασμό στοιχείων και δεδομένων, τα οποία προέρχονται από διαφορετικές πηγές, είτε αυτές είναι εμπειρικές, αναλυτικές ή σύμφωνα με τη γνώμη ειδικών εμπειρογνομόνων. Κατά την εφαρμογή των υβριδικών μεθόδων, συνήθως συνδυάζονται τα στατιστικά στοιχεία των μετασεισμικών βλαβών (δεδομένα από εμπειρικές μεθόδους) με αναλυτικά στατιστικά προσομοιώματα βλαβών από ένα μαθηματικό μοντέλο κατασκευασμένο για την τυπολογία της κατασκευής που βρίσκεται υπό μελέτη (δεδομένα από αναλυτικές μεθόδους). Αν και η χρήση τους δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, μπορεί να αποτελέσουν ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον εργαλείο όταν υπάρχει έλλειψη στοιχείων για συγκεκριμένα επίπεδα έντασης που αφορούν την γεωγραφική περιοχή που μελετάται, και τα οποία έχουν προέλθει από την παρατήρηση των μετασεισμικών βλαβών. Επιπροσθέτως, συχνά ο σκοπός επιλογής του συγκεκριμένου τύπου ανάλυσης είναι η ανεπάρκεια αποτελεσματικής προσομοίωσης των κατασκευών και η επιθυμία αποφυγής της υποκειμενικότητας που εμπεριέχεται στα στοιχεία που προέρχονται από την γνώμη των

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

ειδικών. Παραδείγματα μελετών στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν υβριδικές μέθοδοι είναι οι μελέτες των Kappos et al.(2006) και Barbat et al.(1996).

## **3.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ**

### **3.4.1 Μέτρα έντασης (Intensity Measures)**

Η απαίτηση αντοχής σε μια κατασκευή μπορεί να προσεγγισθεί ως μετρό της απόκρισής της (π.χ. το μέγιστο drift που εμφανίζεται μεταξύ των ορόφων), συνεπώς για να προβλεφθεί αποτελεσματικά αυτή η απόκριση, χρειαζόμαστε το μέτρο έντασης IM (Intensity Measure) για κάθε σεισμό, όπου ως μέτρο έντασης IM ορίζεται η παράμετρος αναφοράς της εδαφικής κίνησης. Έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά μέτρα έντασης (IM), καθένα από τα οποία περιγράφει διαφορετικά χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης. Επομένως, η επιλογή του κατάλληλου IM στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου καθορίζεται από το πόσο αποτελεσματικά ανταποκρίνεται το μέτρο έντασης στις βλάβες που προκαλούνται στα δομικά στοιχεία του συστήματος. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μέτρων έντασης: οι περιγραφικοί δείκτες και οι υπολογιστικοί δείκτες.

Σύμφωνα με τους υπολογιστικούς δείκτες, που έχουν κύρια εφαρμογή στις μεθόδους ανάλυσης σεισμικής τρωτότητας, η ένταση της εδαφικής κίνησης μπορεί να εκφραστεί ως τιμή που έχει μετρηθεί από κατάλληλα όργανα ή που έχει προέλθει από την επεξεργασία καταγεγραμμένων επιταχυνσιογραφημάτων, συνεπώς η εκτίμηση της έντασης παύει να είναι υποκειμενική. Τα πιο διαδεδομένα μέτρα έντασης στην εκτίμηση της σεισμικής απώλειας είναι:

- η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration – PGA)
- η φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιοπεριόδου της κατασκευής  $S_a(T_1)$
- μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity – PGV)
- η φασματική μετακίνηση της πρώτης ιδιοπεριόδου της κατασκευής  $S_d(T_1)$

Είναι εμφανές ότι για την περίπτωση κατασκευών που συμμορφώνονται με τις διατάξεις κανονικότητας, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας συμμετέχει στην πρώτη ιδιομορφή, ο καταλληλότερος δείκτης έντασης είναι η φασματική επιτάχυνση  $S_a(T_1)$  της πρώτης ιδιοπεριόδου της κατασκευής (ή αντίστοιχα και η φασματική μετακίνηση  $S_d(T_1)$ ). Αντίστοιχα, έχει προταθεί στην περίπτωση πλάστιμου τρόπου αστοχίας (κάμψη) και παραμενουσών παραμορφώσεων, να επιλέγεται η φασματική μετακίνηση της πρώτης ιδιοπεριόδου της κατασκευής  $S_d(T_1)$ , ενώ στην περίπτωση που επικρατεί η ψαθυρή αστοχία

(διάτμηση) προτιμότερη επιλογή είναι η ελαστική ή ανελαστική περίοδος της κατασκευής που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο όριο βλάβης. Για τα κτίρια μεσαίου ύψους (mid-rise buildings) όπου η θεμελιώδης περίοδος, τόσο η ανελαστική όσο και η ελαστική, βρίσκονται στο διάστημα σταθερής ταχύτητας του ελαστικού φάσματος απόκρισης, αποδοτικότερος δείκτης έντασης θεωρείται η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV).

Τα προαναφερθέντα μέτρα έντασης είναι γενικώς μονοπαραμετρικά κι γι' αυτόν το λόγο αποκαλούνται βαθμωτά. Αντιστοίχως, υπάρχουν και μέτρα εντάσεως που λαμβάνουν υπόψη δύο και παραπάνω παραμέτρους, τα οποία αποκαλούνται διανυσματικά. Εφόσον τα διανυσματικά μέτρα έντασης διαθέτουν περισσότερες πληροφορίες για την εδαφική κίνηση, είναι αναμενόμενο να προβλέπουν με περισσότερη επιτυχία την απόκριση της κατασκευής. Ωστόσο, οι τρισδιάστατες επιφάνειες που προκύπτουν ερμηνεύονται πολύ δυσκολότερα από τις αντίστοιχες δισδιάστατες των βαθμωτών μέτρων έντασης και ταυτόχρονα καθιστούν δυσκολότερη τη διαχείριση των εδαφικών σεισμικών καταγραφών.

Για λόγους πληρότητας αξίζει να αναφερθεί πως υπάρχουν εμπειρικοί δείκτες έντασης που αποτελούν διαφορετικές κλίμακες μακροσεισμικής έντασης, οι οποίες διαμορφώνονται κυρίως από την ποιοτική εκτίμηση της βλάβης που έχει επιφέρει το σεισμικό γεγονός, η οποία μετατρέπεται σε διακριτή αριθμητική κλίμακα. Ορισμένα παραδείγματα δεικτών έντασης που εμπίπτουν σε αυτήν τη κατηγορία είναι η κλίμακα Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), η αναθεωρημένη κλίμακα Mercalli (MMI), όπως επίσης και η Ευρωπαϊκή μακροσεισμική κλίμακα (EMS-98). Ως προς τη χρήση των δεικτών έντασης αυτής της κατηγορίας, αν και έχουν ευρεία εφαρμογή σε ποικίλες αναλύσεις και έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο σε παλαιότερες όσο και σε πρόσφατες αναλύσεις τρωτότητας, η χρήση τους στις σύγχρονες μεθοδολογίες εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας είναι περιορισμένη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως καταλληλότερος δείκτης έντασης θεωρείται η η φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιοπεριόδου της κατασκευής  $S_a(T_1)$ .

### 3.4.2 Επίπεδα Βλαβών (Damage States)

Στην αξιολόγηση σεισμικού κινδύνου, τα επίπεδα απόκρισης της κατασκευής μπορούν να καθορισθούν μέσω δεδομένων οριακών καταστάσεων (limit states). Η κάθε οριακή κατάσταση αποτελεί το «σύνορο» (threshold) μεταξύ διαφορετικών επιπέδων βλάβης (damage states), συνεπώς εάν η απόκριση ενός κτιρίου περιγράφεται επαρκώς από δύο οριακές καταστάσεις βλάβης θα υπάρχουν τρία επίπεδα βλάβης για την κατασκευή. Το κάθε

επίπεδο βλάβης καθορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες και βλάβες που υφίστανται τα δομικά μέλη ή και ολόκληρη η κατασκευή. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των καμπυλών ευθραστότητας ( fragility curves) απεικονίζουν τις βλάβες σε μια ευδιάκριτη κλίμακα ταξινόμησης της βλάβης. Στις εμπειρικές μεθόδους, χρησιμοποιείται η κλίμακα ταξινόμησης για την προσπάθεια δημιουργίας στατιστικών δεδομένων για τις μετασεισμικές βλάβες, ενώ στις αναλυτικές μεθόδους η κλίμακα ταξινόμησης σχετίζεται με τις μηχανικές ιδιότητες της κάθε οριακής κατάστασης της κατασκευής.

Το πλήθος των επιπέδων βλάβης εξαρτάται από την μεθοδολογία που επιλέγει ο εκάστοτε μελετητής προκειμένου να δημιουργήσει τις καμπύλες τρωτότητας και την κλίμακα ταξινόμησης που θα χρησιμοποιηθεί. Οι πιο συνήθεις επιλογές κλιμάκων ταξινόμησης είναι σύμφωνα με τα HAZUS99 (FEMA,1999), ATC-13(ATC,1985), Vision 2000(SEAOC 1995). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία που παρέχει το FEMAP-58 για κάθε ομάδα βλάβης δομικών μελών.

### 3.4.3 Παράμετροι σεισμικής απαίτησης (Engineering Demand Parameter)

Οι παράμετροι σεισμικής απαίτησης (EDP) περιγράφουν την απόκριση των δομικών και μη-δομικών μελών της κατασκευής, όπως και του περιεχομένου των εγκαταστάσεων, που προκαλείται κατά τη σεισμική διέγερση. Ο υπολογισμός των παραμέτρων σεισμικής απαίτησης γίνεται μέσω της προσομοίωσης της συμπεριφοράς της κατασκευής με τη χρήση των κατάλληλων μέτρων έντασης (IM) και των σεισμικών καταγραφών, οι οποίες θα πρέπει να περιέχουν τα σημαντικά χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης που επηρεάζουν την απόκριση της κατασκευής.

Στην εφαρμογή της μεθοδολογίας εκτίμησης σεισμικής κινδύνου καταλληλότερη επιλογή του δείκτη EDP θεωρείται αυτή που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών βλάβης και κόστους. Οι παράμετροι απόκρισης που χρησιμοποιούνται κυρίως στις διατάξεις σχεδιασμού έχουν προέλθει από άμεσο υπολογισμό και συνεισφέρουν στην αξιολόγηση σεισμικού κινδύνου κατά τον υπολογισμό της πιθανότητα  $P[EDP | IM]$ , αναλόγως εάν εξετάζεται μεμονωμένα το κάθε δομικό μέλος ή η κατασκευή στο σύνολο της. Παραδείγματα παραμέτρων EDP που μπορεί να χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση των αντισεισμικών

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

διατάξεων 2000 NEHRP (Recommended Provisions for Seismic Regulations for Buildings and Other Structures) είναι τα εξής:

- η πλαστική στροφή των άκρων του δομικού μέλους( plastic rotation)
- η ανηγμένη σχετική μετακίνηση μεταξύ των ορόφων (interstorey drift)
- η αξονική δύναμη, η τέμνουσα δύναμη και η καμπτική ροπή στα υποστυλώματα
- η τέμνουσα δύναμη και η καμπτική ροπή στις δοκούς
- η διατμητική δύναμη σε κόμβο δοκού-υποστυλώματος
- η διατμητική δύναμη και η καμπτική ροπή στις πλάκες

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως παράμετρος απόκρισης έχει επιλεγεί ανηγμένη σχετική μετακίνηση μεταξύ των ορόφων (interstorey drift), καθώς εκτιμάται ότι περιγράφει με την απαιτούμενη ακρίβεια την συνολική απόκριση της κατασκευής.

### 3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

#### 3.5.1 Πιθανολογικό μοντέλο σεισμικής τρωτότητας

Η ανάλυση της τρωτότητας απαιτεί τον υπολογισμό των πιθανοτήτων υπέρβασης μίας μονοτονικά αυξανόμενης οριακής κατάστασης. Αυτό σημαίνει πως για να εκτιμηθεί η τρωτότητα μίας κατασκευής, πρέπει να υπολογισθεί η δεσμευμένη πιθανότητα  $F_R$ , όπου η σεισμική απαίτηση, εκφρασμένη ως μία παράμετρος απόκρισης (Engineering Demand Parameter – EDP) υπερβαίνει την ικανότητά της,  $edp$ , για δεδομένη τιμή του μέτρου έντασης  $IM$ , δηλαδή:

$$F_R = P(EDP \geq edp|IM) \quad (3.23)$$

Η ικανότητα υπολογίζεται με βάση τις προτεινόμενες οριακές καταστάσεις, ενώ η σεισμική απαίτηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ της μέσης τιμής της κατασκευαστικής απαίτησης,  $S_d$ , και κάθε μέτρο έντασης  $IM$ :

$$S_d = aIM^b \quad (3.24)$$

όπου:

$a, b$ : οι γραμμικοί συντελεστές παλινδρόμησης για τη λογαριθμική έκφραση του νόμου

Θεωρώντας ότι ισχύει η λογαριθμοκανονική κατανομή, τόσο για την ικανότητα όσο και για την απαίτηση της κατασκευής και λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις αβεβαιότητες της σεισμικής απαίτησης,  $\beta_{lnEDP}$ , η ανωτέρω εξίσωση (3.24) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$F_R(EDP \geq edp|IM) = 1 - \Phi \left( \frac{\ln(edp) - \mu_{lnEDP}}{\beta_{lnEDP}} \right) \quad (3.25)$$

όπου:

$\Phi$ : η τυπική συνάρτηση κανονικής αθροιστικής κατανομής

$\mu_{lnEDP}$ : η μέση τιμή της απαίτησης

$\beta_{lnEDP}$ : η διασπορά ή η λογαριθμική κανονική απόκλιση της απαίτησης, σε συνάρτηση του μέτρου έντασης  $IM$

### 3.5.2 Εφαρμογή ανάλυσης σεισμικής τρωτότητας - Κατασκευή καμπυλών τρωτότητας

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, η κατασκευή των καμπυλών τρωτότητας συνίσταται στη δημιουργία λογαριθμοκανονικών συναρτήσεων που περιγράφουν την πιθανότητα ένα δομικό ή ένα μη δομικό μέλος της κατασκευής να φτάσει ή να υπερβεί συγκεκριμένα επίπεδα βλάβης, έχοντας ως δεδομένο την εκτίμηση της μέσης τιμής της φασματικής απόκρισης (π.χ. της φασματικής μετατόπισης  $S_d$ ). Οι καμπύλες τρωτότητας δημιουργούνται λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες και την μεταβλητότητα των παραμέτρων που συμμετέχουν στην καμπύλη ικανότητας, στα επίπεδα βλάβης και στην εδαφική κίνηση.

Στο παράδειγμα κατασκευής των καμπυλών τρωτότητας που ακολουθεί έχει εφαρμοστεί η μεθοδολογία των Sergio Lagomarsino & Sonia Giovinazzi (2006), η οποία είναι παρόμοια με τη μεθοδολογία που υιοθετείται από το HAZUS (FEMA 1999). Τα στάδια εφαρμογής της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

➤ *Καμπύλη Ικανότητας*

Πρωταρχικό βήμα είναι η δημιουργία της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής που πραγματοποιείται για το μοντέλο προσομοίωσης της κατασκευής. Για τη δημιουργία του προσομοιώματος της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SeismoStruct (version 7.0.6) της εταιρίας SeismoSoft, με το οποίο εκτελείται μη γραμμική στατική ανάλυση Pushover.

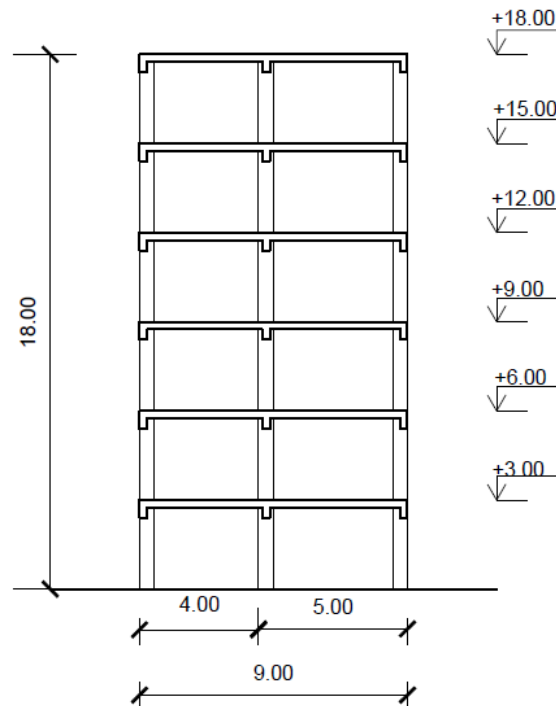
Το μοντέλο προσομοίωσης που σχεδιάστηκε αφορά ένα κτίριο έξι ορόφων με συνολικό ύψος 18 m., και ύψος κάθε ορόφου 3 m. (Σχήμα 3.1). Τον φέροντα οργανισμό του κτιρίου αποτελούν τα υποστυλώματα, τα οποία είναι όλα τετραγωνικά, διαστάσεων 0.5m×0.5m, και οι δοκοί με πλάτος 0.25m και κρέμαση 0.60m. Τα υποστυλώματα και οι δοκοί έχουν οπλιστεί σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις για τον ελάχιστο απαιτούμενο οπλισμό ( $\rho_1 = 1-1.5\%$ ).

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για τον οπλισμό των δοκών και των υποστυλωμάτων ανήκει στην κατηγορία B500C και διαθέτει μέτρο ελαστικότητας  $E=210$  GPa, ενώ το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στο σύνολο των δομικών στοιχείων είναι κατηγορίας C20/25 με μέτρο ελαστικότητας  $E=25$  GPa.



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

Η συνολική μάζα της κατασκευής ισούται με 579.91 tn η οποία ισοκατανέμεται στα έξι διαφράγματα, έτσι ώστε να αντιστοιχεί μάζα ίση με 96.65 tn σε κάθε διάφραγμα. Στη συνέχεια, η συνολική μάζα κατανεμήθηκε με τη μορφή βαρυτικού φορτίου σε κάθε υποστύλωμα μέσω των κατάλληλων φορτικών επιφανειών. Αναλυτικότερη περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης υπάρχει στο κεφάλαιο 5, καθώς χρησιμοποιήθηκε το ίδιο κτιριακό προσομοίωμα στην εφαρμογή εκτίμησης σεισμικών απωλειών.



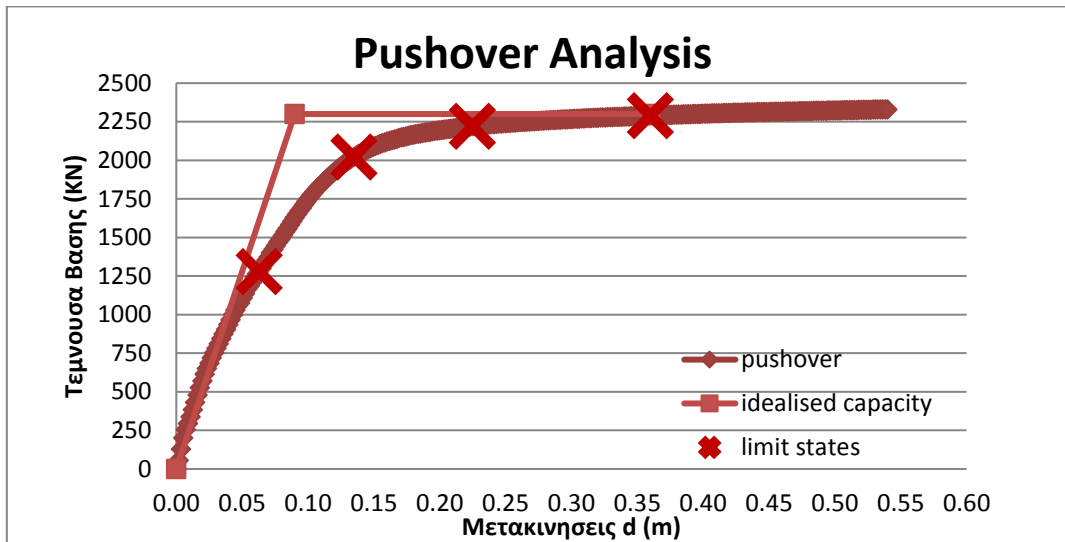
*Σχήμα 3.1 Τομή προσομοιώματος κατασκευής κατά μήκος της διεύθυνσης x*

Με την εκτέλεση της ανάλυσης Pushover, δηλαδή τη στατική επιβολή σταδιακά αυξανόμενης φόρτισης, εξήχθη η καμπύλη ικανότητας του κτιρίου η οποία παρουσιάζει τη μη γραμμική σχέση που συνδέει την τέμνουσα βάσης της κατασκευής και την ανελαστική μετακίνηση του κέντρου μάζας του ανώτερου ορόφου της κατασκευής. Στη συνέχεια, ακολούθησε η διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας (Σχήμα 3.2), σύμφωνα με τις ακόλουθες οδηγίες:

- Η τέμνουσα βάσης που οφείλεται για τη δημιουργία του πρώτου πλαστικού μηχανισμού αντιστοιχεί τόσο στην δύναμη διαρροής  $F_y$  όσο και στην οριακή δύναμη αστοχίας  $F_u$ .
- Η δυσκαμψία του ιδεατού συστήματος καθορίζεται από την απαίτηση να απορροφάται ίδια ποσότητα ενέργειας και στα δύο συστήματα (πραγματικό – ιδεατό).

Κατά συνέπεια, υπολογίσθηκαν οι μετατοπίσεις διαρροής και αστοχίας και οι αντίστοιχες δυνάμεις, όπως επίσης σχεδιάστηκε η ιδεατή καμπύλη ικανότητας της κατασκευής (Σχήμα 3.2). Συγκεκριμένα έχουμε:

- $d_y = 0.09$  m και  $F_y = 2300$  KN
- $d_u = 0.36$  m και  $F_u = 2300$  KN



Σχήμα 3.2: Πραγματική καμπύλη ικανότητας του προσομοιώματος, ιδεατή καμπύλη ικανότητας της κατασκευής μετά τη διγραμμικοποίηση και οριακές καταστάσεις βλάβης

➤ Ορισμός επιπέδων βλάβης

Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης ορίζει τέσσερα επίπεδα βλάβης  $D_{Sk}$  με ( $k = 1 \div 4$ ) ως εξής:  $D_{S1}$  ελαφρές βλάβες (slight),  $D_{S2}$  μέτριες βλάβες (moderate),  $D_{S3}$  εκτεταμένες βλάβες (extensive),  $D_{S4}$  πολύ εκτεταμένες βλάβες έως και ολική κατάρρευση (complete). Τα επίπεδα βλάβης στα οποία κατανέμεται η βλάβη που είναι δυνατόν να υποστεί η κατασκευή λόγω του σεισμικού γεγονότος, ορίζονται κατά αντιστοιχία με τις τέσσερις οριακές καταστάσεις  $S_{dk}$  ( $k = 1 \div 4$ ) οι οποίες διαμορφώνονται ως συναρτήσεις των μετατοπίσεων διαρροής και αστοχίας,  $d_y$  και  $d_u$  αντίστοιχα. Ειδικότερα, οι οριακές καταστάσεις βλάβης (limit damage states) ορίζονται μέσω των εξισώσεων (3.26 – 3.30), λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά της ελαστοπλαστικής κατασκευής, όπως αυτή περιγράφεται στην ιδεατή καμπύλη ικανότητας.

$$S_{d1} = 0.7 * d_y \quad (3.26)$$

$$S_{d2} = 1.5 * d_y \quad (3.27)$$

$$S_{d3} = 1.5 * (d_y + d_u) \quad (3.28)$$

$$S_{d4} = d_u \quad (3.30)$$

➤ *Επιλογή δείκτη απόκρισης EDP*

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιλέγει να εκφράσει τις καμπύλες τρωτότητας ως προς ένα δείκτη απόκρισης εκφρασμένο σε όρους μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα, ορίζει την παράμετρο  $S_{d*}$  μέσω κλειστών αναλυτικών σχέσεων (Εξίσωση 3.31) λαμβάνοντας υπόψη αφενός τις παραμέτρους που έχουν εξαχθεί από την καμπύλη ικανότητας, όπως είναι οι όροι  $T$  και  $\alpha_y$ , αφετέρου τις παραμέτρους που περιγράφουν την σεισμική απαίτηση, όπως είναι οι όροι  $S_{ae}(T)$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ .

$$S_d = \begin{cases} \left[ 1 + \left( \frac{S_{ae}(T)}{\alpha_y} - 1 \right) \frac{T_C}{T} \right] d_y, T < T_C \text{ and } \frac{S_{ae}(T)}{\alpha_y} > 1 \\ \frac{S_{ae}(T)}{\alpha_y} d_y, T_C \leq T < T_D \text{ or } \frac{S_{ae}(T)}{\alpha_y} \leq 1 \\ \frac{S_{ae}(T_D) T_D^2}{4\pi^2}, T \geq T_D \end{cases} \quad (3.31)$$

➤ *Ορισμός παραμέτρων λογαριθμοκανονικής κατανομής*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι καμπύλες τρωτότητας εκφράζουν την πιθανότητα η βλάβη να φτάσει ή να υπερβεί κάθε συγκεκριμένο επίπεδο βλάβης  $D_k$  σε σχέση με την παράμετρο  $S_{d*}$ , δηλαδή την πιθανότητα υπέρβασης για κάθε οριακή κατάσταση βλάβης  $S_{dk}$ , θεωρώντας ότι περιγράφονται ικανοποιητικά από την λογαριθμοκανονική κατανομή. Ειδικότερα, οι καμπύλες δημιουργούνται ως συναρτήσεις της μετατόπισης  $S_{d*}$  (Εξίσωση 3.31) και των μετατοπίσεων των οριακών καταστάσεων για κάθε επίπεδο βλάβης, όπως αυτές έχουν οριστεί από τις Εξισώσεις (3.26)-(3.30), χρησιμοποιώντας την λογαριθμοκανονική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (Εξίσωση 3.32), παρόμοια με αυτή που υιοθετείται για την αξιολόγηση των καμπυλών τρωτότητας από το HAZUS (1999).

$$P(D_{Sk} | S_{d*}) = \Phi \left( \frac{\ln(S_{d*}) - \ln(S_{dk})}{\beta_k} \right) \quad (3.32)$$

Η κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση  $\beta$  του φυσικού λογαρίθμου της μετατόπισης της οριακής κατάστασης  $S_{dk}$  ορίζεται ως συνάρτηση της πλαστιμότητας  $\mu$  της κατασκευής,

προκειμένου να ληφθεί υπόψη μια διασπορά η οποία να αντιστοιχίζει την πραγματική βλάβη που παρατηρείται με την βλάβη που προκύπτει από την κατανομή.

$$\beta_k = 0.4 \ln \mu, k = 1, 2, 3, 4 \quad (3.33)$$

➤ *Εφαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής*

Στην παρούσα εργασία εκτιμάται ότι η ανάλυση γίνεται για κατηγορία εδάφους B με τα εξής στοιχεία: χαρακτηριστικές περίοδοι  $T_C = 0.5$  s,  $T_D = 2.5$  s και δείκτης εδάφους  $S=1.20$ . Στο προσομοίωμα της κατασκευής εκτελέστηκε ιδιομορφική ανάλυση μέσω του λογισμικού SeismoStruct, από όπου προέκυψε πως η κατασκευή έχει ιδιοπερίοδο  $T=0.585$ s, ενώ από τα δεδομένα που εξήχθησαν από την καμπύλη ικανότητας προκύπτει ότι  $a_y = 3.97$  m/s<sup>2</sup>. Συνεπώς, μέσω της δεύτερης σχέσης της Εξίσωσης (3.31) για ένα εύρος  $S_{ac}(T)$  που κυμαίνεται από την τιμή 0 έως την τιμή 4.1 m/s<sup>2</sup> υπολογίζονται τα αντίστοιχα  $S_{d*}$  που θα αποτελέσουν το δείγμα των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των καμπύλων τρωτότητας. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις οριακές καταστάσεις βλάβης μετά από εφαρμογή των Εξισώσεων (3.26)-(3.30) είναι τα εξής:

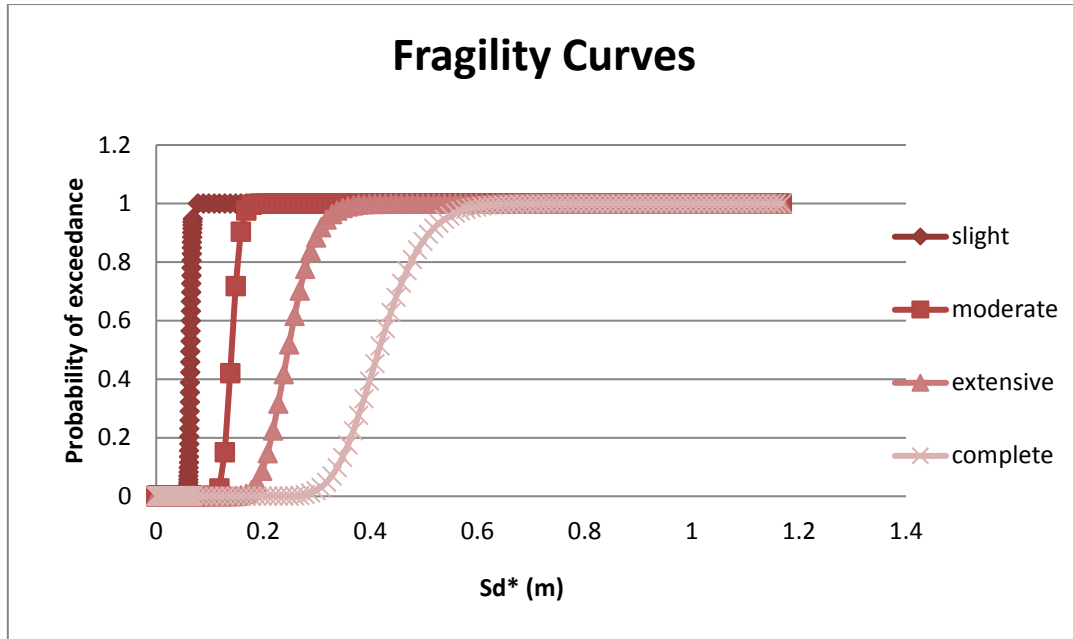
- $S_{d1} = 0.063$  m
- $S_{d2} = 0.135$  m
- $S_{d3} = 0.225$  m
- $S_{d4} = 0.360$  m

Οι οριακές καταστάσεις βλάβης παρουσιάζονται ως σημεία στην καμπύλη ικανότητας, ώστε να δοθεί μια εικόνα της φυσικής σημασίας των επιπέδων βλάβης (*Εικόνα 3.2*).

Αντίστοιχα, μετά την εφαρμογή της Εξίσωσης (3.33) για κάθε οριακή κατάσταση βλάβης προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- $\beta_{k1} = 0.08$
- $\beta_{k2} = 0.20$
- $\beta_{k3} = 0.37$
- $\beta_{k4} = 0.55$

Επομένως, εφαρμόζοντας την Εξίσωση (3.33) για κάθε τιμή του εύρους των  $S_{d*}$  προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες τρωτότητας για κάθε επίπεδο βλάβης που έχει οριστεί. (*Σχήμα 3.3*)



Σχήμα 3.3: Καμπύλες τρωτότητας εξαώροφου κτιρίου συνολικού ύψους 18 m.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ

---

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Σεισμική Μηχανική Βάσει Επιτελεστικότητας PBEE (Performance-Based Earthquake Engineering) αποτελεί τη φυσική εξέλιξη της διαδικασίας σχεδιασμού των κατασκευών ώστε να παραμένει κύρια επιδίωξη η προστασία της ανθρώπινης ζωής, όμως πλέον να συμπεριλαμβάνονται οι ιδιαίτερες απαιτήσεις των ιδιοκτητών για αυξημένη απόδοση των κτιρίων τους. Προσφάτως, έχουν παρουσιαστεί διάφοροι κανονισμοί που αναγνωρίζουν αυτές τις ανάγκες, όπως για παράδειγμα οι SAC/FEMA-350/351( SAC 2000), FEMA-356 (FEMA 2000) και ATC-40(ATC 1996). Παρότι, αυτές οι μελέτες έχουν θέσει τα θεμέλια για την ανάπτυξη της διαδικασίας, ο τρόπος που υιοθετούν για την εκτίμηση της απόκρισης είναι ανασταλτικός παράγοντας, καθώς δεν ορίζονται με σαφή και εύχρηστο τρόπο τα επιθυμητά επίπεδα απόκρισης, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη ποσοτικοποίησης της απόκρισης της κατασκευής με ένα τρόπο πιο κατανοητό από τους ίδιους τους ιδιοκτήτες. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η μεθοδολογία του Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center (Cornell & Krawinkler 2000), που προτείνει ως δείκτες εκτίμησης της σεισμικής απόδοσης τις οικονομικές απώλειες, το χρόνο που απαιτείται για την αποπεράτωση της επισκευής του κτιρίου και τις ανθρώπινες απώλειες, σε όρους δηλαδή που είναι κατανοητοί και ενδιαφέρουν τους ιδιοκτήτες, προκειμένου να λαμβάνουν αποφάσεις για τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό των κατασκευών.

Η μεθοδολογία PBEE παρέχει πλήρη εκτίμηση της κτιριακής συμπεριφοράς για κάθε επίπεδο σεισμικής έντασης και για οποιαδήποτε στάθμη επιτελεστικότητας μέσω της ολοκλήρωσης της σεισμικής επικινδυνότητας και των αποτελεσμάτων της δομικής ανάλυσης των κατασκευών με δεδομένα βλαβών, κόστους και χρόνου επισκευής για να παραχθούν ρεαλιστικές εκτιμήσεις των επιπτώσεων που συνεπάγεται ένας σεισμός. Η μεθοδολογία αποτελείται από τέσσερα ευδιάκριτα διαδοχικά αναλυτικά στάδια που αφορούν τα ακόλουθα: τον κίνδυνο λόγω της εδαφικής κίνησης στην περιοχή μελέτης (hazard analysis), την απόκριση της κατασκευής υπό την σεισμική καταπόνηση (structural analysis), τις βλάβες στις οποίες υπόκεινται τα μέλη της κατασκευής (damage analysis) και τις οικονομικές απώλειες λόγω επισκευής (loss analysis).

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την ανάλυση σεισμικού κινδύνου, στην οποία καθορίζεται η καμπύλη μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης ενός μέτρου έντασης (IM) της εδαφικής κίνησης στην περιοχή μελέτης. Το δεύτερο βήμα χρησιμοποιεί την απόκριση της κατασκευής για να υπολογίσει ένα σύνολο δομικών αποκρίσεων οι οποίες αποτελούν τα μέτρα απόκρισης EDPs, όπως για παράδειγμα είναι οι σχετικές ανηγμένες μετατοπίσεις των ορόφων, οι επιταχύνσεις των ορόφων, οι πλαστικές στροφές των μελών κ.λπ. Στο τρίτο βήμα παράγονται τα επίπεδα βλαβών (DMs) μέσω των συναρτήσεων τρωτότητας, οι οποίες αποτελούν αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας και εκφράζουν την υπό όρους πιθανότητα τα EDPs να βρίσκονται ή ακόμα και να υπερβούν συγκεκριμένα επίπεδα βλαβών. Το τέταρτο και τελευταίο βήμα ορίζει τις μεταβλητές απόφασης (DVs), στην συγκεκριμένη μελέτη έχουν επιλεχθεί οι οικονομικές απώλειες που στηρίζονται σε κόστη επισκευής και αποκατάστασης μελών της κατασκευής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε στάδιο χρησιμοποιούνται ως δεδομένα «εισόδου» για το επόμενο στάδιο, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην Σχήμα 4.1.

Η μεθοδολογία είναι πιθανοτική, δηλαδή σε κάθε στάδιο ανάλυσης περιλαμβάνονται συνδυασμένες αριθμητικές μέθοδοι όλων των πιθανών περιπτώσεων, προκειμένου να μεταφέρονται οι αβεβαιότητες από βήμα σε βήμα, έτσι ώστε στο τέλος να προκύπτει η συνολική πιθανοτική πρόβλεψη της επιτελεστικότητας του κτιρίου. Μαθηματικά, εάν τα μέτρα που προκύπτουν μετά το πέρας κάθε βήματος θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές, μπορεί για το άθροισμα τους να χρησιμοποιηθεί το θεώρημα ολικής πιθανότητας όπως εκφράζεται μέσω της Εξίσωσης 4.1 (π.χ. Cornell & Krawinkler 2000):

$$\lambda(DV) = \int_{DM} \int_{EDP} \int_{IM} G(DV|DM) P(DM|EDP) P(EDP|IM) dIM \left| \frac{d\lambda(IM)}{dIM} \right| dIM dEDP dDM \quad (4.1)$$

Όπου,

DV: η μεταβλητή απόφασης (decision variable), παράμετρος βάσει της οποίας εκτιμάται η επιτελεστικότητα της κατασκευής, όπως το κόστος, ο χρόνος αποκατάστασης κ.λπ.

DM: το μέτρο βλάβης (damage measure), παράμετρος βάσει της οποίας καθορίζονται τα επίπεδα βλάβης των μελών της κατασκευής π.χ. καθόλου, ελαφριές, μέτριες σοβαρές βλάβες, πλήρης απώλεια (κατάρρευση).

EDP: το μέτρο απόκρισης (engineering demand parameter) π.χ. η ανηγμένη σχετική μετακίνηση ενός ορόφου, η πλαστική στροφή ενός μέλους κ.λπ.

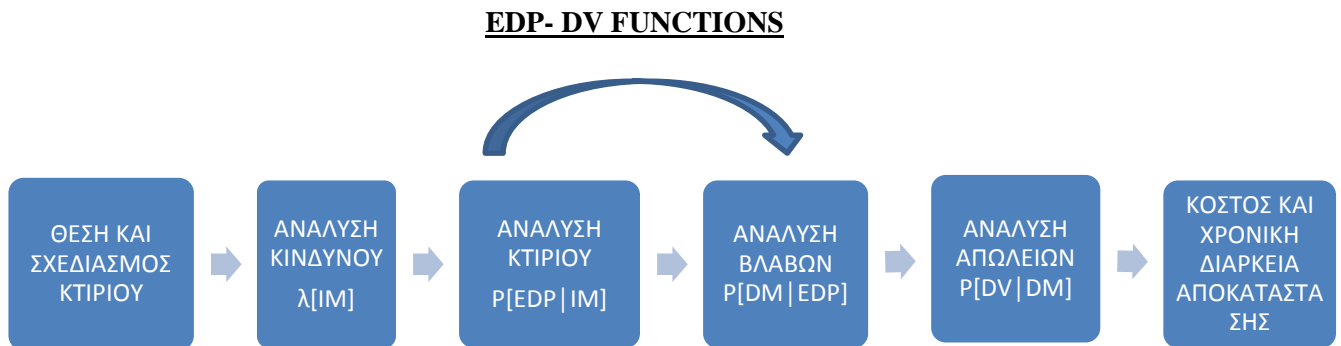
IM: το μέτρο έντασης, (intensity measure ) παράμετρος έκφρασης της επιρροής του σεισμού στην κατασκευή

$\lambda ( )$ : η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης MAF (mean annual frequency of exceedance) της ποσότητας μέσα στην παρένθεση.

$G ( )$ : η συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας CCDF της ποσότητας μέσα στην παρένθεση.

$P ( )$ : η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF της ποσότητας μέσα στην παρένθεση.

$(X|Y)$ : η δεσμευμένη πιθανότητα της πιθανοτικής μεταβλητής X ως προς την Y.



*Σχήμα 4.3: Στάδια μεθοδολογίας PEER.*

Το επίπεδο βλαβών κάθε ομάδας καθορίζεται από το μέγεθος της επισκευής η οποία απαιτείται προκειμένου να επανέλθει στην αρχική κατάσταση. Κάθε συνάρτηση τρωτότητας μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με μια πιθανοτική κατανομή της φέρουσας ικανότητας κάθε μέλους. Μια απλοποιημένη έκδοση της συγκεκριμένης μεθόδου βελτιστοποιεί τη διαδικασία υπολογισμού όλων αυτών των πιθανοτικών μεταβλητών με την ομαδοποίηση των μελών της κατασκευής σε ομάδες μελών (damageable groups) που υπόκεινται σε ίδιες βλάβες κατά τη σεισμική καταπόνηση, επομένως έχουν κοινές καμπύλες τρωτότητας. Για κάθε ομάδα μελών, λοιπόν, συγκρίνεται η απόκριση με την φέρουσα ικανότητα του, προκειμένου να καθοριστεί η πιθανότητα το μέλος να έχει ξεπεράσει την οριακή του κατάσταση και να απαιτεί επισκευή ή αντικατάσταση. Πραγματοποιώντας αυτή την διαδικασία σύγκρισης, δημιουργείται μια πλήρης εικόνα της κατάστασης των βλαβών όλης της κατασκευής ανάλογα της σεισμικής διέγερσης και γίνεται γνωστό το μέγεθος των επισκευών που πρέπει να πραγματοποιηθούν



προκειμένου να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της βλάβης υπολογίζεται το κόστος επισκευής κάθε ομάδας μελών και προσδιορίζεται το συνολικό κόστος επισκευής του κτιρίου.

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας διεξάγεται για την πιθανοτική περιγραφή του κινδύνου που συνεπάγεται η σεισμική διέγερση, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που την επηρεάζουν, όπως είναι τα κοντινά ρήγματα, το μέγεθος έντασης της σεισμικής διέγερσης, ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού, η σχετική θέση πηγής και θέσης μελέτης, η επίδραση του μέσου, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες κ.λπ., και εφαρμόζοντας μοντέλα εξασθένισης της σεισμικής κίνησης, όπως για παράδειγμα τα μοντέλα πρόβλεψης νέας γενιάς (NGA). Για την περιγραφή της εδαφικής σεισμικής κίνησης επιλέγεται ένα μέτρο έντασης IM (intensity measure). Αυτό το μέτρο μπορεί να είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA, ή μπορεί να επιλεγεί μία εκ των φασματικών αποκρίσεων (spectral response), όπως για παράδειγμα, η φασματική επιτάχυνση  $S_a$  ή η αντίστοιχη ψευδοφασματική PSA (όροι που λόγω της ελάχιστης διαφοράς των τιμών τους θα χρησιμοποιούνται εναλλάξιμα και χωρίς διάκριση), η ταχύτητα  $S_v$  (PSV) ή η μετατόπιση  $S_d$ . Αυτές οι φασματικές αποκρίσεις, για μικρές αποσβέσεις, συνδέονται μεταξύ τους μέσω της ιδιοσυχνότητας  $\omega$ , όπως φαίνεται στη σχέση (4.2). Από την άλλη πλευρά, η χρήση ανελαστικών φασματικών αποκρίσεων, προσφέρει το πλεονέκτημα καλύτερης αντιμετώπισης των κατασκευών, οι οποίες ξεπερνούν την ελαστική τους απόκριση, μέσω της παραμέτρου της απαίτησης σε πλαστιμότητα.

$$S_a \approx \omega \cdot S_v \approx \omega^2 \cdot S_d \quad (4.2)$$

Το μέτρο έντασης IM αποτελεί τη βασική μεταβλητή επικοινωνίας μεταξύ σεισμολόγων και πολιτικών μηχανικών. Συγκεκριμένα, οι σεισμολόγοι μελετούν μια περιοχή συλλέγοντας όλες τις πληροφορίες για προηγούμενους σεισμούς (μέγεθος, απόσταση από ρήγμα, είδος κ.λπ.), θεωρώντας όλα τα δυνατά σενάρια σεισμού σε κάθε ρήγμα που επηρεάζει τα κτίρια σε μια περιοχή. Τα σενάρια αυτά ολοκληρώνονται με μια σχέση εξασθένισης π.χ. Boore et al (1993), προκειμένου να υπολογιστεί για κάθε μια από τις στάθμες επιτελεστικότητας, η μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης MAF (Mean Annual Frequency of Exceedance) του αντίστοιχου επιπέδου σεισμικής έντασης (Kramer 1996). Ουσιαστικά δηλαδή εκτιμάται η

πιθανότητα εμφάνισης μελλοντικού σεισμού με δεδομένο επίπεδο μέτρου έντασης. Οι συνήθεις στάθμες επιτελεστικότητας είναι οι ακόλουθες:

- Άμεση Κατάληψη (Immediate Occupancy): πιθανότητα εμφάνισης 50% στα 50 χρόνια (1 περιστατικό στα 72 χρόνια κατά μέσο όρο).
- Ασφάλεια Ζωής (Life Safety): πιθανότητα εμφάνισης 10% στα 50 χρόνια (1 περιστατικό στα 475 χρόνια κατά μέσο όρο).
- Πρόληψη Κατάρρευσης (Collapse Prevention): πιθανότητα εμφάνισης 2% στα 50 χρόνια (1 περιστατικό στα 2475 χρόνια κατά μέσο όρο).

Οι τιμές αυτές απεικονίζονται σε καμπύλη, η οποία ονομάζεται καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας (seismic hazard curve). Αναλόγως της περιοχής μελέτης και της πρώτης ιδιοπεριόδου του κτιρίου επιλέγεται η κατάλληλη καμπύλη επικινδυνότητας και αναλόγως της επιδιωκόμενης απόδοσης του κτιρίου σε σεισμό, επιλέγεται η τιμή της φασματικής επιτάχυνσης  $S_a(T_1)$  βάσει της οποίας, επιλέγονται τα κατάλληλα επιταχυνσιογραφήματα και κλιμακώνονται στο επιθυμητό μέτρο έντασης.

Σύμφωνα με τους Lucio & Cornell (2007), το επιλεγόμενο μέτρο έντασης πρέπει να είναι ταυτόχρονα αποδοτικό αλλά και επαρκές. Αποδοτικό γιατί πρέπει να συσχετίζεται άμεσα με τις ζημιές οι οποίες προκύπτουν ώστε η χρήση διαφορετικών επιταχυνσιογραφημάτων να παράγει σχετικά μικρή διασπορά τελικών αποτελεσμάτων, αλλά και επαρκές έτσι ώστε οι ζημιές αυτές, βάσει του μέτρου έντασης, να μην σχετίζονται σε σημαντικό βαθμό με άλλες παραμέτρους τις εδαφικής κίνησης, όπως το μέγεθος του σεισμού και η απόσταση από το ρήγμα. Στο τέλος, επιλέγεται ένα μέτρο έντασης για το οποίο υπάρχουν οι περισσότερες πληροφορίες και αποδεικνύει ότι προβλέπει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το μέγεθος ζημιών σε διάφορες κατασκευές.

Το τελικό αποτέλεσμα του σταδίου αυτού είναι η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας που παρουσιάζει τη μεταβολή ενός επιλεγμένου μέτρου έντασης (εδαφική παράμετρος) σε σχέση με τη μέση ετήσια συχνότητα (MAF) υπέρβασης (Boomer and Abrahamson, 2006). Θεωρώντας ότι η χρονική συχνότητα του σεισμού περιγράφεται από το πιθανοτικό μοντέλο του Poisson, η πιθανότητα υπέρβασης ενός μεγέθους έντασης σε «t» έτη που αντιστοιχεί στην δεδομένη MAF υπέρβασης μπορεί να υπολογιστεί μέσω της Εξίσωσης (4.3), όπου ως «t» μπορεί να επιλεγεί η διάρκεια ζωής της κατασκευής:

$$P(IM) = 1 - e^{-\lambda(IM)} \quad (4.3)$$

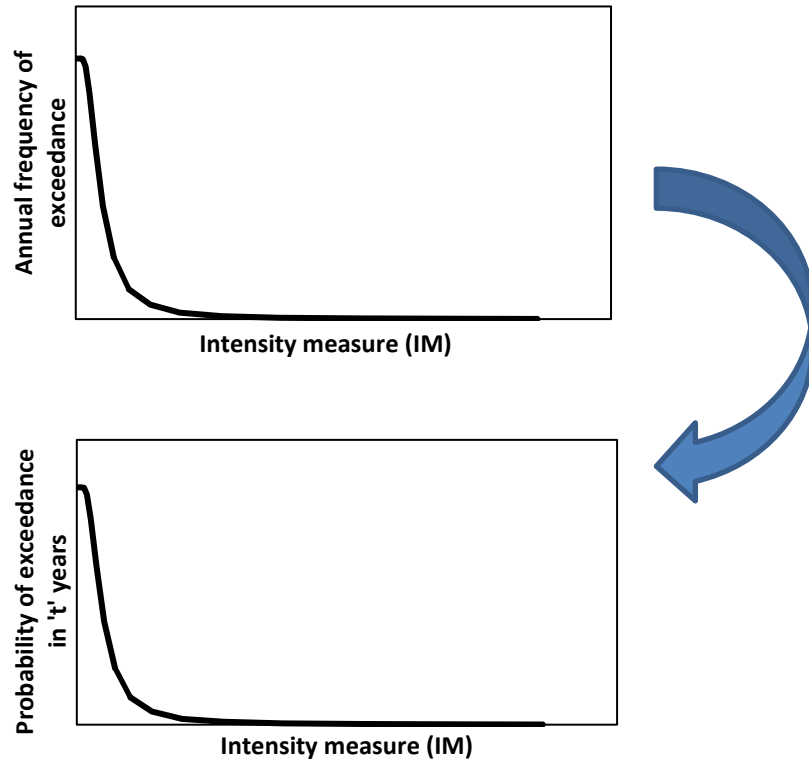
Όπου IM είναι το μέτρο έντασης,  $\lambda(IM)$  είναι η MAF υπέρβασης του IM, και  $P(IM)$  είναι η πιθανότητα υπέρβασης του IM σε «t» έτη (Σχήμα 4.2). Η πιθανότητα κάθε τιμής του IM, δηλαδή η  $p(IM)$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την πιθανότητα υπέρβασης POE του IM μέσω της Εξίσωσης 4.4:

για  $m = 1$ : # πλήθος IMs

$p(IM) = P(IM_m)$ , αν  $m = \#$  πλήθους IMs

$$p(IM_m) = p(IM_m) - p(IM_{m+1}), \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση} \quad (4.4)$$

Ως μέτρα έντασης συνήθως χρησιμοποιούνται οι τιμές των PGA, PGV, δηλαδή οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα, όπως επίσης και η τιμή της φασματικής επιτάχυνσης που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής,  $S_a(T_1)$ . Οι συγκεκριμένες παράμετροι χρησιμοποιούνται ευρέως ως IM, διότι οι πιο σημαντικές σχέσεις σεισμικής εξασθένισης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας έχουν αναπτυχθεί για αυτές τις παραμέτρους.



Σχήμα 4.2: Σχέση μεταξύ της μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης (MAF) και της πιθανότητας υπέρβασης ενός IM μέσω του μοντέλου Poisson.

### **4.3 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Η στατική ανάλυση της κατασκευής πραγματοποιείται για να καθοριστεί η απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα ποικίλα επίπεδα και χαρακτηριστικά του σεισμικού κινδύνου μέσω μιας πιθανοτικής διαδικασίας. Οι αβεβαιότητες που εμπεριέχονται σε αυτό το στάδιο και αφορούν τις παραμέτρους που επηρεάζουν το μοντέλο της κατασκευής, όπως για παράδειγμα είναι η μάζα, η απόσβεση, η δυσκαμψία και η αντοχή θεωρείται ότι ενσωματώνονται στο μοντέλο προσομοίωσης. Σύμφωνα με την μεθοδολογία, για κάθε επίπεδο έντασης σεισμικού κινδύνου εκτελούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστοριών, με σκοπό να γίνει εκτίμηση της απόκρισης της κατασκευής σε όρους EDP, χρησιμοποιώντας τις εδαφικές κινήσεις που αφορούν το συγκεκριμένο επίπεδο έντασης.

Ως δείκτες EDP μπορούν να χρησιμοποιηθούν τοπικές παράμετροι, όπως είναι οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις που υφίστανται τα μέλη, ή καθολικές παράμετροι, όπως είναι η επιτάχυνση και μετακίνηση κάθε ορόφου, και η σχετική ανηγμένη μετατόπιση μεταξύ των ορόφων. Για τα φέροντα δομικά στοιχεία ( structural components), όπως είναι τα τοιχία, τα υποστυλώματα, οι δοκοί κ.λπ., κρίνεται καταλληλότερη επιλογή ως EDP η δύναμη (για παράδειγμα η αξονική ή τέμνουσα δύναμη σε μη πλαστικό μέλος) ή η παραμόρφωση (για παράδειγμα η πλαστική στρόφη για πλαστικό στοιχείο) που δέχεται το ίδιο το στοιχείο, ενώ για μη-δομικά στοιχεία (non- structural components), όπως για παράδειγμα είναι το περιεχόμενο και ο εξοπλισμός της κατασκευής, καλύτερη επιλογή αποτελεί ένας καθολικός δείκτης, όπως είναι η επιτάχυνση του ορόφου. Μια ιδιαίτερα χρήσιμη παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καθολική ανάλυση του κτιρίου είναι η σχετική ανηγμένη μετακίνηση των ορόφων (interstorey drift), καθώς περιγράφει ικανοποιητικά τόσο τα δομικά (structural), όσο και τα μη δομικά (non-structural) στοιχεία της κατασκευής. Επίσης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί δείκτες EDP για διαφορετικά μέλη της κατασκευής, έτσι το πλήθος των χρησιμοποιούμενων EDP στην μελέτη ορίζονται με τον δείκτη j.

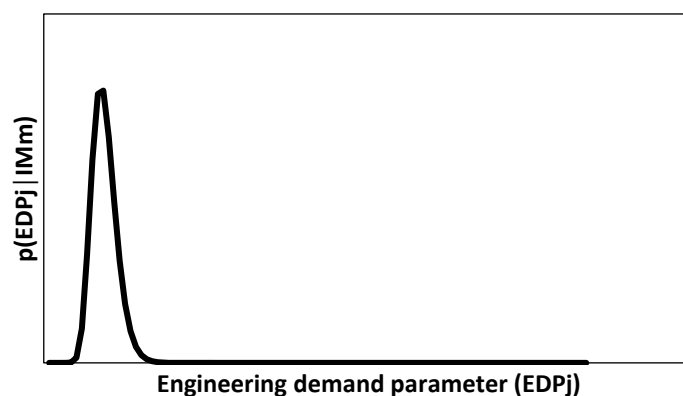
Ένα σημείο που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η περίπτωση της καθολικής κατάρρευσης της κατασκευής, που είναι δυνατόν να επέλθει σε σεισμικές διεγέρσεις μεγαλύτερης έντασης. Η περίπτωση της ολικής κατάρρευσης της κατασκευής αντιστοιχεί σε ανεξέλεγκτη αύξηση της απόκρισης της κατασκευής που όμως αντιστοιχεί σε μικρή αύξηση της έντασης που υφίσταται. Στην PEER-PBEE μεθοδολογία η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται ξεχωριστά,

αφού στον υπολογισμό της πιθανότητας της δεν παρουσιάζονται διαφορές ανάμεσα στις ομάδες που έχουν διαμορφωθεί για τα δομικά στοιχεία (damageable groups). Η πιθανότητα, λοιπόν, να συμβεί ολική κατάρρευση (C-Collapse), δηλαδή η  $p(C|IM)$ , μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά ως το πλήθος των προσομοιώσεων που οδήγησαν σε ολική κατάρρευση της κατασκευής ως προς το συνολικό πλήθος των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν για το συγκεκριμένο επίπεδο έντασης. Αντίστοιχα, η πιθανότητα για να μην παρουσιαστεί κατάρρευση στην κατασκευή (NC- No Collapse), ορίζεται σύμφωνα με την θεωρία των πιθανοτήτων ως εξής:

$$p(NC|IM) = 1 - p(C|IM),$$

αφού τα δύο σενάρια (κατάρρευσης-μη κατάρρευσης) αποτελούν συμπληρωματικά ενδεχόμενα.

Κατά την εκτέλεση αυτού του σταδίου, επιλέγεται μια κατανομή, όπως για παράδειγμα η λογαριθμοκανονική, που περιγράφει κατάλληλα το συγκεκριμένο δείκτη απόκρισης  $EDP_j$  που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί, και υπολογίζονται οι παράμετροι της κατανομής, δηλαδή η μέση τιμή (median) και τυπική απόκλιση (beta), από τις πληροφορίες που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της κατασκευής για την περίπτωση της μη κατάρρευσης. Έχοντας αυτά τα στοιχεία, για κάθε  $EDP_j$  μπορεί να δημιουργηθεί η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας (PDF) (Εικόνα 4.3), έτσι ώστε ως τελικό αποτέλεσμα αυτού του σταδίου να εξάγεται συνολικά ένας αριθμός PDFs ίσος με  $\alpha \times \beta$ , όπου  $\alpha$  είναι ο αριθμός των μέτρων έντασης (IM) που έχουν οριστεί και  $\beta$  είναι ο αριθμός των θεωρούμενων EDPs.



Εικόνα 4.3: Καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ενός EDP ως αποτέλεσμα του βήματος 2

## 4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΛΑΒΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κύριο πλεονέκτημα της μεθοδολογίας PEER-PBEE σε σχέση με προγενέστερες μεθόδους είναι ότι χρησιμοποιεί ως μεταβλητές απόφασης (DVs) παραμέτρους που είναι σημαντικές για τους ιδιοκτήτες, αντί να χρησιμοποιεί μέτρα κατανοητά μόνο από μηχανικούς, όπως είναι οι δυνάμεις και οι μετακινήσεις. Από το προηγούμενο στάδιο της ανάλυσης έχουν καθοριστεί οι πιθανότητες των EDPs, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα επόμενα βήματα ώστε να καθοριστούν οι πιθανότητες υπέρβασης των μεταβλητών απόφασης.

Ο σκοπός του σταδίου υπολογισμού των βλαβών είναι η εκτίμηση της υλικής ζημιάς που έχει επέλθει σε κάθε ομάδα μελών ή σε ολόκληρο το σύστημα. Έτσι, αν και μπορούν να δοθούν πολλοί διαφορετικοί ορισμοί για την περιγραφή των δεικτών βλάβης (damage measures (DMs)), ο επικρατέστερος ορισμός των DMs αντιστοιχεί στο μέγεθος της επισκευής η οποία απαιτείται προκειμένου να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση το μέλος ή ολόκληρη η κατασκευή.

Σε κάθε επίπεδο βλάβης παρουσιάζεται διακύμανση για κάθε ομάδα μελών, ακόμα και αν χρησιμοποιείται κοινό μέτρο απόκρισης EDP. Αυτό το γεγονός οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: την αβεβαιότητα που απορρέει από τα χαρακτηριστικά του υλικού και τις διαφορές που παρατηρούνται στον τύπο και την ιστορία της απόκρισης της κατασκευής. Καθώς ως EDPs συνήθως χρησιμοποιούνται μέγιστες τιμές των δεικτών, είναι δυνατό να παρατηρηθούν διαφορές στο πώς επιτεύχθηκε αυτή η μέγιστη τιμή, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις βλάβες που παρατηρούνται και με τη σειρά τους αυτές οι διαφοροποιήσεις να συμβάλλουν στη διακύμανση του δείκτη βλάβης (DM) που σχετίζεται με το μέτρο απόκρισης. Συνεπώς, κάθε τιμή του μέτρου απόκρισης EDP αντιστοιχεί σε πολλαπλά επίπεδα βλαβών, με διαφορετικές πιθανότητες (Σχήμα 4.4).

Ο τρόπος που χρησιμοποιείται για να καθοριστούν οι ζητούμενες πιθανότητες είναι οι συναρτήσεις τρωτότητας, που έχουν περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η κάθε καμπύλη τρωτότητας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα υπέρβασης ενός δείκτη βλάβης DM για διάφορες τιμές ενός μέτρου απόκρισης EDP. Κάθε συνάρτηση τρωτότητας μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με μια πιθανοτική κατανομή της φέρουσας ικανότητας κάθε μέλους. Αν θεωρήσουμε την πιθανότητα ένα μέλος να υπερβεί την κατάσταση βλάβης  $Y$  όταν εκτεθεί σε ένα μέτρο απόκρισης  $X$  με τιμή  $x$ , τότε αυτή η πιθανότητα είναι ίση με την πιθανότητα η

τυχαία ικανότητα του μέλους για τη δεδομένη κατάσταση βλάβης σε όρους του μέτρου  $X$ , να είναι μικρότερη του  $x$ . Για κάθε μέλος, συγκρίνεται η απόκριση στην οποία εκτίθεται με την φέρουσα ικανότητα του, προκειμένου να καθοριστεί η πιθανότητα το μέλος να έχει ξεπεράσει την οριακή του κατάσταση και να απαιτεί επισκευή ή αντικατάσταση. Πραγματοποιώντας αυτή τη διαδικασία σύγκρισης για κάθε μέλος, δημιουργείται μια πλήρης εικόνα της κατάστασης των βλαβών όλου του κτιρίου και γίνεται γνωστό το σύνολο των επισκευών που απαιτείται προκειμένου να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

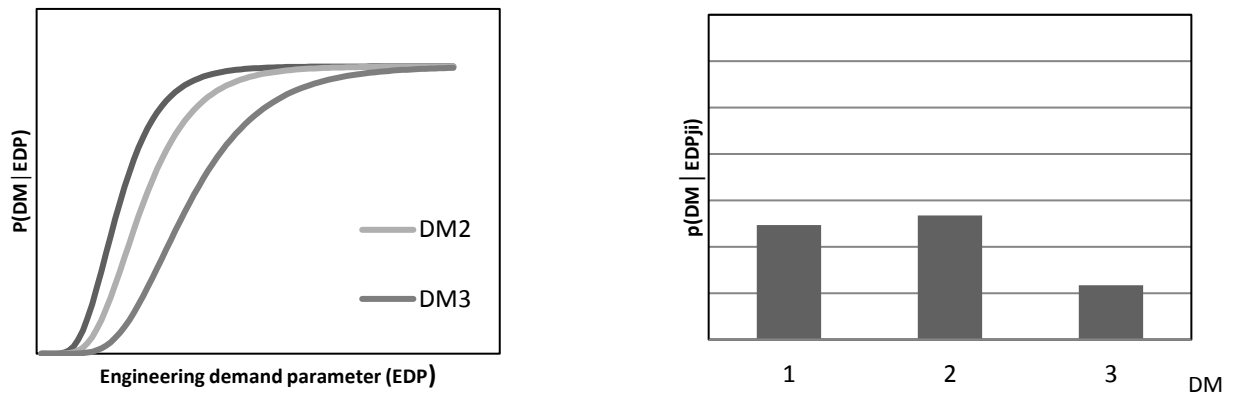
Οι συναρτήσεις τρωτότητας μπορούν να αναπτυχθούν τόσο για δομικά όσο και για μη-δομικά στοιχεία της κατασκευής χρησιμοποιώντας αναλυτικές ή εμπειρικές μεθόδους. Κάθε μέλος της κατασκευής που μπορεί να υποστεί βλάβη κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης εντάσσεται σε μια ομάδα βλάβης (damageable group), τα μελή της οποίας επηρεάζονται από το ίδιο μέτρο απόκρισης EDP με παρόμοιο τρόπο, έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε κοινή συνάρτηση τρωτότητας. Η κάθε συνάρτηση τρωτότητας περιγράφεται μέσω μιας καμπύλης (fragility curve), που διαμορφώνεται από την πιθανότητα υπέρβασης ενός δείκτη βλάβης DM, όπως επίσης και από τις τιμές των μέτρων απόκρισης  $EDP_j^i$ , όπου ο δείκτης  $j$  αντιστοιχεί σε κάθε ομάδα βλάβης, ενώ ο δείκτης  $i$  αντιστοιχεί στο πλήθος του δείγματος των EDP. Η ζητούμενη πιθανότητα κάθε δείκτη βλάβης DM υπολογίζεται μέσω των πιθανοτήτων υπέρβασης των συναρτήσεων τρωτότητας μέσω της Εξίσωσης (4.5):

για  $k = 1$ : # πλήθος DMs

$$P(DM_k | EDP_j^i) = P((DM_k | EDP_j^i), \text{αν } k = \# \text{ πλήθους DMs}$$

$$P(DM_k | EDP_j^i) = P((DM_k | EDP_j^i) - P((DM_{k+1} | EDP_j^i), \text{σε άλλη περίπτωση} \quad (4.5)$$





Σχήμα 4.4: Καμπύλες τρωτότητας και πιθανότητα  $p$  των δεικτών βλαβών  $DMs$  για μια τιμή του μέτρου απόκρισης  $EDP_j^i$ .

## 4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας PEER-PBEE αποτελεί η ανάλυση απωλειών, όπου τα στοιχεία που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του προηγούμενου βήματος αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό των τελικών πιθανοτήτων των δεικτών απόφασης (DVs). Ως μεταβλητή απόφασης μπορεί να θεωρηθεί μια από τις ακόλουθες:

- Ανθρώπινα θύματα: Ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών κρίνεται ως η σημαντικότερη παράμετρος του αντισεισμικού σχεδιασμού και αποτελεί άμεση συνέπεια των βλαβών που υφίστανται οι εγκαταστάσεις.
- Οικονομικό κόστος: Οι χρηματικές απώλειες συνίστανται στο κόστος επισκευής των μελών του φορέα που έχουν υποστεί βλάβες και στο κόστος αντικατάστασης όσων έχουν καταπονηθεί ανεπανόρθωτα.
- Διάρκεια εργασιών αποκατάστασης: Το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να ολοκληρωθούν οι εργασίες αποκατάστασης της κατασκευής, κατά το οποίο η χρήση και η λειτουργικότητα του κτιρίου αναστέλλεται.
- Τραυματισμοί: Ο αριθμός των τραυματιών αποτελεί εξίσου άμεση συνέπεια των βλαβών που υφίστανται οι εγκαταστάσεις.

Η μεταβλητή που επιλέγει να χρησιμοποιήσει η προκείμενη μεθοδολογία είναι το οικονομικό κόστος, καθώς η εκτίμηση της αναμενόμενης χρηματικής απώλειας που οφείλεται στις βλάβες που έχουν προκληθεί από σεισμική διέγερση είναι άμεσου ενδιαφέροντος για τους ιδιοκτήτες των κτιρίων, ώστε να λάβουν τις απαραίτητες αποφάσεις για την μετασεισμική αποκατάσταση των κατασκευών. Η αξία αυτής της επιλογής ως δείκτη απωλειών (DV) επιτείνεται από το γεγονός, ότι σε παγκόσμιο επίπεδο παρατηρείται ότι η εκτίμηση του κτιριακού κόστους έχει αρχίσει να ενσωματώνεται στην μέθοδο σχεδιασμού με βάση τις επιτελεστικότητες, προκειμένου να συσχετίζεται η απόκριση της κατασκευής κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων με τις αναμενόμενες χρηματικές απώλειες.

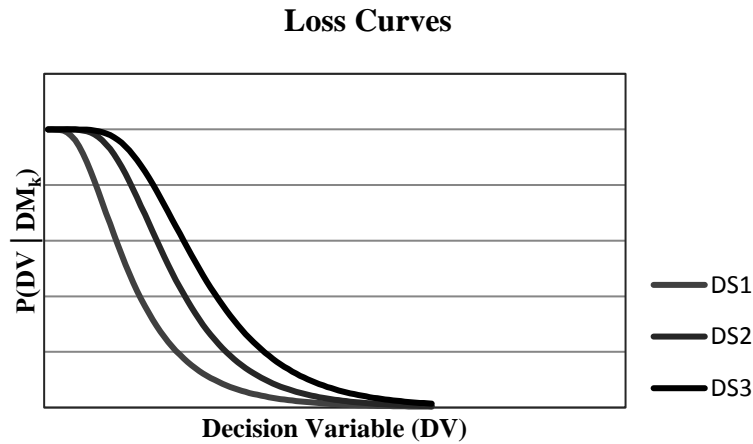
Τα στοιχεία που θεωρούνται σημαντικά για αυτή την εκτίμηση, εκτός από την μέση τιμή των χρηματικών απωλειών, είναι η ποσοτικοποίηση του αναμενόμενου εύρους απωλειών, όπως επίσης και η μέγιστη τιμή που μπορούν να πάρουν. Επομένως, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας που συνδέεται με την εκτίμηση των οικονομικών απωλειών, τόσο για τον υπολογισμό αυτών των απαραίτητων στοιχείων,

όσο και για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης κάθε συγκεκριμένης τιμής κόστους. Σύμφωνα με τις μεθοδολογίες που έχουν προταθεί, η μεταβλητότητα του κόστους για ένα δεδομένο επίπεδο σεισμικής έντασης αποτελεί μια συνάρτηση της μεταβλητότητας του κόστους που συνδέεται με την κατάρρευση της κατασκευής και του αντίστοιχου κόστους που συνδέεται με την μη κατάρρευση της κατασκευής, όπως επίσης και στην συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των δύο καταστάσεων. Στην περίπτωση της μη κατάρρευσης της κατασκευής η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη, ενώ στην περίπτωση της ολικής κατάρρευσης της κατασκευής, η ζητούμενη διασπορά οφείλεται στη μεταβλητότητα που συνδέεται με τις εργασίες δόμησης του κτιρίου, αφού απαιτείται η ολοκληρωτική ανακατασκευή του, δηλαδή υπονοείται ότι το κόστος ανακατασκευής του κτιρίου με την κατασκευή ενός καινούριου κτιρίου έχουν κοινή μεταβλητότητα.

Τα στοιχεία που αφορούν τα κατασκευαστικά κόστη και είναι απαραίτητα για την εξαγωγή των δεδομένων τα οποία απαιτούνται για την πιθανολογική μελέτη των οικονομικών απωλειών σπανίζουν, λόγω του τρόπου με τον οποίον οι εργολάβοι κοστολογούν τα οικοδομικά έργα. Συνήθως οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούν, οι οποίες έχουν διαμορφωθεί από τα οικονομικά κόστη παλαιότερων έργων που έχουν αναλάβει, παραμένουν απόρρητα για τους μελετητές για λόγους ανταγωνισμού της αγοράς. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει σαφής διάκριση του απαιτούμενου κόστους ανά δομικό στοιχείο της κατασκευής, αλλά ένα συνολικό κόστος για όλες τις εργασίες που απαιτούνται που λειτουργεί ως κύριος προϋπολογισμός κάθε έργου. Ωστόσο, πολλοί μελετητές έχουν ασχοληθεί με τον υπολογισμό της αναμενόμενης χρηματικής απώλειας και της αντίστοιχης διασποράς λόγω ενός σεισμικού γεγονότος, με ανάλυση που προσεγγίζει κάθε δομικό στοιχείο ξεχωριστά αν και τα αντίστοιχα οικονομικά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα. Για παράδειγμα, οι Aslani and Miranda (2005) ανέπτυξαν εξισώσεις κλειστού τύπου για τον υπολογισμό της διασποράς για όλη την κατασκευή με την άθροιση των διασπορών των επιμέρους μελών της κατασκευής.

Σε αυτό το στάδιο υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης των οικονομικών απωλειών για τις διαφορετικές ομάδες των δομικών στοιχείων σε διαφορετικά επίπεδα βλάβης (DMs) διαμορφώνοντας έτσι τις συναρτήσεις απωλειών (loss functions). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει γίνει ομαδοποίηση των στοιχείων της κατασκευής, καθώς δεν είναι πρακτικό να γίνει ο υπολογισμός για κάθε δομικό και μη δομικό στοιχείο ξεχωριστά, η κατανομή της βλάβης ανά ομάδα στοιχείων (damageable group) μπορεί να έχει επίδραση

σε διαφορετικές μεταβλητές απωλειών (DVs) για το ίδιο επίπεδο βλαβών. Κατά αντιστοιχία, κάθε επίπεδο βλάβης (DM) μιας ομάδας μελών ανταποκρίνεται σε ποικίλες μεταβλητές απόφασης (DVs) με διαφορετικές πιθανότητες. Ο συνολικός αριθμός συναρτήσεων απωλειών (loss functions) για μια κατασκευή ισούται με  $\gamma \times \lambda$ , όπου  $\gamma$  είναι το πλήθος των δεικτών βλάβης (DM) και  $\lambda$  είναι το πλήθος των ομάδων δομικών στοιχείων της κατασκευής (Σχήμα 4.5).



*Εικόνα 4.5: Οι συναρτήσεις απώλειας για μια ομάδα δομικών στοιχείων της κατασκευής για τους αντίστοιχους δείκτες βλάβης που την αντιπροσωπεύουν.*

## 4.6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Το τελικό αποτέλεσμα της PEER-PBEE μεθοδολογίας είναι η καμπύλη απωλειών (loss curve), η οποία αναπαριστά την πιθανότητα υπέρβασης (POE) για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής απόφασης (DV). Για τη δημιουργία της έχει χρησιμοποιηθεί το ολικό θεώρημα πιθανότητας (total probability theorem) κατά το οποίο συνδυάζονται τα επιμέρους αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων, δηλαδή ανάλυσης σεισμικού κινδύνου, στατικής ανάλυσης της κατασκευής και ανάλυσης βλαβών και συνίσταται στον υπολογισμό του τριπλού ολοκληρώματος που περιγράφεται στην Εξίσωση 4.1.

Η διαδικασία υπολογισμού της καμπύλης απωλειών με τον αναλυτικό τρόπο που στηρίζεται εξ ολοκλήρου στην πιθανοτική ανάλυση σε όρους της μεταβλητής απόφασης (DV), όπου  $DV = DV^n \forall n$ , έχει ως αφετηρία τον καθορισμό των εξισώσεων απωλειών (loss functions) για την επιλεγμένη μεταβλητή απόφασης (DV), για κάθε ομάδα δομικών στοιχείων (πλήθος j) της κατασκευής, για κάθε k επίπεδο βλάβης DM που υφίσταται. Έπειτα, συνδυάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης απωλειών και της ανάλυσης βλαβών για κάθε ομάδα δομικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζεται η πιθανότητα υπέρβασης  $P(DV_j^n | EDP_j^i)$  για κάθε ομάδα βλάβης της κατασκευής, για όλες τις τιμές i του δείκτη απόκρισης EDP που έχουν χρησιμοποιηθεί στις καμπύλες τρωτότητας της αντίστοιχης ομάδας, μέσω της Εξίσωσης (4.6). Στη συνέχεια, συνδυάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων απωλειών, βλαβών και στατικής ανάλυσης της κατασκευής με στόχο τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης  $P(DV_j | NC, IM_m)$  της μεταβλητής απόφασης DV, για κάθε ομάδα βλάβης j της κατασκευής για κάθε τιμή IM που έχει χρησιμοποιηθεί κατά το δεύτερο βήμα της μεθοδολογίας στην στατική ανάλυση της κατασκευής. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα υπό την προϋπόθεση της περίπτωσης μη κατάρρευσης του φορέα (No Collapse) σύμφωνα με την Εξίσωση (4.7).

Επιτελικός στόχος είναι η εκτίμηση του συνολικού κόστους της κατασκευής, επομένως απαιτείται να αθροιστούν οι αντίστοιχες πιθανότητες  $P(DV_j | NC, IM_m)$ , για όλες τις ομάδες βλάβης στις οποίες έχουν κατηγοριοποιηθεί τα δομικά στοιχεία της κατασκευής, εξακολουθώντας να ισχύει η προϋπόθεση της μη κατάρρευσης της κατασκευής (Εξίσωση 4.8). Καθώς, όμως, η μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη και την περίπτωση της ολικής κατάρρευσης του φορέα (Collapse) υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης  $P(DV^n | C)$  για κάθε μεταβλητή απόφασης DV (πλήθος n), θεωρώντας ότι το κόστος ως μεταβλητής απόφασης ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Αξίζει να αναφερθεί πως η πιθανότητα υπέρβασης  $P(DV^n | C)$ , για την περίπτωση της ολικής κατάρρευσης, δεν συμπεριλαμβάνει

δέσμευση ως προς το μέτρο έντασης IM, σε αντίθεση με την πιθανότητα υπέρβασης για την περίπτωση μη ολικής κατάρρευσης  $P(DV^n | NC, IM_m)$ , καθώς η περίπτωση μη ολικής κατάρρευσης απαρτίζεται από διαφορετικά επίπεδα βλάβης και η συνεισφορά καθενός από αυτά διαφοροποιείται ανάλογα το μέτρο έντασης IM. Συνεπώς, καθίσταται εφικτό να συνδυαστούν οι δύο καταστάσεις μέσω της Εξίσωσης (4.9), προκειμένου να προκύψει η πιθανότητα υπέρβασης  $P(DV^n | IM_m)$ , που αφορά το σύνολο της κατασκευής για κάθε τιμή IM που έχει ληφθεί υπόψη στις επιμέρους αναλύσεις. Ο συνδυασμός αυτών των δύο καταστάσεων (Collapse, No Collapse) γίνεται μέσω υπολογισμού του αθροίσματος των πιθανοτήτων  $P(DV^n | NC, IM_m)$  και  $P(DV^n | C)$ , σταθμισμένων με τις πιθανότητες  $p(NC | IM_m)$  και  $p(C | IM_m)$  κάθε κατάστασης αντίστοιχα, για κάθε τιμή του δείκτη έντασης  $IM_m$ .

Στο τελευταίο στάδιο της διαμόρφωσης της καμπύλης απωλειών εντάσσεται στη διαδικασία η ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας, καθώς καθορίζεται η πιθανότητα υπέρβασης  $P(DV^n)$  κατασκευής, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (4.10), μέσω της συσχέτισης των πιθανοτήτων υπέρβασης  $P(DV^n | IM_m)$  της μεταβλητής απόφασης DV με τις πιθανότητες  $p(IM_m)$  των αντίστοιχων IM, που έχουμε ως δεδομένο από την ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας. Η τελική πιθανότητα  $P(DV^n)$  που προκύπτει αντιπροσωπεύει την πιθανότητα υπέρβασης που αντιστοιχεί σε «t» έτη, δηλαδή για τη διάρκεια που έχουν υπολογιστεί οι απαιτούμενες πιθανότητες υπέρβασης  $p(IM_m)$  για τις τιμές των IM στην ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας. Κατά την κατασκευή της καμπύλης απωλειών όπως αυτή περιγράφεται στην Εξίσωση (4.10) λαμβάνονται υπόψη όλα τα πιθανά σενάρια σεισμικού κινδύνου, παρόλο που σε κάποιες μελέτες της PEER-PBEE μεθοδολογίας η διαδικασία εκτελείται μόνο για συγκεκριμένες τιμές μέτρων έντασης IM, για παράδειγμα για τις τιμές με πιθανότητα υπέρβασης 2%, 10% και 20% στα 50 έτη. Σε αυτή τη περίπτωση, δεν χρησιμοποιείται τελικώς η Εξίσωση (4.10) και οι τελικές καμπύλες απωλειών για κάθε IM ξεχωριστά ορίζονται από την Εξίσωση (4.9).

Οι εξισώσεις που είναι αναγκαίες για την πραγματοποίηση της μεθοδολογίας PEER-PBEE είναι οι ακόλουθες:

$$P(DV_j^n | EDP_j^i) = \sum_k P(DV_j^n | DM_k) p(DM_k | EDP_j^i) \quad (4.6)$$

$$P(DV_j^n | NC, IM_m) = \sum_i P(DV_j^n | EDP_j^i) p(EDP_j^i | IM_m) \quad (4.7)$$

$$P(DV^n|NC, IM_m) = \sum_j P(DV_j^n|NC, IM_m) \quad (4.8)$$

$$P(DV^n|IM_m) = P(DV^n|NC, IM_m)p(NC|IM_m) + P(DV^n|C)p(C|IM_m) \quad (4.9)$$

$$P(DV^n) = \sum_m P(DV^n|IM_m)p(IM_m) \quad (4.10)$$

όπου:

- $p(IM_m)$ : η πιθανότητα του  $m$  μέτρου έντασης  $IM$  που έχει προκύψει ως αποτέλεσμα από την ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας (hazard analysis).
- $p(EDP_j^i | IM_m)$ : η πιθανότητα του  $i$  μέτρου απόκρισης  $EDP$  για τη  $j$  ομάδα βλάβης μελών της κατασκευής για κάθε μια από τις  $m$  τιμές του μέτρου έντασης  $IM$  που έχει προκύψει ως αποτέλεσμα της στατικής ανάλυσης της κατασκευής (structural analysis).
- $p(DM_k | EDP_j^i)$ : η πιθανότητα του  $k$  επιπέδου βλάβης  $DM$ , όταν υποβάλλεται στο  $i$  μέτρο απόκρισης  $EDP$  που έχει χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση των καμπύλων τρωτότητας για καθεμία από τις  $j$  ομάδες βλάβης των δομικών στοιχείων, αποτέλεσμα της ανάλυσης βλαβών (damage analysis).
- $P(DV_j^n | DM_k)$ : η πιθανότητα υπέρβασης της  $n$  μεταβλητής απόφασης  $DV$  για κάθε  $j$  ομάδα βλάβης της κατασκευής, όταν υφίσταται το  $k$  επίπεδο βλάβης, αποτέλεσμα που έχει προκύψει από την ανάλυση απωλειών (loss analysis).

## **4.7 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ MONTE CARLO**

Ο υπολογισμός του επιμέρους κόστους κάθε ομάδας βλάβης δομικών στοιχείων αλλά και του συνολικού κόστους επισκευής του κτιρίου είναι δυνατό να επιτευχθεί με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος στηρίζεται στον απευθείας υπολογισμό των ολοκληρωμάτων της μεθοδολογίας του PEER, και αναπτύχθηκε εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα (Εξισώσεις (4.6) έως (4.10)). Η δεύτερη μέθοδος υπολογίζει την κατανομή του κόστους επισκευής του κτιρίου αριθμητικά με προσομοίωση Monte Carlo.

Η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo βασίζεται στη θεωρία των μεγάλων αριθμών, σύμφωνα με την οποία η συμπεριφορά ενός στατιστικού δείγματος τείνει να σταθεροποιηθεί καθώς το μέγεθος του δείγματος τείνει προς το άπειρο. Επομένως, αντί ένα πιθανοτικό πρόβλημα να επιλυθεί με αριθμητικές ή αναλυτικές μεθόδους, η λύση του προσεγγίζεται με την πιθανοτική κατανομή των αποτελεσμάτων μιας στατιστικής επεξεργασίας. Η ακρίβεια της προσέγγισης εξαρτάται κυρίως από την κατανομή του δείγματος στον δειγματοχώρο του προβλήματος και φυσικά από το μέγεθος του. Η μέθοδος αυτή είναι ευχερέστερη από την πρώτη μέθοδο καθώς δεν καταλήγει σε μια τελική μέση τιμή και διασπορά για το κόστος επισκευής, αλλά προσφέρει ολόκληρη την κατανομή του κόστους

Η εκτέλεση της μεθόδου Monte Carlo στηρίζεται σε μια προσομοίωση η οποία δημιουργεί τυχαίους αριθμούς, οι οποίοι ακολουθούν συγκεκριμένη πιθανοτική κατανομή. Στην παρούσα μελέτη, θα χρειαστεί να δημιουργηθούν δείγματα τυχαίων μεταβλητών αφενός σύμφωνα με την τυπική κανονική κατανομή και αφετέρου σύμφωνα με τη λογαριθμοκανονική κατανομή.

### **4.7.1 Δημιουργία δείγματος κατά την Τυπική Κανονική Κατανομή**

Η κανονική κατανομή των πιθανοτήτων παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των στατικών αναλύσεων, επομένως είναι εξίσου σημαντική και η ικανότητα δημιουργίας της αντίστοιχης προσομοίωσης τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Προκειμένου να είναι εφικτή η εκκίνηση της διαδικασίας δημιουργίας μια σειράς κανονικών τυχαίων αριθμών  $z_1, z_2, \dots, z_n$  είναι ανάγκη να οριστεί πρώτα η αντίστοιχη σειρά



τυχαίων μεταβλητών  $u_1, u_2, \dots, u_n$  που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή και βρίσκονται εντός του εύρους τιμών  $[0,1]$ . Έπειτα, για κάθε τιμή  $u_i$  μπορεί να δημιουργηθεί η αντίστοιχη τιμή του  $z_i$ , σύμφωνα με την Εξίσωση 4.11.

$$z_i = \Phi^{-1}(u_i) \quad (4.11)$$

Όπου  $\Phi^{-1}$  είναι η αντίστροφη συνάρτηση της τυπικής κανονικής αθροιστικής συνάρτησης.

### 4.7.2 Δημιουργία δείγματος κατά την Λογαριθμοκανονική Κατανομή

Εάν η  $X$  θεωρείται μια τυχαία λογαριθμοκανονική μεταβλητή με μέση τιμή  $\mu_X$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_X$ , τότε η γένεση του δείγματος των τυχαίων αριθμών μέσω τη προσομοίωσης ξεκινάει με τη δημιουργία μιας σειράς μεταβλητών  $u_i$  που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή με τιμές που κυμαίνονται εντός του εύρους  $[0,1]$ . Έπειτα, καθίσταται εφικτή η δημιουργία της τιμής δείγματος  $z_i$  που ακολουθεί την τυπική κανονική κατανομή μέσω της Εξίσωσης 4.11. Τελικό στάδιο της διαδικασίας είναι η δημιουργία της σειράς τυχαίων μεταβλητών  $x_i$  που ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή, μέσω της σχέσης που συνδέει την κανονική με την λογαριθμοκανονική κατανομή, όπως αυτή περιγράφεται στην Εξίσωση 4.12.

$$x_i = \exp(\mu_{\ln X} + z_i \cdot \sigma_{\ln X}) \quad (4.12)$$

όπου:

$$\sigma_{\ln X}^2 = \ln(V_X^2 + 1) \approx V_X^2 \quad (4.13)$$

$$\mu_{\ln X} = \ln(\mu_X) - \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\ln X}^2 \approx \ln(\mu_X) \quad (4.14)$$

## 4.8 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η αβεβαιότητα (uncertainty) αποτελεί ένα καθοριστικό παράγοντα στη σεισμική μηχανική και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν από τις σεισμικές αναλύσεις. Σύμφωνα με τους Porter et al.(2002), εάν κάποιος θέλει να εξασφαλίσει ένα κατώτατο επίπεδο επιτελεστικότητας (performance) της κατασκευής με

συγκεκριμένη εμπιστοσύνη (confidence), τότε η μεγαλύτερη αβεβαιότητα στις σεισμικές απαιτήσεις ή στην ικανότητα του συστήματος, αυξάνει το επίπεδο της ικανότητας για την οποία πρέπει να σχεδιαστεί. Εάν κάποιος μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα, μπορεί γενικά να μειώσει το κόστος.

Εντούτοις υπάρχουν πολλές πηγές αβεβαιότητας στη σεισμική μηχανική των κατασκευών οι οποίες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις φυσικές αβεβαιότητες (natural/aleatory randomness), δηλαδή αυτές που οφείλονται στην τυχαματική φύση και τις οποίες δεν μπορούμε να μειώσουμε ως μελετητές. Τέτοιες αβεβαιότητες είναι το επίπεδο έντασης της εδαφικής κίνησης δηλαδή ουσιαστικά το σεισμικό φορτίο, πληροφορίες για τη χρήση του κτιρίου προκειμένου να καθοριστούν με ακριβείς τα κατακόρυφα φορτία τα οποία καταπονούν την κατασκευή, όπως επίσης και οι ιδιότητες των υλικών και οι διαστάσεις των μελών για ένα υπό σχεδίαση κτίριο. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις επιστημικές αβεβαιότητες (epistemic uncertainty), δηλαδή αυτές που οφείλονται στην ελλιπή μας γνώση και οι οποίες μέσω πειραματικών διαδικασιών μπορούν να μειωθούν. Τέτοιες αβεβαιότητες είναι οι ιδιότητες του εδάφους, το κόστος κατασκευής και επιδιόρθωσης των δομικών στοιχείων, οι αβεβαιότητες της μεθόδου ανάλυσης, όπως επίσης οι ιδιότητες των υλικών και οι διαστάσεις των μελών για ένα υφιστάμενο κτίριο. Το ανθρώπινο σφάλμα, αν και αποτελεί ένα δυνητικά τεράστιο παράγοντα αβεβαιότητας, δε λαμβάνεται υπόψη.

Κάποιος μπορεί να αξιολογήσει και να μειώσει ενδεχομένως τις αβεβαιότητες σε κάθε μία από τις μεταβλητές που εμπίπτουν στην κατηγορία των επιστημικών αβεβαιοτήτων, αλλά το ερώτημα το οποίο τίθεται, είναι ποιες από αυτές είναι οι πιο σημαντικές και αξίζουν την περισσότερη προσοχή. Με το όρο σημαντικές μεταβλητές, ορίζονται αυτές των οποίων η αβεβαιότητα συμβάλλει εντονότερα στη συνολική αβεβαιότητα της αντισεισμικής απόδοσης του κτιρίου. Σύμφωνα με τους Porter et al. (2002), υπάρχουν δύο οφέλη από τη γνώση της σχετικής συμβολής κάθε μεταβλητής στη συνολική αβεβαιότητα της αντισεισμικής απόδοσης. Πρώτον, οι μεταβλητές που δεν συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην ολική αβεβαιότητα μπορούν να ληφθούν υπόψη με την καλύτερα εκτιμημένη τιμή τους (best-estimate value), παρά να τύχουν χειρισμού ως αβέβαιες, και να απλοποιηθεί με αυτό τον τρόπο το πρόβλημα ανάλυσης. Δεύτερον, οι μεταβλητές που συμβάλλουν έντονα στην ολική αβεβαιότητα απόδοσης μπορούν να ληφθούν υπόψη με περισσότερες από μία πιθανές τιμές και συγκεκριμένα, προσομοιώνοντας τις με μια μέση / διάμεση τιμή η οποία αποτελεί την καλύτερα εκτιμημένη τιμή και με μια διασπορά, καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο ένα ευρύτερο φάσμα τιμών τις οποίες δύνανται αυτές οι μεταβλητές να λάβουν. Μειώνοντας την

ολική αβεβαιότητα, μειώνεται η διασπορά και αυξάνεται παράλληλα η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, μειώνοντας τις επιστημικές αβεβαιότητες τις οποίες περιλαμβάνει ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός κτιρίου υπό σεισμικά φορτία, για τον υπολογισμό του κόστους της μετασεισμικής του αποκατάστασης, μειώνεται η διασπορά γύρω από την αναμενόμενη τιμή του κόστους αυτού, δηλαδή πόσο πιο πάνω ή πιο κάτω μπορεί να κυμανθεί η τιμή, και έτσι είναι πιο ακριβή τα τελικά αποτελέσματα. Εντούτοις, η διασπορά αυτή δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω από αυτό που επιτρέπει η φυσική διασπορά των δεδομένων.

Οι βασικές αβέβαιες μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τις εξαγόμενες παραμέτρους για την εκτίμηση της επιτελεστικότητας μιας κατασκευής, και οι οποίες είναι οι ζημιές των μελών ενός κτιρίου μετά από ένα σεισμό, το κόστος και η χρονική διάρκεια επισκευής του είναι:

- Η ένταση και η μορφή της εδαφικής κίνησης.
- Η ικανότητα των δομικών στοιχείων να αντιστέκονται στις ζημιές.
- Το κόστος, τα έξοδα και το κέρδος του εργολάβου.

Άλλες παράμετροι οι οποίες θα μπορούσαν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις μελλοντικές δαπάνες επισκευής είναι η μάζα και η απόσβεση της κατασκευής, το είδος προσομοιώματος το οποίο χρησιμοποιείται, η αστοχία του εδάφους, η μέθοδος επισκευής που υιοθετείται για την αποκατάσταση δεδομένου τύπου ζημιάς, η επιλογή του να γίνουν οι επισκευές αυτές από ένα συνεργείο ή περισσότερα, οι αλλαγές στους κανονισμούς με αποτέλεσμα να απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση του κτιρίου, σε σχέση με τις απαιτήσεις του κανονισμού βάσει των οποίων σχεδιάστηκε πριν το σεισμό, τυχόν ενισχύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο κτίριο και δεν φαίνονται στα σχέδια κ.λπ. (Porter et al. 2002). Αναλυτικότερα:

- *Αβεβαιότητα στην ένταση και τη μορφή της εδαφικής κίνησης*

Ο σεισμός αποτελεί ένα απρόβλεπτο φυσικό γεγονός, του οποίου δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή η θέση, ο χρόνος, το είδος, το μέγεθος, η απόσταση, η κατευθυντικότητα, το συχνοτικό περιεχόμενο, η διάρκεια κ.λπ. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι παράμετροι δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής, συνήθως επιλέγεται να εκφράζεται η σεισμική απειλή με ένα σύνολο επιταχυνσιογραφημάτων κλιμακωμένων σε κατάλληλα επίπεδα έντασης και συγκεκριμένα στο επίπεδο σεισμού/σχεδιασμού που αναμένεται για την εκάστοτε υπό μελέτη περιοχή και κτίριο. Στην παρούσα μεθοδολογία PEER-PBEE,

αξιοποιούνται τα αποτελέσματα τα οποία έχουν προκύψει από αναλύσεις με πολλαπλά ζεύγη επιταχυνσιογραφημάτων τα οποία έχουν κλιμακωθεί σε διάφορα επίπεδα έντασης. Ως εκ τούτου, καλύπτεται πολύ μεγάλο φάσμα πιθανών σεναρίων σεισμού προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και αξιοπιστία ότι η μεθοδολογία η οποία εφαρμόζεται προβλέπει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις πιθανές ζημιές οι οποίες ενδέχεται να προκύψουν μετά από ένα σεισμικό γεγονός στα υπό μελέτη κτίρια.

- *Αβεβαιότητα στη φέρουσα ικανότητα των μελών της κατασκευής*

Η θραυστότητα (fragility) ή τρωτότητα (vulnerability) ενός μέλους αποτελεί μια δεσμευμένη κατανομή πιθανότητας και ορίζεται ως η πιθανότητα το μέλος να ξεπεράσει ένα ανεπιθύμητο επίπεδο βλάβης για κάποια δεδομένη τιμή μέτρου απόκρισης (demand parameter), όπως για παράδειγμα η ρηγμάτωση ή η κατάρρευση μιας τοιχοπλήρωσης (επίπεδο βλάβης) όταν ξεπεραστεί μία τιμή της σχετικής μετατόπισης των ορόφων (μέτρο απόκρισης), μεταξύ των οποίων βρίσκεται η τοιχοπλήρωση. Τελευταίως, ερευνητές όπως για παράδειγμα οι Goulet et al. (2007), διακρίνουν τη θραυστότητα από την τρωτότητα, με την πρώτη να αφορά δέσμευση στο μέτρο απόκρισης και τη δεύτερη, δέσμευση στο μέτρο έντασης, κάτι το οποίο δεν υιοθετείται στην παρούσα διατριβή.

Η τρωτότητα των μελών για τις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας, μοντελοποιείται ως πιθανοτική κατανομή της οποίας η τυχαία μεταβλητή είναι η αντοχή του μέλους για τη δεδομένη στάθμη σε όρους του μέτρου απόκρισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά στη πιθανοτική κατανομή, τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα στο οριακό μέτρο απόκρισης το οποίο οδηγεί στη συγκεκριμένο επίπεδο βλάβης. Για την περιγραφή της τρωτότητας των μελών, χρησιμοποιείται συνήθως η λογαριθμοκανονική κατανομή (π.χ. Naeim et al. 2006, Goulet et al. 2007). Βάσει αυτής της λογικής, προκύπτουν οι καμπύλες τρωτότητας, για τις οποίες γίνεται εκτενής αναφορά στο τέταρτο κεφάλαιο.

Σημαντικός παράγοντας αβεβαιότητας ο οποίος δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία είναι η συσχέτιση (correlation) μεταξύ των αντοχών των στοιχείων του κτιρίου αφού ίδια στοιχεία π.χ. υποστυλώματα στον ίδιο όροφο, πιθανόν να έχουν ανάλογες και ισχυρά συσχετισμένες αντοχές αφού έχουν κατασκευαστεί από το ίδιο συνεργείο με τα ίδια υλικά (Baker 2008).

- *Αβεβαιότητα στο κόστος του εργολάβου*

Ο όρος κόστος του εργολάβου, σε γενικές γραμμές, περιλαμβάνει το κόστος επισκευής των μελών προκειμένου να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, τα έξοδα και το κέρδος του εργολάβου (contractor overhead and profit).

Τα μέλη τα οποία έχουν πάθει ζημιές ή έχουν καταστραφεί ολοκληρωτικά, ταξινομούνται σε κατηγορίες, βάσει ενός ταξινομικού συστήματος (π.χ. Uniformat System ASTM 1996). Οι εργασίες οι οποίες θα πρέπει να διενεργηθούν για την επισκευή των μελών, εκτιμώνται βάσει των ποσοτήτων σε κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες. Το κόστος για κάθε κατηγορία υπολογίζεται βάσει των εργατοωρών ανά μέλος κατασκευής. Το σύνολο αυτών των κοστών συνθέτει το άμεσο κόστος, στο οποίο εν συνεχεία προστίθεται το έμμεσο κόστος το οποίο δεν εξαρτάται από αυτήν την κατηγοριοποίηση, και αποτελείται από τα έξοδα (π.χ. εξασφάλιση αδειών, διαχείριση) και το κέρδος του εργολάβου. Τα έξοδα και το κέρδος του εργολάβου μαζί, τείνουν να είναι γύρω στο 15% με 20% του άμεσου κόστους, με μεγαλύτερου μεγέθους εργασίες να τείνουν να έχουν μικρότερο ποσοστό εξόδων και κέρδους. Το κόστος επισκευής των μελών χαρακτηρίζεται από κάποιο βαθμό αβεβαιότητας λόγω του εύρους του κόστους των υλικών, της αβεβαιότητας στην παραγωγικότητα των εργατών κ.λπ., αβεβαιότητες για τη διαχείριση των οποίων δημιουργούνται οι κατάλληλες πιθανοτικές κατανομές, όπως ήδη αναφέρθηκε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

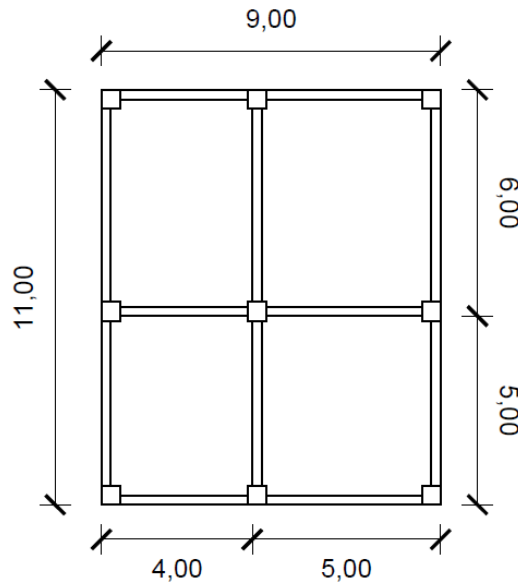
Η μεθοδολογία PEER-PBEE που αναπτύχθηκε αναλυτικώς στα παραπάνω κεφάλαια μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την εξέλιξη του αντικειμένου αξιολόγησης των σεισμικών βλαβών και ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στην προσπάθεια ανάπτυξης αντίστοιχων μεθόδων. Συνεπώς στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπου κύριος στόχος είναι η εκτίμηση των μετασεισμικών βλαβών και ο υπολογισμός του αντίστοιχου κόστους επισκευής, για συγκεκριμένα σενάρια σεισμού επιλέχθηκε να εφαρμοστούν τα κύρια μέρη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, όμως σε συνδυασμό με μεθόδους που έχουν εισηγηθεί άλλες μελέτες (για παράδειγμα η μέθοδος Monte Carlo), ώστε να προκύψει μια πληρέστερη ανάλυση για το υπό μελέτη πρόβλημα. Επομένως, αρχικά δημιουργείται το προσομοίωμα της υπό ανάλυση κατασκευής και τίθεται υπο στατική ανάλυση και ακολουθεί η δημιουργία κώδικα προγραμματισμού μέσω του αριθμητικού περιβάλλοντος MATLAB (2011), ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα προαναφερθέντα βήματα ανάλυσης που απαιτούνται, καθώς και τον τελικό συνδυασμό τους, προκειμένου να προκύψει η ζητούμενη καμπύλη απωλειών (loss curve) που αποδίδει το τελικό ζητούμενο της μελέτης, δηλαδή την πιθανότητα υπέρβασης των τιμών κόστους επισκευής αναλόγως του σεισμικού σεναρίου.

### 5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

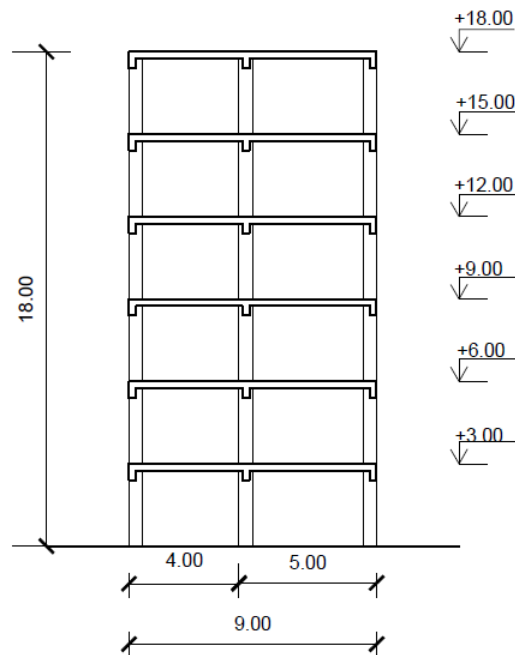
#### 5.1.1 Γενική περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης

Το μοντέλο της κατασκευής που τυγχάνει της παρούσας ανάλυσης είναι ένα εξαώροφο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο δομικός φορέας του κτιρίου που σχεδιάστηκε αποτελείται από τρία πλαίσια (frames) που απέχουν 5m και 6m αντίστοιχα. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από δύο ανοίγματα (bays), με τιμή ανοίγματος 4m. και 5m. αντίστοιχα (Σχήμα 5.1). Το συνολικό ύψος της κατασκευής είναι 18 m., με το ύψος κάθε ορόφου να είναι 3m, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.2 (τομή κατά τη διεύθυνση x). Το κτίριο αυτό διαθέτει δομικό φορέα που συνίσταται στα φέροντα στοιχεία, δηλαδή τα υποστυλώματα και τις δοκούς, και στα άκαμπτα διαφράγματα (πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 0.25 m.). Τα υποστυλώματα είναι όλα τετραγωνικά διαστάσεων 0.5m×0.5m, ενώ οι δοκοί έχουν πλάτος 0.25m. και κρέμαση 0.60 m. Η αντίσταση στην οριζόντια φόρτιση εξασφαλίζεται

πρωταρχικά από τα εξωτερικά πλαίσια και έπειτα από τα εσωτερικά και τις πλάκες σκυροδέματος που αποτελούν τα διαφράγματα.



Σχήμα 5.1: Κάτοψη του μοντέλου προσομοιώματος.

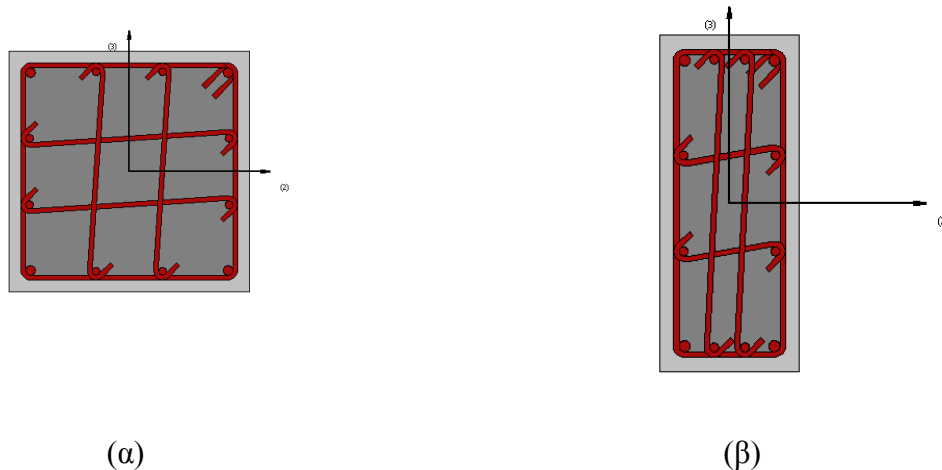


Σχήμα 5.2: Τομή του μοντέλου προσομοίωσης της κατασκευής κατά τη διεύθυνση x.

Τα υποστυλώματα και οι δοκοί έχουν οπλισθεί σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα για τον ελάχιστο απαιτούμενο οπλισμό ( $\rho_1 = 1-1.5\%$ ). Πιο συγκεκριμένα, τα υποστυλώματα

έχουν διαμήκη οπλισμό 4Φ20 στις γωνίες του υποστυλώματος και 8Φ16 ενδιάμεσα ( $A_{sl}=28.65\text{cm}^2$ ). Αντίστοιχα, οι δοκοί έχουν ως συνολικό διαμήκη οπλισμό 12Φ10 ( $A_{sl}=10.06\text{cm}^2$ ). Ο τρόπος όπλισης των υποστυλωμάτων και των δοκών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για τον οπλισμό των δοκών και των υποστυλωμάτων ανήκει στην κατηγορία B500C και διαθέτει μέτρο ελαστικότητας  $E=210\text{ GPa}$ . Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στο σύνολο των υποστυλωμάτων και των δοκών είναι κατηγορίας C20/25 με μέτρο ελαστικότητας  $E=25\text{ GPa}$ .

Το κτίριο σχεδιάστηκε για εύκαμπτα χωρίσματα με αποτέλεσμα τις σχετικά μεγάλες δυνατότητες παραμόρφωσης. Έπειτα από την εκτέλεση της Ιδιομορφικής Ανάλυσης (Eigenvalue Analysis) μέσω του προγράμματος SeismoStruct προέκυψε ότι η ιδιοπερίοδος του κτιρίου, για διεύθυνση σεισμού κατά x, ισούται με  $T_{1x}=0.589\text{s}$ .



Σχήμα 5.3: (α) Τυπική λεπτομέρεια τρόπου όπλισης υποστυλώματος διαστάσεων  $0.50\text{m}\times 0.50\text{m}$ .

(β) Τυπική λεπτομέρεια όπλισης δοκού.

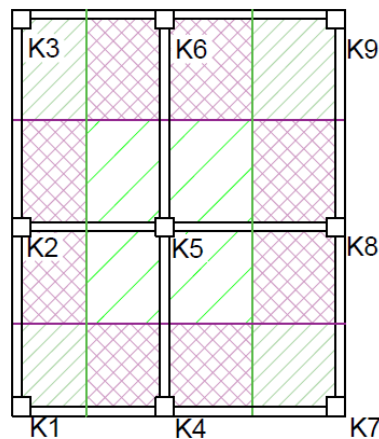
### 5.1.2 Στατική ανάλυση Pushover σε Πρόγραμμα Seismostruct

Η αποτίμηση της απόκρισης της κατασκευής υπό την επίδραση σεισμικών δράσεων επιτυγχάνεται με την προσομοίωση του υπό μελέτη κτιρίου μέσω του λογισμικού SeismoStruct (version 7.0.6) της εταιρίας SeismoSoft, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες αναλύσεις. Ειδικότερα, το πρόγραμμα Seismostruct αποτελεί βασικό υπολογιστικό εργαλείο στην εργασία αυτή, καθώς έχει τη δυνατότητα να εκτελεί μη-γραμμικές μεθόδους ανάλυσης και να παρέχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας πλαισιωτών κατασκευών.



Ο υπολογισμός των μόνιμων φορτίων που καταπονούν την κατασκευή συνίσταται στην κατανομή του συνολικού βάρους της κατασκευής στα επιμέρους δομικά στοιχεία. Η συνολική μάζα της κατασκευής προέκυψε από τον χαρακτηριστικό συνδυασμό φορτίων  $Q_{sd} = G + 0.3Q$  (χαρακτηριστική τιμή  $Q=2 \text{ KN/m}^2$ ) και ισούται με 579.91 tn, η οποία ισοκατανέμεται στα έξι διαφράγματα, έτσι ώστε η μάζα κάθε στάθμης να ισούται με 96.65 tn. Τα φορτία που προήλθαν από τη μάζα της κατασκευής (948.15 KN ανά κέντρο μάζας κάθε διαφράγματος) κατανεμήθηκαν σε κάθε υποστυλώμα σύμφωνα με την φορτική επιφάνεια που αντιστοιχεί στο καθένα (Σχήμα 5.4).

Φορτικές Επιφάνειες Υποστυλωμάτων



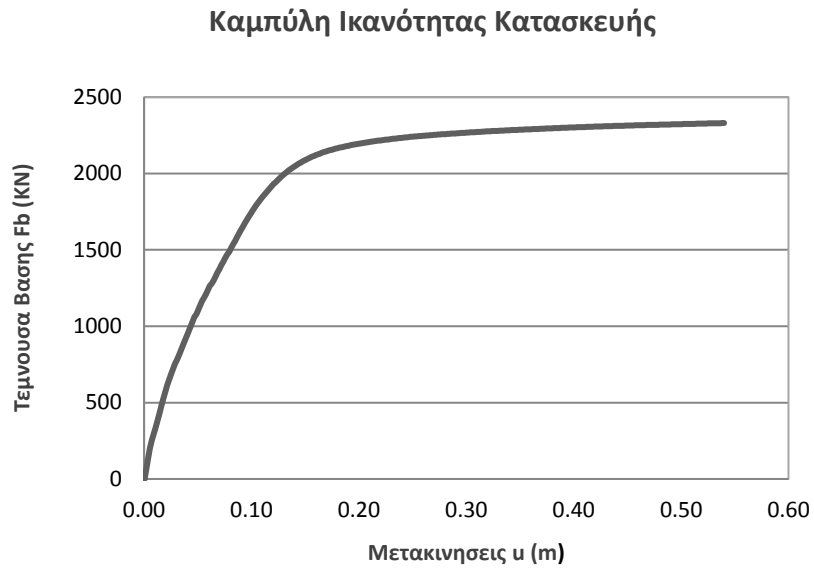
Σχήμα 5.4: Κατανομή φορτικών επιφανειών υποστυλωμάτων.

Η εκτέλεση της μη-γραμμικής ανάλυσης Pushover (Static Pushover Analysis) απαιτεί η κατασκευή να υποβληθεί σε σταδιακά αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, πέραν της υπάρχουσας καταπόνησης από τα μόνιμα φορτία, τα οποία όπως αναφέρθηκε εκτιμάται ότι επιβάλλονται στους κόμβους των υποστυλωμάτων. Η οριζόντια φόρτιση γίνεται σύμφωνα με την κανονικοποιημένη κατανομή της πρώτης ιδιομορφής, κατά την οποία τα κέντρα μάζας των διαφραγμάτων καταπονούνται με οριζόντιες σταδιακά αυξανόμενες δυνάμεις με αρχικές τιμές φορτικών συντελεστών:

$$\alpha_1 = 0.048, \alpha_2 = 0.095, \alpha_3 = 0.143, \alpha_4 = 0.190, \alpha_5 = 0.238, \alpha_6 = 0.286$$

Η στοχευμένη μετακίνηση του ανώτερου ορόφου ήταν 0.54 m, που αντιστοιχεί στο 3% του συνολικού ύψους του κτιρίου και η κύρια διεύθυνση ελέγχου είναι η διεύθυνση x. Η

καμπύλη ικανότητας της κατασκευής που προέκυψε από την στατική ανάλυση Pushover παρουσιάζεται παρακάτω. (Σχήμα 5.5)



*Σχήμα 5.5: Καμπύλη Ικανότητας κατασκευής για σεισμική καταπόνηση κατά x.*

## 5.2 ΑΡΧΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

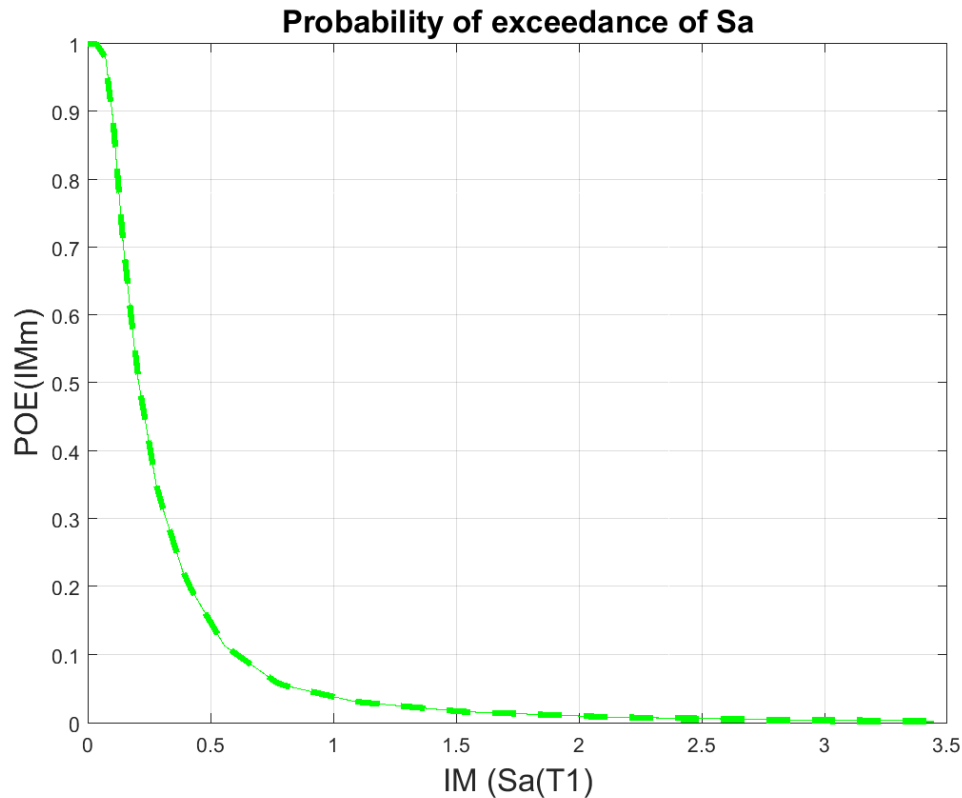
### 5.2.1 Hazard Analysis

Στο στάδιο ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας σύμφωνα με τη μεθοδολογία κατά PEER-PBEE, σκοπός είναι η δημιουργία της καμπύλης της πιθανότητας υπέρβασης (POE) του μέτρου έντασης (IM) που θα επιλεγεί, για τα διάφορα σεισμικά σενάρια που αφορούν την περιοχή. Συνεπώς, αρχικά εκλέγεται η θέση μελέτης της κατασκευής και το μέτρο έντασης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η κατασκευή βρίσκεται στην Κρήτη συγκεκριμένα στο νομό Ρεθύμνου, περιοχή που εντάσσεται στο ελληνικό σεισμικό τόξο. Όπως είναι γνωστό, το ελληνικό τόξο ξεκινώντας από την Κεφαλονιά, διασχίζει το νότιο Ιόνιο ανατολικά της Πελοποννήσου και περνώντας νότια της Κρήτης καταλήγει στη Ρόδο. Είναι το όριο επαφής και σύγκλισης της αφρικανικής με την ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα, και αποτελεί την κύρια αιτία εκδήλωσης των περισσότερων σεισμών στην Ελλάδα. Το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατηγορία B, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των εδαφών που προτείνει ο Ευρωκώδικας 8, με τιμές χαρακτηριστικών περιόδων  $T_B = 0.15$  s,  $T_C = 0.50$  s,  $T_D = 2.50$  s και συντελεστή εδάφους  $S = 1.20$ . Ως μέτρο έντασης επιλέγεται η φασματική επιτάχυνση  $S_a(T_1)$ , καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί θεωρείται ο πλέον κατάλληλος δείκτης έντασης (IM) για κατασκευές στις οποίες το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας συμμετέχει στην πρώτη ιδιομορφή, όπως δηλαδή συμβαίνει στο παρόν κτίριο.

Ο υπολογισμός της καμπύλης σεισμικού κινδύνου πραγματοποιήθηκε μέσω του EFHR (European Facility for Earthquake Hazard and Risk), με την εισαγωγή των συντεταγμένων της περιοχής μελέτης, προκειμένου να είναι εφικτή η άμεση δημιουργία της καμπύλης σεισμικής επικινδυνότητας (hazard curve). Έπειτα, για λόγους υπολογιστικής ορθότητας της μεθόδου πραγματοποιήθηκε γραμμική παραβολή στις τιμές που εξήχθησαν από την καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας, με σκοπό να δημιουργηθούν 100 ζεύγη τιμών και σχεδιάστηκε εκ νέου η καμπύλη (Σχήμα 5.6).

Επίσης, υπολογίστηκε μέσω της Εξίσωσης 4.4 η πιθανότητα  $p(IM)$  για κάθε τιμή δείκτη έντασης IM.



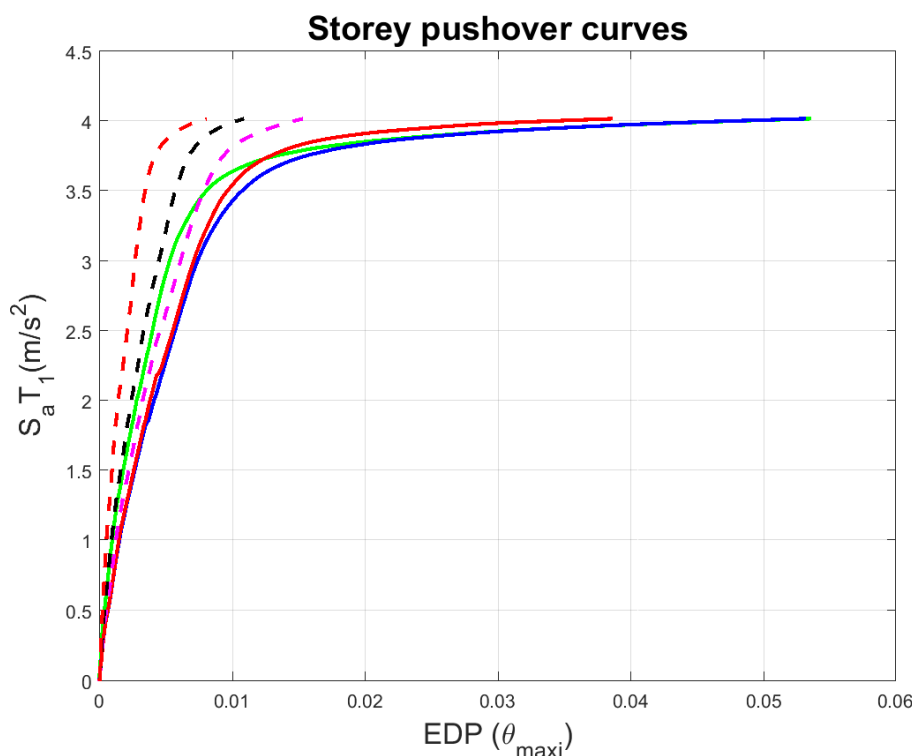
Σχήμα 5.6: Καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας (*hazard curve*) που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 έτη.

### 5.2.2 Structural Analysis

Η εκτέλεση αυτού του σταδίου ανάλυσης έχει ως αφετηρία τον ορισμό της κατάλληλης παραμέτρου απόκρισης EDP βάσει της οποίας καθορίζεται η κατάσταση βλάβης των δομικών μελών. Η επιλογή του κατάλληλου EDP εξαρτάται άμεσα από τον ορισμό των κρίσιμων ομάδων των δομικών στοιχείων οι οποίες θα πάρουν μέρος στην ανάλυση της κατασκευής. Στην παρούσα διπλωματική όλες οι ομάδες των δομικών μελών (*damageable groups*) που θα λάβουν μέρος, η λεπτομερής περιγραφή των οποίων ακολουθεί στην επόμενη ενότητα (*damage analysis*), έχουν ως κρίσιμο δείκτη απόκρισης την ανηγμένη σχετική μετακίνηση των ορόφων (*interstorey drift*). Συνεπώς, εφόσον επιδιώκεται η εφαρμογή της διαδικασίας σε επίπεδο ορόφου εκλέγονται ως παράμετροι απόκρισης (EDP) οι έξι ανηγμένες σχετικές μετακινήσεις (*interstorey drift*), έτσι ώστε να αντιστοιχεί μια σε κάθε όροφο, δηλαδή  $EDP_j^i = \theta_i$ , με  $i=1,2,3,4,5,6$ .

Από την εκτέλεση της στατικής ανάλυσης Pushover προκύπτουν οι Καμπύλες Ικανότητας σε επίπεδο ορόφου, με δείκτη IM την εδαφική φασματική επιτάχυνση  $S_a$  και δείκτες  $EDP_i$  τις

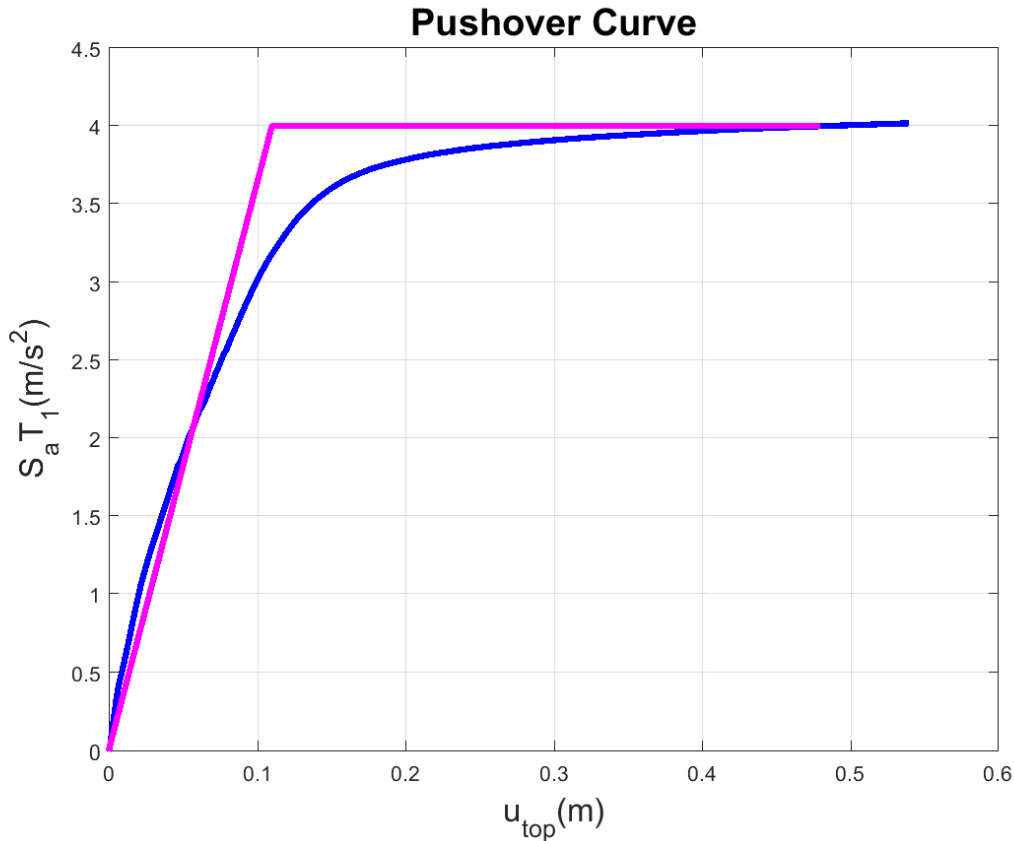
μέγιστες σχετικές ανηγμένες σχετικές μετακινήσεις, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Καμπύλες Ικανότητας σε επίπεδο ορόφου.

Στη συνέχεια, αποδόθηκαν 100 τυχαίες τιμές στο δείκτη έντασης  $S_a(T_1)$  εντός του εύρους που είχε προκύψει από την ανάλυση Pushover, όπως επίσης αποδόθηκαν 100 τυχαίες τιμές και στην παράμετρο απόκρισης  $EDP_i$ , εντός του εύρους  $\theta_{min}=0.0001$  και  $\theta_{max}=0.1$ . Για αυτές τις τιμές εφαρμόστηκε εκ νέου γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών που προήλθαν από την Pushover και αυτών που αποδόθηκαν άμεσα από την μελέτη προκειμένου να υπάρχει η ανάλογη αντιστοιχία με τις τιμές των ανηγμένων σχετικών μετακινήσεων interstorey drift ( $\theta_{max}$ ).

Επίσης, υπολογίστηκε για κάθε μέτρο έντασης IM που προήλθε από τα διαδοχικά βήματα της Pushover η τυπική απόκλιση  $\beta_{Sa}$ . Για τον υπολογισμό της είναι η απαραίτητη η διγραμμικοποίηση της Καμπύλης Ικανότητας της κατασκευής σύμφωνα με τις κατάλληλες διατάξεις, από όπου προέκυψε ότι η μετατόπιση διαρροής  $d_y$  ισούται με 0.11m, ενώ η μετατόπιση αστοχίας  $d_u$  ισούται με 0.48m.(Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8: Καμπύλη Ικανότητας κατασκευής μετά τη διγραμμικοποίηση με τιμές  $du=0.11m$  και  $dy=0.48m$ .

Σύμφωνα, με το FEMAP-58 και την εφαρμογή απλοποιημένης ανάλυσης για τον υπολογισμό των τιμών διασποράς, ώστε να συμπεριλαμβάνονται οι αβεβαιότητες που αφορούν τη μοντελοποίηση της κατασκευής, η τυπική απόκλιση για κάθε τιμή του IM που έχει ληφθεί από την ανάλυση Pushover δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Εξίσωση 5.1):

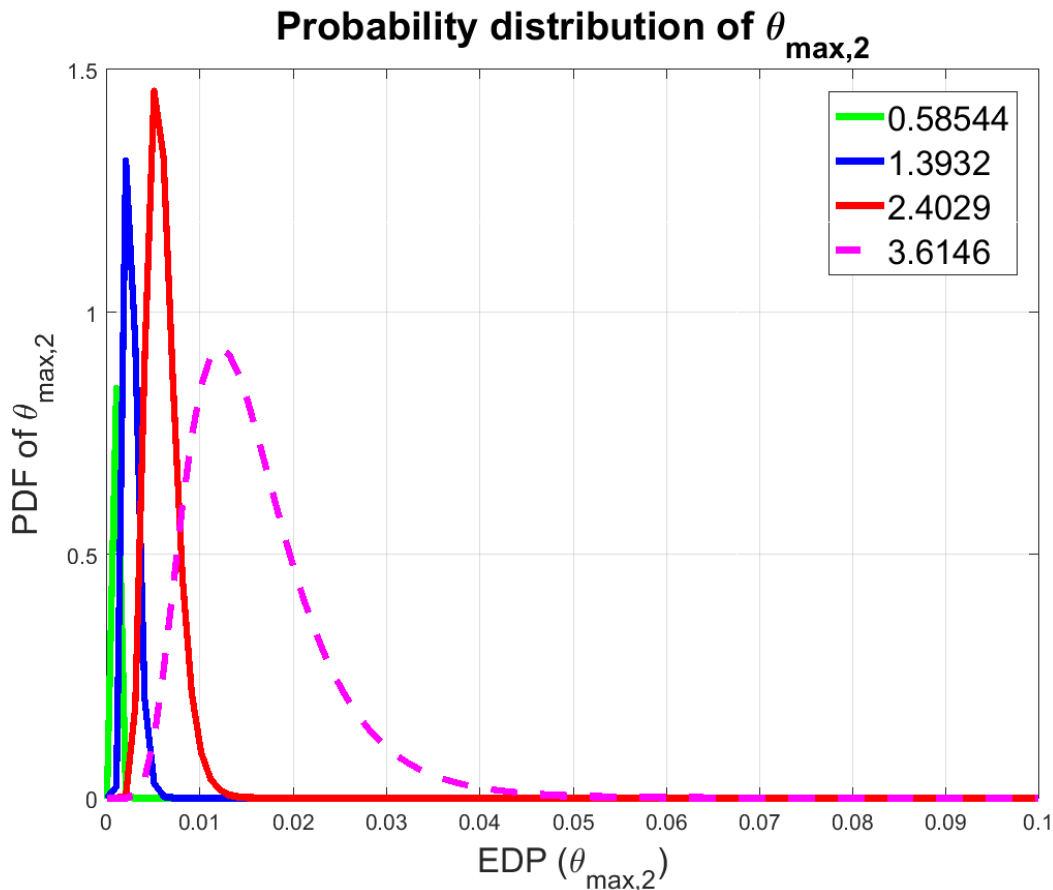
$$\beta_{SA} = \sqrt{\beta_{\alpha\Delta}^2 + \beta_m^2} \quad (5.1)$$

Όπου οι τιμές των  $\beta_{\alpha\Delta}$  και  $\beta_m$  λαμβάνονται από τον Πίνακα Α σε συνάρτηση με την ιδιοπερίοδο και την πλαστιμότητα  $\mu_i$  της κατασκευής, η οποία υπολογίζεται για κάθε τιμή  $u_{topi}$ . Η συσχέτιση της πλαστιμότητας  $\mu$  της κατασκευής με την τυπική απόκλιση που χαρακτηρίζει κάθε μέτρο έντασης  $S_a$  έχει επαληθευτεί από άλλες μεθόδους με χρήση δυναμικών αναλύσεων.

Πίνακας Α: Βασικές τιμές διασποράς για την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου υπολογισμού της τυπικής απόκλισης κατά FEMAP-58

$T_1$ (sec)	$S = \frac{S_a(T_1)W}{V_{j1}}$	$\beta_{-4}$	$\beta_{-}$	$\beta_{-}$	$\beta_{-}$
0.20	$\leq 1.0$	0.05	0.10	0.50	0.25
	2	0.35	0.10	0.51	0.25
	4	0.40	0.10	0.40	0.35
	6	0.45	0.10	0.37	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.05	0.24	0.50
0.35	$\leq 1.0$	0.10	0.15	0.32	0.25
	2	0.35	0.15	0.38	0.25
	4	0.40	0.15	0.43	0.35
	6	0.45	0.15	0.38	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.15	0.34	0.50
0.5	$\leq 1.0$	0.10	0.20	0.31	0.25
	2	0.35	0.20	0.35	0.25
	4	0.40	0.20	0.41	0.35
	6	0.45	0.20	0.36	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.20	0.32	0.50
0.75	$\leq 1.0$	0.10	0.25	0.30	0.25
	2	0.35	0.25	0.33	0.25
	4	0.40	0.25	0.39	0.35
	6	0.45	0.25	0.35	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.25	0.30	0.50
1.0	$\leq 1.0$	0.15	0.30	0.27	0.25
	2	0.35	0.30	0.29	0.25
	4	0.40	0.30	0.37	0.35
	6	0.45	0.30	0.36	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.25	0.34	0.50
1.50	$\leq 1.0$	0.15	0.35	0.25	0.25
	2	0.35	0.35	0.26	0.25
	4	0.40	0.30	0.33	0.35
	6	0.45	0.30	0.34	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.25	0.33	0.50
$\geq 2.0$	$\leq 1.0$	0.25	0.50	0.28	0.25
	2	0.35	0.45	0.21	0.25
	4	0.40	0.45	0.25	0.35
	6	0.45	0.40	0.26	0.50
	$\geq 8$	0.45	0.35	0.26	0.50

Επομένως, για κάθε τιμή του δείκτη έντασης  $S_a(T_1)$ , με την εκτίμηση ότι ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή με τυπική απόκλιση  $\beta$  και μέση τιμή  $\theta_{max}$  αυτή που προέκυψε από την συσχέτιση της ανάλυσης Pushover και της γραμμικής παρεμβολής, βρέθηκε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για κάθε τιμή  $\theta_{max}$  για κάθε όροφο. Ενδεικτικά, έχουν σχεδιαστεί για ορισμένες τιμές  $S_a(T_1)$  οι καμπύλες PDF για το δεύτερο όροφο της κατασκευής για εύρος τιμών  $\theta_{max}=[0.0001,0.1]$  (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Καμπύλες PDF για το δεύτερο όροφο της κατασκευής για την  $15^\eta$ ,  $35^\eta$ ,  $60^\eta$  και  $90^\eta$  τιμή του μέτρου έντασης IM.

### 5.2.3 Damage Analysis

Πρωταρχικό βήμα του σταδίου ανάλυσης βλαβών είναι ο ορισμός των ομάδων των δομικών μελών (damageable groups), στις οποίες εντάσσονται τα συστατικά μέρη της κατασκευής που υφίστανται όμοιες βλάβες κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος και οι οποίες επιλέχθηκαν να εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι εξής τρεις διαφορετικές ομάδες βλάβης δομικών στοιχείων ( $j=3$ ):

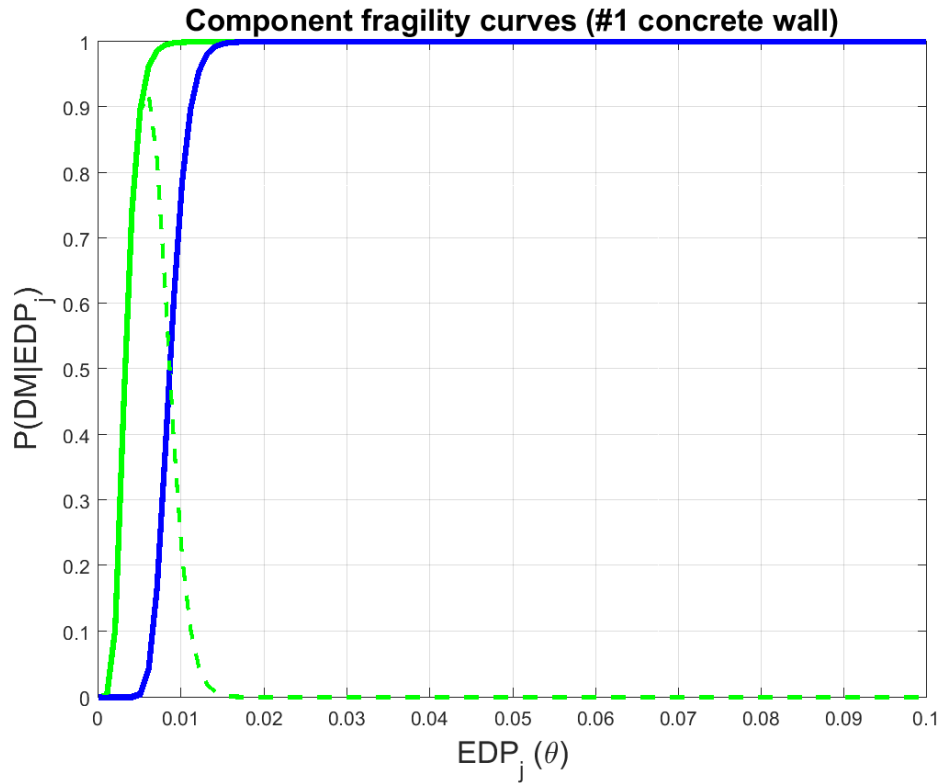
- τοίχοι σκυροδέματος (concrete walls) με κωδικοποίηση στο FEMAP-58 ως 'B10044.072'.
- κόμβοι δοκού υποστυλώματος με δοκό και στις δύο πλευρές (concrete beam-column joints with beam on both sides) με κωδικοποίηση στο FEMAP-58 ως 'B1041.031b'.
- τοιχοπληρώσεις (wall partitions) με κωδικοποίηση στο FEMAP-58 ως 'B1051.014'.



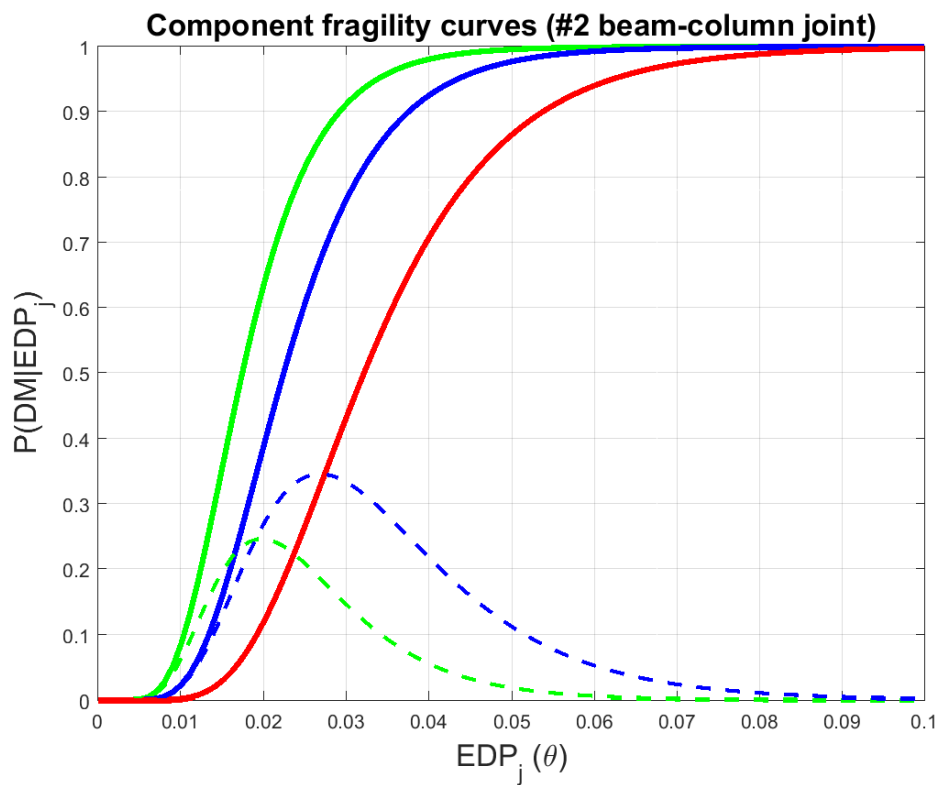
Στη συνέχεια, αντλώντας πληροφορίες από τη λίστα δεδομένων (inventory) του εγχειριδίου FEMA P-58 καθορίζεται το πλήθος των απαραίτητων επιπέδων βλάβης  $k$  για κάθε ομάδα, όπως επίσης δίνεται η λεπτομερής περιγραφή κάθε επιπέδου βλάβης (Πίνακας 5.1).

Η δημιουργία των καμπυλών τρωτότητας για κάθε ομάδα δομικών μελών της κατασκευής ( $j$ =πλήθος των ομάδων βλάβης-damageable groups), για κάθε επίπεδο βλάβης (DM) προϋποθέτει την εύρεση των αντίστοιχων αθροιστικών καμπυλών κατανομής (CDF), που απεικονίζουν τη πιθανότητα υπέρβασης του συγκεκριμένου επιπέδου βλάβης, για τιμές της ανηγμένης σχετικής μετακίνησης των ορόφων οι οποίες κυμαίνονται στο καθορισμένο εύρος τιμών του προηγούμενου σταδίου της ανάλυσης ( $\theta_{\max}=[0.0001,0.1]$ ). Ειδικότερα, εκτιμάται ότι η λογαριθμοκανονική κατανομή περιγράφει αποδοτικότερα την κατανομή της βλάβης, επομένως λαμβάνοντας υπόψη τα απαραίτητα στοιχεία από τη λίστα δεδομένων του FEMAP-58, δηλαδή τη μέση τιμή (median) του επιλεγμένου  $EDP_j$  και την τυπική απόκλιση  $\beta$  για κάθε επιμέρους επίπεδο βλάβης (Πίνακας 5.2) αναπτύσσονται οι καμπύλες τρωτότητας για κάθε ομάδα μελών ξεχωριστά, και απεικονίζονται αντίστοιχα στα *Σχήματα 5.10,5.11,5.12*. Υπενθυμίζεται ότι από τις καμπύλες τρωτότητας προκύπτουν οι πιθανότητες κάθε ομάδα μελών να έχει φτάσει ή και να έχει υπερβεί κάθε μια από αυτές τις καταστάσεις βλάβης.

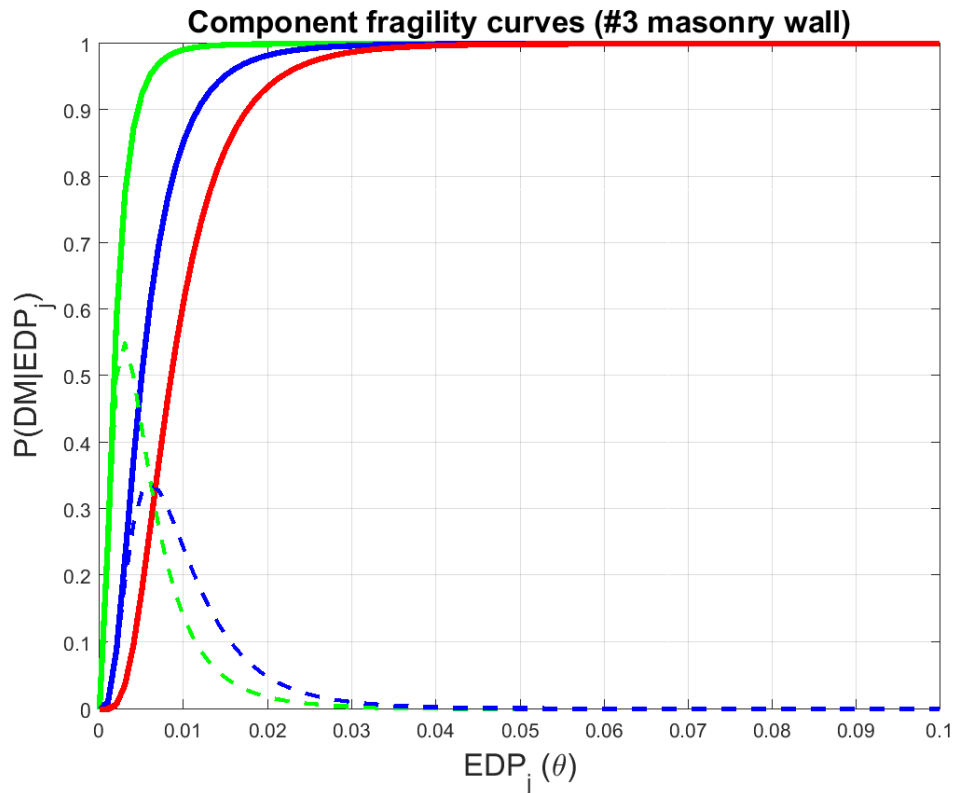
Το τελικό ζητούμενο εξαγωγής από αυτό το στάδιο ανάλυσης είναι η πιθανότητα  $p(DM_k | EDP_j^i)$  για κάθε επίπεδο βλάβης, η οποία προκύπτει από την Εξίσωση 4.5 όπως αυτή έχει οριστεί στο Κεφάλαιο 4. Σύμφωνα, με αυτές τις σχέσεις, δημιουργούνται για κάθε τιμή της παραμέτρου απόκρισης  $EDP_j^i$  οι διαφορές μεταξύ των αθροιστικών καμπυλών κατανομής (CDF) για τα διαδοχικά επίπεδα βλάβης, με αποτέλεσμα να προκύψουν οι πιθανότητες κάθε επιμέρους ομάδα βλάβης να βρίσκεται σε κάθε μια από τις καταστάσεις βλάβης που την χαρακτηρίζουν. Εάν αυτές οι διαφορές απεικονιστούν σε διάγραμμα συναρτήσεως της παραμέτρου απόκρισης δημιουργούν συνεχείς καμπύλες, όπως παρουσιάζεται στα αντίστοιχα *Σχήματα 5.10,5.11,5.12* με διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 5.10: Καμπύλες τρωτότητας για την 1<sub>η</sub> ομάδα δομικών μελών (B10044.072).



Σχήμα 5.11: Καμπύλες τρωτότητας για την 2<sub>η</sub> ομάδα δομικών μελών (B1041.031b).



Σχήμα 5.12: Καμπύλες τρωτότητας για την 3<sub>η</sub> ομάδα δομικών μελών (B1051.014).

**Πίνακας 5.1:** Ορισμός και περιγραφή των ομάδων βλάβης δομικών μελών της κατασκευής

Δείκτης Βλάβης (Damage Measure)	Κατάσταση Βλάβης (Damage State)
<i>Τοίχοι σκυροδέματος (concrete walls) - B1044.072</i>	
DM1	Θρυμματισμένος πυρήνας σκυροδέματος, τοπικές ρωγμές (εύρος >0.12 in), λυγισμός κατακόρυφου οπλισμού.
DM2	Ολίσθηση του τοίχου με συνέπεια μεγάλες παραμένουσες μετατοπίσεις, εκτεταμένες ρωγμές, κάμψη του οπλισμού.
<i>Κόμβοι δοκού υποστρώματος - B1041.031b</i>	
DM1	Παραμένουσες ρωγμές σε δοκούς ή κόμβο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

	(εύρος >0.06in.), δεν υπάρχει σημαντικός θρυμματισμός ή κάμψη του οπλισμού.
DM2	Θρυμματισμός της επικάλυψης σκυροδέματος, έκθεση του εγκάρσιου οπλισμού, δεν υπάρχει κάμψη ή λυγισμός οπλισμού.
DM3	Έκθεση σημαντικού μήκους του διαμήκους οπλισμού της δοκού, πιθανή σύνθλιψη του πυρήνα σκυροδέματος και κάμψη ή λυγισμός του οπλισμού.
<i>Τοιχοπληρώσεις - B1051.014</i>	
DM1	Μερικές καμπτικές και διατμητικές ρωγμές με ελαφρώς αισθητό εύρος, δεν παρατηρείται θρυμματισμός ή κάμψη του οπλισμού, δεν υπάρχει σημαντική δομική αστοχία
DM2	Πολυάριθμες καμπτικές και διαγώνιες ρωγμές με παραμένον εύρος <1/in., μικρή παραμένουσα παραμόρφωση.
DM3	Εκτεταμένες καμπτικές ρωγμές με παραμένον εύρος > 1/32 in, σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις., κάμψη ή λυγισμός κάθετου οπλισμού.

**Πίνακας 5.2:** Ορισμός των στοιχείων λογαριθμοκανονικής κατανομής των ομάδων βλάβης δομικών μελών της κατασκευής.

<b>Ομάδα Βλάβης (Damageable Group)</b>	<b>Επίπεδο Βλάβης (Damage Level)</b>	<b>Παράμετρος Απόκρισης (EDP)</b>	<b>Μέση τιμή (Median)</b>	<b>Τυπική απόκλιση</b>
<i>B10044.072</i>	DM1	Interstorey Drift	0.0033	0.35
	DM2	Interstorey Drift	0.0087	0.20
<i>B1041.031b</i>	DM1	Interstorey Drift	0.0175	0.40
	DM2	Interstorey Drift	0.0225	0.40
	DM3	Interstorey Drift	0.0322	0.40
<i>B1051.014</i>	DM1	Interstorey Drift	0.0018	0.73
	DM2	Interstorey Drift	0.0051	0.65
	DM3	Interstorey Drift	0.0086	0.56

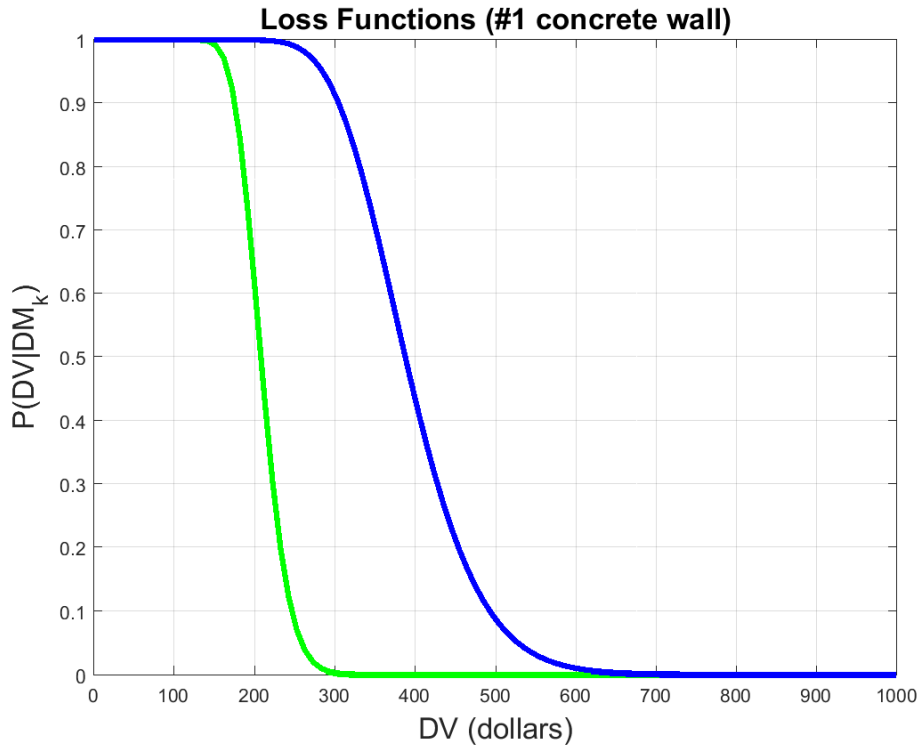
### 5.2.4 Loss Analysis

Το στάδιο της ανάλυσης απωλειών έχει ως αφετηρία τον καθορισμό της μεταβλητής απόφασης (DV) που θα ληφθεί υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση του χρηματικού κόστους επισκευής των μετασεισμικών βλαβών της κατασκευής, επομένως αυτό καθορίζεται ως η ζητούμενη μεταβλητή απόφασης. Η δημιουργία των συναρτήσεων κόστους, για κάθε ομάδα βλάβης των δομικών μελών, βασίζεται στη συλλογή στοιχείων από τη λίστα οικονομικών δεδομένων του FEMAP-58, θεωρώντας ότι η πιθανοτική κατανομή του χρηματικού κόστους είναι λογαριθμοκανονική.

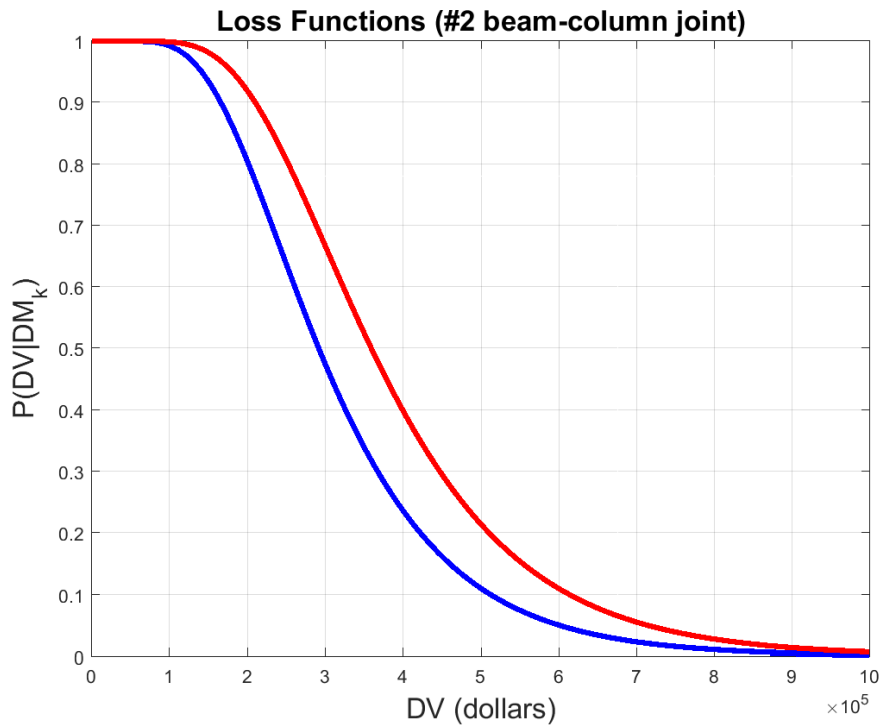
Ειδικότερα, για κάθε ομάδα βλάβης αντλούνται πληροφορίες για τα χρηματικά κόστη (σε δολάρια) που αντιστοιχούν σε πιθανότητα εμφάνισης 10%, 50% και 90% (Πίνακας 5.3), έτσι ώστε η τιμή με πιθανότητα εμφάνισης 50% να ισούται με τη μέση τιμή της κατανομής, ενώ οι υπόλοιπες δύο τιμές να χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί η τυπική απόκλιση της κατανομής μέσω του εξής τύπου:

$$\sigma = \frac{\ln P90 - \ln P10}{2} \quad (5.1)$$

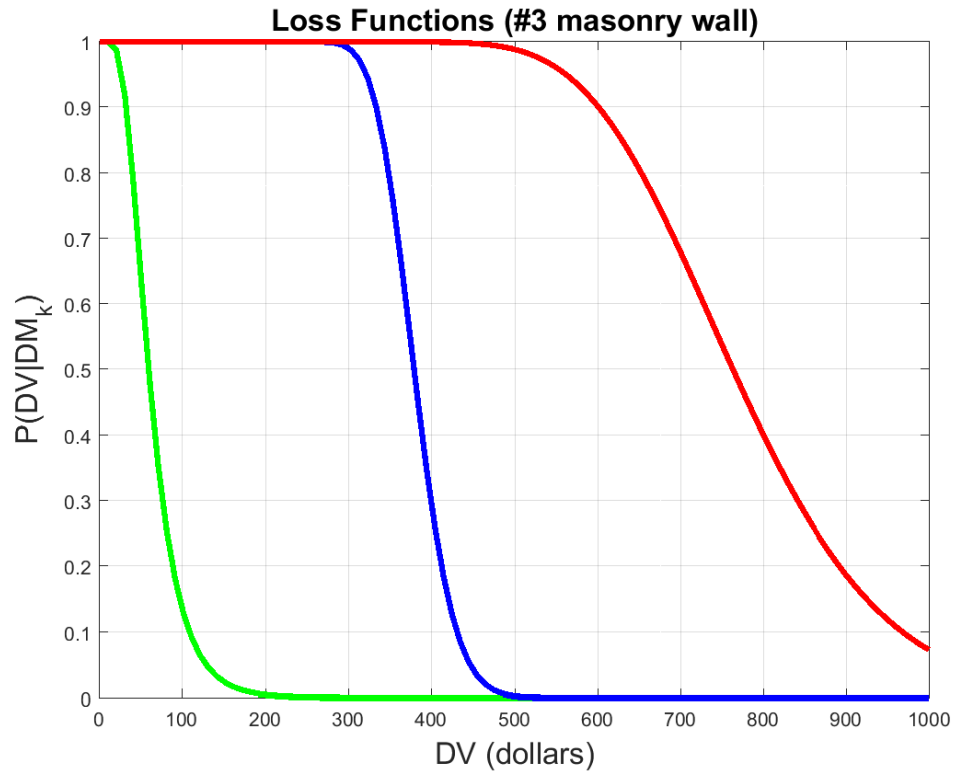
Έπειτα, ορίστηκε το εύρος του χρηματικού κόστους (σε δολάρια) για κάθε ομάδα μελών ξεχωριστά, καθώς παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ του κόστους επισκευής των διαφορετικών ομάδων, αφού όπως είναι προφανές κάθε κόστος εξαρτάται από τα τεχνικά υλικά, τις εργασίες αποκατάστασης κ.λπ. Συνεπώς, για κάθε επίπεδο βλάβης (DM), των επιμέρους ομάδων βλάβης (damageable group) υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής αυτής μέσω της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής πιθανότητας για κάθε τιμή του εύρους του χρηματικού κόστους (DV), από την οποία προκύπτουν οι ζητούμενες καμπύλες των συναρτήσεων απώλειας (loss functions) οι οποίες απεικονίζονται στα Σχήματα 5.13, 5.14 και 5.15.



Σχήμα 5.13: Καμπύλες συναρτήσεων απώλειας για την 1<sup>η</sup> ομάδα δομικών μελών (B10044.072).



Σχήμα 5.14: Καμπύλες συναρτήσεων απώλειας για την 2<sup>η</sup> ομάδα δομικών μελών (B1041.031b).



Σχήμα 5.15: Καμπύλες συναρτήσεων απώλειας για την 3η ομάδα δομικών μελών (B1051.014).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

**Πίνακας 5.3:** Ορισμός των στοιχείων λογαριθμοκανονικής κατανομής του κόστους των ομάδων βλάβης δομικών μελών της κατασκευής.

<i>Ομάδα Βλάβης</i>	<i>Επίπεδο Βλάβης</i>	<i>LossP10(\$)</i>	<i>LossP50(\$)</i>	<i>LossP90(\$)</i>
<i>B10044.072</i>	DM1	189.50	208.50	246.5
	DM2	435.0	388,2	501.4
<i>B1041.031b</i>	DM1	166428	292338	399996
	DM2	206928	359838	476496
	DM3	206928	359838	476496
<i>B1051.014</i>	DM1	36.70	60.0	93.30
	DM2	342.80	379.40	418.30
	DM3	578.30	763.30	838.30

### 5.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΒΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η διεργασία συνδυασμού των βημάτων που υπολογίσθηκαν στις προηγούμενες ενότητες έχει ως στόχο τον υπολογισμό του εξής ολοκληρώματος:

$$\lambda(DV) = \int_{DM} \int_{EDP} \int_{IM} G(DV|DM) P(DM|EDP) P(EDP|IM) dIM \left| \frac{d\lambda(IM)}{dIM} \right| dIM dEDP dDM$$

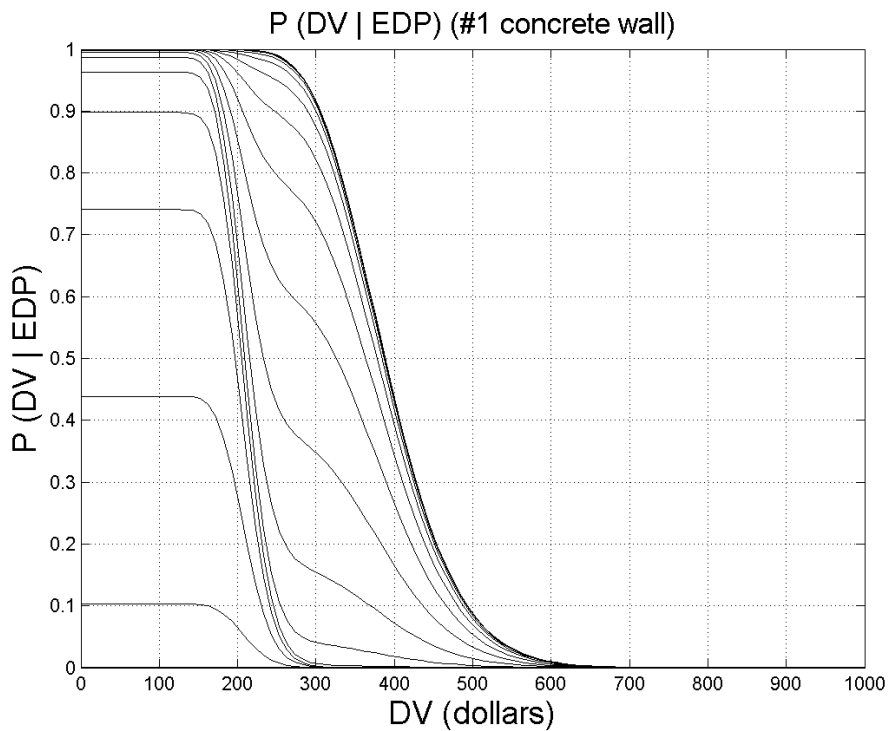
Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου τριπλού ολοκληρώματος θα οδηγήσει στον καθορισμό της τελικής καμπύλης εκτίμησης απωλειών που θα εκφράζει την πιθανότητα υπέρβασης του κόστους επισκευής για κάθε πιθανή τιμή του κόστους DV, με προϋπόθεση ότι δεν εξετάζεται η περίπτωση κατάρρευσης της κατασκευής.

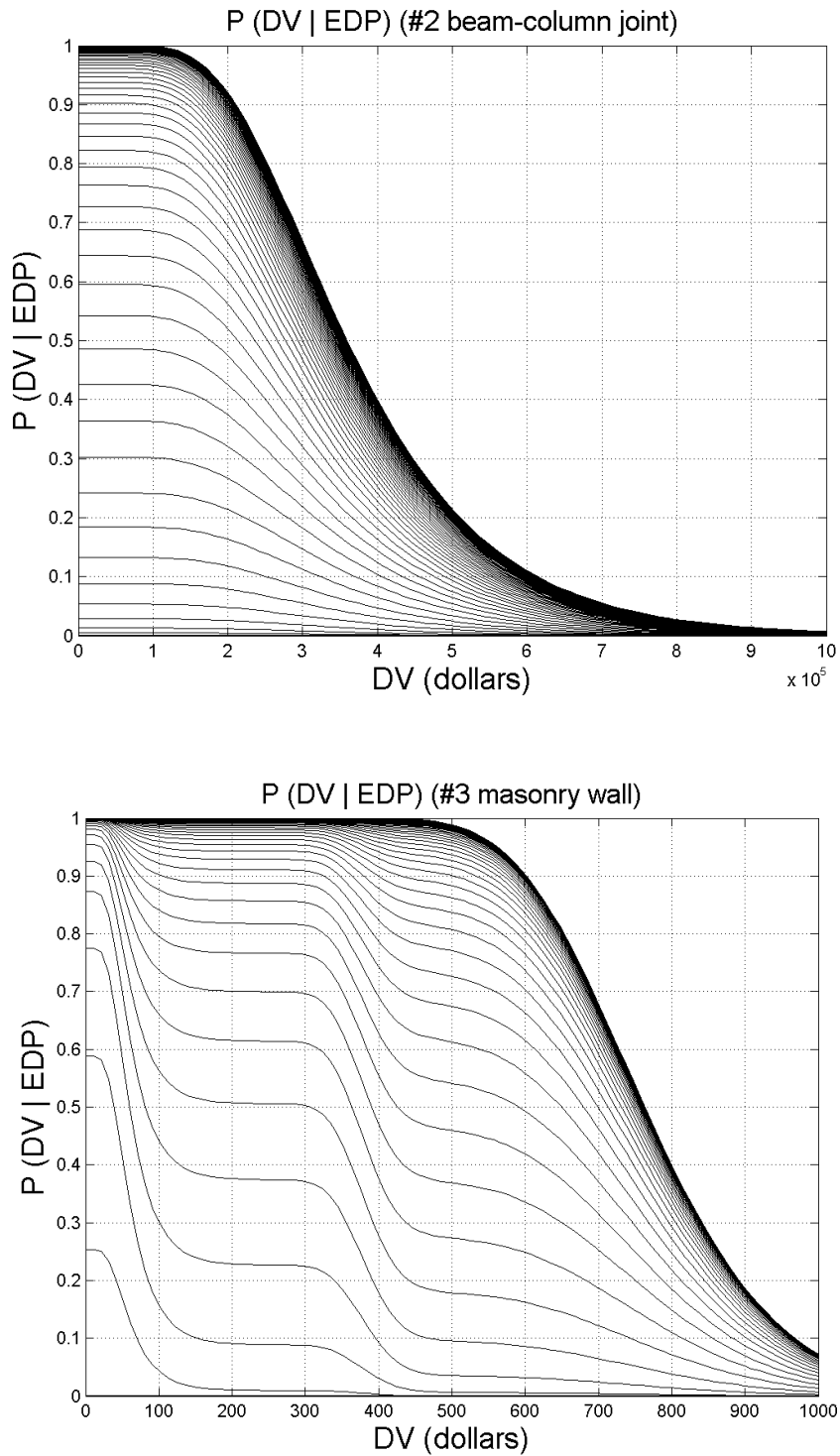
Ως σημείο εκκίνησης του συνδυασμού των σταδίων ανάλυσης, έχοντας ως δεδομένο τα εξαγόμενα αποτελέσματα από την εκτέλεση των αρχικών βημάτων ανάλυσης όπως αυτά έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους, ορίζεται η πραγματοποίηση της προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo. Κατά την διαδικασία αυτή, για κάθε τιμή του μέτρου έντασης IM, δημιουργούνται 500 δείγματα της τυχαίας μεταβλητής που αντιπροσωπεύει την σχετική μετατόπιση της κορυφής,  $u_{top}$ , της κατασκευής μέσω της εφαρμογής των Εξισώσεων (4.11)-(4.14), εκτιμώντας ότι ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή. Όπως είναι προφανές, οι σχετικές ανηγμένες μετακινήσεις των ορόφων είναι άμεσα συνδεδεμένες κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος, αφού η απόκριση κάθε επιμέρους ορόφου αλληλεξαρτάται από τους υπόλοιπους, επομένως εκτιμάται ότι υπάρχει πλήρης συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων απόκρισης EDP (fully correlated EDPs). Συνεπώς εφόσον έχει οριστεί ως κρίσιμη η μετατόπιση της κορυφής ( $u_{top}$ ), δηλαδή του έκτου διαφράγματος, οι υπόλοιπες απαραίτητες μετατοπίσεις υπολογίζονται συναρτήσει αυτής μέσω γραμμικής παρεμβολής.

Στη συνέχεια, για κάθε τιμή EDP που έχει προέλθει ως τιμή της προσομοίωσης και για κάθε ομάδα βλάβης κάθε ορόφου, όπως αυτές έχουν οριστεί στην παρούσα μελέτη, καθορίζεται η καμπύλη τρωτότητας της για όσα επίπεδα βλάβης ορίζονται ανά ομάδα δομικών μελών. Η διαδικασία πραγματοποιείται όπως περιγράφηκε στην παράγραφο της ανάλυσης βλαβών χρησιμοποιώντας τιμές για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των EDPs που παρέχονται από το FEMA P-58, καθώς εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύουν επαρκώς τη συμπεριφορά κάθε ομάδας δομικών μελών της κατασκευής. Προκειμένου να υπολογιστεί η πιθανότητα  $p(DM_k | EDP_j^i)$  για κάθε επίπεδο βλάβης, δημιουργούνται για κάθε τιμή της παραμέτρου

απόκρισης  $EDP_j^i$  οι διαφορές μεταξύ των αθροιστικών καμπύλων κατανομής (CDF) για τα διαδοχικά επίπεδα βλάβης, με αποτέλεσμα να προκύψουν οι πιθανότητες κάθε επιμέρους ομάδα βλάβης να βρίσκεται σε κάθε μια από τις καταστάσεις βλάβης που την χαρακτηρίζουν, διαδικασία που περιγράφηκε λεπτομερώς στο στάδιο ανάλυσης βλαβών.

Η διαδικασία συνεχίζεται με τον συνδυασμό των αναλύσεων βλάβης και απωλειών, με στόχο την εύρεση της πιθανότητας  $P(DV_j | EDP_j)$  για κάθε ομάδα δομικών μελών  $j$ , κάθε ορόφου που έχει ληφθεί υπόψη στην εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις απωλειών  $P(DV_j | DM_k)$ , οι οποίες υπολογίστηκαν κατά το αρχικό στάδιο του loss analysis σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί σε προηγούμενη παράγραφο, και τις πιθανότητες  $p(DM_k | EDP_j)$  για κάθε επίπεδο βλάβης όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω των καμπυλών τρωτότητας. (Σχήμα 5.16)

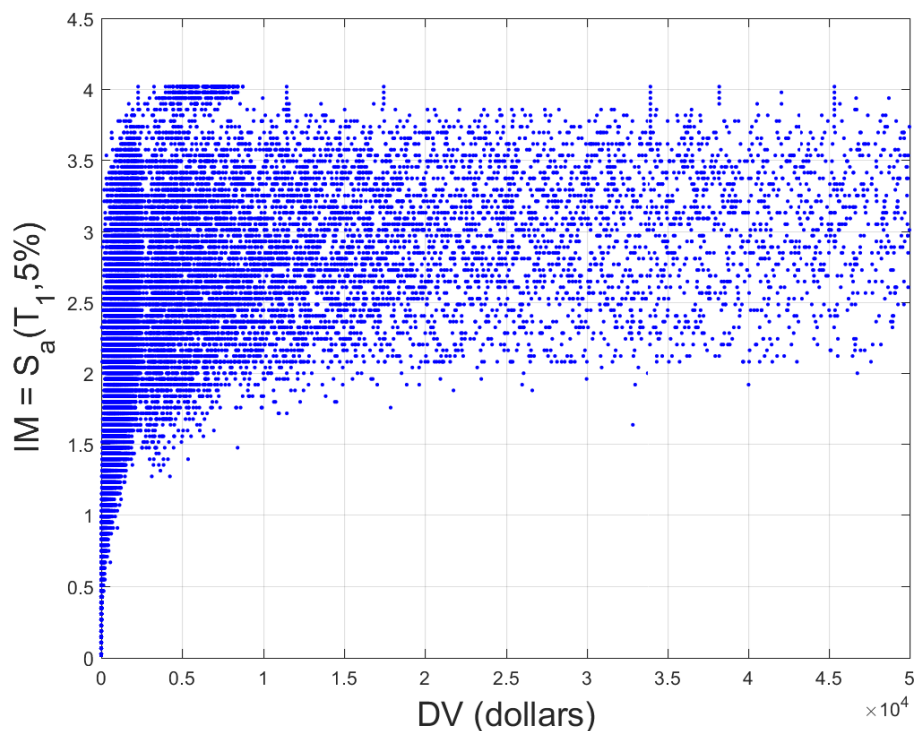




Σχήμα 5.16: Καμπύλες της πιθανότητας  $P(DV_j | EDP_j)$  ενδεικτικά για τον έκτο όροφο για ενδεικτική τιμή του  $IM$  ( $Sa = 3.21m/s^2$ ) α) για την ομάδα βλάβης 1 (τοιχοί σκυροδέματος), β) για την ομάδα βλάβης 2 (κόμβοι δοκού υποστυλώματος) γ) για την ομάδα βλάβης 3 (τοιχοπληρώσεις) για όλες τις τιμές του  $EDP$  που έχουν προκύψει από την προσομοίωση Monte Carlo.

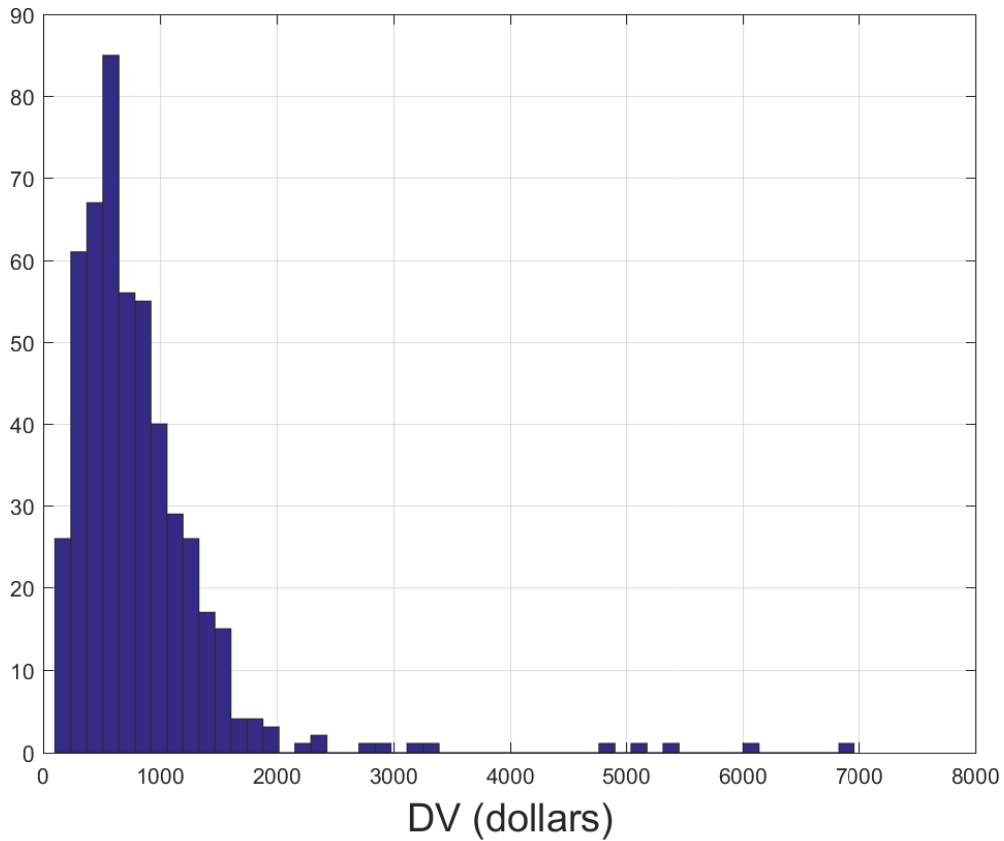
Κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί δεύτερη προσομοίωση Monte Carlo, για κάθε τιμή του μέτρου έντασης IM, για κάθε ήδη υπάρχουσα προσομοίωση της παραμέτρου απόκρισης EDP, για κάθε ομάδα δομικών μελών κάθε ορόφου, προκειμένου να γίνει δειγματοληψία (sampling) για 200 τιμές της πιθανότητας  $P(DV_j | EDP_j)$  σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή για εύρος τιμών μεταξύ του 0 και του 1. Η δεύτερη προσομοίωση Monte Carlo λαμβάνει χώρα γιατί είναι απαραίτητο να υπολογισθεί η μέση τιμή του κόστους DV, όμως δεν περιγράφεται από κλειστή σχέση, συνεπώς μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo και της εκτέλεσης γραμμικής παρεμβολής εξάγονται οι αντίστοιχες τιμές του κόστους DV και από αυτές προκύπτει το ζητούμενο μέσο κόστος και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση.

Η συγκεκριμένη διαδικασία όπως αναφέρθηκε, επαναλαμβάνεται για κάθε ομάδα βλάβης κάθε ορόφου και στο τέλος αθροίζονται οι εξαγόμενες καμπύλες που έχουν προέλθει από όλες τις ομάδες μελών όλων των ορόφων, προκειμένου να προκύψει μια συνολική καμπύλη που αφορά όλη την κατασκευή για κάθε τιμή προσομοίωσης της παραμέτρου απόκρισης EDP για κάθε τιμή του δείκτη έντασης IM. Επομένως, μπορεί να παρουσιασθεί κάθε πιθανός συνδυασμός συνολικού κόστους επισκευής της κατασκευής DV και μέτρου έντασης IM για όλες τις δυνατές τιμές των δύο παραμέτρων (Σχήμα 5.17).

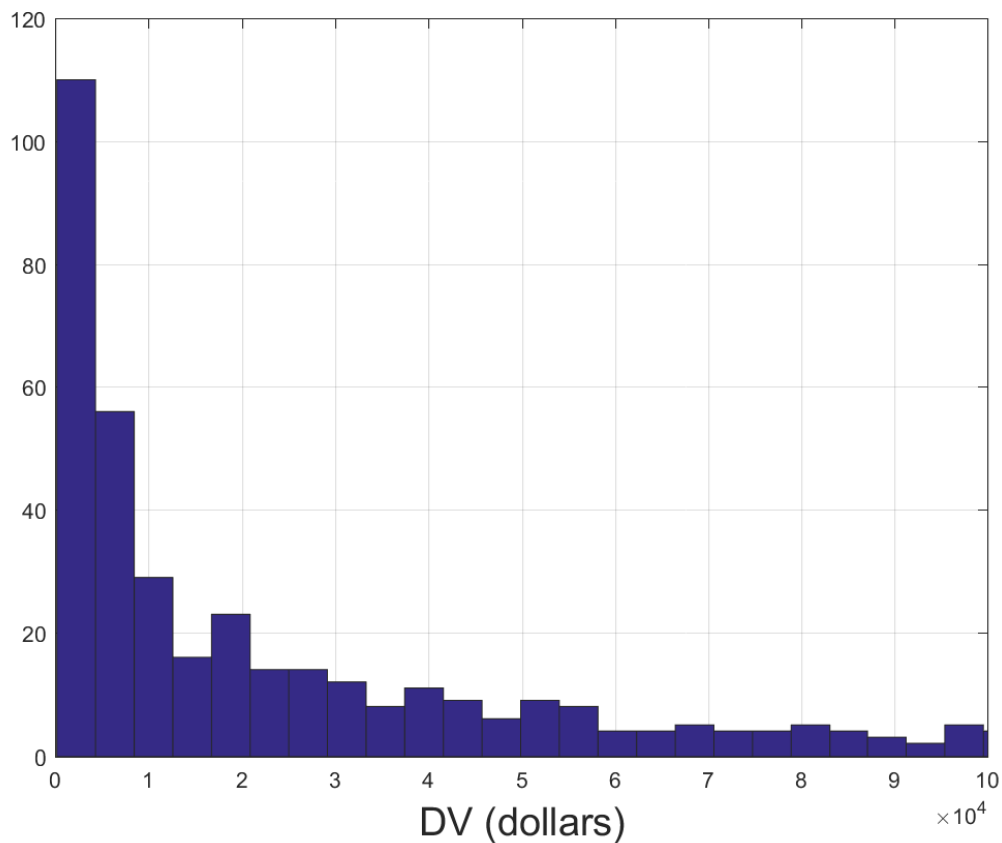


Σχήμα 5.17: Διάγραμμα απεικόνισης όλων των πιθανών συνδυασμών IM και συνολικού κόστους επισκευής της κατασκευής DV.

Συνεπώς, μέσω αυτού του διαγράμματος και για κάθε επιμέρους τιμή του δείκτη έντασης IM είναι δυνατόν να εξαχθούν ιστογράμματα που παρουσιάζουν την κατανομή του κόστους σε κάθε επιμέρους εύρος τιμών της μεταβλητής κόστους DV (Σχήμα 5.18, 5.19).

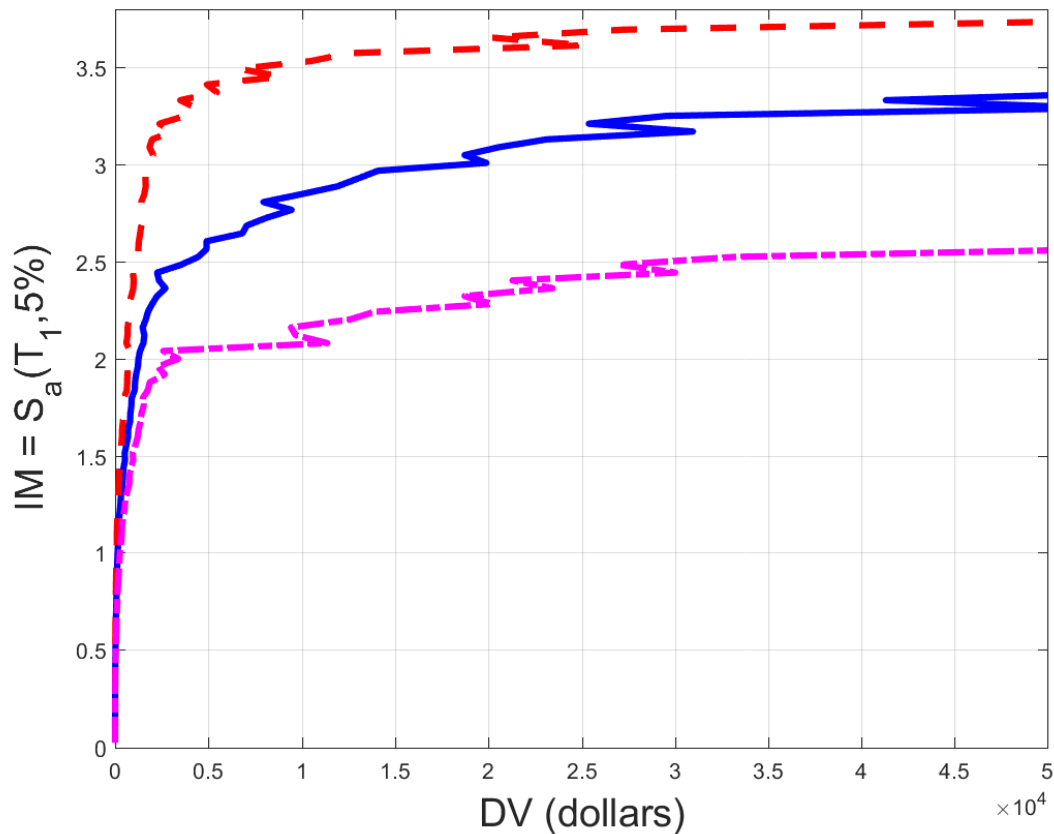


Σχήμα 5.18: Ενδεικτικό ιστόγραμμα κατανομής του κόστους για ορισμένη τιμή του δείκτη έντασης IM ( $S_a=1.6m/s^2$ ).



Σχήμα 5.19: Ενδεικτικό ιστόγραμμα κατανομής του κόστους για ορισμένη τιμή του δείκτη έντασης  $IM$  ( $S_a=3.22m/s^2$ ).

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια ξεκάθαρη εικόνα για τις μεταβολές που παρουσιάζονται στην κατανομή του κόστους για τις διάφορες τιμές που μπορεί να λάβει το μέτρο έντασης  $IM$ , παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.20 οι καμπύλες κατανομής κόστους για ποσοστό 16%, 50% και 84%. Με αυτό τον τρόπο, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό κάτω όριο (ποσοστό 16%), μια ενδεικτική μέση τιμή ( ποσοστό 50%) και ένα ενδεικτικό άνω όριο για το εύρος τιμών στο οποίο κυμαίνεται η μεταβλητή  $DV$ .



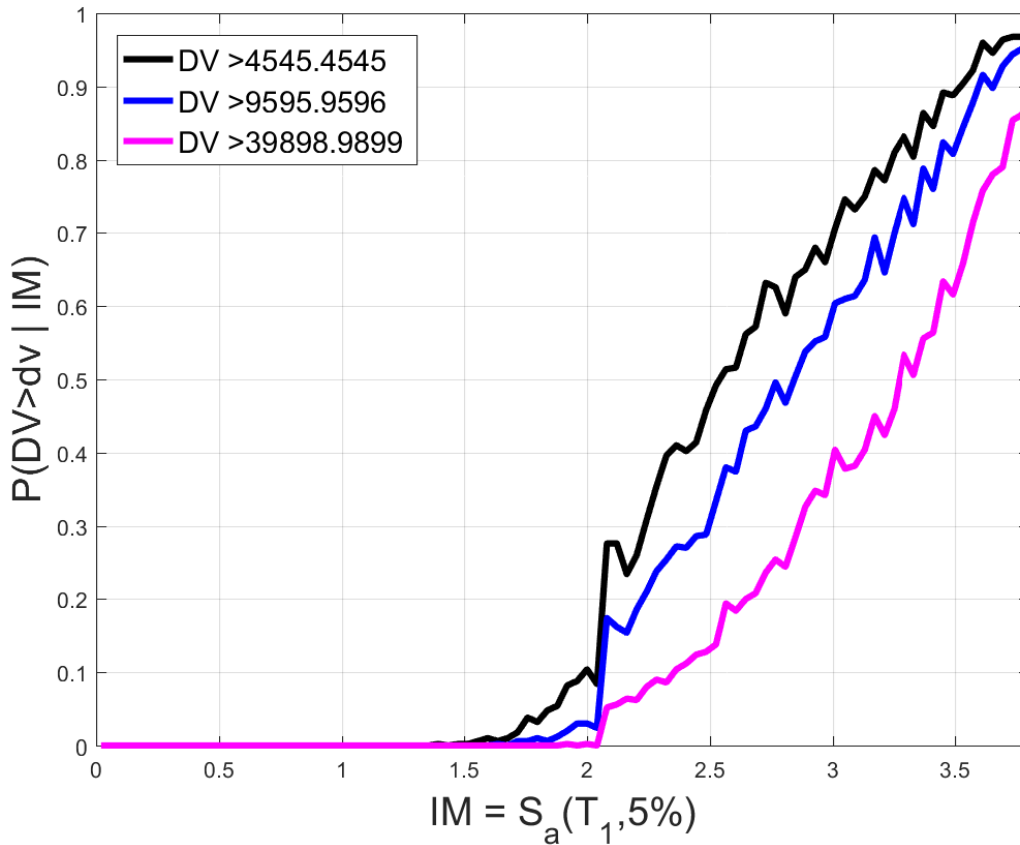
Σχήμα 5.20: Καμπύλες κόστους για ποσοστά κατανομής 16%, 50% και 84%, παρουσιάζοντας την κατανομή του κόστους κατασκευής ως συνάρτηση του δείκτη έντασης IM.

Επομένως, καθίσταται δυνατόν να υπολογιστούν οι πιθανότητες υπέρβασης  $P(DV > dv | IM)$  για κάθε τιμή του IM, οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να απεικονιστούν με τη μορφή συνεχούς καμπύλης. Οι ζητούμενες πιθανότητες θα προκύψουν από την θεμελιώδη πιθανοτική σχέση:

$$P(DV > dv | IM) = \frac{\text{πλήθος προσομοιώσεων για τις οποίες ισχύει ότι } DV > dv}{\text{συνολικό πλήθος προσομοιώσεων}}$$

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.21, οι ζητούμενες καμπύλες για συγκεκριμένες τιμές της οριακής τιμής





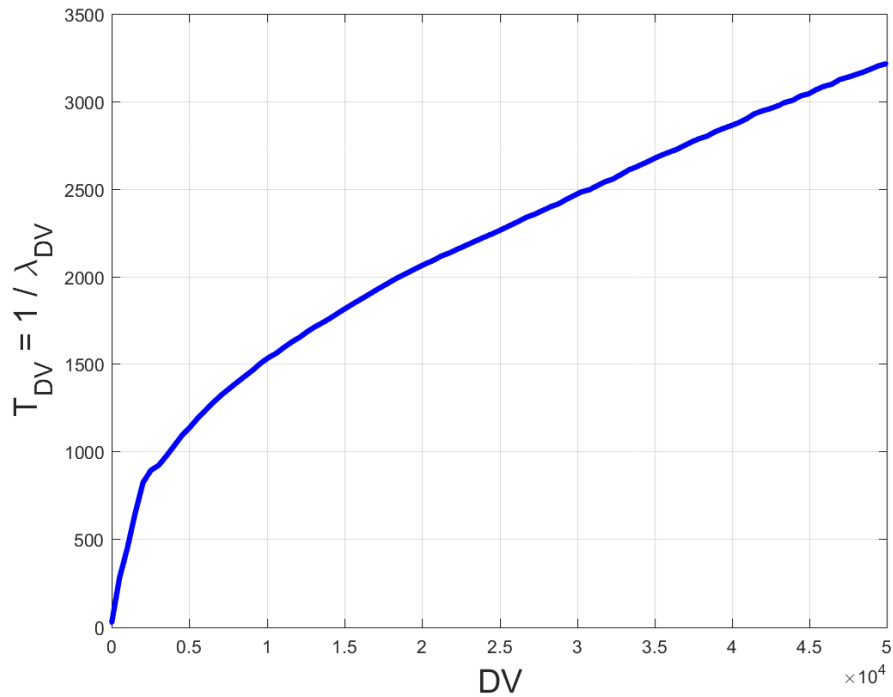
Σχήμα 5.21: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης  $P(DV > dv | IM)$  για ορισμένες τιμές της μεταβλητής κόστους  $DV(\$)$ .

Τέλος, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι απαραίτητος ο συνδυασμός των υπαρχόντων αποτελεσμάτων με την πιθανότητα  $p(IM)$ , η οποία έχει υπολογιστεί κατά το βήμα ανάλυσης σεισμικού κινδύνου (hazard analysis), προκειμένου να εξαχθεί η τελική καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης της μεταβλητής κόστους για το σύνολο της κατασκευής. Αυτό το βήμα θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση (Εξίσωση 5.2) που συνδέει την πιθανότητα  $p(IM)$  και τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης (MAF) του κάθε μέτρου έντασης.

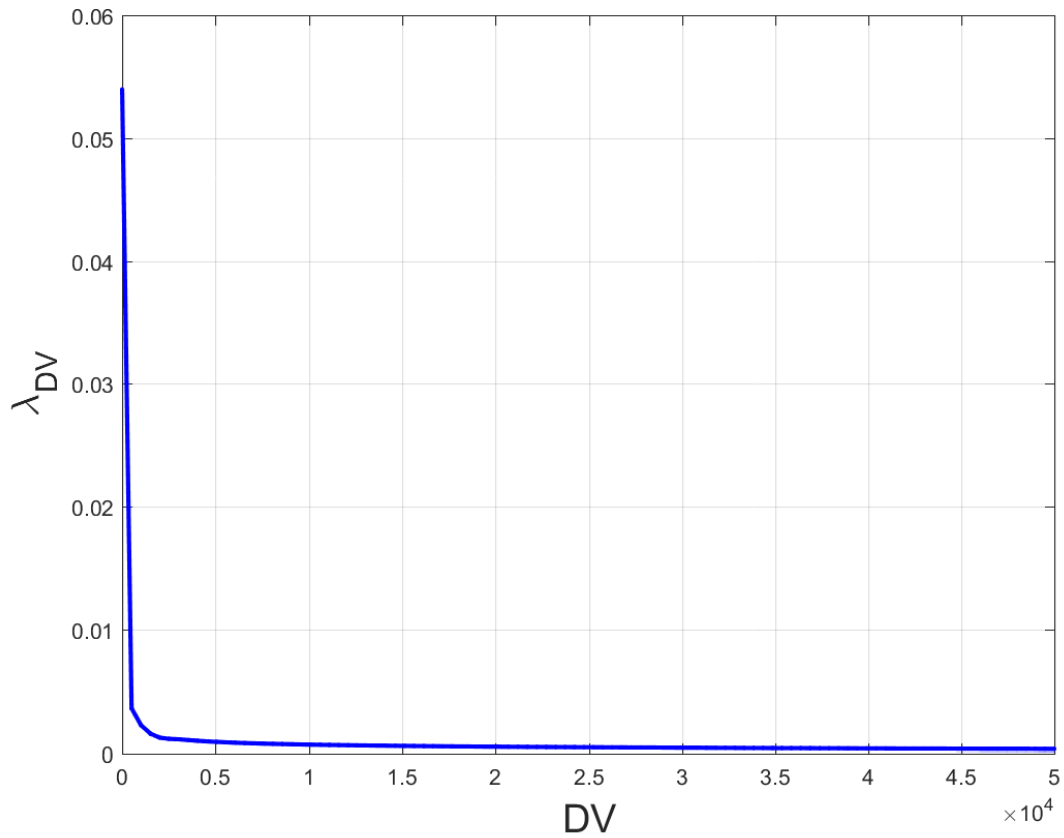
$$P(IM) = 1 - e^{-\lambda(IM)t} \quad (5.2)$$

Επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η εκτίμηση της πιθανότητας  $P(DV)$ , για κάθε τιμή της μεταβλητής απόφασης  $DV$ , όπου στην παρούσα εργασία έχει επιλεγθεί να την αντιπροσωπεύει το κόστος σε δολάρια. Ειδικότερα, ο υπολογισμός της πιθανότητας  $P(DV)$  επιτυγχάνεται μέσω της άθροισης των επιμέρους γινομένων των πιθανοτήτων υπέρβασης  $P(DV > dv | IM)$  για όλες τις διαφορετικές τιμές του  $IM$  με την μέση ετήσια συχνότητα των

συγκεκριμένων IM,  $\lambda(IM)$ , που όπως αναφέρθηκε έχουν υπολογισθεί μέσω της Εξίσωσης 5.2. Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η περίοδος επαναφοράς της μέσης ετήσιας συχνότητας υπέρβασης, ενώ η ζητούμενη τελική καμπύλη εκτίμησης απωλειών (Loss Curve) απεικονίζεται στο Σχήμα 5.23 για όλες τις τιμές  $\lambda(DV)$  ως προς τις αντίστοιχες τιμές του κόστους DV, συσχετίζοντας όπως αναφέρθηκε τη μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης του κόστους DV με το εύρος τιμών του κόστους.



Σχήμα 5.22: Περίοδος επαναφοράς της μέσης ετήσιας συχνότητας.



Σχήμα 5.23: Καμπύλη εκτίμησης συνολικού κόστους για την υπό μελέτη κατασκευή για τη μέση ετήσια συχνότητα υπέρβασης  $\lambda(DV)$  και όλες τις τιμές κόστους  $DV$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

### 6.1 Σύνοψη μεθοδολογίας και αποτελεσμάτων

Μέσω του λογισμικού που έχει δημιουργηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς (Matlab), έχει αξιοποιηθεί η δομική απόκριση της κατασκευής, όπως έχουν προκύψει από την εκτέλεση της στατικής μη-γραμμικής ανάλυσης Pushover. Οι αποκρίσεις των ομάδων των δομικών στοιχείων του κτιρίου, και συγκεκριμένα των τοίχων σκυροδέματος, των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων και τοιχοπληρώσεων, εισηχθήσαν σε συναρτήσεις τρωτότητας και συγκρίθηκε η καταπόνηση στην οποία έχουν εκτεθεί, με τη φέρουσα ικανότητά τους, προκειμένου να καθοριστεί η πιθανότητα κάθε μέλος να έχει ξεπεράσει την οριακή του κατάσταση και να απαιτεί επισκευή ή αντικατάσταση. Πραγματοποιώντας αυτή τη διαδικασία σύγκρισης για κάθε μέλος κάθε κτιρίου, δημιουργήθηκε μία πλήρης εικόνα της κατάστασης βλαβών της υπό μελέτη κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος ζημιάς για κάθε μέλος, υπολογίστηκε το κόστος επισκευής τους και προσδιορίστηκε η κατανομή του συνολικού κόστους επισκευής για όλα τα επίπεδα έντασης, όμως με δεδομένη τη συνθήκη της μη κατάρρευσης της κατασκευής.

Ως περιοχή μελέτης έχει καθοριστεί η περιοχή του Ρεθύμνου όπου προσδιορίστηκε η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας με παράμετρο την φασματική επιτάχυνση στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο σε απόσβεση 5%,  $S_a(T_1, 5\%)$ . Η τιμή αυτή της έντασης της εδαφικής κίνησης αποτέλεσε το μέτρο έντασης IM, βάσει του οποίου έχουν παρουσιαστεί τα αναλυτικά αποτελέσματα με τις βλάβες των δομικών στοιχείων και του κόστους επισκευής του κτιρίου.

Από τις αναλύσεις οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί για όλα τα επίπεδα έντασης, και με δεδομένες τις τιμές κόστους επισκευής οι οποίες έχουν υιοθετηθεί από το αρχείο που παρέχει το FEMA P-58, προκύπτει συμπέρασμα που ενισχύει τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, για τις χαμηλές τιμές του μέτρου έντασης της σεισμικής διέγερσης κυριαρχούν οι βλάβες στα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής, ενώ οι βλάβες σε δομικά στοιχεία της κατασκευής που ισοδυναμούν σε υψηλότερο κόστος κατασκευής είναι οι κυρίαρχες σε ανώτερα επίπεδα σεισμικής έντασης. Αυτό το γεγονός, παρουσιάζεται ιδιαίτερα στα ιστογράμματα που απεικονίζουν την κατανομή του κόστους για τις διάφορες τιμές του

μέτρου έντασης IM, καθώς υπάρχει μια ξεκάθαρη μετατόπιση προς τα δεξιά, δηλαδή αυξανόμενα κόστη για αυξανόμενη τιμή του μέτρου έντασης.

Συνεπώς, παρέχεται η δυνατότητα σε μηχανικούς και εργολάβους, να δημιουργήσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη σεισμική συμπεριφορά ενός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, η οποία γίνεται εύκολα κατανοητή από μη μηχανικούς ιδιοκτήτες, πελάτες ή μετόχους. Στο σύνολό της, πρόκειται για μια πρακτική και χρήσιμη μέθοδο για Σεισμική Μηχανική βάσει Επιτελεστικότητας η οποία μπορεί εύκολα να αποτελέσει τη βάση νέων λογισμικών δομικής ανάλυσης.

## 6.2 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα

Η Σεισμική Μηχανική Βάσει Επιτελεστικότητας αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία παγκοσμίως παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και έχει σκοπό τον υπολογισμό του κόστους και της χρονικής διάρκειας μετασεισμικής αποκατάστασης κατασκευών όπως επίσης και την εκτίμηση των απωλειών ανθρώπινων ζωών. Αν και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει δοθεί έμφαση στην εκτίμηση των βλαβών και τον υπολογισμό του κόστους, μελλοντική επιδίωξη, είναι η επέκταση αυτής της έρευνας με την τρισδιάστατη απεικόνισή των βλαβών και την εκτίμηση της χρονικής διάρκειας αποκατάστασης κτιρίων σε σεισμό, όπως και των αναμενόμενων απωλειών ανθρώπινων ζωών σε περίπτωση σεισμού. Η αξία εκτίμησης της τελευταίας παραμέτρου αυτού του ζητήματος είναι αναμφισβήτητη, αρκεί να αναλογιστεί κάποιος τις χιλιάδες των ανθρώπων οι οποίοι έχουν σκοτωθεί κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμών. όπως στο σεισμό Kobe (1995) στην Ιαπωνία, το σεισμό Northridge (1994), Loma Prieta (1989) και San Fernando (1971) στις Η.Π.Α., αλλά και τον πρόσφατο σεισμό στην πόλη L'Aquila (2009) στην Ιταλία.

Επιπρόσθετα, για την βελτίωση της μεθοδολογίας η οποία έχει αναπτυχθεί στη παρούσα διατριβή και την όσο το δυνατό καλύτερη και πιο αξιόπιστη εξαγωγή αποτελεσμάτων κόστους επισκευής, συστήνεται όπως ληφθούν υπόψη φαινόμενα οικονομίας κλίμακας, δηλαδή η μείωση του κόστους επισκευών για μεγαλύτερου μεγέθους εργασίες, όπως επίσης και η εισαγωγή της συσχέτισης (correlation) μεταξύ των αντοχών των στοιχείων κάθε κτιρίου (Baker 2008) αφού ίδια στοιχεία π.χ. ίδια υποστυλώματα στον ίδιο όροφο πιθανόν να έχουν ανάλογες και ισχυρά συσχετισμένες αντοχές αφού έχουν κατασκευαστεί από το ίδιο συνεργείο με τα ίδια υλικά. Επιπλέον, αξιοποιώντας τις απόλυτες επιταχύνσεις των πλακών ορόφων των κτιρίων, μπορεί να καταστεί εφικτή η μελέτη της τρωτότητας των περιεχομένων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

κάθε κτιρίου. Με τις παραπάνω προσθήκες θα εκτιμηθεί με περισσότερη ακρίβεια η μετασεισμική απόδοση του κτιρίου και το κόστος αποκατάστασής του.

Το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας, με τις πιο πάνω προσθήκες, είναι ικανό να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για τον τεχνικό κόσμο καθώς θα επιτρέπει την αυτοματοποίηση των αναλύσεων κόστους και του προγραμματισμού εργασιών αποκατάστασης για μια ολοκληρωμένη απεικόνιση της μετασεισμικής κατάστασης του κτιρίου σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Αυτό το εργαλείο θα δύναται να χρησιμοποιηθεί κατά το σχεδιασμό κτιρίων και ταυτόχρονα θα συνιστά ένα όργανο για ταχεία μετασεισμική ενέργεια καθώς θα προσφέρει μια άμεση εικόνα των πιθανότερων βλαβών και προβλημάτων που ενδέχεται να αντιμετωπίσει όποιος εισέρχεται σε ένα κτίριο μετά από κάποιο σεισμικό γεγονός (Kamat & El-Tawil 2007).

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

Aslani H. and Miranda E. (2005) Probabilistic Earthquake Loss Estimation and Loss Disaggregation in buildings, *Report No 157*, Stanford CA, The John A. Blume Earthquake Engineering Center

Calvi G., Magenes G., Bommer J.J, Restrepo-Vélez L.F., Crowley H. (2006), Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years, *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 472, Vol. 43, No. 3

D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T. (2015), Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, Vulnerability Global Component Project. DOI 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12

Cornell, C.A., and Krawinkler, H., (2000), Progress and challenges in seismic performance assessment, *PEER Center News*, 3(2): 1-2.

Federal Emergency Management Agency (2012), FEMA P-58, Seismic Performance Assessment of Buildings, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC

Gunay S. and Mosalam K. (2013), PEER performance based earthquake engineering methodology, revisited, *Journal of Earthquake Engineering* 17:6, 829-858

Γεωργίου, Χ., (2009), Κτιριακά μοντέλα πληροφοριών για εκτίμηση ζημιών, κόστους και χρονικής διάρκειας μετασεισμικής αποκατάστασης κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Lagomarsino S. and Giovinazzi S., (2006), Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*

Krawinkler, H., and Seneviratna, G.D.P.K., (1998), Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation, *Engineering Structures*, 20(4-6): 452-464.

Maiorani R and Tsionis G (2016) Seismic fragility curves for the European building stock: review and evaluation of analytical fragility curves. EUR 27635 EN. doi:10.2788/586263.

Mitrani-Reiser J. (2007), An ounce of prevention: probabilistic loss estimation for performance-based Earthquake Engineering, ph.d. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California

Nowak A. and Collins K. (2000) RELIABILITY OF STRUCTURES, CRC Press , 69-77

Ramirez C.M. and Miranda E. (2009) Building-specific Loss Estimation Methods & Tools for Simplified Performance-based Earthquake Engineering, *Report No. 171*, Stanford CA, The John A. Blume Earthquake Engineering Center

Papageorgiou A.V., Fragiadakis M., Vamvatsikos D. (2014), Seismic Loss and Life-Cycle Cost Assessment for Reinforced Concrete Structures, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey.

Porter, K., 2016. A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. University of Colorado Boulder, 92 pp

Porter K.A., Kennedy R.P., Bachman R.E. (2007), Creating Fragility Functions for performance-based Earthquake Engineering, *Earthquake Spectra*, 23(2): 471–489

Porter, K.A., and Kiremidjian, A.S., (2001), Assembly-based vulnerability and its uses in seismic performance evaluation and risk-management decision-making, *Report No. 309*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford, CA.

Whittaker A., S.,Hamburger R. O. and Huang Y.N.(2008), Building-Specific Seismic Loss Assessment

Yang T., Moehle J., Stojadinovic B.and Der Kiureghian A. (2009), Seismic Performance Evaluation of Facilities: Methodology and Implementation, *Journal of structural engineering*, Vol. 135, No. 10

Yang T., Stojadinovic B. and Moehle J. (2012), Demonstration of a Practical Method for Seismic Performance Assessment of Structural Systems, *Earthquake Spectra*, Volume 28, No. 2, pages 811–829