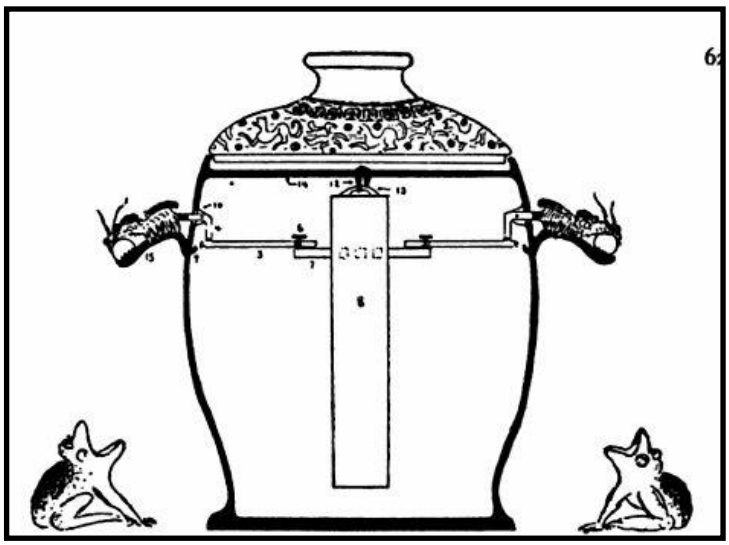
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή εργασία

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

Εκπόνηση: Παναγιώτης Χρ. Κλειώσης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Ιωάννης Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός



Seismoscope invented by Zhang Heng in 132 AD

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάλυση της σεισμικής διακινδύνευσης εκτιμά την πιθανότητα οι κατασκευές μιας περιοχής να φθάσουν ή να ξεπεράσουν ένα επίπεδο βλαβών ή απωλειών μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο για δεδομένη ένταση σεισμικού γεγονότος ή σεναρίου.
Η εικόνα που μας παρέχει αυτή η ανάλυση είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη των απωλειών, την αντιμετώπιση τους και τη λήψη αποφάσεων για τη στρατηγική που θα ακολουθηθεί για την ελαχιστοποίηση τους.

Στην παρούσα εργασία, που αποτελείται από 5 κεφάλαια, γίνεται μια προσπάθεια ανασκόπησης των σύγχρονων μεθόδων εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης δίνοντας έμφαση στις αναλυτικές μεθόδους, καθώς και στην υλοποίηση τους στα ερευνητικά λογισμικά.
Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο τμήμα της τρωτότητας των κατασκευών και αναλύονται τόσο οι αναλυτικές όσο και οι εναλλακτικές μέθοδοι.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στις μεθόδους, περιγράφονται οι δύο κυριότερες αναλυτικές μέθοδοι, η ντετερμινιστική και η πιθανοκρατική, εξετάζονται τα δύο βασικά τμήματα της καθεμίας - δηλαδή ο σεισμικός κίνδυνος και η τρωτότητα των κατασκευών - και αναλύεται διεξοδικότερα το τμήμα της τρωτότητας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των σημαντικότερων ερευνητικών λογισμικών που αφορούν στην σεισμική διακινδύνευση, τονίζοντας τις μεθόδους που χρησιμοποιούν και τις δυνατότητες τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο επιλέγεται ως αντιπροσωπευτικό λογισμικό το SELENA, ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα και ελεύθερης πρόσβασης, και παρουσιάζονται δύο παραδείγματα αντίστοιχα για τις δύο βασικές αναλυτικές μεθόδους, την πιθανοκρατική και τη ντετερμινιστική. Στα παραδείγματα δίνεται η ευκαιρία να αναλύσουμε περεταίρω τα δεδομένα που απαιτεί το πρόγραμμα να του εισάγουμε, τις μεθόδους που χρησιμοποιεί και τα αποτελέσματα που μας παρέχει.

Στο τέταρτο κεφάλαιο για να έχουμε άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν οι δύο μέθοδοι υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας (η MADRS και η I-DCM) τις οποίες χρησιμοποιεί το SELENA, δημιουργούμε μια ρουτίνα που απομονώνει και καλεί ανεξάρτητα τις δύο αυτές υπορουτίνες του SELENA. Εξετάζονται οι διαφορές στην εκτίμηση των δύο μεθόδων και διερευνάται η επίδραση τους στην τελική εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο επιχειρείται μια ανασκόπηση των κυριοτέρων μεθόδων εκτίμησης της τρωτότητας που δεν βασίζονται στην αναλυτική διαδικασία υπολογισμού.
Τέλος, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού καμπυλών ικανότητας με τη μηχανική μέθοδο των Giovinazzi - Lagomarsino και γίνεται μια ενδεικτική σύγκριση τους με τις αντίστοιχες καμπύλες ικανότητας που υπάρχουν στη βάση δεδομένων του λογισμικού SELENA για τους τύπους κτιρίων C1M και C1H.

ABSTRACT

Seismic risk analysis is a methodology used to estimate the expected level of damage of buildings within a certain region, for a certain period of time, for a given intensity of a seismic event or a seismic scenario.
It provides a clear picture of the damage and losses that could occur as a result of the seismic event, which also serves as a tool for the proper planning and the decisions that have to be made for dealing with these losses and for the strategy that has to be followed in order to minimize them.

This study, consisting of five chapters, is a review of the most current seismic-risk assessment methods, focusing on the analytical methods and on their implementation in researching software.
The part of the vulnerability of structures is further examined and the analytical and the alternatives methods are analyzed.

The first chapter is a general reference to the methods of seismic-risk loss assessment and particularly examines the analytical methods (the two basic ones being the Deterministic and the Probabilistic). Seismic hazard and structure vulnerability are being studied - which are the two main sections of each method - with emphasis on vulnerability.

The second chapter reviews the most significant seismic-risk analysis researching software and analyzes the methods they use and their capabilities.

In chapter three, SELENA as representative software for seismic-risk analysis, which is an open source code and free access software. An example is displayed for each one of the two basic analytical methods (the Deterministic and the Probabilistic). For each method, I analyze the required input data files as well as the results of the output files, and further explain the methods it uses.

Chapter four presents a brief comparison of the outcoming results of the two calculating methods for the assessment of the performance point (the MADRS and the I-DCM which are both extracted from the SELENA subroutines). It also examines the effect of their different results on the final results of the seismic-risk loss assessment.

The fifth chapter reviews the most significant non-analytical methods for the estimation of the vulnerability of the buildings. An example is displayed where capacity curves are calculated by using the mechanical method of Giovinazzi and Lagomarsino and an indicative comparison is made with the equivalent capacity curves provided from the SELENA software data files for the C1M and C1H building types.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μου εργασίας, τον επιστημονικό συνεργάτη Dr. πολιτικό Μηχανικό Ιωάννη Ταφλαμπά και τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Ιωάννη Ν. Ψυχάρη για την ανάθεση του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση τους.

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Στον πατέρα μου που έφυγε πρόσφατα, και στη σύζυγο μου για την πλήρη υποστήριξη της.

Παναγιώτης Κλειώσης

Ιούνιος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ**

1.1. Σεισμική διακινδύνευση ……...……..…σελ. 7

1.2. Σεισμός και σεισμικός κίνδυνος …….…σελ. 10

1.3 Τρωτότητα ……..…σελ. 19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 **ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ**

2.1. Σκοπός …….…σελ. 50

2.2. Υπάρχοντα λογισμικά …….....σελ. 51

2.3. Δομή λογισμικών …….…σελ. 52

2.4. Περιγραφή λογισμικών …….…σελ. 55

2.5. Σχόλια - συμπεράσματα …… ……σελ. 75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 **ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SELENA ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ**

3.1. Εισαγωγή - Βασικά στοιχεία ……..σελ. 78

3.2. Σύνθεση και Ανάλυση παραδειγμάτων …….σελ. 84

3.2.1. Επίλυση με την Ντετερμινιστική μέθοδο

3.2.2. Επίλυση με την Πιθανοκρατική μέθοδο

3.3. Ανακεφαλαίωση ……..σελ. 119

3.4. Σχόλια ……σελ. 120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 **ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MADRS ΚΑΙ I-DCM ΟΠΩΣ ΥΛΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ SELENA**

4.1. Ανάλυση της διαδικασίας …….……σελ. 123

4.2. Απευθείας σύγκριση των 2 μεθόδων ……σελ. 127

4.3. Διερεύνηση της επίδρασης των 2 μεθόδων στα τελικά αποτελέσματα με την πιθανοκρατικη μέθοδο ……σελ. 131

4.3.1 Αποτελέσματα για μέθοδο MADRS

4.3.2 Αποτελέσματα για μέθοδο I-DCM

4.3.3 Συγκρίσεις

4.4. Γενικά συμπεράσματα …….……..σελ. 144

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u> **ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ**

5.1. Εισαγωγή …….……..σελ. 149

5.2. Περιγραφή μεθόδων ……σελ. 150

5.2.1 Μέθοδος DBELA

5.2.2 Μέθοδος SPBELA

5.2.2.1 Μέθοδος SPBELA για οπλισμένο σκυρόδεμα

5.2.2.2 Μέθοδος SPBELA για άοπλη τοιχοποιία

5.2.3 Μέθοδος με χρήση σημείων διασποράς (point dispersion)

5.2.4. Μέθοδος Rossetto-Elnashai δημιουργίας Καμπυλών Τρωτότητας

5.2.5. Μηχανική μέθοδος Giovinazzi-Lagomarsino υπολογισμού της Τρωτότητας

5.3. Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης καμπύλων ικανότητας των Giovinazzi-Lagomarsino στα λογισμικά υπολογισμού της Τρωτότητας .....……..…σελ. 209

5.4. Γενικά συμπεράσματα ……σελ. 222

Κεφάλαιο 1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ

1.1 Σεισμική διακινδύνευση

1.1.1 Εισαγωγή

1.1.2 Ορισμοί

1.1.3 Μεθοδολογία

1.2 Σεισμός και σεισμικός κίνδυνος

1.2.1 Γένεση ρηγμάτων-γεωμετρικά χαρακτηριστικά

1.2.2 Μέτρηση σεισμών-μεγέθη

1.2.3 Σεισμικός κίνδυνος

1.3 Τρωτότητα

1.3.1 Εισαγωγή

1.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

1.3.3 Μέθοδοι που βασίζονται στην κρίση των ειδικών

1.3.4 Αναλυτικές μέθοδοι

1.3.4.1 Ταξινόμηση κτιρίων- επιλογή αντιπροσωπευτικού κτιρίου

1.3.4.2 Επιλογή μοντέλου ανάλυσης των κτιρίων

1.3.4.3 Επιλογή επιπέδων βλάβης

1.3.4.4 Ανάλυση κτιρίου με ανελαστικές μεθόδους-παραγωγή της καμπύλης ικανότητας

1.3.4.4.1 Στατική ανελαστική ανάλυση (pushover)

1.3.4.4.2 Δυναμική ανελαστική ανάλυση (Non-Linear Dynamic Analysis)

1.3.4.5 Επιλογή της σεισμικής απαίτησης

1.3.4.6 Σύγκριση ικανότητας με απαίτηση - εύρεση σημείου επιτελεστικότητας

1.3.4.6.1 Μέθοδος DCM (Displacement Coefficient Method - FEMA 356)

1.3.4.6.2 Βελτιωμένη μέθοδος I-DCM (Improved DCM)

1.3.4.6.3 Μέθοδος CSM (Capacity Spectrum Method)

1.3.4.6.4 Μέθοδος MADRS (βελτίωση της CSM)

1.3.4.6.5 Μέθοδος N2 (fajfar 2000)

1.3.4.7 Δημιουργία καμπυλών θραυστότητας – εκτίμηση επιπέδου βλάβης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ

1.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ

1.1.1 Εισαγωγή

Οι κίνδυνοι από τα φυσικά φαινόμενα, όπως ο σεισμός, και οι καταστροφικές επιπτώσεις τους έχουν από παλιά απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα.

Η εκτίμηση των απωλειών μιας τέτοιας καταστροφής (βλάβες κατασκευών, απώλειες υλικών αγαθών, απωλειών ζωής, τραυματισμών, διακοπή λειτουργίας δικτύων και σημαντικών εγκαταστάσεων, πυρκαγιών λόγω σεισμού, διαρροή αερίων, κλπ) εκτός από το οικονομικό κόστος έχει να κάνει και με την πρόβλεψη τρόπου άμεσης αντιμετώπισης των επιπτώσεων.

Οι τραυματίες χρειάζονται άμεση φροντίδα, οι άστεγοι χρειάζονται καταλύματα, τα οδικά δίκτυα όπως και τα δίκτυα διανομής ενέργειας και ύδρευσης πρόβλεψη για γρήγορη αποκατάσταση λειτουργίας αλλά και άρση των κινδύνων που προκαλούν, κλπ.

Η γνώση επομένως του βαθμού και του είδους των επιπτώσεων είναι πολύ σημαντική για τον προγραμματισμό και τη λήψη αποφάσεων για την αντιμετώπιση τους.

Από την άλλη, οι απώλειες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις βλάβες που προκαλεί στις κατασκευές ένα σεισμικό συμβάν. Επομένως ο βαθμός αντίστασης μιας κατασκευής απέναντι σε δεδομένης έντασης σεισμικό γεγονός, δηλαδή η τρωτότητα της κατασκευής, είναι φυσικό να απασχολεί τον μηχανικό τόσο για την εκτίμηση των μετασεισμικών βλαβών όσο και στη βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού για την ελαχιστοποίηση αυτών.

Έτσι σε παγκόσμιο επίπεδο παρατηρούμε οργανωμένες προσπάθειες εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης, είτε σε κρατικό επίπεδο (πρόγραμμα HAZUS υπό την αιγίδα της FEMA), είτε σε διεθνείς ερευνητικές συνεργασίες (πρόγραμμα NERIES, GEM (Global Earthquake Model)) αλλά και σε καθαρά εμπορικό επίπεδο που αφορά τις ασφαλίσεις.

Οι προσπάθειες αυτές έχουν επιφέρει σημαντικά βήματα προόδου στις μεθόδους εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης τόσο στο κομμάτι εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου όσο και στο κομμάτι της εκτίμησης της τρωτότητας των κατασκευών.

1.1.2 Ορισμοί

Σεισμικό κίνδυνο (Seismic hazard) μπορούμε να ορίσουμε την πιθανότητα εμφάνισης σεισμού συγκεκριμένης έντασης σε συγκεκριμένη περιοχή μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Η σφοδρότητα του σεισμού μπορεί να εκφραστεί είτε με **μακροσεισμικά** μεγέθη, όπως η ένταση από τα παρατηρούμενα αποτελέσματα του σεισμού (εκφράζεται συνήθως από τη σεισμική ένταση ή το μέγεθος σεισμού) είτε με **μικροσεισμικά** μεγέθη που προκύπτουν από μετρήσεις της μετακίνησης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης που προκαλεί στο έδαφος μιας περιοχής ο σεισμός (πχ επιταχυνσιογραφήματα, PGD, PGA, φάσματα απόκρισης Sa, φάσματα απόκρισης Sd).

Τρωτότητα (Vulnerability) μπορούμε να ορίσουμε την ευπάθεια των κατασκευών απέναντι στην ένταση ενός σεισμικού γεγονότος. Η **ένταση του σεισμικού γεγονότος** μπορεί να εκφραστεί είτε από τα μακροσεισμικά μεγέθη (ένταση), είτε από τα μικροσεισμικά μεγέθη (πχ επιταχύνσεις υποβάθρου)**.**

Διακινδυνευόμενη αξία (exposure) μπορεί να οριστεί η εκτεθειμένη σε κίνδυνο κατασκευή με τις ζωές των κατοίκων και των υλικών αγαθών.

Έτσι μπορούμε να ορίσουμε ως **Σεισμική Διακινδύνευση (Seismic Risk) την πιθανότητα να ξεπεραστεί ένα επίπεδο βλάβης ή απωλειών** των κατασκευών για την περιοχή που εξετάζουμε μέσα σε ένα χρονικό διάστημα για συγκεκριμένη ένταση σεισμού. Οι απώλειες αφορούν τόσο τις άμεσες όσο και τις έμμεσες συνέπειες και μπορούν να εκφραστούν με διάφορα κριτήρια (πχ οικονομικό κόστος, απωλειών ζωής).

Σεισμική Διακινδύνευση = Σεισμικός κίνδυνος Χ Τρωτότητα Χ Διακινδυνευμένη Αξία

Με όρους πιθανοτήτων θα μπορούσαμε να πούμε ότι αν Χ είναι η τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την ένταση της σεισμικής διέγερσης και χ_0 κάποια συγκεκριμένη τιμή της, Υ είναι η τυχαία μεταβλητή που εκφράζει το επίπεδο βλαβών ή απωλειών και y_0 κάποια συγκεκριμένη τιμή της, τότε χρησιμοποιώντας το ολικό θεώρημα πιθανοτήτων, ορίζουμε ότι η πιθανότητα το επίπεδο βλαβών ή απωλειών **Υ** να φτάσει ή να ξεπεράσει την τιμή $\mathbf{y_0}$ ισούται με το γινόμενο της πιθανότητας η τιμή του **Υ** να φτάσει ή να ξεπεράσει την τιμή $\mathbf{y_0}$ υπό την προϋπόθεση το **Χ** να φτάσει ή να ξεπεράσει την τιμή $\boldsymbol{\chi_0}$ επί την πιθανότητα το **Χ** να φτάσει ή να ξεπεράσει την τιμή $\boldsymbol{\chi_0}$:

$$\mathbf{P(Y \geq y_0) = P(Y \geq y_0 \mid X \geq x_0) * P(X \geq x_0)}$$

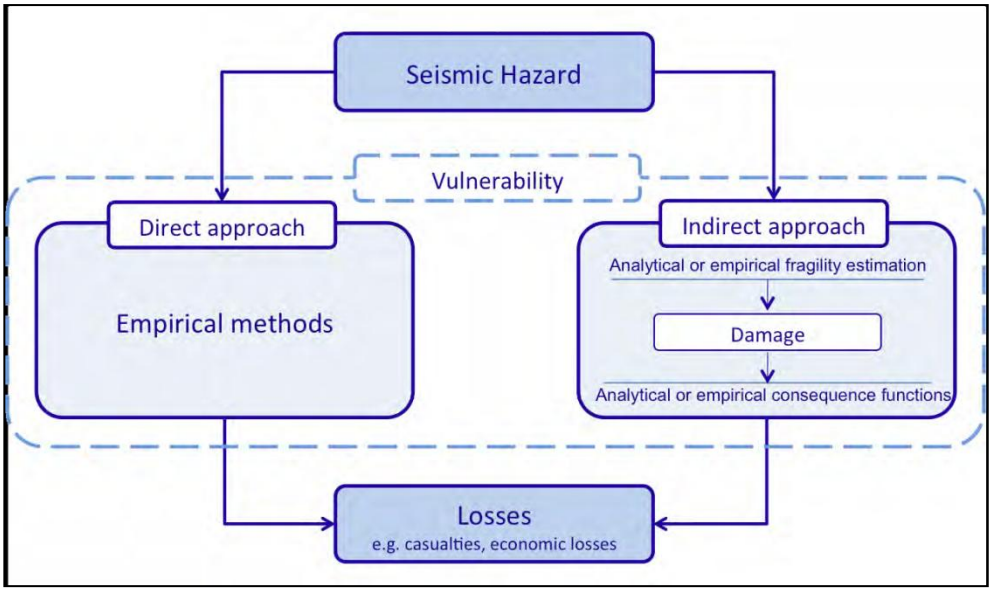
Δηλαδή η πιθανότητα να ξεπεραστεί ένα επίπεδο βλάβης ισούται με την πιθανότητα να ξεπεραστεί ένα επίπεδο βλάβης εάν ξεπεραστεί ένα επίπεδο σεισμικής έντασης επί την πιθανότητα να ξεπεραστεί αυτό το επίπεδο σεισμικής έντασης.

Η **ανάλυση σεισμικής διακινδύνευσης (seismic risk analysis)** αναζητά τη σχέση ανάμεσα στο επίπεδο απωλειών λόγω συγκεκριμένου σεισμικού κινδύνου και την πιθανότητα να υπερβληθεί αυτό το επίπεδο απωλειών μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα.

1.1.3 Μεθοδολογία

Ο υπολογισμός της σεισμικής διακινδύνευσης περιλαμβάνει 3 βασικά στάδια.

Υπολογισμό του **σεισμικού κινδύνου** για την υπό εξέταση περιοχή, υπολογισμό της **τρωτότητας** των κατασκευών που περιλαμβάνονται στην υπό εξέταση περιοχή, και τέλος βάσει του σεισμικού κινδύνου και της τρωτότητας υπολογίζεται το επίπεδο των ζημιών των κατασκευών και από αυτές υπολογίζονται οι **απώλειες** που μας ενδιαφέρουν.



Σχήμα 1: Λογικό διάγραμμα μεθοδολογίας υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας (GEM Technical report 2010-5 [11])

`Οι δύο μεγάλες παράμετροι για τον υπολογισμό του σεισμικού ρίσκου είναι ο **σεισμικός κίνδυνος** και η **τρωτότητα** των κατασκευών.

Παρακάτω εξετάζουμε αναλυτικότερα την καθεμία από αυτές.

1.2 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ

1.2.1 Γένεση ρηγμάτων - γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Η σύγχρονη επικρατούσα θεωρία για την γένεση των σεισμών είναι η θεωρία των τεκτονικών πλακών.

Οι πλάκες είναι μεγάλες βραχώδεις πλάκες με πάχος της τάξης των 100 km, που καταλαμβάνουν το φλοιό της λιθόσφαιρας και τμήμα του εξωτερικού μανδύα της Γης.

Η σχετική κίνηση των πλακών δημιουργεί μεγάλες εντάσεις οι οποίες όταν ξεπεράσουν τα όρια αντοχής των στρωμάτων δημιουργούνται σε αυτά ρήγματα και η σχετική μετακίνηση των δύο μαζών προκαλεί τη δόνηση που ονομάζουμε σεισμό **[7]**.

Τα ρήγματα ταξινομούνται ανάλογα του τρόπου και του προσανατολισμού της σχετικής μετακίνησης των δύο τμημάτων.

Έτσι έχουμε δύο βασικές κατηγορίες ρηγμάτων, τα ρήγματα κατακόρυφης ολίσθησης (**dip-slip**) και τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (**strike-slip**). Μερικά ρήγματα αποτελούν συνδυασμό των δύο προηγουμένων και λέγονται κεκλιμένα ρήγματα ή ρήγματα κεκλιμένης ολίσθησης (**oblique-slip**).

Στα κεκλιμένα ρήγματα έχουμε το τμήμα κάτω από το ρήγμα (**footwall**) και το τμήμα πάνω από το ρήγμα (**hanging wall**).

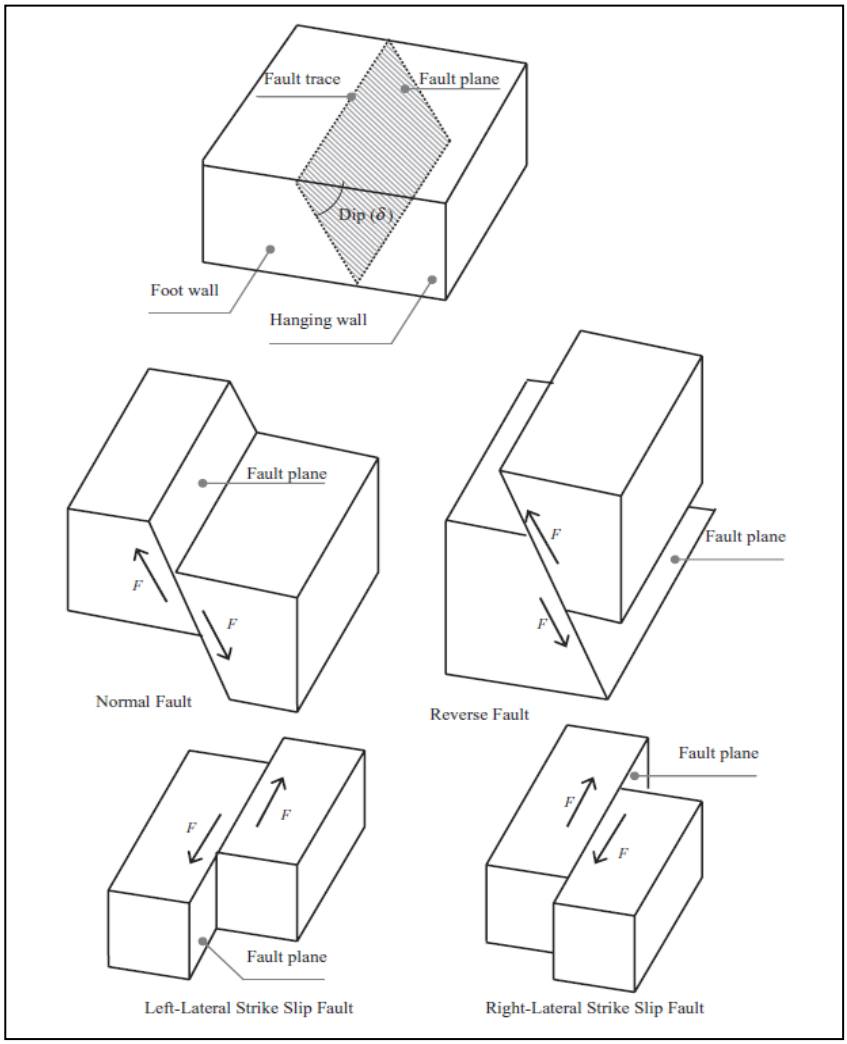
Όταν στο κεκλιμένο ρήγμα κυριαρχούν οι **εφελκυστικές τάσεις,** τότε το κάτω τμήμα (**footwall**) υψώνεται σχετικά με το πάνω τμήμα (**hanging wall**) και έχουμε το λεγόμενο **κανονικό ρήγμα**.

Όταν στο κεκλιμένο ρήγμα κυριαρχούν οι **θλιπτικές τάσεις,** τότε το πάνω τμήμα (**hanging wall**) υψώνεται σχετικά με το κάτω τμήμα (**footwall**) και έχουμε το λεγόμενο **ανάστροφο ρήγμα**.

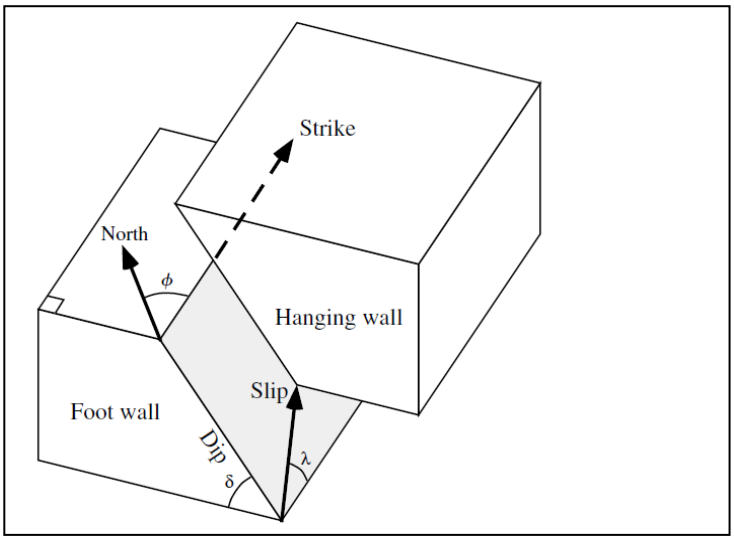
Όταν στα οριζόντια ρήγματα ένας παρατηρητής που στέκεται στη μία πλευρά βλέπει σχετική μετακίνηση προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά, ονομάζουμε αντίστοιχα το οριζόντιο ρήγμα **δεξιόστροφο** ή **αριστερόστροφο**. Στα οριζόντια ρήγματα κυριαρχούν οι **διατμητικές εντάσεις.** Οι διάφοροι τύποι ρηγμάτων φαίνονται στο σχήμα 2.

Η τομή του επιπέδου του ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο ορίζει την ευθεία του **ίχνους του ρήγματος (strike)**. Η δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο γεωγραφικό βορρά και στη θετική φορά του ίχνους του ρήγματος ονομάζεται **γωνία διεύθυνσης φ (trace angle**). Η γωνία ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο του ρήγματος είναι η **γωνία βύθισης δ** ή κλίση (**dip angle**). Η **γωνία ολίσθησης λ (rake)** μετριέται πάνω στο επίπεδο του ρήγματος και ορίζεται από την αριστερόστροφη γωνία από τη διεύθυνση του ίχνους του ρήγματος μέχρι τη διεύθυνση του διανύσματος της ολίσθησης.

Η **γωνία διεύθυνσης φ** κυμαίνεται $0 \leq \varphi \leq 360$, η **γωνία βύθισης δ** κυμαίνεται $0 \leq \delta \leq 90$ και η **γωνία ολίσθησης λ** κυμαίνεται $0 \leq \varphi \leq 360$. Από την τιμή της γωνίας ολίσθησης λ μπορεί να καθοριστεί ο τύπος του ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο, κλπ). Οι ορισμοί των γωνιών φαίνονται στο σχήμα 3.

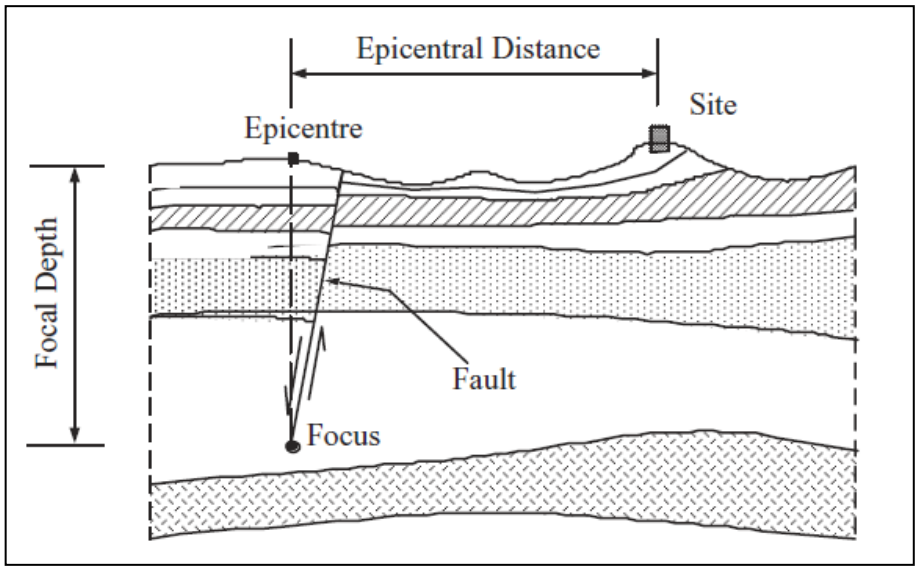


Σχήμα 2: Βασικοί τύποι ρηγμάτων [7] Amr S. Elnashai – Luigi Di Sarno



Σχήμα 3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρηγμάτων [8] Peter M. Shearer

Η **εστία ή υπόκεντρο (focus)** ενός σεισμού είναι το σημείο που θεωρούμε ότι έγινε η διάρρηξη. Η προβολή της εστίας στο επίπεδο της επιφανείας ορίζει το **επίκεντρο**. Η απόσταση της εστίας από το επίκεντρο ορίζει **το εστιακό βάθος (focal depth).** Η απόσταση μιας περιοχής από το επίκεντρο ορίζει την **επικεντρική απόσταση (epicentral distance).** Οι ορισμοί φαίνονται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Ορισμοί γεωμετρίας της εστίας των ρηγμάτων [7] Amr S. Elnashai – Luigi Di Sarno

1.2.2 Μέτρηση σεισμών - μεγέθη

Η μέτρηση των σεισμών γίνεται με δύο τρόπους **[7]**.

Ποιοτικά ή ανόργανα που είναι η ποιοτική περιγραφή των επιπτώσεων του σεισμού που βασίζεται στην παρατήρηση και όχι στις μετρήσεις. Το μέγεθος που χαρακτηρίζει αυτό τον τρόπο είναι η **ένταση I (Intensity)**, και υπάρχουν διάφορες κλίμακες που καθορίζουν το μέγεθος της έντασης ανάλογα τις παρατηρήσεις. Τέτοιες κλίμακες είναι η παλαιότερες **Mercalli** (MCS), η **τροποποιημένη Mercalli** (MM) και η πρόσφατη **Ευρωπαϊκή κλίμακα (EMS)**.

Ποσοτικά ή ενόργανα που είναι η ποσοτική έκφραση της σφοδρότητας του σεισμού που βασίζεται σε ενόργανη καταγραφή κάποιου μεγέθους. Αυτές είτε αφορούν το μέγεθος του σεισμού που έχει να κάνει με την ενέργεια που εκλύεται από τον σεισμό, είτε τη χρονοιστορία της επιτάχυνσης (επιταχυνσιογράφημα), της μετακίνησης και της ταχύτητας.

Για το μέγεθος του σεισμού υπάρχουν πολλοί ορισμοί, όπως το τοπικό μέγεθος $\mathbf{M_L}$(Richter), το μέγεθος των επιφανειακών κυμάτων $\mathbf{M_S}$ και το μέγεθος σεισμικής ροπής $\mathbf{M_w}$.

Το μέγεθος σεισμικής ροπής $\mathbf{M_w}$ είναι το πιο σημαντικό, από την σκοπιά του σεισμικού κινδύνου καθώς εμπλέκει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρήγματος, και ορίζεται από τη σχέση

$$\boxed{\mathbf{M_w = \frac{2}{3}\log M_0 - 6}}$$

Όπου $\mathbf{M_o}$ είναι το μέτρο της εκλυόμενης ενέργειας και ορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρήγματος (πλάτος ρήγματος **W**, μήκος ρήγματος **L** , και μετακίνησης **δ**) και από το μέτρο διάτμησης του υλικού **G**, και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{M_0 = G \times A \times \delta = G \times L \times W \times \delta}$$

Από τις χρονοιστορίες της επιτάχυνσης (επιταχυνσιογράφημα), της μετακίνησης και της ταχύτητας προκύπτουν οι χαρακτηριστικές τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης **PGA**, της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας **PGV**, και της μέγιστης εδαφικής μετακίνησης **PGD**.

Από την καταγραφή της χρονοιστορίας (επιταχυνσιογραφήματα) για τις διάφορες περιοχές που εξετάζουμε, υπολογίζουμε με αναλυτικό τρόπο τις μέγιστες αποκρίσεις ελαστικών μονοβάθμιων ταλαντωτών για ένα εύρος ιδιοπεριόδων τους. Η καταγραφή σε ένα διάγραμμα των μέγιστων μετακινήσεων των μονοβαθμίων σε σχέση με την ιδιοπερίοδο, είναι τα λεγόμενα ελαστικά φάσματα απόκρισης (**Sa, Sd**).

Τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν κυρίως για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου είναι η ένταση **I** , το μέγεθος ($\mathbf{M_L}$, $\mathbf{M_S}$, $\mathbf{M_W}$), οι μέγιστες τιμές εδαφικών κινήσεων (**PGA,PGD**) μιάς περιοχής, και οι φασματικές τιμές (**Sa,Sd**) της απόκρισης μονοβάθμιων ταλαντωτών συναρτήσει της περιόδου τους.

Για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου σε μια περιοχή πρέπει να γνωρίζουμε ποιά ένταση σεισμού θα προκαλέσει στην περιοχή ένα δεδομένο ρήγμα.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί σχέσεις με στατιστικές μεθόδους (Regression analysis), που συναρτήσει του μεγέθους σεισμικής ροπής $\mathbf{M_w}$, της επικεντρικής απόστασης από την πηγή **R**, του εστιακού βάθους **h**, το είδος του ρήγματος και το είδος του εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος, μας υπολογίζουν την αναμενόμενη τιμή σεισμικής έντασης που θα προκληθεί στην περιοχή (**PGA, PGD, Sa, Sd).** Αυτές είναι γνωστές ως **σχέσεις απόσβεσης**.

Οι σχέσεις απόσβεσης έχουν προκύψει από στατιστική συσχέτιση των καταγεγραμμένων μεγεθών του σεισμού σε μια περιοχή με τα χαρακτηριστικά του ρήγματος που τον προκάλεσε και την απόσταση της περιοχής από το ρήγμα. Υπάρχουν πολλές σχέσεις απόσβεσης που η αξιοπιστία τους εξαρτάται από το εύρος της βάσης δεδομένων που στηρίχθηκαν. Πρόσφατα έχει δημιουργηθεί νέα γενιά τέτοιων σχέσεων που βασίζεται σε περισσότερες παραμέτρους και με μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων με αποτέλεσμα την αυξημένη αξιοπιστία τους.

1.2.3 Σεισμικός κίνδυνος

Για το σχεδιασμό νέας κατασκευής ή την αξιολόγηση αντοχής υπάρχουσας σε σεισμό πρέπει να ξέρουμε για ποια ένταση σεισμού θα γίνει η αξιολόγηση και τι πιθανότητες έχει να συμβεί η ένταση αυτή μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Την απάντηση σε αυτό το ερώτημα την δίνει η ανάλυση σεισμικού κινδύνου.

Για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου σε μια περιοχή πρέπει να αναγνωριστούν όλες οι πιθανές πηγές σεισμικής δραστηριότητας και να αξιολογηθεί το δυναμικό τους σε παραγωγή σεισμών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται γεωλογικά στοιχεία, ιστορικά στοιχεία παλαιών σεισμών, και καταγραφές σύγχρονων σεισμών με όργανα.

Η προσέγγιση του σεισμικού κινδύνου μπορεί να είναι **ντετερμινιστική**, όπου υποθέτουμε ένα συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο (μέγεθος σεισμού – θέση και γεωμετρία ρήγματος, κλπ) και βρίσκουμε την ένταση σεισμού που προκαλεί στην περιοχή ενδιαφέροντος, και **πιθανοκρατική** όπου το σενάριο είναι τυχαία μεταβλητή (μέγεθος σεισμού – θέση και γεωμετρία ρήγματος, κλπ) και ο κίνδυνος εκφράζεται σαν πιθανότητα να εμφανιστεί μια συγκεκριμένη ένταση μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Α. Ντετερμινιστική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (Deterministic Seismic Hazard Analysis DSHA)

Η **DSHA** είναι η παλαιότερη μέθοδος που εφαρμόστηκε. Κατά τη μέθοδο αυτή καθορίζεται ένα σεισμικό σενάριο (δηλαδή καθορισμός θέσης, γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρήγματος και μεγέθους σεισμού) και βάσει αυτού γίνεται ο υπολογισμός σεισμικού κινδύνου. Η διαδικασία ακολουθεί βασικά 4 βήματα (Reiter 1990):

1. **Αναγνώριση και ταξινόμηση όλων των πιθανών πηγών** που μπορεί να δώσουν σημαντικό σεισμό. Αυτό περιλαμβάνει καθορισμό της γεωμετρίας της πηγής (source zone) και του δυναμικού της σε μέγεθος σεισμών.

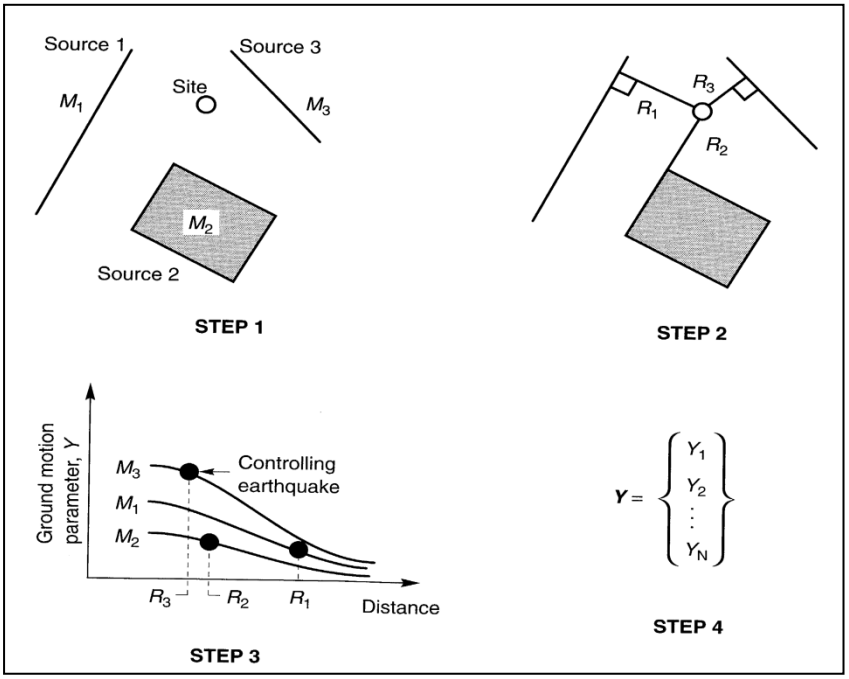
2. Καθορισμός της **απόστασης της πηγής R** από την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Συνήθως επιλέγεται η μικρότερη απόσταση. Η απόσταση μπορεί να είναι υποκεντρική, επικεντρική, κλπ, και η επιλογή της εξαρτάται από τη **σχέση απόσβεσης** που θα χρησιμοποιήσουμε στο επόμενο βήμα.

3. Επιλογή του **κυρίαρχου σεισμού** (**controlling earthquake**), δηλαδή αυτού που θα δώσει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα στην περιοχή που εξετάζουμε. Αφού υπολογιστεί με κάποια σχέση απόσβεσης που θα επιλέξουμε, το μέγεθος της σεισμικής έντασης (πχ PGA, Sa) που προκαλεί η κάθε πηγή στην περιοχή που εξετάζουμε, επιλέγεται η πηγή που μας δίνει το μεγαλύτερο μέγεθος. Ο σεισμός της συγκεκριμένης πηγής αποτελεί τον κυρίαρχο σεισμό.

4. Από τον κυρίαρχο σεισμό υπολογίζουμε τον σεισμικό κίνδυνο σαν συγκεκριμένη μέγιστη ένταση στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Ο κίνδυνος εκφράζεται με μεγέθη όπως PGA, PGV ή φάσματα απόκρισης Sa. Σχηματικά η μέθοδος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.

Η μέθοδος εκτιμά τη δυσμενέστερη ένταση σεισμού που θα συμβεί σε μια περιοχή από ένα σύνολο πιθανών ρηγμάτων με δεδομένη γεωμετρία και δυναμικό, δεν μας δίνει πληροφορίες για τη συχνότητα εμφάνισης του κυρίαρχου σεισμού και δεν λαμβάνει υπόψη τις διάφορες αβεβαιότητες και όλα τα πιθανά ρήγματα. Για περιπτώσεις όμως που αφορούν κατασκευές που η αστοχία τους έχει

καταστροφικά αποτελέσματα (όπως φράγματα, πυρηνικοί σταθμοί) αποτελεί μια αξιόπιστη εκτίμηση του **χειρότερου σεναρίου**.



Σχήμα 5: Αναπαράσταση ντετερμινιστικής μεθοδολογίας υπολογισμού σεισμικού κινδύνου S.L. Krammer [9]

Β. Πιθανοκρατική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (Probabilistic Seismic Hazard Analysis PSHA)

Για να μιλήσουμε για ανάλυση κινδύνου με όρους πιθανοτήτων πρέπει πρώτα να ορίσουμε τη σεισμικότητα μιας περιοχής.

Η **σεισμικότητα** μιας περιοχής εκφράζεται από μια **σχέση συχνότητας εμφάνισης** των σεισμικών γεγονότων γνωστή και σαν σχέση **Guttenberg-Richter** που έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{log N_T} = \alpha - \beta \mathbf{M}$$

Όπου $\mathbf{N_T}$ είναι ο αριθμός των σεισμών στο χρονικό διάστημα **T** με μέγεθος μεγαλύτερο ή ισο του **M,** ο συντελεστής **α** χαρακτηρίζει τη συνολική σεισμικότητα μιας περιοχής και ο συντελεστής β δίνει τη σχέση μεταξύ μεγάλων και μικρών σεισμών, είναι δε ανάλογος της ψαθυρότητας της περιοχής. Η σεισμικότητα δηλαδή μιας περιοχής εκτιμά πόσοι σεισμοί μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου με **M** θα συμβούν στην περιοχή μέσα στο χρονικό διάστημα **T.**

Για να συνδέσουμε την εμφάνιση των σεισμικών γεγονότων με τις πιθανότητες, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τη **σχέση κατανομής πιθανότητας της εμφάνισης των σεισμικών γεγονότων** . Συνήθως θεωρούμε ότι τα σεισμικά γεγονότα ακολουθούν την κατανομή **Poisson,** δεχόμενοι ότι η εμφάνιση ενός μελλοντικού σεισμού είναι ανεξάρτητη από τα προηγηθέντα γεγονότα.

Θεωρώντας ως τυχαίο γεγονός την εμφάνιση σεισμού με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο με M με ετήσια συχνότητα εμφάνισης **N**, τότε η πιθανότητα εμφάνισης **X** γεγονότων μέσα σε χρόνο **T** δίνεται από τη σχέση:

$$p(X) = \frac{(N * T)^X * e^{-N*T}}{X!}$$

Η εμφάνιση ενός τουλάχιστον γεγονότος ισούται με την μονάδα μείον την πιθανότητα μη εμφάνισης γεγονότος (για X=0) και δίνεται από την σχέση:

$$p = 1 - e^{-N*T}$$

Η **περίοδος επαναφοράς** ενός σεισμικού γεγονότος, δηλαδή **ο μέσος χρόνος μέχρι την εμφάνιση του επόμενου αντίστοιχου γεγονότος** και δίνεται από τον λόγο:

$$T_r = 1/N$$

όπου **N** είναι η **μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης** του γεγονότος.

Έχοντας ορίσει την πιθανότητα να συμβεί ένα σεισμικό γεγονός μεγέθους **M,** θέλουμε να συνδέσουμε το σεισμικό μέγεθος **M** με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση **PGA** που μας είναι χρήσιμη στη μετέπειτα διαδικασία της αξιολόγησης της τρωτότητας.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται **σχέσεις απόσβεσης της εδαφικής κίνησης** που είναι σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση της εξεταζόμενης θέσης από την σεισμική πηγή με κάποια παράμετρο της εδαφικής κίνησης λόγω του σεισμού στην εξεταζόμενη θέση, συνήθως με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ή τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα.

Μια τέτοια σχέση είναι μία σχέση που προτείνεται από τον Παπαζάχο για τον Ελληνικό χώρο:

$$\ln a_g = 3.88 + 1.12 * M_s - 1.65 * \ln(R + 15)$$

όπου a_g η εδαφική επιτάχυνση σε cm/sec^2 και **R** η απόσταση από την σεισμική πηγή.

Η βασική διαφορά της **πιθανοκρατικής μεθόδου** από την **ντετερμινιστική** είναι ότι εδώ λαμβάνεται υπόψη κάθε πιθανός κίνδυνος και η επιρροή κάθε αβεβαιότητας που εισάγεται σε κάθε βήμα και στο τέλος ο σεισμικός κίνδυνος εκφράζεται με την πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης έντασης σεισμού μέσα σε κάποιο καθορισμένο χρονικό διάστημα. Τα βασικά βήματα της μεθόδου είναι:

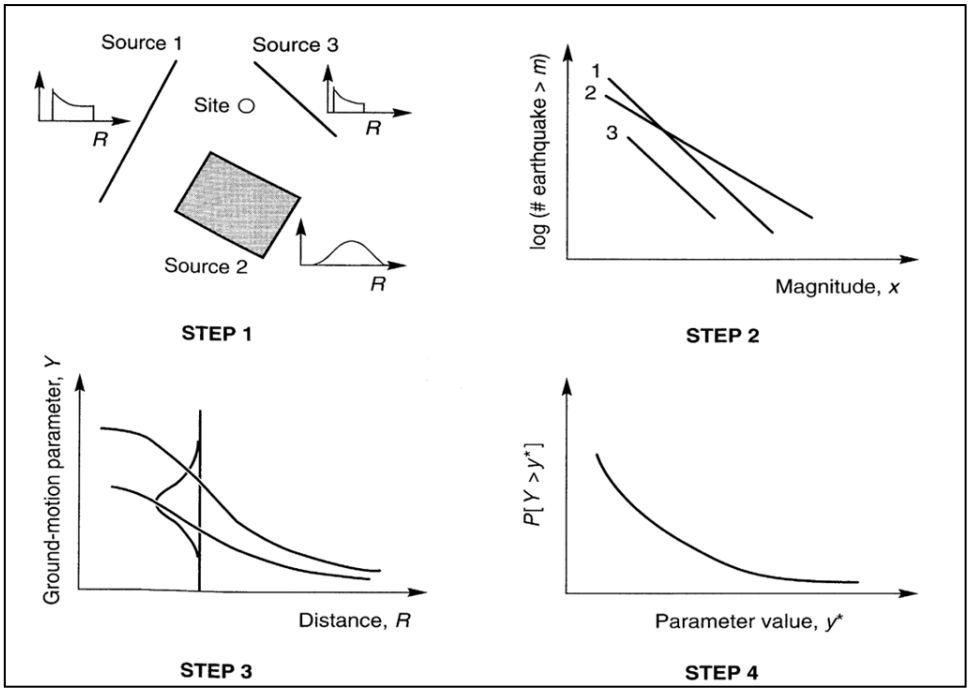
1. Αναγνώριση και ταξινόμηση όλων των πιθανών πηγών όπως και στην προηγούμενη μέθοδο. Η διαφορά εδώ είναι ότι υπολογίζεται η κατανομή πιθανότητας να δημιουργηθεί ρήγμα σε καθένα από τα σημεία κάθε πηγής (συνήθως χρησιμοποιείται η ομοιόμορφη κατανομή – θεωρώντας ίσες πιθανότητες για όλα τα γεγονότα). Αυτή η κατανομή συνδυάζεται με τη γεωμετρία της κάθε πηγής για να προκύψει η κατανομή πιθανότητας της απόστασης πηγής με την περιοχή που μας ενδιαφέρει.

2. Υπολογίζεται η σεισμικότητα της κάθε πηγής, δηλαδή του μέσου ρυθμού επαναφοράς σεισμού πάνω από κάποιο συγκεκριμένο όριο από την κάθε πηγή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε κάποια **σχέση συχνότητας εμφάνισης (Guttenberg-Richter)**.

3. Υπολογίζονται οι παράμετροι εδαφικής κίνησης (πχ PGA, Sa) στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, χρησιμοποιώντας **σχέσεις απόσβεσης**, για κάθε πιθανό μέγεθος σεισμού από κάθε πιθανό σημείο κάθε πηγής και λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες της κάθε σχέσης απόσβεσης.

4. Τελικά οι αβεβαιότητες της θέσης του κάθε σεισμού, του μεγέθους του, και της πρόβλεψης των παραμέτρων εδαφικής κίνησης συνδυάζονται για να προκύψει η πιθανότητα οι παράμετροι εδαφικής κίνησης να ξεπεράσουν κάποια συγκεκριμένη τιμή για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η μέθοδος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 6: Αναπαράσταση της Πιθανοκρατικής μεθόδου υπολογισμού σεισμικού κινδύνου. S.L. Krammer [9])

Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ότι τόσο οι **σχέσεις επαναφοράς** (πχ Gutemberg-Richter) όπως και οι **σχέσεις απόσβεσης** (πχ Campbell, Joyner-Boore) είναι εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από ανάλυση παλινδρόμησης (συνήθως μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων) πάνω σε περιορισμένες βάσεις δεδομένων και επομένως η κάθε μία ενέχει ανάλογο βαθμό αβεβαιότητας.

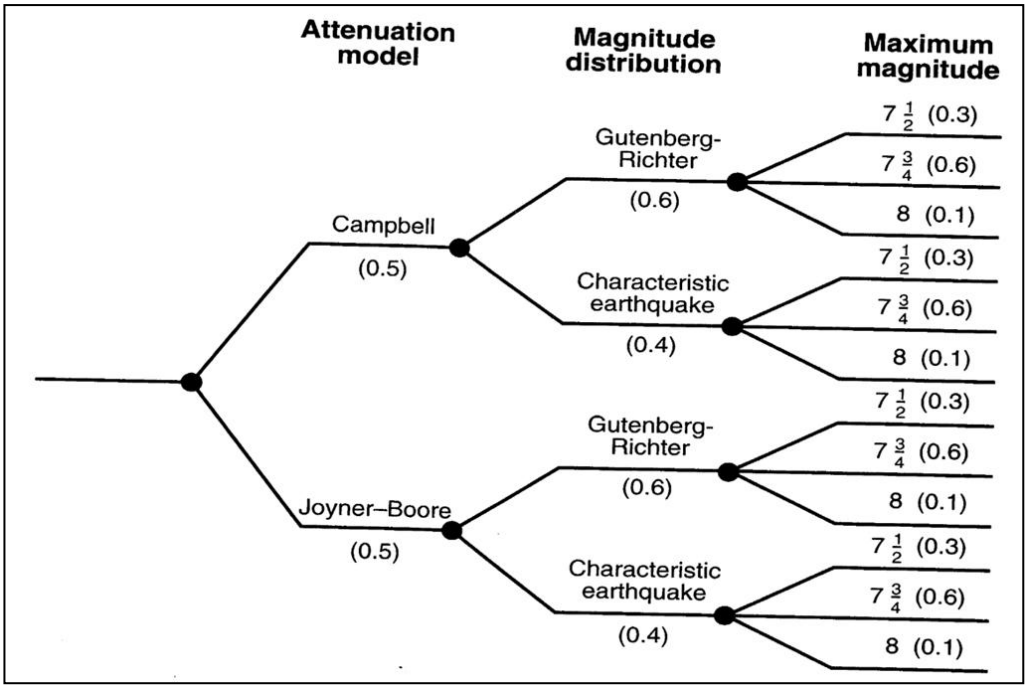
Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί η **μέθοδος των διακλαδώσεων (logic tree approach)** που επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών μοντέλων υπολογισμού που στο κάθε ένα ορίζουμε ένα συντελεστή βαρύτητας που αντιστοιχεί στη σχετική αξιοπιστία του κάθε μοντέλου.

Σε κάθε κόμβο δηλαδή δημιουργούνται τόσοι κλάδοι όσα διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού του κάθε σταδίου χρησιμοποιούμε, ώστε στο τέλος να έχουμε αποτελέσματα από διαφορετικούς συνδυασμούς μοντέλων με τις αντίστοιχες πιθανότητες.

Οι πιθανότητες όλων των κλάδων που ξεκινούν από ένα κόμβο οφείλουν να είναι σε άθροισμα ίσες με τη μονάδα.

Φυσικά με αυτό τον τρόπο έχουμε αποτελέσματα που προκύπτουν με πολλές διαφορετικές μεθόδους και διαφορετική αξιοπιστία ώστε να επιλέξουμε αυτό που μας καλύπτει, όμως ο χρόνος υπολογισμού αυξάνει απότομα για κάθε προστιθέμενο κλάδο.

Η μέθοδος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



<u>Σχήμα 7: Αναπαράσταση μεθόδου διακλάδωσης για τον υπολογισμό σεισμικού κινδύνου S.L. Krammer [9])</u>

1.3 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

Τρωτότητα θεωρείται η ευπάθεια των κατασκευών απέναντι στο σεισμικό γεγονός.

Η ευπάθεια της κατασκευής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ίδιας της κατασκευής, ενώ το επίπεδο των βλαβών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

Η τρωτότητα εκφράζεται από σχέσεις που συνδέουν τη σεισμική διέγερση με το επίπεδο βλαβών των κατασκευών. Υπάρχουν δυο ειδών τέτοιες σχέσεις, οι καμπύλες θραυστότητας και οι συναρτήσεις τρωτότητας.

Η **καμπύλη θραυστότητας (fragility curve)** εκφράζει την πιθανότητα μια ορισμένη κατασκευή να φθάσει ή να ξεπεράσει ένα καθορισμένο επίπεδο βλάβης (πχ κατάρρευση, μεγάλες βλάβες) για δοθείσα σεισμική διέγερση. Όπου ως επίπεδο βλάβης θεωρείται μια καθορισμένη περιοχή από τιμές ενός χαρακτηριστικού μεγέθους (πχ παραμορφώσεις, σχετική στροφή ορόφου). Έτσι καταλήγουμε σε λίγες διακριτές τιμές, συνήθως 4 ή 5, επιπέδων βλάβης και σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί μια **καμπύλη θραυστότητας,** που εκφράζει την πιθανότητα να ξεπεραστεί αυτό το επίπεδο βλάβης ανάλογα της τιμής της σεισμικής διέγερσης. Οι συναρτήσεις **συνεπειών (consequence functions or damage – loss conversion functions**) μεταφράζουν αυτό το επίπεδο βλαβών σε υλικές απώλειες, απώλειες ζωής, κλπ. Η **συνάρτηση τρωτότητας (vulnerability function)** εκφράζει απ' ευθείας την πιθανότητα να φθάσουμε ή να ξεπεράσουμε ένα επίπεδο απωλειών για μια δοθείσα σεισμική διέγερση.

1.3.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, εμπειρικές, αναλυτικές και μεθόδους που βασίζονται στην κρίση των ειδικών (expert opinion), στην πράξη όμως έχουμε πολλές φορές και συνδυασμούς μεταξύ τους.

Ακολούθως θα περιγράψουμε τις τρεις κατηγορίες δίνοντας όμως μεγαλύτερη βαρύτητα στις αναλυτικές μεθόδους.

1.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι συναρτήσεις (ή καμπύλες) τρωτότητας και θραυστότητας συνδέουν απώλειες και βλάβες, αντίστοιχα, με την ένταση του σεισμού, η μορφή τους δε είναι είτε με διακριτές τιμές είτε με συνεχή καμπύλη [1].

Η πλειοψηφία των μεθόδων εκφράζεται είτε με τη μορφή μητρώων πιθανότητας βλάβης (damage probability matrices που χρησιμοποιήθηκε από ερευνητές όπως οι Whitman 1973,Yang 1989, Gulkan 1992, Eleftheriadou & Karampinis 2008, κλπ) είτε με τη μορφή των καμπυλών θραυστότητας (fragility curves από ερευνητές όπως Rossetto & Elnashai 2003, Colombi 2008, κλπ).

Τα μητρώα πιθανότητας βλάβης (DPM) αποτελούνται από ένα σύνολο διακριτών τιμών που αντιστοιχούν στην πιθανότητα για μια κατηγορία κτιρίων να φθάσει ένα επίπεδο βλάβης για μια δεδομένη τιμή της σεισμικής έντασης. Δηλαδή για κάθε τιμή σεισμικής έντασης έχουμε ένα ιστόγραμμα.

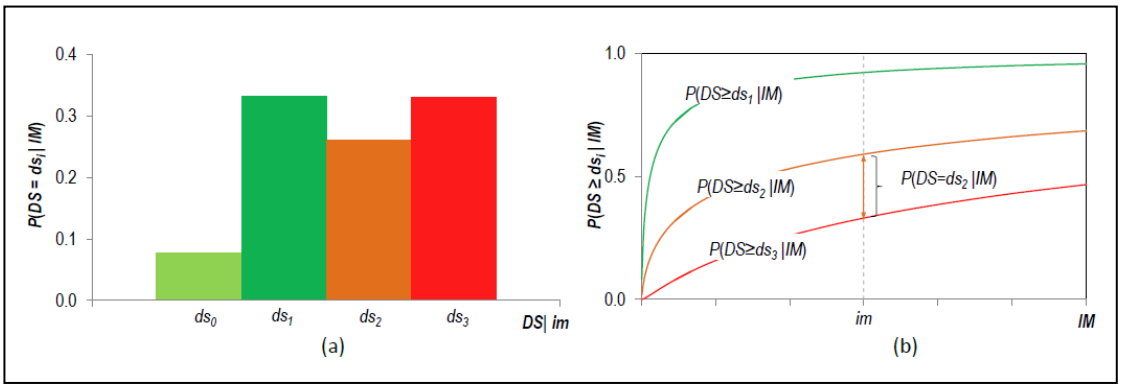
Οι καμπύλες θραυστότητας από την άλλη εκφράζουν την πιθανότητα, για μια κατηγορία κτιρίων να φθάσει ή να ξεπεράσει ένα επίπεδο βλάβης για δοσμένο εύρος τιμών σεισμικής έντασης. Για κάθε επίπεδο βλάβης δηλαδή έχουμε μια καμπύλη της πιθανότητας υπέρβασης του επιπέδου αυτού για διάφορες τιμές σεισμικής έντασης.

Η γενική έκφραση και των δύο μεθόδων είναι η παρακάτω

$$P(DS = ds_i | IM) = \begin{cases} 1 - P(DS \geq ds_i | IM) & i = 0 \\ P(DS \geq ds_i | IM) - P(DS \geq ds_{i+1} | IM) & 0 < i \leq n-1 \\ P(DS \geq ds_i | IM) & i = n \end{cases}$$

Όπου **$P(DS \geq ds_i \backslash IM)$** είναι η πιθανότητα το επίπεδο βλάβης (Damage State **DS**) της κατηγορίας κτιρίων να φθάσει ή να ξεπεράσει την τιμή **ds_i** του επιπέδου βλάβης **i**, αν συμβεί σεισμός με ένταση **IM** (Intensity Measure), **$P(DS=ds_i \backslash IM)$** είναι η πιθανότητα το επίπεδο βλάβης (Damage State DS) της κατηγορίας κτιρίων να φθάσει την τιμή **ds_i** του επιπέδου βλάβης i, αν συμβεί σεισμός με ένταση IM, και **ds_n** είναι η τιμή του μέγιστου επιπέδου βλάβης **n**.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται το μητρώο πιθανότητας βλάβης και οι καμπύλες θραυστότητας για τρία επίπεδα βλάβης.



<u>Σχήμα 8: α) Ιστόγραμμα μητρώου πιθανότητας βλάβης β) Καμπύλες θραυστότητας για n=3. [1] T. Rossetto, I. Ioannou, D.N. Grant. GEM 2015</u>

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8β, για δεδομένη ένταση **im** η πιθανότητα να είμαστε σε ένα επίπεδο βλάβης **ds_i** ισούται με την διαφορά της τιμής της καμπύλης **i** με την τιμή της από κάτω καμπύλης.

Οι εμπειρικές καμπύλες δημιουργούνται από την στατιστική συσχέτιση (regression analysis) των βλαβών που έχει υποστεί μια κατηγορία κτιρίων με την καταγεγραμμένη ένταση σεισμού που την προκάλεσε.

Για την κατασκευή μιας καμπύλης θραυστότητας η προσαρμογή των δεδομένων γίνεται συνήθως σε μια λογαριθμοκανονική αθροιστική κατανομή πιθανότητας.

Η αξιοπιστία της μεθόδου εξαρτάται από το δείγμα-πλήθος των παρατηρήσεων καθώς και την ποικιλία κατηγοριών κτιρίων και εντάσεων σεισμών.

1.3.3 Μέθοδοι που βασίζονται στην κρίση των ειδικών

Το ATC-13 (1985) παρουσίασε μια προσέγγιση για την εκτίμηση της τρωτότητας κάνοντας χρήση της κρίσης των ειδικών [3].

Οι συγγραφείς δημιούργησαν μια εκτεταμένη βάση δεδομένων από μητρώα πιθανότητας βλάβης για 78 κατηγορίες κατασκευών για την πολιτεία της Καλιφόρνιας, από τις οποίες οι 40 αφορούσαν κτίρια.

Η βασική ιδέα της μεθόδου ήταν να ζητηθεί από ένα σύνολο ατόμων που θεωρήθηκαν ειδικοί να εκφράσουν την εκτίμηση τους για ένα σύνολο περιπτώσεων, και στο τέλος να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος των εκτιμήσεων.

Αυτή η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα λόγω της εύκολης πρόσβασης, της διαφάνειας και της εκτεταμένης ποικιλίας περιπτώσεων.

1.3.4 Αναλυτικές Μέθοδοι

Αναλυτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της τρωτότητας είναι αυτές που για την εκτίμηση της τρωτότητας στηρίζονται σε προσεγγίσεις που έχουν ως βάση την επιστήμη του μηχανικού.

Το βασικό μοντέλο των μεθόδων αυτών είναι σχηματικά υπολογισμός της ικανότητας, εύρεση του σημείο επιτελεστικότητας (εκτιμώμενη απόκριση) σαν τομή της ικανότητας με την απαίτηση, και τελικά εκτίμηση των βλαβών που αντιστοιχούν σε αυτό το σημείο μέσω των καμπυλών θραυστότητας.

Κατά την υλοποίηση του αυτό το μοντέλο ακολουθεί βασικά τα παρακάτω στάδια με διάφορες παραλλαγές κατά περίπτωση.

1. Ταξινόμηση κτιρίων-επιλογή αντιπροσωπευτικού κτιρίου

2. Επιλογή μοντέλου ανάλυσης των κτιρίων - Διαχωρισμός στοιχείων

3. Επιλογή επιπέδων βλάβης

4. Ανάλυση κτιρίου με ανελαστικές μεθόδους-παραγωγή της καμπύλης ικανότητας

5. Επιλογή της σεισμικής απαίτησης

6. Σύγκριση ικανότητας με απαίτηση - εύρεση σημείου επιτελεστικότητας

7.Δημιουργία καμπυλών θραυστότητας – εκτίμηση επιπέδου βλάβης

8. Καμπύλες Τρωτότητας – εκτίμηση απωλειών

Τα στάδια αυτά αναλύονται διεξοδικά παρακάτω.

1.3.4.1 Ταξινόμηση κτιρίων - επιλογή αντιπροσωπευτικού κτιρίου

Τα κτίρια χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

α) Υλικό κατασκευής

β) Δομικό σύστημα αντίστασης στο σεισμό

γ) Ύψος

δ) Αντισεισμικό Κανονισμό και έτος κατασκευής

ε) Κανονικότητα

Για την επιλογή του αντιπροσώπου της κατηγορίας υπάρχουν τρεις εναλλακτικές:

α) η κατηγορία αντιπροσωπεύεται από **ένα κτίριο** με τυπικά για την κατηγορία χαρακτηριστικά. Η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη τη διασπορά των χαρακτηριστικών αλλά είναι γρηγορότερη.

β) η κατηγορία αντιπροσωπεύεται από **τρία κτίρια**, το τυπικό κεντρικό κτίριο και τα άλλα δύο με καλή και κακή συμπεριφορά. Ο χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής, υλικών, κανονισμό, έτος κατασκευής, κλπ.

Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τα ακραία όρια συμπεριφοράς ενός τυπικού κτιρίου.

γ) Ένα **σύνολο από τυπικά κτίρια**. Εδώ τα χαρακτηριστικά των κτιρίων θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές. Επιλέγεται ένα δείγμα κτιρίων με τυχαία χαρακτηριστικά με στοχαστικές μεθόδους (συνήθως με μέθοδο Monte-Carlo) και αφού επιλυθούν όλα στο τέλος επιλέγεται η μέση καμπύλη. Αυτή η μέθοδος θεωρείται ότι λαμβάνει αξιόπιστα υπόψη τη διασπορά των χαρακτηριστικών αλλά απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο και ειδικές γνώσεις σε προχωρημένες στοχαστικές διαδικασίες.

1.3.4.2 Επιλογή μοντέλου ανάλυσης των κτιρίων

Ανάλογα της απαιτούμενης ακρίβειας αλλά και του διαθέσιμου χρόνου διατίθενται τρία επίπεδα ανάλυσης.

α) **Πολυβάθμιο (MDOF)** τρισδιάστατο ή δισδιάστατο μοντέλο. Σε αυτή την προσέγγιση έχουμε την ακριβέστερη αντιμετώπιση του θέματος που όμως απαιτεί και τον περισσότερο χρόνο σε περιγραφή και υπολογισμούς. Το κάθε στοιχείο περιγράφεται με πεπερασμένα στοιχεία και οι κόμβοι έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας.

β) **απλοποιημένο πολυβάθμιο δισδιάστατο μοντέλο (MDOF lumped)**. Ο κάθε όροφος θεωρείται συγκεντρωμένος σε ένα κόμβο με τρεις βαθμούς ελευθερίας (δύο μεταφορικούς και ένα στροφικό).

Ο χρόνος υπολογισμών είναι μειωμένος σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο αλλά υπάρχει μείωση της ακρίβειας και αδυναμία να περιγράψει περιπτώσεις μη κανονικών κτιρίων που εμφανίζουν στροφικές ιδιομορφές.

γ) το **μονοβάθμιο (SDOF)** μοντέλο, που φυσικά είναι το ταχύτερο σε απαίτηση υπολογισμών, αλλά εκτός από την αδυναμία αξιόπιστης εκτίμησης των μη κανονικών κτιρίων δεν λαμβάνει υπόψη και την επίδραση των ανώτερων ιδιομορφών.

1.3.4.3 Επιλογή επιπέδων βλάβης

Για να περιγραφτεί η βλάβη και από αυτή μετέπειτα οι απώλειες, ορίζονται διακριτές τιμές βλάβης τα λεγόμενα επίπεδα βλάβης.

Η κάθε μέθοδος καθορίζει τα δικά της επίπεδα. Μια συνήθης πρακτική που ακολουθούν πολλές μέθοδοι (HAZUS, SELENA) είναι η χρησιμοποίηση πέντε επιπέδων βλάβης. Χωρίς βλάβη, ελαφριά βλάβη, μέτρια βλάβη, μεγάλη βλάβη, κατάρρευση. Για το διαχωρισμό των πέντε επιπέδων βλάβης, χρησιμοποιούνται τέσσερα όρια που θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές οι οποίες ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή και επομένως για να καθοριστούν πλήρως απαιτείται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

Το χαρακτηριστικό μέγεθος βάσει του οποίου θα γίνει ο διαχωρισμός ποικίλει στις διάφορες μεθόδους, μπορεί να είναι η μετακίνηση της οροφής, η σχετική μετακίνηση των ορόφων (drift), κλπ.

Το χαρακτηριστικό μέγεθος μπορεί να είναι διαφορετικό σε κάθε κατηγορία κτιρίων ώστε να περιγράφονται ανάλογα οι ιδιαιτερότητες (πχ οι κατασκευές από τοιχοποιία είναι πιο ευαίσθητες στο drift), μπορεί όμως για απλούστευση να είναι το ίδιο για όλες της εις βάρος της ακρίβειας.

1.3.4.4 Ανάλυση κτιρίου με ανελαστικές μεθόδους - παραγωγή της καμπύλης ικανότητας

Για να εξεταστεί η συμπεριφορά του κτιρίου και να εκτιμηθούν οι βλάβες σε καταστάσεις πέραν της ελαστικής περιοχής για την οποία έχει σχεδιαστεί, απαιτούνται αναλύσεις με ανελαστικές μεθόδους.

Η ανάλυση με ανελαστικές μεθόδους καταλήγει σε μία καμπύλη της μορφής τέμνουσα βάσης προς τη χαρακτηριστική μετακίνηση, που θεωρείται αντιπροσωπευτική για την ανελαστική συμπεριφορά του κτιρίου, γνωστή ως καμπύλη ικανότητας του κτιρίου.

Οι ανελαστικές μέθοδοι ποικίλουν ως προς την πολυπλοκότητα και την ακρίβεια τους.

Οι σημαντικότερες από αυτές περιγράφονται παρακάτω.

1.3.4.4.1 Στατική ανελαστική ανάλυση (pushover)

Είναι η εφαρμογή μιας πλευρικής κατανομής φόρτισης μονοτονικά αυξανόμενης σταδιακά στο μοντέλο του κτιρίου μέχρι την αστοχία ή την επίτευξη κάποιας μέγιστης μετακίνησης που έχουμε καθορίσει.

Η μεταβολή της τέμνουσας βάσης και της μετακίνησης του κόμβου αναφοράς, που συνήθως επιλέγεται στο κ.β. της οροφής, καταγράφονται και στο τέλος σχεδιάζεται η καμπύλη της τέμνουσας βάσης προς τη μετακίνηση της οροφής, που αποτελεί την καμπύλη ικανότητας της κατασκευής.

Η μέθοδος προσπαθεί με απλουστευμένο στατικό τρόπο να προσεγγίσει ένα δυναμικό φαινόμενο, προσεγγίζοντας τις αδρανειακές δυνάμεις λόγω σεισμού οι οποίες μεταβάλλονται δυναμικά με τον χρόνο, με αντίστοιχη πλευρική κατανομή δυνάμεων που αυξάνεται σταδιακά.

Η απλουστευμένη προσέγγιση του δυναμικού φαινομένου έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά η ταχύτερη και απλούστερη αντιμετώπιση του φαινομένου που μας δίνει μια καλή εικόνα της επίδρασης της οριζόντιας φόρτισης στην κατασκευή, την έχει καθιερώσει σε πολλές μεθόδους.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά η μοντελοποίηση που γίνεται για αυτή την μέθοδο καθώς και τα βασικά της βήματα.

Μοντελοποίηση

α) Φορτίων

Λαμβάνονται υπόψη πάντα τα κατακόρυφα φορτία (βάσει κανονισμού ο συνδυασμός μονίμων κινητών **G+0.30Q**).
Η οριζόντια κατανομή είναι συνήθως η τριγωνική που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη ιδιομορφή θεωρώντας ότι έχει κυρίαρχη συμμετοχή στη συμπεριφορά του κτιρίου, ή η ορθογωνική κατανομή θεωρώντας ότι λαμβάνει υπόψη και τις άλλες ιδιομορφές.

β) Συμπεριφοράς

Καθορίζεται αν θα ληφθεί υπόψη η διαφραγματική λειτουργία των πλακών, η συμπεριφορά των θεμελίων (συνήθως τα κατακόρυφα στοιχεία θεωρούνται πακτωμένα στη βάση), καθορίζονται τα κύρια και δευτερεύοντα δομικά στοιχεία, και λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα Ρ-Δ.
Καθορίζεται ο καταστατικός νόμος ανελαστικής συμπεριφοράς των στοιχείων, και ορίζεται η θέση των πιθανών πλαστικών αρθρώσεων θεωρώντας την πλαστική συμπεριφορά συγκεντρωμένη σε αυτές.

γ) Καθορισμός χαρακτηριστικού κόμβου μετακίνησης

Επιλέγεται συνήθως ο κόμβος που αντιστοιχεί στο κέντρο μάζας της οροφής του κτιρίου.

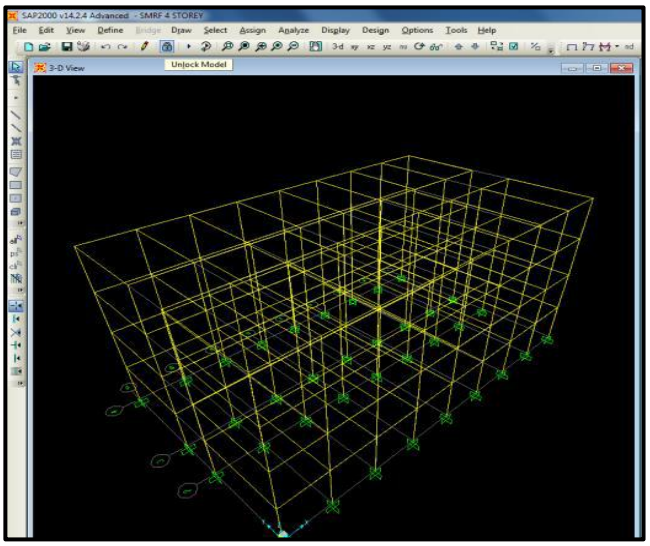
<u>Βήματα</u>

Η μέθοδος ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

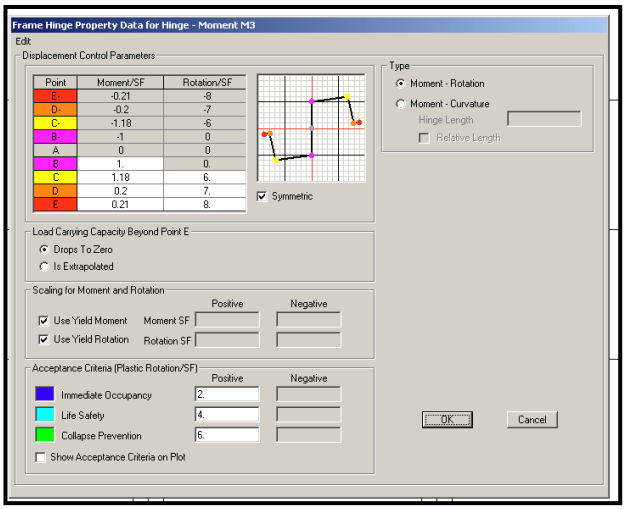
1. Ξεκινά η αύξηση της οριζόντιας κατανομής φόρτισης και αναλύεται ο φορέας.
2. Ελέγχονται οι διατομές στις θέσεις πιθανών πλαστικών αρθρώσεων αν έχουν ξεπεράσει την ροπή διαρροής My.
3. Αν δεν την έχουν ξεπεράσει επαναλαμβάνουμε τα δύο πρώτα βήματα. Αν την έχουν ξεπεράσει αλλάζει η ακαμψία των διατομών αυτών βάσει του καταστατικού νόμου που έχουμε καθορίσει και συνεχίζεται η φόρτιση με ανακατανομή των εσωτερικών δυνάμεων σύμφωνα με τις νέες ακαμψίες.
4. Ελέγχουμε αν έχουμε αστοχία ή η μετακίνηση του κόμβου οροφής έχει φτάσει την καθορισμένη μέγιστη τιμή. Αν όχι, επαναλαμβάνω τα προηγούμενα βήματα μέχρι να επιτευχθεί αστοχία ή μέγιστη μετακίνηση.
5. Στο τέλος σχεδιάζεται η καμπύλη Τέμνουσας βάσης - Μετακίνηση οροφής που είναι η καμπύλη ικανότητας.

Η μέθοδος έχει υλοποιηθεί σε πολλά εμπορικά (πχ SAP2000, Etabs, Cubus, κλπ), όσο και σε ερευνητικά λογισμικά (πχ Opensees, Seismostruc).

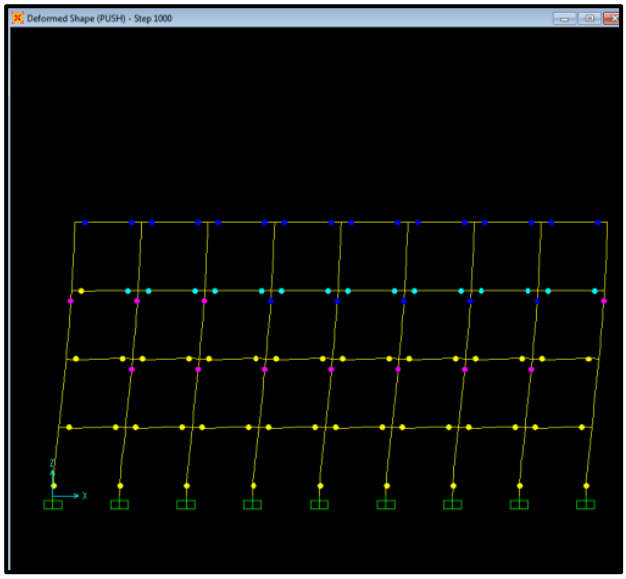
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η υλοποίηση της μεθόδου στα διάφορα στάδια της.



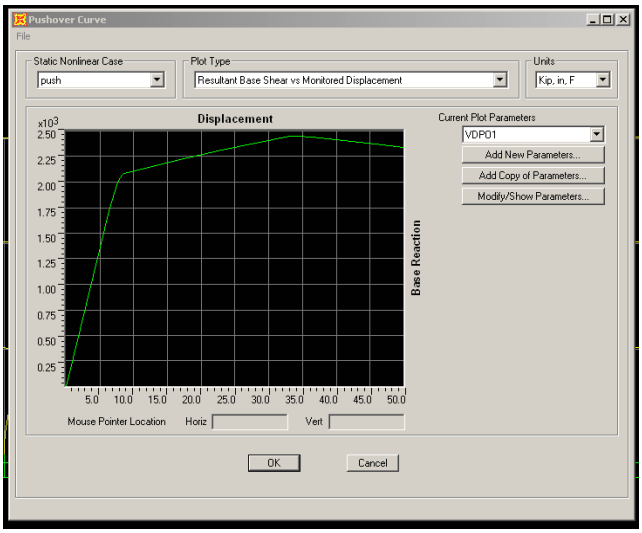
Σχήμα 9: Τρισδιάστατο πολυβάθμιο μοντέλο κτιρίου στο SAP2000 (SAP2000 manual)



Σχήμα 10: Καθορισμός καταστατικού νόμου συμπεριφοράς διατομής στο SAP2000 (SAP2000 manual)



Σχήμα 11: Μηχανισμός κατάρρευσης κτιρίου στο SAP2000 (SAP2000 manual)



Σχήμα 12: Καμπύλη ικανότητας στο SAP2000 (SAP2000 manual)

Παρά το ότι προσπαθεί να προσεγγίσει μια καθαρά δυναμική ανακυκλιζόμενη φόρτιση με στατική μονοτονική φόρτιση, η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα εκτίμησης της ανελαστικής συμπεριφοράς κανονικών κτιρίων που δεν παρουσιάζουν σημαντική στρεπτική ιδιομορφή και δεν επηρεάζονται από τις ανώτερες ιδιομορφές.

Η ταχύτητα της όμως σε σχέση με την ακριβέστερη μεν αλλά απαιτητικότερη σε μοντελοποίηση και υπολογισμούς δυναμική ανελαστική ανάλυση, την έχει κάνει δημοφιλή σε πολλές υλοποιήσεις αναλυτικών μεθόδων.

Η έρευνα για βελτίωση των αποτελεσμάτων της **pushover** έχει οδηγήσει σε νέες εξελιγμένες μορφές της μεθόδου.

Οι **A.Chopra και R. Goel** [13] πρότειναν την **Modal pushover** η οποία λαμβάνει υπόψη και την επίδραση των ανωτέρων ιδιομορφών.

Οι **Stelios Antoniou και Rui Pinho [14]** το 2009 πρότειναν την **adaptive pushover** η οποία σε κάθε βήμα κάνει ανακατανομή της πλευρικής φόρτισης ανάλογα με την ακαμψία που έχει διαμορφωθεί στο προηγούμενο βήμα. Η **adaptive pushover** σε συνδυασμό με την μέθοδο N2 για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας δίνει εκτιμήσεις για την απόκριση της κατασκευής οι οποίες είναι πολύ κοντά στα αντίστοιχα αποτελέσματα από την Δυναμική ανελαστική ανάλυση [14].

1.3.4.4.2 Δυναμική ανελαστική ανάλυση (Non-Linear Dynamic Analysis)

Η ανελαστική δυναμική ανάλυση θεωρείται σαν η πιο ακριβής και αξιόπιστη μέθοδος για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών, η χρήση της δε προτείνεται από τα ATC-63[2008] και ATC-58[FEMA P-58 2012].

Είναι όμως απαιτητική στο τμήμα που αφορά στην περιγραφή του μοντέλου του κτιρίου, της περιγραφής των μαζών στο φορέα, στη μοντελοποίηση της απόσβεσης, στον καθορισμό του αλγορίθμου για την ολοκλήρωση στο χρόνο, στο τρόπο εισαγωγής της σεισμικής κίνησης, και στο τρόπο καθορισμού των διαφόρων τύπων αστοχίας.

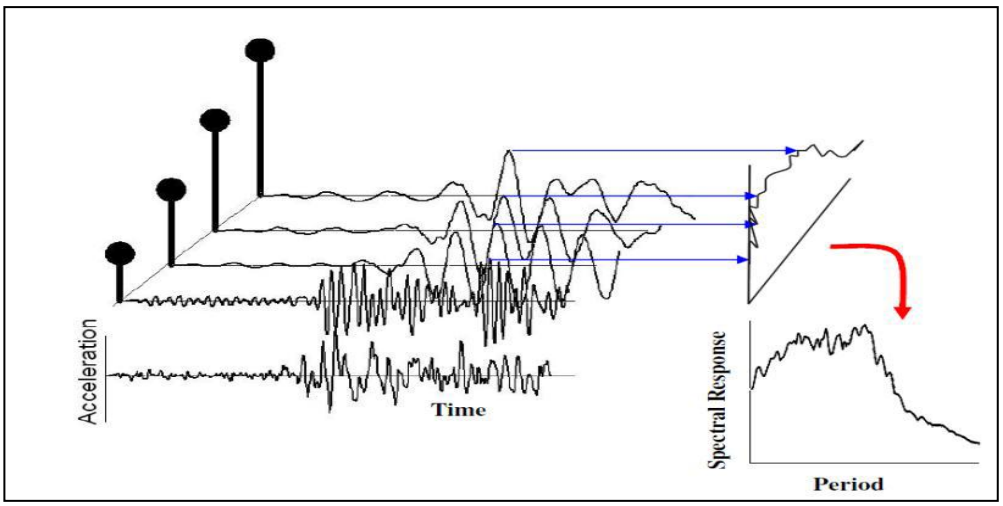
Η πολυπλοκότητα αυτή μεταφράζεται σε περισσότερο υπολογιστικό κόπο και χρόνο.

Η απαιτητικότητα της μεθόδου στη μοντελοποίηση, σε υπολογιστικό χρόνο, αλλά και σε ειδικευμένες γνώσεις των μηχανικών που θα την χρησιμοποιήσουν την κάνει λιγότερο δημοφιλή από τις αντίστοιχες αναλύσεις pushover.

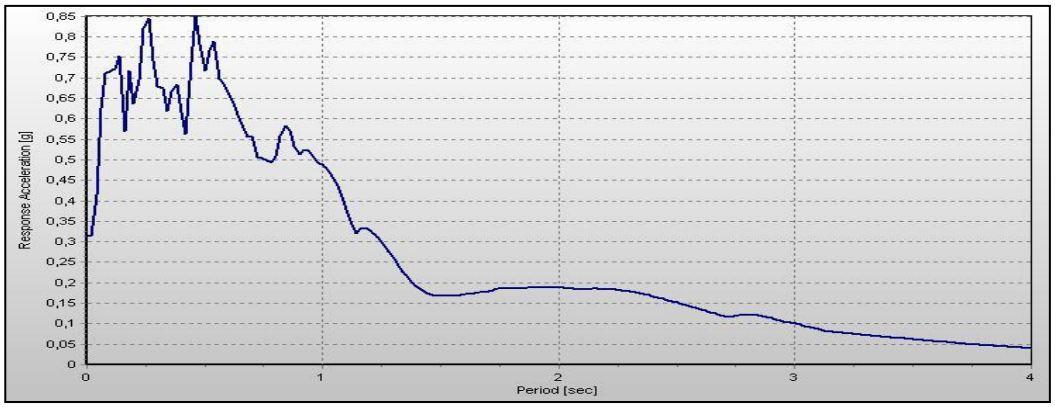
1.3.4.5 Επιλογή της σεισμικής απαίτησης

Η σεισμική απαίτηση εκφράζεται συνήθως υπό μορφή φάσματος απόκρισης (συνήθως φασματική επιτάχυνση S_a ή φασματική μετακίνηση S_d).

Από την καταγραφή της χρονοιστορίας (επιταχυνσιογραφήματα) για τις διάφορες περιοχές που εξετάζουμε, υπολογίζουμε με αναλυτικό τρόπο τις μέγιστες αποκρίσεις ελαστικών μονοβάθμιων ταλαντωτών για ένα εύρος ιδιοπεριόδων τους. Η καταγραφή σε ένα διάγραμμα των μέγιστων μετακινήσεων των μονοβαθμίων σε σχέση με την ιδιοπερίοδο, είναι τα λεγόμενα ελαστικά φάσματα απόκρισης.
Τα φάσματα αυτά συνήθως 'εξομαλύνονται' και η περιβάλλουσα τους παίρνει τη μορφή μια τριγραμμικής καμπύλης, όπως συμβαίνει στους κανονισμούς.
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται σχηματικά η διαδικασία παραγωγής φασμάτων καθώς και το τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 13: Απεικόνιση της κατασκευής φάσματος απόκρισης. Η μέγιστη απόκριση κάθε μονοβάθμιου συστήματος αναπαριστάται γραφικά συναρτήσει της ιδιοπεριόδου



Σχήμα 14: Απεικόνιση φάσματος απόκρισης επιτάχυνσης

1.3.4.6 Σύγκριση ικανότητας με απαίτηση - εύρεση σημείου επιτελεστικότητας

Έχοντας την εκτίμηση για την ικανότητα των κτιρίων με τη μορφή της καμπύλης ικανότητας και την σεισμική απαίτηση με την μορφή φάσματος απόκρισης μπορούμε να εκτιμήσουμε την τελική μέγιστη απόκριση των κατασκευών για το δεδομένο σεισμικό γεγονός.

Την διαδικασία αυτή έρχονται να την καλύψουν διάφορες ανελαστικές μέθοδοι, με διαφορετικό τρόπο η καθεμία.

Η βασική ιδέα όλων είναι η αντιστοίχιση της συμπεριφοράς του πολυβαθμίου μοντέλου του κτιρίου με ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο και η μετατροπή της καμπύλης ικανότητας του πολυβαθμίου σε αντίστοιχη του μονοβαθμίου.

Με αυτό τον τρόπο η απαίτηση και η ικανότητα είναι άμεσα συγκρίσιμες.

Τέλος με τη διαδικασία που ακολουθεί η κάθε μέθοδος προκύπτει η τομή της ικανότητας με την απαίτηση και το σημείο αυτό, που καλείται **σημείο επιτελεστικότητας**, εκφράζει την απόκριση του κτιρίου για δεδομένο σεισμό .

Η περιγραφή των σημαντικότερων από αυτές τις μεθόδους ακολουθεί παρακάτω.

1.3.4.6.1 **Μέθοδος DCM** (Displacement Coefficient Method - **FEMA 356**)

Τό 2000 με την FEMA 356 (κεφάλαιο 3)***[4]*** θεμελιώθηκε η στατική ανελαστική μέθοδος εκτίμησης της συμπεριφοράς ενός κτιρίου που υπόκειται σε σεισμική φόρτιση η οποία είναι γνωστή ως μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης displacement coefficient method - DCM.

Η μέθοδος που υπολογίζει το σημείο επιτελεστικότητας σαν εκτίμηση της απόκρισης του κτιρίου περιγράφεται παρακάτω.

Επιλέγεται κόμβος ελέγχου το κέντρο μάζας της οροφής του κτιρίου. Δημιουργείται το πλήρες μοντέλο του κτιρίου. Το μοντέλο του κτιρίου φορτίζεται με μια μονοτονικά αυξανόμενη κατανομή πλευρικού φορτίου, που αντιστοιχεί στις δυνάμεις αδρανείας λόγω σεισμού, και καταγράφεται η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου της οροφής. Δημιουργείται έτσι μια καμπύλη σχέσης δύναμης βάσης σε σχέση με τη μετακίνηση οροφής (καμπύλη pushover).

Η φόρτιση γίνεται και προς τις δύο κύριες διευθύνσεις, περιλαμβάνει το συνδυασμό κατακόρυφων φορτίων (Q_D + 0.25*Q_L) και γίνεται για δύο οριζόντιες κατανομές φόρτισης, μία από κάθε ομάδα από τις παρακάτω:

1η ομάδα

1.1) σε κάθε όροφο-διάφραγμα εφαρμόζεται οριζόντια δύναμη της μορφής

$\mathbf{F_i=C_i*V}$

Όπου $\mathbf{C_i}=\frac{Wi*Hi}{\Sigma Wi*Hi}$

Wi = το βάρος του I ορόφου

Hi = το ύψος του κάθε ορόφου από τη βάση.

Η χρήση αυτής της κατανομής γίνεται αν η συμμετοχή μάζας της θεμελιώδους ιδιομορφής ξεπερνά το 75% της συνολικής μάζας.

1,2) μια κατανομή ανάλογη με το σχήμα της θεμελιώδους ιδιομορφής εφόσον πάλι η συμμετοχή μάζας της θεμελιώδους ιδιομορφής ξεπερνά το 75% της συνολικής μάζας.

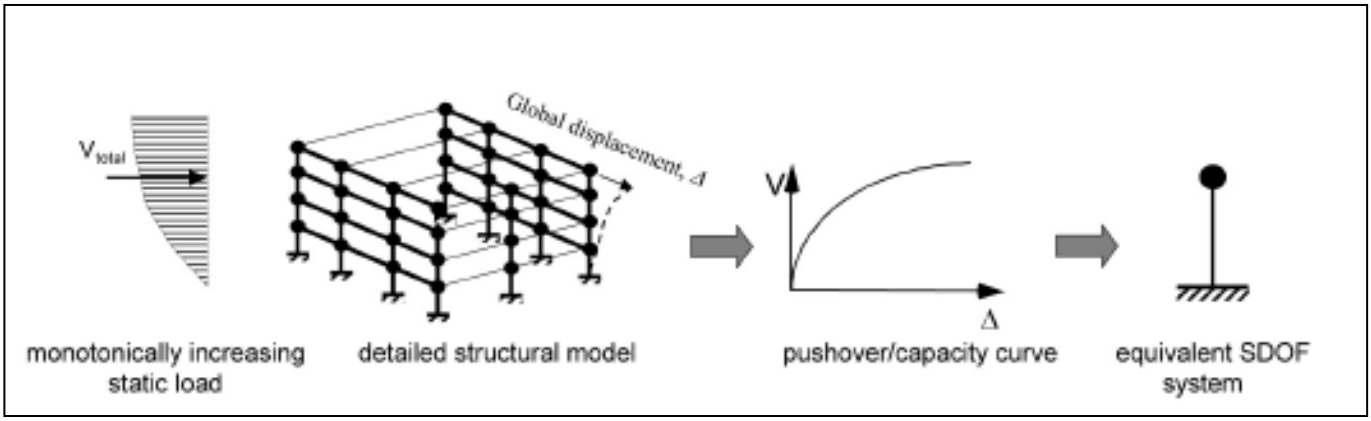
1,3) Μια κατανομή που προκύπτει από το συνδυασμό διαφόρων ιδιομορφών με συνολική συμμετοχή μάζας πάνω από το 90% της συνολικής και εφόσον η θεμελιώδης περίοδος ξεπερνά το 1,0 sec.

2η ομάδα

2.1) μια ομοιόμορφη κατανομή.

2.2) μια προσαρμοζόμενη κατανομή που αλλάζει με την παραμόρφωση της κατασκευής (Fajfar).

Στο τέλος, ως χαρακτηριστική καμπύλη σχέσης δύναμης βάσης με μετακίνηση οροφής (καμπύλη pushover) επιλέγεται η δυσμενέστερη από όλους τους συνδυασμούς.



Σχήμα 15: Καθορισμός καμπύλης ικανότητας (pushover) του κτιρίου [5] (FEMA 440)

Αφού επιλεγεί η χαρακτηριστική καμπύλη pushover ακολουθεί η εξιδανίκευση της σε διγραμμική μορφή.

Η κλίση της πρώτης γραμμής ορίζεται από την αρχή των αξόνων και από το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στο 60% της δύναμης διαρροής.

Η δεύτερη γραμμή ξεκινά από το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετακίνηση και τέμνει την πρώτη ώστε τα εμβαδά που σχηματίζονται πάνω και κάτω να είναι ίσα.

Η τελική διγραμμική προκύπτει με επαναλήψεις (σχήματα 1α,1β).

Η εξιδανικευμένη διγραμμική καμπύλη δύναμης βάσης-μετακίνησης οροφής κτιρίου αντιστοιχίζεται με την καμπύλη ενός ισοδύναμου μονοβαθμίου ταλαντωτή (**SDOF**) με ενεργή θεμελιώδη περίοδο:

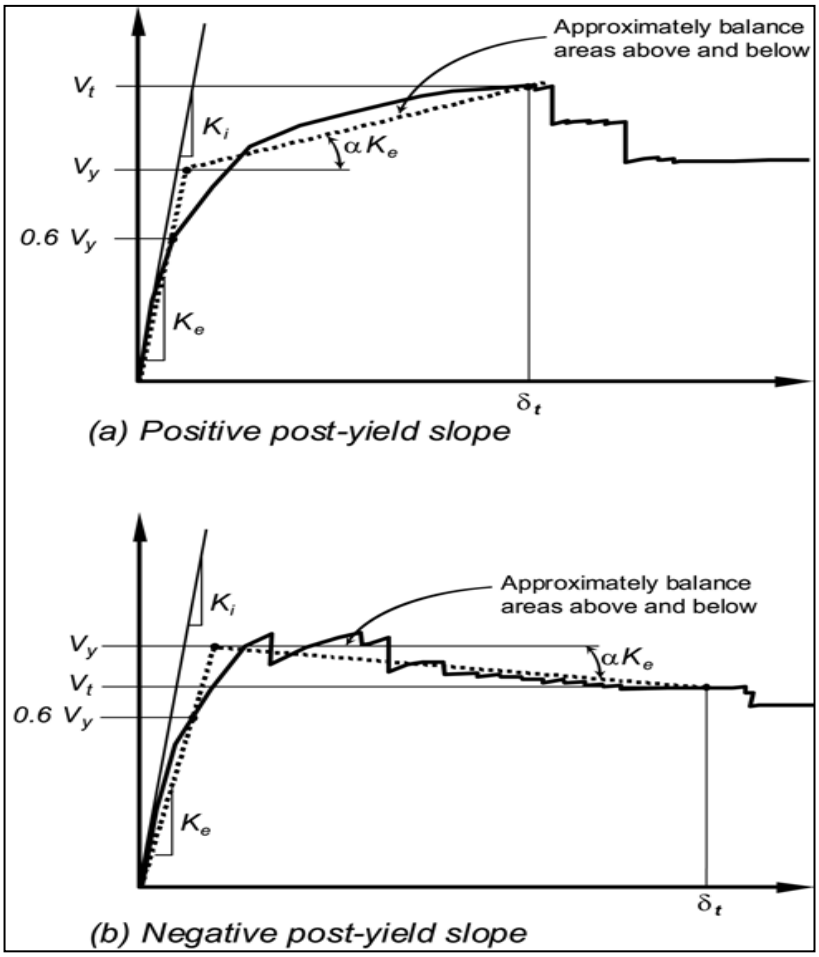
$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{Ki}{Ke}}$$

Όπου

T_i είναι η ελαστική θεμελιώδης περίοδος κτιρίου στη διεύθυνση που εξετάζουμε

K_i είναι η ελαστική ακαμψία της κατασκευής στη διεύθυνση που εξετάζουμε

K_e είναι η ενεργή ακαμψία της κατασκευής στη διεύθυνση που εξετάζουμε και ορίζεται από την κλίση του πρώτου σκέλους της διγραμμικής καμπύλης ικανότητας (σχήματα 1α,1β).



Σχήμα 16: Καθορισμός διγραμμικής καμπύλης ικανότητας και χαρακτηριστικά μεγέθη [4] (FEMA 356)

Γνωρίζοντας τη φασματική επιτάχυνση **Sa** που αντιστοιχεί σε μονοβάθμιο ταλαντωτή με περίοδο ίση με την ενεργό **T_e** του μονοβαθμίου μπορούμε να εκτιμήσουμε τη μετακίνηση της οροφής του κτιρίου που εξετάζουμε λόγω του σεισμού με το παραπάνω φάσμα από τη σχέση

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * C_3 * Sd = C_0 * C_1 * C_2 * C_3 * Sa * \frac{Te^2}{4\pi^2} * g$$

όπου :

C_0 : συντελεστής που συσχετίζει την φασματική μετακίνηση του ισοδυνάμου μονοβαθμίου ταλαντωτή με τη μετακίνηση της οροφής του κτιρίου, οι τιμές του δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Table 3-2 Values for Modification Factor C_0 [1]

	Shear Buildings[2]		Other Buildings
Number of Stories	Triangular Load Pattern (1.1, 1.2, 1.3)	Uniform Load Pattern (2.1)	Any Load Pattern
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

1. Linear interpolation shall be used to calculate intermediate values.
2. Buildings in which, for all stories, interstory drift decreases with increasing height.

Πίνακας 1: Τιμές του συντελεστή Co. [4] (FEMA 356)

C_1 : συντελεστής που συσχετίζει τη φασματική μέγιστη αναμενόμενη ανελαστική μετακίνηση με την υπολογισμένη ελαστική μετακίνηση. Ισχύει :

C_1=1.0 όταν T_e>T_c και

C_1= [1,0+(R-1)* T_c / T_e]/R όταν T_e<T_c

Πάντοτε όμως **C_1=>1.0**

Όπου **T_e** είναι η ενεργός θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου στη διεύθυνση που εξετάζουμε όπως έχει οριστεί παραπάνω, και **T_c** η χαρακτηριστική περίοδος που το φάσμα απόκρισης περνάει από την περιοχή σταθερής φασματικής επιτάχυνσης στην περιοχή σταθερής φασματικής ταχύτητας.

Ο συντελεστής **R** είναι ο λόγος της απαιτούμενης ελαστικής αντοχής προς τον υπολογισμένο συντελεστή διαρροής και δίνεται από την σχέση

$$R = \frac{Sa/g}{Vy/W} * C_m$$

Η **Sa** είναι η φασματική επιτάχυνση για την ενεργό περίοδο **T_e** ,την απόσβεση του κτιρίου και για την διεύθυνση που εξετάζουμε.

Η **V_y** είναι η δύναμη διαρροής όπως προκύπτει από τη διγραμμική καμπύλη.

Το **W** είναι το ενεργό βάρος για τον κατακόρυφο συνδυασμό φόρτισης (Q_D + 0.25*Q_L).

C_2 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επίδραση του πριονωτού σχήματος της υστερητικής απόσβεσης, τη μείωση της ακαμψίας και μείωση της αντοχής στη μέγιστη απόκριση μετακίνησης. Τιμές της **C_2** δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Table 3-3 Values for Modification Factor C_2

Structural Performance Level	$T \leq 0.1$ second[3]		$T \geq T_S$ second[3]	
	Framing Type 1[1]	Framing Type 2[2]	Framing Type 1[1]	Framing Type 2[2]
Immediate Occupancy	1.0	1.0	1.0	1.0
Life Safety	1.3	1.0	1.1	1.0
Collapse Prevention	1.5	1.0	1.2	1.0

1. Structures in which more than 30% of the story shear at any level is resisted by any combination of the following components, elements, or frames: ordinary moment-resisting frames, concentrically-braced frames, frames with partially-restrained connections, tension-only braces, unreinforced masonry walls, shear-critical, piers, and spandrels of reinforced concrete or masonry.
2. All frames not assigned to Framing Type 1.
3. Linear interpolation shall be used for intermediate values of T.

Πίνακας 2: Ττιμές του συντελεστή C_2 . [4] (FEMA 356)

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η τιμή της C_2 άρα και της δ_t εξαρτάται από το επίπεδο επιτελεστικότητας που θα επιλέξουμε από τον πίνακα 2. Η δ_t είναι η μετακίνηση της οροφής.

C_3 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επίδραση των φαινομένων P-Δ στην μέγιστη απόκριση μετακίνησης. Όταν η κλίση της μετελαστικής περιοχής της καμπύλης pushover είναι θετική (προς τα πάνω, όπως σχήμα 1α) τότε C_3=1,00. Όταν η κλίση της μετελαστικής περιοχής της καμπύλης pushover είναι αρνητική (προς τα κάτω, όπως σχήμα 1β) τότε η C_3 δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$C_3 = 1.0 + \frac{|a| * (R-1)^{3/2}}{Te}$$

Το α είναι η κλίση του μετελαστικού κλάδου της διγραμμικής καμπύλης (σχήματα 1α,1β)

C_m : συντελεστής ενεργής μάζας που υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα.

Table 3-1 Values for Effective Mass Factor C_m[1]

No. of Stories	Concrete Moment Frame	Concrete Shear Wall	Concrete Pier-Spandrel	Steel Moment Frame	Steel Concentric Braced Frame	Steel Eccentric Braced Frame	Other
1–2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 or more	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

1. C_m shall be taken as 1.0 if the fundamental period, T, is greater than 1.0 second.

Πίνακας 3: Τιμές του συντελεστή C_m . [4] (FEMA 356)

1.3.4.6.2 Βελτιωμένη Μέθοδος I-DCM (Improved DCM)

Τό 2005 μετά από εκτεταμένη σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων από αναλύσεις χρονοιστορίας σε μονοβάθμιους ταλαντωτές με επιταχυνσιογραφήματα 20 διαφορετικών σεισμών, με τις εκτιμήσεις της μεθόδου DCM βρέθηκαν σημαντικές αποκλίσεις.

Ακολούθως στην **FEMA 440 [5]** προτάθηκαν αλλαγές για τη μέθοδο ώστε να συμφωνεί καλύτερα με τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Έτσι προέκυψε η νέα βελτιωμένη μέθοδος **I-DCM.**

Η λογική της μεθόδου παραμένει ίδια, αλλάζουν μόνο οι τρεις συντελεστές οι C_1, C_2, C_3.

Η μετακίνηση της οροφής του κτιρίου δίνεται από τη σχέση

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * Sa * \frac{Te^2}{4\pi^2} * g$$

όπου

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{Ki}{Ke}}$$

Η νέα C_1 δίνεται από την σχέση

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{a * Te^2}$$

Όπου

α=130 για έδαφος κατηγορίας Β

α=90 για έδαφος κατηγορίας Γ

α=60 για έδαφος κατηγορίας Δ

για T_e **<**0,20 sec λαμβάνεται η τιμή του C_1 για T_e **=** 0,20 sec

για T_e **>**1,00 sec λαμβάνεται η τιμή του C_1 =1,00

Η νέα C_2 δίνεται από τη σχέση

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} * \left(\frac{R-1}{Te}\right)^2$$

για T_e **<**0,20 sec λαμβάνεται η τιμή του C_2 για T_e **=** 0,20 sec

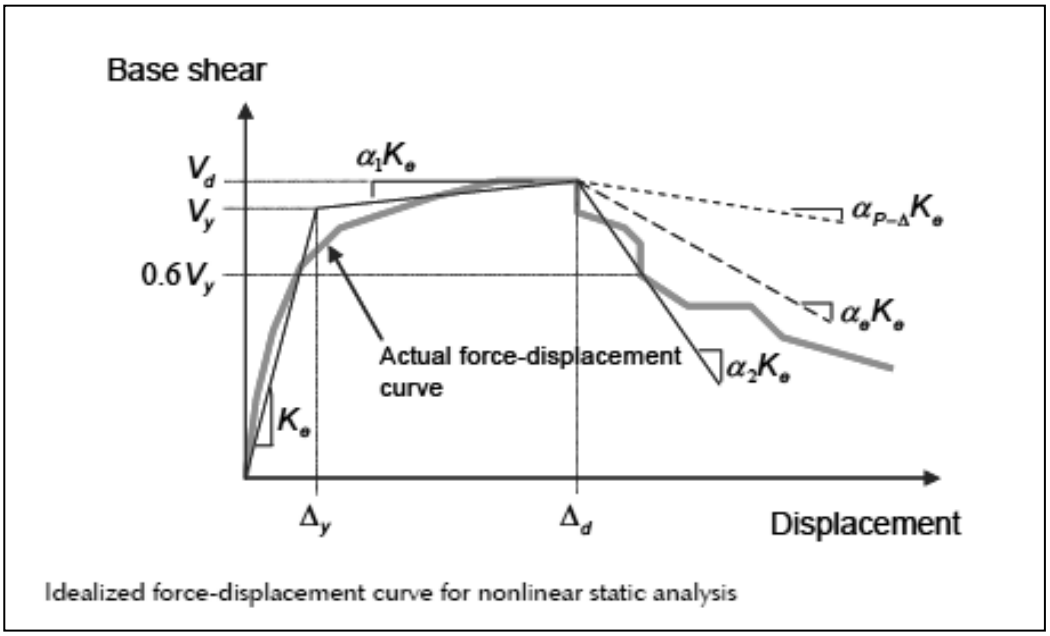
για T_e **>**0.70 sec λαμβάνεται η τιμή του C_2 =1,00

Για την C_3 προτάθηκε η κατάργηση και η αντικατάσταση της από ένα έλεγχο.

Ο έλεγχος γίνεται για την R που πρέπει να είναι μικρότερη από μια τιμή $R_{max.}$

$$R_{max} = \frac{\Delta d}{\Delta y} + \frac{|ae|^{-t}}{4} \quad \text{και} \quad t = 1+0.15\ln T_e$$

Τα διάφορα μεγέθη των σχέσεων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 17: Καθορισμός διγραμμικής καμπύλης και χαρακτηριστικά μεγέθη [5] (FEMA 440)

Αν κατά τον έλεγχο η τιμή της R ξεπεράσει την τιμή $R_{max.}$το κτίριο κινδυνεύει από δυναμική αστάθεια και πρέπει να ελεγχθεί.

Ο έλεγχος της δυναμικής αστάθειας απαιτεί επίλυση με μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικές χρονοιστορίες επιταχύνσεων.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η τιμή της C_2 άρα και της δ_t δεν εξαρτάται πλέον από το επίπεδο επιτελεστικότητας. Η μέθοδος υπολογίζει κατευθείαν την δ_t που είναι η μετακίνηση της οροφής του κτιρίου.

1.3.4.6.3 Μέθοδος CSM (Capacity Spectrum Method)

Προτάθηκε το 1996 από το ATC-40 [6] και είναι γνωστή ως μέθοδος του φάσματος ικανότητας.

Η μέθοδος αντιστοιχίζει το κτίριο με ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή ώστε το φάσμα ικανότητας του μονοβάθμιου που θα προκύψει να είναι άμεσα συγκρίσιμο με το φάσμα απαίτησης του σεισμού που αναφέρεται σε μονοβάθμιους ταλαντωτές.

Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου αντιστοιχίζεται με την ενεργό περίοδο του μονοβαθμίου $T_{eff}=T_{sec}=2\pi\sqrt{\left(\frac{Sd}{Sa}\right)}$ και η καμπύλη pushover του κτιρίου (δύναμη βάσης-μετακίνηση οροφής) αντιστοιχίζεται με το φάσμα ικανότητας του μονοβαθμίου σε όρους Sa,Sd.

Η λογική είναι ότι το φάσμα απαίτησης και το φάσμα ικανότητας δεν είναι ανεξάρτητα.

Η αλληλεξάρτηση τους είναι φανερή αν παρατηρήσουμε το φάσμα ικανότητας σε μορφή ADRS.

Όσο η απαίτηση αυξάνει, τόσο η ακαμψία μειώνεται και επομένως η περίοδος μεγαλώνει. Εφόσον η επιτάχυνση (Sa) είναι εξαρτώμενη από την περίοδο και η απαίτηση αλλάζει (μειώνεται) όσο το κτίριο παραμορφώνεται.

Άλλος ένας παράγοντας που δείχνει την αλληλεξάρτηση τους είναι η ενεργός απόσβεση.

Κτίρια με μεγάλο και σταθερό στους κύκλους φόρτισης βρόγχο υστέρησης αποσβένουν μεγαλύτερη ενέργεια και εφόσον το κτίριο αποθηκεύει λιγότερη ενέργεια η απαίτηση για μετακίνηση μειώνεται.

Στο ATC-40 [6] προτείνονται τρεις ισοδύναμες επαναληπτικές μέθοδοι υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας, εδώ περιγράφουμε την A.

Βήμα 1

Παίρνουμε το δεδομένο ελαστικό φάσμα απαίτησης με απόσβεση 5% Sa(T) και το μετατρέπουμε σε μορφή ADRS (Sa(T) - Sd(T)).

Το Sa(T) είναι γνωστό ενώ το Sd δίνεται από την σχέση Sd(T) **=** $\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$ *Sa(T)*g.

Παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθείας από την αρχή των αξόνων και ενός σημείου της καμπύλης έχει κλίση ω^2 που αντιστοιχεί σε μια τιμή περιόδου **T** του ισοδύναμου μονοβαθμίου.

Βήμα 2

Μετατρέπουμε την καμπύλη pushover του κτιρίου, η οποία έχει προκύψει όπως αναφέρουμε στις προηγούμενες μεθόδους, σε καμπύλη φάσματος ικανότητας του ισοδυνάμου μονοβαθμίου με βάσει τις παρακάτω σχέσεις.

Sa = $\frac{V/M}{\alpha 1}$ **, Sd =** $\frac{\Delta o\rho o\varphi}{\Gamma * \varphi 1}$

Όπου ο συντελεστής συμμετοχής Γ δίνεται από την σχέση

$$\Gamma = \frac{\Sigma mi * \varphi i}{\Sigma mi * \varphi \iota^2}$$

Το ποσοστό συμμετοχής της μάζας της 1ης ιδιομορφής δίνεται από τη σχέση

$\boldsymbol{a1} = \Gamma * \frac{\Sigma mi * \varphi i}{\Sigma mi}$

Ενώ **M** = $\Sigma \mathbf{mi}$ είναι η συνολική μάζα, **V** είναι η τέμνουσα βάσης και $\Delta \mathbf{o}\rho\mathbf{o}\varphi$ είναι η μετακίνηση οροφής του κτιρίου.

Βήμα 3

Επιλέγουμε ένα υποθετικό σημείο επιτελεστικότητας **api, dpi**, συνήθως αρχικά επιλέγεται το τέλος της καμπύλης του φάσματος ικανότητας.

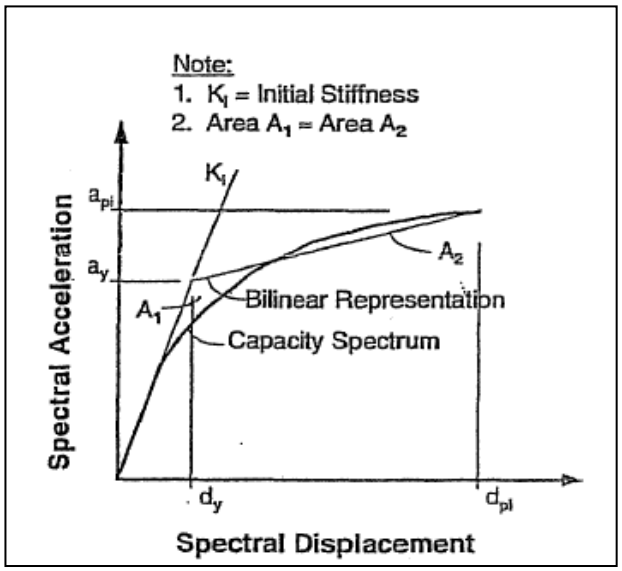
Βήμα 4

Μετατρέπουμε το φάσμα ικανότητας σε διγραμμική μορφή ως εξής:

Η πρώτη γραμμή έχει αρχή την αρχή των αξόνων και κλίση την αρχική ακαμψία Ki.

Η δεύτερη γραμμή ξεκινά από το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στο υποθετικό σημείο επιτελεστικότητας (api, dpi) και τέμνει την πρώτη ώστε τα εμβαδά που σχηματίζονται μεταξύ του δεύτερου σκέλους και της καμπύλης του φάσματος πάνω και κάτω να είναι ίσα.

Η τελική διγραμμική προκύπτει με επαναλήψεις (σχήμα 3).



Σχήμα 18: Καθορισμός διγραμμικής καμπύλης φάσματος ικανότητας. [6] (ATC-40)

Βήμα 5

Υπολογίζονται οι συντελεστές μείωσης του φάσματος απαίτησης και σχεδιάζεται το τροποποιημένο φάσμα απαίτησης. Οι μειωτικοί συντελεστές της επαναληπτικής μεθόδου είναι:

$$RA = 2.12 / (3.21 - 0.68 \ln \beta_{eff}) \quad \text{και} \quad RB = 1.65 / (2.31 - 0.41 \ln \beta_{eff})$$

Η ενεργός απόσβεση β_{eff} δίνεται από τη σχέση $\beta_{eff} = \kappa * \beta_0 + 5$.

Ο συντελεστής τροποποίησης της απόσβεσης **κ** ανάλογα της συμπεριφοράς του κτιρίου (δηλαδή ανάλογα του αναμενόμενου βρόχου υστέρησης που μπορεί να αναπτύξει) δίνεται από τον παρακάτω πίνακα

Table 8-1. Values for Damping Modification Factor, κ

Structural Behavior Type [1]	β_0 (percent)	κ
Type A[2]	≤ 16.25	1.0
	>16.25	$1.13 - \frac{0.51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Type B	≤ 25	0.67
	>25	$0.845 - \frac{0.446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Type C	Any value	0.33

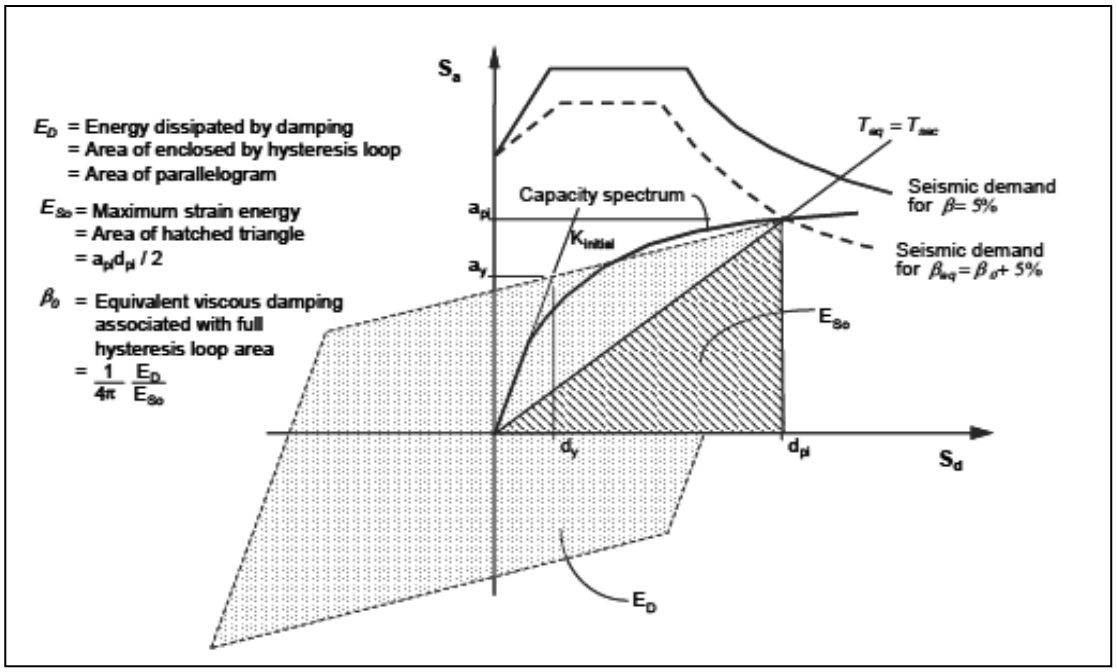
1. See Table 8-4 for structural behavior types.

Table 8-4. Structural Behavior Types

Shaking Duration [1]	Essentially New Building [2]	Average Existing Building [3]	Poor Existing Building [4]
Short	Type A	Type B	Type C
Long	Type B	Type C	Type C

Πίνακας 4: Τιμές του συντελεστή κ. [6] (ATC-40)

`



Σχήμα 19: Καθορισμός συντελεστή απόσβεσης β_0 του ισοδύναμου μονοβαθμίου. [5] (FEMA 440)

Ο συντελεστής απόσβεσης **β_0** του ισοδυνάμου μονοβαθμίου για το επιλεγμένο σημείο σημείο επιτελεστικότητας **api, dpi** αντιστοιχεί στο λόγο του εμβαδού της ενέργειας που καταναλώνεται λόγω απόσβεσης και είναι η περιοχή που περικλείεται από τον βρόχο υστέρησης προς την μέγιστη ενέργεια που αποθηκεύεται υπο μορφή παραμόρφωσης που είναι η περιοχή που περικλείεται από το τρίγωνο με κορυφή το **api, dpi** (Σχήμα 5). Δίνεται δε από τη σχέση

$$\beta_0 = \frac{ED}{4\pi Eso}$$

Βήμα 6

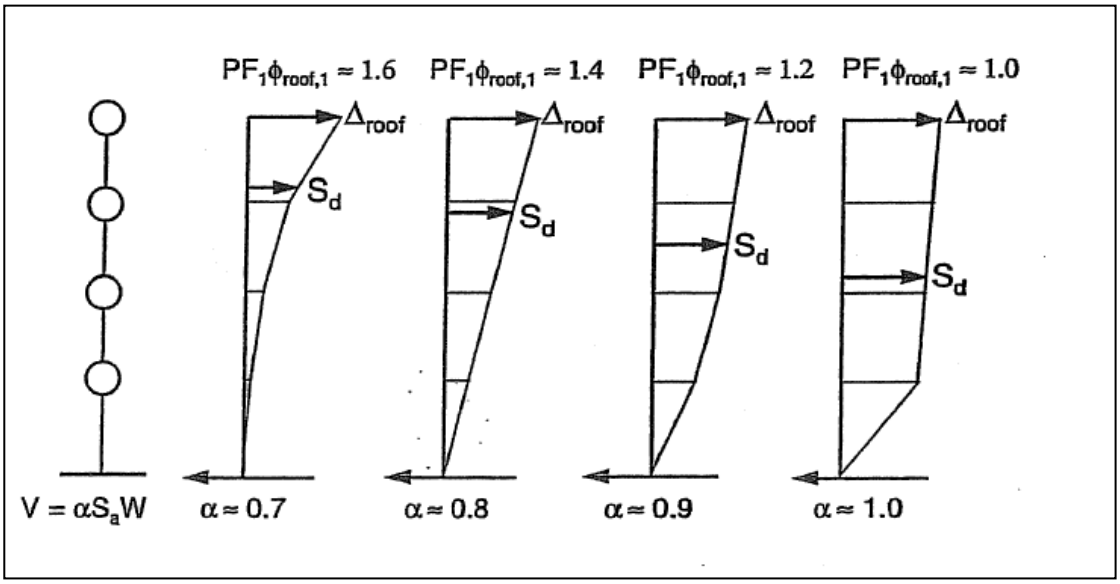
Ελέγχουμε αν υπάρχει τομή του φάσματος ικανότητας και του τροποποιημένου φάσματος απαίτησης. Αν υπάρχει τομή στο σημείο di, ελέγχω αν το di είναι μέσα στο διάστημα [0.95 dpi, 1.05 dpi]. Αν είναι, τότε βρήκαμε το σημείο επιτελεστικότητας με api, dpi.

Βήμα 7

Αν δεν υπάρχει τομή ή το di δεν κυμαίνεται στο διάστημα [0.95 dpi, 1.05 dpi] επιλέγουμε νέο υποθετικό σημείο επιτελεστικότητας και συνεχίζουμε από το βήμα 3. Σαν νέο υποθετικό σημείο επιτελεστικότητας συνήθως επιλέγουμε το προηγούμενο σημείο τομής.

Η μετακίνηση του σημείου επιτελεστικότητας dpi που βρίσκουμε τελικά είναι η μετακίνηση Sd του ισοδύναμου μονοβαθμίου. Για να μετατραπεί σε μετακίνηση οροφής του κτιρίου βάσει των παραπάνω σχέσεων πρέπει **Δοροφ = Sd*Γ*φ1.**

Στο ATC-40 προτείνονται τιμές των **Γ,φ1,α1** για διάφορες μορφές της θεμελιώδους ιδιομορφής των κτιρίων.



Σχήμα 20: Τιμές Γ,φ1,α1 για διάφορες ιδιομορφές. [6] (ATC-40)

Η μέθοδος δίνει καλές εκτιμήσεις όταν κυριαρχεί η πρώτη ιδιομορφή και δεν υπάρχουν στροφικές ιδιομορφές.

1.3.4.6.4 Μέθοδος MADRS (βελτίωση της CSM)

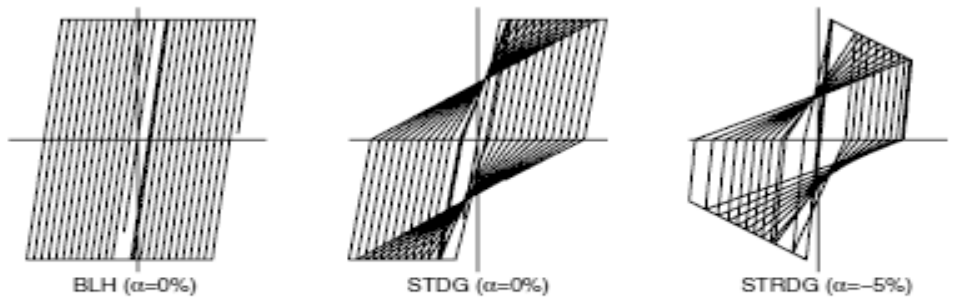
Τό 2005 μετά από εκτεταμένη σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων από αναλύσεις χρονοιστορίας σε μονοβάθμιους ταλαντωτές με επιταχυνσιογραφήματα 20 διαφορετικών σεισμών, με τις εκτιμήσεις της μεθόδου **CSM** βρέθηκαν σημαντικές αποκλίσεις.

Ακολούθως στην **FEMA 440 [5]** προτάθηκαν αλλαγές για τη μέθοδο ώστε να συμφωνεί καλύτερα με τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Η βελτιωμένη μέθοδος ονομάστηκε **MADRS.**

Η λογική της μεθόδου δεν έχει αλλάξει. Το κτίριο εξιδανικεύεται πάλι με τον ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή, έχει όμως αλλάξει ο τρόπος υπολογισμού της ενεργού περιόδου $\mathbf{T_{eff}}$ και του συντελεστή $\boldsymbol{\beta_{eff}}$.

Τα μεγέθη εξαρτώνται τώρα από την απαιτούμενη πλαστιμότητα μ και από μια σειρά συντελεστών που έχουν προκύψει από επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλύσεων χρονοιστορίας σε μονοβάθμιους ταλαντωτές.

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιούνται τρεις καταστατικοί νόμοι-συστήματα σχέσης δυνάμεων-παραμόρφωσης για να εξιδανικεύσουν την μετελαστική συμπεριφορά των κτιρίων, το διγραμμικό σύστημα με υστερητική συμπεριφορά **(BLH),** το σύστημα με μείωση ακαμψίας **(STDG),** το σύστημα με μείωση αντοχής **(STRDG)**. Τα τρία συστήματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 21.



Types of inelastic behavior considered. BLH=Bilinear Hysteretic STDC=Stiffness Degrading, and STRDC=Strength Degrading.

Σχήμα 21: Συστήματα ανελαστικής συμπεριφοράς για την MADRS. [5] (FEMA 440)

Ακολούθως ο **συντελεστής απόσβεσης** $\boldsymbol{\beta_{eff}}$(%) υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

1. όταν όλα τα δομικά στοιχεία του κτιρίου έχουν ίδια μετελαστική συμπεριφορά και αυτή ανήκει σε μία από τις τρεις που ορίστηκαν παραπάνω τότε:

Για **1.0<μ<4.0** $\quad \beta_{eff}=A*(\mu-1)^2 + B*(\mu-1)^3 + \beta_0$

Για **4,0<μ<6,5** $\quad \beta_{eff}=C + D*(\mu-1) + \beta_0$

Για **μ>6,5** $\quad \beta_{eff}=19.0*\left[\frac{F*(\mu-1)-1}{F*(\mu-1)^2}\right]*\left(\frac{Teff}{To}\right)^2 + \beta_0$

Οι συντελεστές ορίζονται στον παρακάτω πίνακα

Table 6-1 Coefficients for use in Equations for Effective Damping

Model	α (%)	A	B	C	D	E	F
Bilinear hysteretic	0	3.2	–0.66	11	0.12	19	0.73
Bilinear hysteretic	2	3.3	–0.64	9.4	1.1	19	0.42
Bilinear hysteretic	5	4.2	–0.83	10	1.6	22	0.40
Bilinear hysteretic	10	5.1	–1.1	12	1.6	24	0.36
Bilinear hysteretic	20	4.6	–0.99	12	1.1	25	0.37
Stiffness degrading	0	5.1	–1.1	12	1.4	20	0.62
Stiffness degrading	2	5.3	–1.2	11	1.6	20	0.51
Stiffness degrading	5	5.6	–1.3	10	1.8	20	0.38
Stiffness degrading	10	5.3	–1.2	9.2	1.9	21	0.37
Stiffness degrading	20	4.6	–1.0	9.6	1.3	23	0.34
Strength degrading	-3[a]	5.3	–1.2	14	0.69	24	0.90
Strength degrading	–5[a]	5.6	–1.3	14	0.61	22	0.90

a. Negative values of post-elastic stiffness should be limited to α_e, as discussed in Section 4.3

Πίνακας 5: Τιμές των συντελεστών για το β_{eff}. [5] (FEMA 440)

2. Όταν έχουμε αμφιβολίες για το αν μετελαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων του κτιρίου ανήκει σε μία από τις τρεις που ορίστηκαν παραπάνω, τότε ισχύουν οι γενικές σχέσεις:

Για **1.0<μ<4.0** $\beta_{eff}=4{,}9*(\mu-1)^2-1{,}1*(\mu-1)^3+\beta_0$

Για **4,0<μ<6,5** $\beta_{eff}=14{,}0+0{,}32*(\mu-1)+\beta_0$

Για **μ>6,5** $\beta_{eff}=19.0*[\frac{0{,}64*(\mu-1)-1}{0{,}64*(\mu-1)^2}]*\left(\frac{Teff}{To}\right)^2+\beta_0$

Η **ενεργός περίοδος T_{eff}** υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

1. Όταν όλα τα δομικά στοιχεία του κτιρίου έχουν ίδια μετελαστική συμπεριφορά και αυτή ανήκει σε μία από τις τρεις που ορίστηκαν παραπάνω τότε:

Για **1.0<μ<4.0** $T_{eff}=[G*(\mu-1)^2+H*(\mu-1)^3+1]*T_0$

Για **4,0<μ<6,5** $T_{eff}=[1+J*(\mu-1)+1]*T_0$

Για **μ>6,5** $T_{eff}=\{K*[\sqrt{\frac{(\mu-1)}{1+L*(\mu-2)}}-1]+1\}*T_0$

Οι συντελεστές ορίζονται στον παρακάτω πίνακα

Table 6-2 Coefficients for use in Equations for Effective Period

Model	α(%)	G	H	I	J	K	L
Bilinear hysteretic	0	0.11	–0.017	0.27	0.090	0.57	0.00
Bilinear hysteretic	2	0.10	–0.014	0.17	0.12	0.67	0.02
Bilinear hysteretic	5	0.11	–0.018	0.09	0.14	0.77	0.05
Bilinear hysteretic	10	0.13	–0.022	0.27	0.10	0.87	0.10
Bilinear hysteretic	20	0.10	–0.015	0.17	0.094	0.98	0.20
Stiffness degrading	0	0.17	–0.032	0.10	0.19	0.85	0.00
Stiffness degrading	2	0.18	–0.034	0.22	0.16	0.88	0.02
Stiffness degrading	5	0.18	–0.037	0.15	0.16	0.92	0.05
Stiffness degrading	10	0.17	–0.034	0.26	0.12	0.97	0.10
Stiffness degrading	20	0.13	–0.027	0.11	0.11	1.0	0.20
Strength degrading	–3[a]	0.18	–0.033	0.17	0.18	0.76	–0.03
Strength degrading	–5[a]	0.20	–0.038	0.25	0.17	0.71	–0.05

a.Negative values of post-elastic stiffness may be limited to α_e, as discussed in Section 4.3

Πίνακας 6: Τιμές των συντελεστών για το $T_{eff.}$ [5] (FEMA 440)

2. Όταν έχουμε αμφιβολίες για το αν μετελαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων του κτιρίου ανήκει σε μία από τις τρεις που ορίστηκαν παραπάνω, τότε ισχύουν οι γενικές σχέσεις:

Για **1.0<μ<4.0** $T_{eff} = \{0.20*(\mu-1)^2 - 0.038*(\mu-1)^3 + 1\}* T_0$

Για **4,0<μ<6,5** $T_{eff} = [0.28 + 0.13*(\mu-1) + 1]* T_0$

Για **μ>6,5** $T_{eff} = \{0.89*[\sqrt{\frac{(\mu-1)}{1+0.05*(\mu-2)}} -1] + 1\}* T_0$

Στις παραπάνω σχέσεις T_0 είναι η αρχική ελαστική θεμελιώδης περίοδος του κτιρίου και β_o είναι ο συντελεστής ισοδύναμης βισκοελαστικής απόσβεσης όπως έχει οριστεί από τον Chopra(1995) σαν $\beta_o = \frac{ED}{4*\pi*Eso}$.

Στην FEMA 440 προτείνονται τρεις ισοδύναμες επαναληπτικές μέθοδοι υπολογισμού του σημείου επιτελέστικότητας, εδώ περιγράφουμε την A (direct iteration).

Βήμα 1

Επιλέγουμε ένα φάσμα που αντιπροσωπεύει το σεισμό που μας ενδιαφέρει ή το φάσμα ενός κανονισμού.

Βήμα 2

Μετατρέπουμε το επιλεγμένο φάσμα σε μορφή ADRS ώστε να έχουμε το αρχικό φάσμα απαίτησης.

Βήμα 3

Μετατρέπουμε την καμπύλη pushover σε φάσμα ικανότητας ισοδύναμου μονοβαθμίου μορφής ADRS, όπως έχουμε περιγράψει στη μέθοδο CSM.

Βήμα 4

Επιλέγουμε στο φάσμα ικανότητας ένα υποθετικό σημείο επιτελεστικότητας (**dpi, api**) που συνήθως αρχικά είναι το τελευταίο σημείο της καμπύλης (μέγιστη μετατόπιση).

Βήμα 5

Μετατρέπουμε το φάσμα απαίτησης σε διγραμμική μορφή με τον τρόπο που περιγράψαμε στην μέθοδο CSM. Κατ' αυτόν τον τρόπο καθορίζονται η αρχική περίοδος $\mathbf{T_0}$, η τιμή της μετακίνησης στη διαρροή **dy** και η τιμή της επιτάχυνσης στη διαρροή **ay**. Τονίζεται ότι τα μεγέθη αυτά $\mathbf{T_0}$**, dy, ay,** εξαρτώνται από τον ορισμό του υποθετικού σημείου επιτελεστικότητας (**dpi, api).**

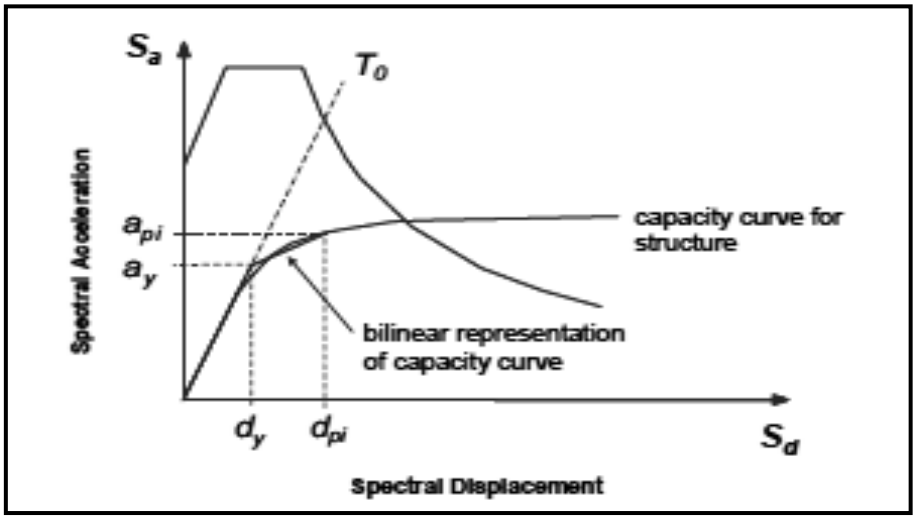
Βήμα 6

Από το διγραμμικό φάσμα ικανότητας υπολογίζεται ο συντελεστής μετελαστικής ακαμψίας **α** , και η απαιτούμενη πλαστιμότητα **μ** ως ακολούθως:

$$a=\frac{\frac{\mathrm{api}-\mathrm{ay}}{\mathrm{dpi}-\mathrm{dy}}}{\frac{\mathrm{ay}}{\mathrm{dy}}} \quad , \quad \mu=\frac{dpi}{dy}$$

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής **α** είναι ο λόγος της κλίσης του δεύτερου σκέλους του διγραμμικού φάσματος προς την κλίση του πρώτου σκέλους.

Επίσης η πλαστιμότητα **μ** είναι αυτή που απαιτείται να έχει το σύστημα ώστε να φθάσει στο υποτιθέμενο σημείο επιτελεστικότητας (**dpi, api).**



Σχήμα 22: Καθορισμός διγραμμικού φάσματος και χαρακτηριστικά μεγέθη της MADRS [5] (FEMA 440)

Βήμα 7

Από τα μεγέθη $\mathbf{T_0}$**, α, μ** και από τις σχέσεις που περιγράψαμε παραπάνω, υπολογίζονται η ενεργή περίοδος $\mathbf{T_{eff}}$ και η ενεργή απόσβεση $\boldsymbol{\beta_{eff}}$.

Βήμα 8

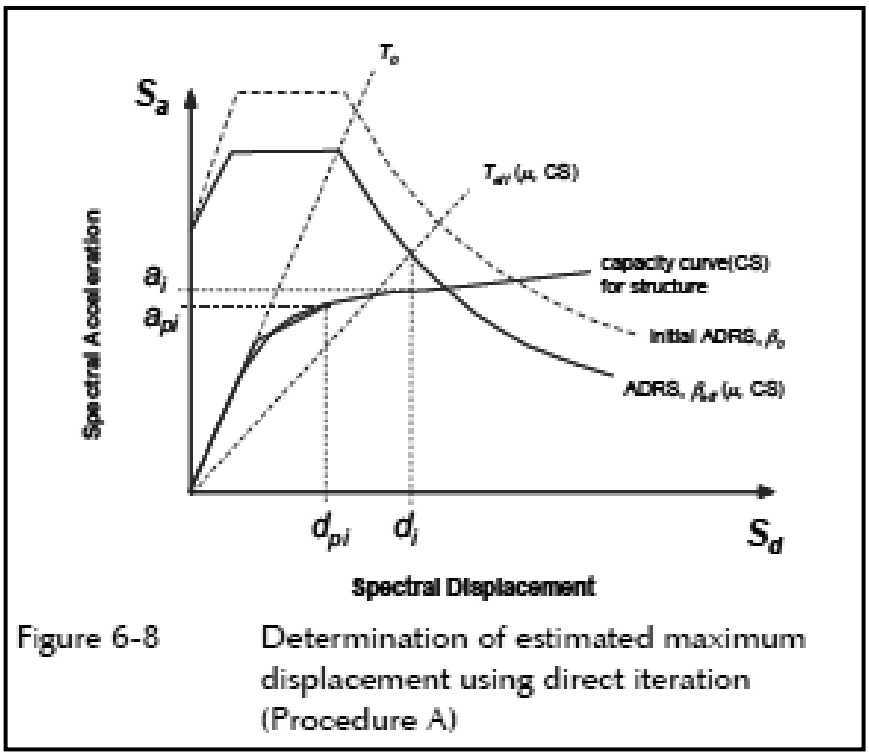
Με την ενεργή απόσβεση β_{eff} υπολογίζουμε νέες μειωμένες τιμές για την επιτάχυνση του φάσματος ικανότητας

$(Sa)_{\beta} = \frac{(Sa)o}{B(\beta eff)}$ όπου $B = \frac{4}{5.6-\ln(\beta eff)}$

Μειώνουμε δηλαδή το αρχικό φάσμα απαίτησης **ADRS** σε ένα $(ADRS)\beta_{eff}$ λαμβάνοντας έτσι υπόψη την επίδραση της απόσβεσης.

Βήμα 9

Από την τομή της ακτινικής T_{eff} με το τροποποιημένο φάσμα απαίτησης $(ADRS)\beta_{eff}$ προκύπτει το σημείο **(αi,di).**



Σχήμα 23: Καθορισμός της εκτιμούμενης μεγίστης μετακίνησης με την διαδικασία Α. [5] (FEMA 440)

Βήμα 10

Ελέγχουμε την απόκλιση του **di** του νέου σημείου τομής από το dpi του αρχικού σημείου.

Αν είναι μεταξύ **0,95dpi<di<1.05dpi** τότε το νέο σημείο **(di,ai)** είναι το σημείο επιτελεστικότητας**.**

Αλλιώς επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το βήμα 4 χρησιμοποιώντας το σημείο (di,ai) σαν νέο υποτιθέμενο σημείο επιτελεστικότητας .

Αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι στη μέθοδο αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη και η επίδραση των εύκαμπτων θεμελίων της κατασκευής. Η FEMA 440 προτείνει μια διαδικασία βάσει της οποίας η

επίδραση της απόσβεσης των εύκαμπτων θεμελίων υπολογίζεται και περιλαμβάνεται στον συντελεστή απόσβεσης β_0.

1.3.4.6.5 Μέθοδος N2 (fajfar 2000)

Σε αυτή τη μέθοδο η ανελαστική συμπεριφορά του κτιρίου προσεγγίζεται από τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης του ισοδύναμου μονοβάθμιου, σταθερής πλαστιμότητας μ, που προκύπτουν από τα ελαστικά φάσματα απόκρισης του ισοδύναμου μονοβάθμιου με την εφαρμογή ενός μειωτικού συντελεστή R_μ.
Είναι γνωστό ότι για ένα ανελαστικό μονοβάθμιο σύστημα με διγραμμική σχέση δύναμης – παραμόρφωσης η ανελαστική φασματική μετατόπιση (Sdin) και η ανελαστική φασματική επιτάχυνση (Sain) δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

Sain=(Sae/Rμ) **και Sdin =$\frac{\mu}{R\mu}$ Sde**

Η μέθοδος ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Από την ανάλυση push-over έχουμε την καμπύλη ικανότητας του τύπου κτιρίου που μας ενδιαφέρει σε όρους τέμνουσας βάσης V-μετακίνησης οροφής D.
Με τις γνωστές σχέσεις, που εφαρμόζονται και σε άλλες μεθόδους, μετατρέπουμε την καμπύλη ικανότητας του κτιρίου σε καμπύλη ικανότητας του ισοδυνάμου μονοβάθμιου σε μορφή ADRS (Sa-Sd).

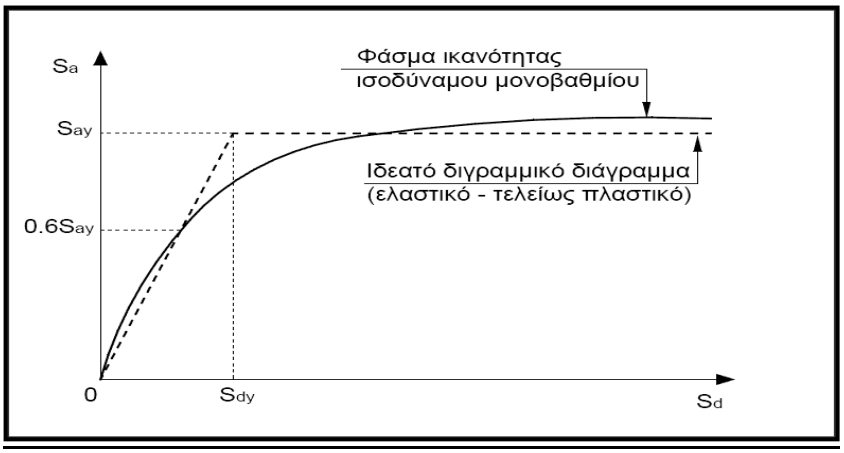
$S_a=\frac{V}{\Gamma * m}$ και $Sd=\frac{D}{\Gamma}$

όπου **Γ** είναι ο συντελεστής συμμετοχής και **m** είναι η μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή όπως προκύπτουν από τις σχέσεις

$\Gamma = \frac{\{\Phi\}\tau * [M] * [I]}{\{\Phi\}\tau * [M] * [\Phi]}$ **και** $m = \{\Phi\}^T[M][I] = \Sigma m_i * \Phi_i$

όπου **[M]** είναι το μητρώο μάζας του πολυβάθμιου συστήματος, **{Φ}** είναι η ιδιομορφή που αντιστοιχεί στην κατανομή της φόρτισης κανονικοποιημένη ώστε το πρώτο της στοιχείο να είναι μονάδα και **[I]** είναι μοναδιαίο μητρώο όπως προκύπτουν από την ελαστική δυναμική ανάλυση του πολυβάθμιου.

2. Μετατρέπουμε την καμπύλη ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου σε διγραμμική, ώστε η αρχική κεκλιμένη γραμμή να περνά από την αρχή των αξόνων και από το σημείο 0.60Say, το δε οριζόντιο τμήμα να κόβει την καμπύλη ώστε τα δύο αποκοπτόμενα εμβαδά να είναι ίσα.



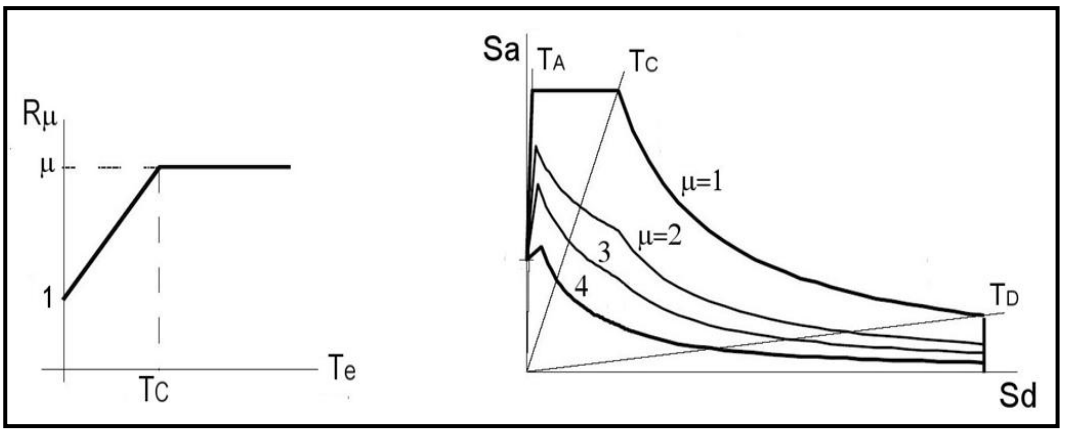
Σχήμα 24: Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας

Το σημείο τομής των δύο γραμμών είναι το σημείο διαρροής (Sdy, Say).
Η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου προκύπτει από τη σχέση

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{Sdy}{Say}}$$

Μέχρι εδώ έχουμε το φάσμα ικανότητας του μονοβάθμιου και την ιδιοπερίοδο του T.

3. Βρίσκουμε το **φάσμα απαίτησης**.
Από το δεδομένο, για το συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο, ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης (Sa,T) κατασκευάζουμε το ελαστικό φάσμα απαίτησης (Sa, Sd) σε μορφή ADRS.



Σχήμα 25: (α) Σχέση Rμ-T (β) Κατασκευή φάσματος απαίτησης (Development of ELER-Methodology: NERIES[12])

4. Για την τιμή της ιδιοπεριόδου T του μονοβάθμιου από το ελαστικό φάσμα απαίτησης βρίσκουμε τις ελαστικές Sae, Sde.
Οι ανελαστικές τιμές των αποκρίσεων που μας ενδιαφέρουν προκύπτουν από τις αντίστοιχες ελαστικές βάσει των σχέσεων

$$Sain = \frac{Sae}{R\mu}\ ,\quad Sdin = \frac{\mu}{R\mu}\,Sde$$

Όπου **μ** είναι η πλαστιμότητα και το **Rμ** δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

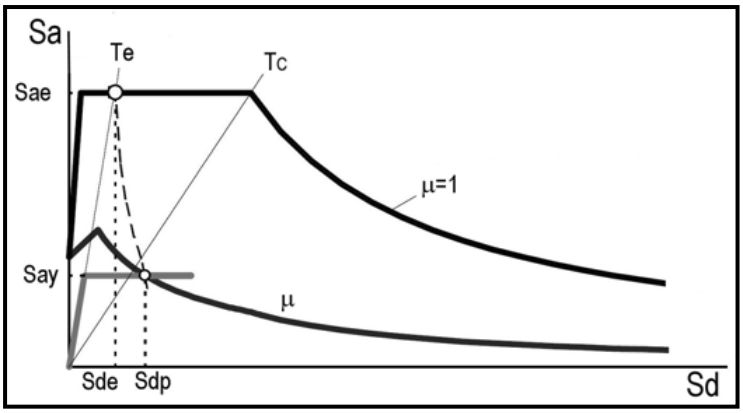
Rμ=(μ-1) $\frac{T}{Tc}$ **+ 1 για T<Tc**

Rμ=μ για T>Tc

5. Υπολογισμός του σημείου επιτελεστικότητας S_{dp}

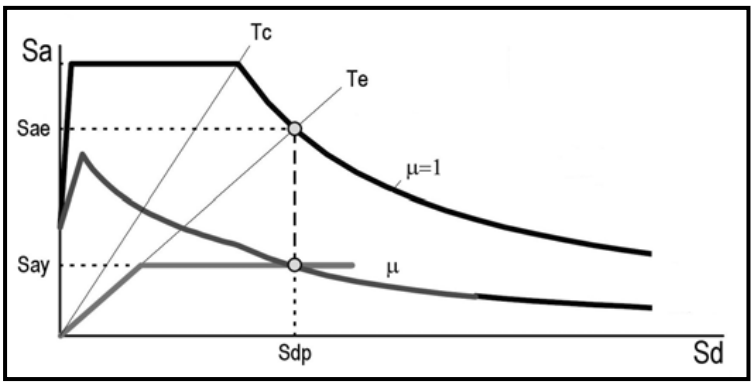
Από τις παραπάνω σχέσεις το **σημείο επιτελεστικότητας** προκύπτει ανάλογα των **T**, **Sae** από τις παρακάτω σχέσεις.

A) για T<Tc και Sae>Say τότε S_{dp}= $\frac{\mu}{R\mu}$ **Sde =**$\frac{Sde}{R\mu}$**(1+(** $R\mu$ **-1)** $\frac{T}{Tc}$**)**



Σχήμα 26: Σχηματικός υπολογισμός του S_{dp} για T<Tc (Development of ELER-Methodology: NERIES[12])

B) για T>Tc και Sae>Say τότε S_{dp}= Sde και Rμ=μ



Σχήμα 27: Σχηματικός υπολογισμός του S_{dp} για T>Tc (Development of ELER-Methodology: NERIES[11])

Γ) για Sae<Say και για κάθε T τότε S_{dp}= Sde.

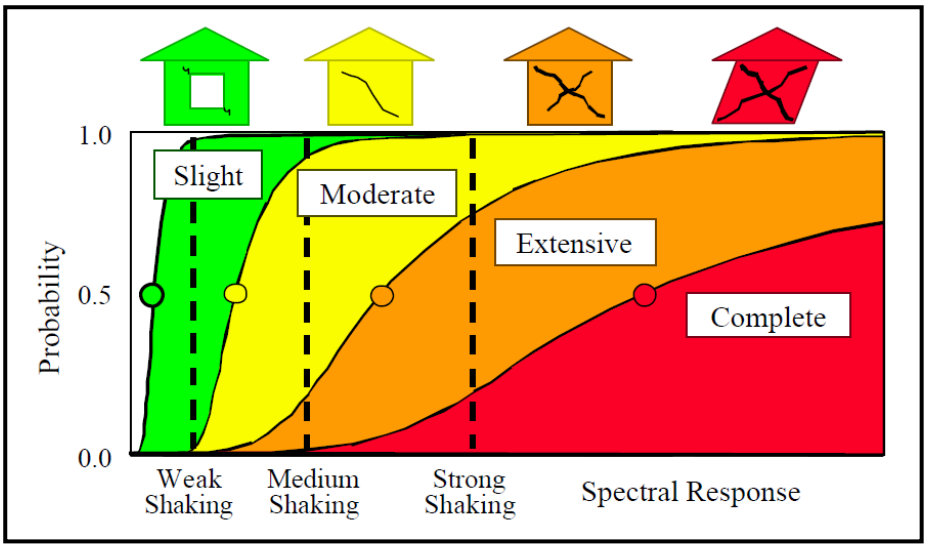
1.3.4.7 Δημιουργία καμπυλών θραυστότητας – εκτίμηση επιπέδου βλάβης

Έχοντας καθορίσει τα όρια των επιπέδων βλάβης με βάση κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος (όπως η φασματική μετακίνηση $\mathbf{S_d}$) δημιουργούμε τις καμπύλες θραυστότητας, μία για κάθε όριο βλάβης.

Οι καμπύλες θραυστότητας θεωρείται ότι ακολουθούν την αθροιστική λογαριθμοκανονική συνάρτηση πιθανότητας και εκφράζουν την πιθανότητα η κατασκευή που έχει αναπτύξει μετακίνηση $\mathbf{S_d}$ να φθάσει ή να ξεπεράσει ένα επίπεδο βλάβης $\mathbf{d_s}$, όπως ορίζει η ακόλουθη σχέση.

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

Όπου $\mathbf{S_{d,ds}}$ είναι η μέση τιμή της φασματικής μετακίνησης $\mathbf{S_d}$ για την οποία θεωρείται ότι το κτίριο φθάνει στο όριο βλάβης $\mathbf{d_s}$, $\boldsymbol{\beta_{ds}}$ είναι η τυπική απόκλιση του λογάριθμου της φασματικής μετακίνησης για το επίπεδο βλάβης $\mathbf{d_s}$ και $\mathbf{\Phi}$ είναι η κανονική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας.



Σχήμα 28: Παράδειγμα καμπυλών θραυστότητας. [10] HAZUS-MH-MR1. FEMA 2003

Γνωρίζοντας τη φασματική μετακίνηση $\mathbf{S_d}$ του σημείου επιτελεστικότητας μπορεί να εκτιμηθεί η πιθανότητα το κτίριο να φθάσει ή να ξεπεράσει κάποιο από τα καθορισμένα επίπεδα βλάβης για τη σεισμική απαίτηση που δημιούργησε τη μετακίνηση $\mathbf{S_d}$. Γνωρίζοντας πλέον το επίπεδο βλάβης μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες (κόστος επισκευής ή αντικατάστασης, απώλειες ζωής, κλπ) βάσει σχέσεων που έχουν προκύψει με μεθόδους της στατιστικής και συνδέουν τις βλάβες με τις απώλειες.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[1] Existing Empirical Fragility and Vulnerability relationships; Compendium and Guide for Selection. T. Rossetto, I. Ioannou, D.N. Grant. GEM 2015.

[2] Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment- Low/Mid-Rise. D'Ayala D., A. Meslem, D. Vamvatsikos, K. Porter and T. Rossetto. GEM 2015.

[3] Global Vulnerability Estimation Methods for the Global Earthquake Model. K.A. Porter et al. 15 WCEE Lisboa 2012.

[4] Federal Emergency Agency (FEMA) 2000. 'Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings'. FEMA 356

[5] Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (2005) - FEMA 440

[6] Applied Technology Council (ATC) 1996. 'Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings', ATC-40.

[7] Fundamentals of Earthquake Engineering. Amr S. Elnashai – Luigi Di Sarno. 2008

[8] Introduction to Seismology . Peter M. Shearer 2009

[9] Geotechnical Earthquake Engineering Steven L. Krammer.

[10] Multi-hazard Loss Estimation Methodology. HAZUS-MH-MR1. FEMA 2003.

[11] GEM1 seismic risk report 2010. GEM Foundation Pavia Italy
(H. Crowley, M. Colombi, J. Crempien, E. Erduran, M. Lopez, H. Liu, M. Mayfield, M. Milanesi)

[12] Report: Development of ELER-Methodology: Vulnerability Relationships. NERIES (NEtwork of Research Infrastructures for European Seismology).

[13] A.K. Chopra , R.K. Goel. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 31.

[14] Displacement Based Adaptive Pushover. Stelios Antoniou, Rui Pinho. COMDYN 2009

Κεφάλαιο 2

ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

2.1. Σκοπός

2.2. Υπάρχοντα λογισμικά

2.3. Δομή λογισμικών

2.3.1. Εκτίμηση Σεισμικού κινδύνου

2.3.2. Απογραφή και ταξινόμηση των προς διερεύνηση κτιρίων και εγκαταστάσεων.

2.3.3. Τρωτότητα

2.3.4 Τελική εκτίμηση επικινδυνότητας - απωλειών

2.4. Περιγραφή λογισμικών

2.4.1 HAZUS

2.4.2 SELENA

2.4.3 ELER

2.4.4 Maeviz

2.4.5 EQRM

2.4.6 HAZ-TAIWAN

2.4.7 OpenRisk

2.4.8 CAPRA

2.4.9 DBELA

2.4.10 OpenQuake

2.5. Σχόλια - Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

2.1. Σκοπός

Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο την αναλυτική μέθοδο εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας.

Η μέθοδος απαιτεί καταγραφή της κατανομής των κτιρίων και του πλυθησμού στην περιοχή ενδιαφέροντος, ταξινόμηση των κτιρίων σε κατηγορίες, καμπύλες ικανότητας και θραυστότητας για κάθε τύπο κτιρίων, εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής, δεδομένα για εκτίμηση των απωλειών βάσει των βλαβών που θα προκύψουν, κλπ.

Η εκτίμηση λοιπόν της σεισμικής επικινδυνότητας με αναλυτικές μεθόδους απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων και υπολογισμών προκειμένου να μας δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επομένως κρίνεται απαραίτητη η χρήση λογισμικών που να μπορούν να διαχειριστούν αυτό τον όγκο πληροφοριών και να εκτελέσουν τους υπολογισμούς σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Έτσι επιχειρήθηκε μέσα από τη διεθνή βιβλιογραφία και τα εγχειρίδια των λογισμικών να γίνει μια επισκόπηση αυτών των λογισμικών, να καταγραφούν οι επιμέρους μέθοδοι που χρησιμοποιούν και οι δυνατοτητές τους, και τέλος να γίνει μια σύγκριση και αξιολόγηση τους.

Οι σημαντικές παράμετροι που ενδιαφέρουν και θα αναδειχθούν είναι κυρίως η δυνατότητα ελεύθερης πρόσβασης και ανοικτού πηγαίου κώδικα, ώστε να είναι δυνατή η βαθύτερη κατανόηση αλλά και η προσθήκη ή τροποποίηση τμημάτων του λογισμικού, και το εύρος παραμετροποίησης που είναι ανάλογο της προσαρμοστικότητας του λογισμικού σε διάφορες περιοχές και σε ποικιλία βάσης δεδομένων.

Η σύγκριση των λογισμικών επομένως θα γίνει από τη σκοπιά του πόσο ευέλικτα είναι σε παραμέτρους και επιμέρους μεθόδους, πόσο δεκτικά είναι για διάφορες βάσεις δεδομένων που αφορούν γεωγραφικές περιοχές, ταξινόμηση κτιρίων, καμπύλες ικανότητας κτιρίων, κλπ, αλλά θα τονιστεί και τυχόν δυνατότητα επέμβασης στον πηγαίο κώδικα τους.

Οι κυριότερες παράμετροι που θα εξεταστούν είναι:

a) Οι υπάρχουσες ταξινόμησεις των κτιρίων, τόσο σε εύρος υλικού (πχ σκυρόδεμα, τοιχοποιία) όσο σε εύρος γεωμετρίας (πχ ύψος, κανονικότητα) και δομικού συστήματος (πχ πλαίσιο, τοίχωμα) καθώς και η δυνατότητα προσθήκης νέων τύπων κτιρίων.

b) Η ποικιλία σχέσειων απόσβεσης και η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του ρήγματος αλλά και η δυνατότητα προσθήκης νέων.

c) Η ποικιλία περιγραφής της απαίτησης (πχ φασματα Sa) αλλά και σεισμικών κανονισμών.

d) Η ποικιλία καμπυλών ικανότητας που περιέχουν στη βάση δεδομένων τους καθώς και η δυνατότητα προσθήκης νέων.

c) Η ποικιλία των μεθόδων υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας (πχ DCM , CSM).

d) Η ποικιλία στατιστικών καμπυλών για τον υπολογισμό καμπυλών θραυστότητας

f) Οι δυνατότητες ορισμού επιπέδων βλάβης.

g) Τα χαρακτηριστικά περιγραφής (γεωμετρικά, εδαφικά, σεισμικά) της προς εξέταση περιοχής

h) Η δυνατότητα εξέτασης πολλών σεναρίων ή συνδυασμού σεναρίων.

2.2. Υπάρχοντα λογισμικά

Από τη διεθνή βιβλιογραφία συγκεντρώθηκε μια ομάδα λογισμικών που φαίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Τα υπάρχοντα λογισμικά διακρίνονται σε :

-ανοικτού κώδικα που ο ‘’πηγαίος κώδικας’’ είναι ανοικτός και ελεύθερα προσβάσιμος από το χρήστη,

-τα λογισμικά με ελεύθερη στο χρήστη μόνο της εκτελέσιμης μορφή τους,

-τα λογισμικά χωρίς ελεύθερη πρόσβαση, και

-τα εμπορικά λογισμικά που απαιτούν άδεια χρήσης.

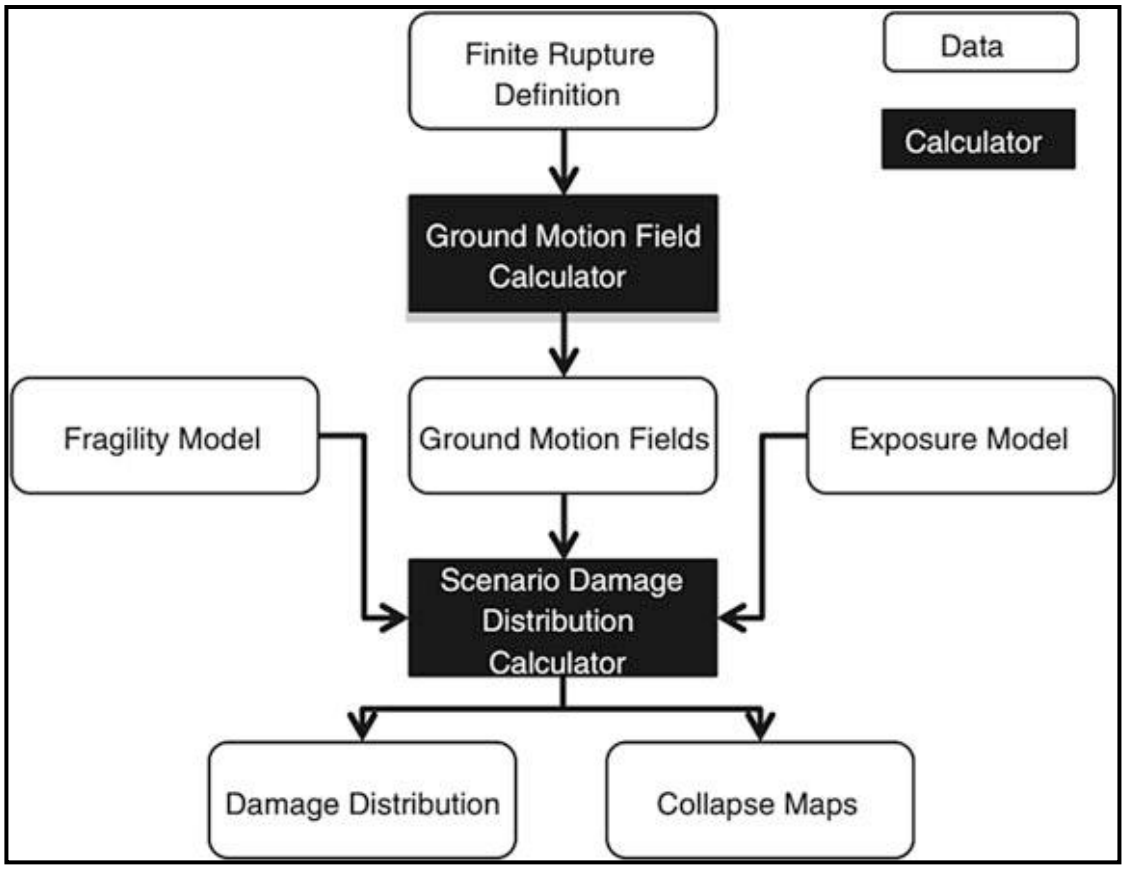
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ**	**ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟΤΗΤΑ**
1. **HAZUS**	FEMA	ΟΧΙ
2. **SELENA**	NORSAR	ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ
3. **ELER**	KOERI	ΕΚΤΕΛΕΣΙΜΗ ΜΟΡΦΗ
4. **EQRM**	Geosience Australia	ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ
5. QLARM	WARMERR	ΟΧΙ
6. CEDIM	Sergey Tyagunov	ΟΧΙ
7. CAPRA	World bank	ΟΧΙ
8. RISKSCAPE	GNS sience	ΟΧΙ
9. LNECLOSS	LNEC	ΟΧΙ
10. **MAEviz**	MAE center	ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ
11. OpenRisk	SPA Risk LLc	ΟΧΙ
12. DBELA	Rose School/EUCENTRE	ΟΧΙ
13. HAZ-TAIWAN		ΟΧΙ
14. **OpenQuake**	GEM	ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Πίνακας 1: Λογισμικά υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας

2.3. Δομή Λογισμικών

Η βασική δομή την οποία ακολουθούν τα λογισμικά εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Τα τέσσερα βασικά στάδια είναι η εισαγωγή δεδομένων της θέσης του ρήγματος, ο υπολογισμός της διέγερσης που προκαλεί η πηγή στις διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος, η εκτίμηση της τρωτότητας των κτιρίων της κάθε περιοχής με κάποια μέθοδο, και τέλος η εκτίμηση της κατανομής βλαβών.



Σχήμα 1: Διαδικασία υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας

Τα τέσσερα αυτά στάδια αναλυτικότερα περιγράφονται ακολούθως.

2.3.1. Εκτίμηση Σεισμικού κινδύνου

Τα λογισμικά χρησιμοποιούν κυρίως δύο μεθόδους εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου:

Α) Αιτιοκρατική (deterministic)

Περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο ή συμβάν.

Β) Πιθανοκρατική (propabilistic)

Εδώ γίνεται συνδυασμός σεναρίων για τον καθορισμό βλαβών σε μια δεδομένη περιοχή.

Χρειάζονται γενικά τα εξής χαρακτηριστικά εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου ανάλογα και με τη μέθοδο εκτίμησης που θα χρησιμοποιηθεί:

1. Θέση και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρήγματος
2. Κατάλογος σεισμών
3. Σχέσεις επαναφοράς (συναρτήσει μεγέθους) που εκφράζουν την πιθανότητα υπέρβασης ενός μεγέθους
4. Σχέσεις απόσβεσης που μας δίνουν πως διαδίδεται το σεισμικό συμβάν στις διάφορες περιοχές (πχ σε τιμές PGA,PGV, κλπ)

Γνωρίζοντας το μέγεθος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τη θέση του ρήγματος και την καταγραφή της χρονοιστορίας υπολογίζεται η εδαφική κίνηση σε κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος.

Ενδιαφέρον εδώ έχει η ποικιλία σχέσεων απόσβεσης που προσφέρει το κάθε λογισμικό αλλά και η δυνατότητα προσθήκης επιπλέον τέτοιων σχέσεων.

2.3.2. Απογραφή και ταξινόμηση των προς διερεύνηση κτιρίων και εγκαταστάσεων.

Τα κτίρια ταξινομούνται σε διακριτούς τύπους και κατανέμονται ανά γεωγραφική περιοχή.

Η ταξινόμηση γίνεται με κριτήρια το υλικό δόμησης, το δομικό σύστημα, το ύψος, το έτος κατασκευής, το κανονισμό που εφαρμόστηκε, κλπ. Για να υπολογίσουμε τις απώλειες σε ζωές ή τραυματισμούς, πρέπει να εισάγουμε και την κατανομή του πληθυσμού ανά κτίριο. Η βάση δεδομένων συνήθως δίνεται σε πλατφόρμα **GIS** για την καλύτερη εποπτικότητα των δεδομένων και των αποτελεσμάτων.

Η λεπτομέρεια αυτής της βάσης δεδομένων είναι πολύ σημαντική για την ακρίβεια των περεταίρω υπολογισμών, απαιτεί δε σημαντικό χρόνο και κόστος για να δημιουργηθεί ώστε να καλύπτει μια ολόκληρη χώρα ή μια ευρύτερη περιοχή.

Μια τέτοια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων που αφορά όμως μόνο τις ΗΠΑ, είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό του προγράμματος **HAZUS**. Προσπάθειες γίνονται για να δημιουργηθούν και άλλες βάσεις δεδομένων σε άλλα μέρη του πλανήτη, όπως στην περιοχή Ευρώπης – Μεσογείου, με τα πρόγραμματα **NERIES, GEM,** κλπ.

Σημαντικό για κάθε λογισμικό είναι η ποικιλία ταξινομήσεων απο τις τυποποιημένες (πχ κατά HAZUS, κατά EMS-96) που έχουν στη βάση δεδομένων τους και η δυνατότητα προσθήκης νέων.

2.3.3. Τρωτότητα

Για τον υπολογισμό της τρωτότητας τα λογισμικά παρέχουν βάσεις δεδομένων με τις καμπύλες ικανότητας των διαφόρων τύπων κτιρίων της κάθε ταξινόμησης που υποστηρίζουν, τις αντίστοιχες καμπύλες θραυστότητας και δεδομένα για μετατροπή των βλαβών σε απώλειες.

Η συνήθης πρακτική είναι η υποστήριξη της ταξινόμησης κτιρίων κατά HAZUS που συνοδεύεται από τις αντίστοιχες καμπύλες ικανότητας προερχόμενες απο πειράματα, καμπύλες θραυστότητας και δεδομένα συσχέτισης βλαβών με απώλειες προερχόμενα απο στατιστική επεξερξεργασία πειραμάτων και αποτελεσμάτων.

Παρότι μια τέτοια βάση δεδομένων είναι δύσκολο να δημιουργηθεί είναι σημαντικό για την προσαρμοστικότητα ενός λογισμικού να έχει τη δυνατότητα προσθήκης επιπλέον τέτοιων βάσεων δεδομένων.

Με δεδομένη όμως τη σπανιότητα πλήρους και λεπτομερής αποτύπωσης κτιρίων και εγκαταστάσεων σε ευρύτερες περιοχές καθώς και της πίεσης χρόνου, έχουν αναπτυχτεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της τρωτότητας.

Αυτές συνήθως βασίζονται στη συσχέτιση κάποιου χαρακτηριστικού του σεισμικού γεγονότος (πχ, ένταση-μέγεθος-PGA) με το επίπεδο των βλαβών. Παρότι έχουν μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων, η ευκολία χρήσης τους σε μεγάλες περιοχές ενδιαφέροντος τις κάνει χρήσιμες για την προσεγγιστική εκτίμηση της επικινδυνότητας.

Έτσι ενδιαφέρον χαρακτηριστικό ενός λογισμικού είναι η ύπαρξη δυνατότητας εκτίμησης της τρωτότητας και με άλλες μεθόδους λιγότερο ακριβείς αλλά και με μικρότερη απαίτηση στην λεπτομέρεια της καταγραφής.

2.3.4 Τελική εκτίμηση επικινδυνότητας – απωλειών

Γνωρίζοντας τη σεισμική απαίτηση και την τρωτότητα των κατασκευών, δηλαδή την προδιάθεση τους να παρουσιάσουν βλάβες, υπολογίζουμε το τελικό επίπεδο βλαβών.

Από το επίπεδο βλαβών με σχέσεις που προέρχονται απο στατιστική επεξεργασία καταγραφών σεισμικής έντασης και των αποτελεσμάτων της σε διάφορες περιοχές, εκτιμούμε το κόστος, τις απώλειες ζωής, τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, κλπ.

Οι σχέσεις και τα δεδομένα για μετατροπή βλαβών σε απώλειες περιέχονται στη βάση δεδομένων των διαφόρων λογισμικών.

Εφόσον όμως αυτές οι σχέσεις είναι εμπειρικές και προέρχονται απο στατιστική συσχέτιση είναι φυσικό να είναι προσαρμοσμένες στα δεδομένα των περιοχών απο τις οποίες προέκυψαν.

Έτσι και εδώ είναι σημαντική η δυνατότητα προσθήκης νέων τέτοιων σχέσεων και δεδομένων για την προσαρμοστικότητα του λογισμικού.

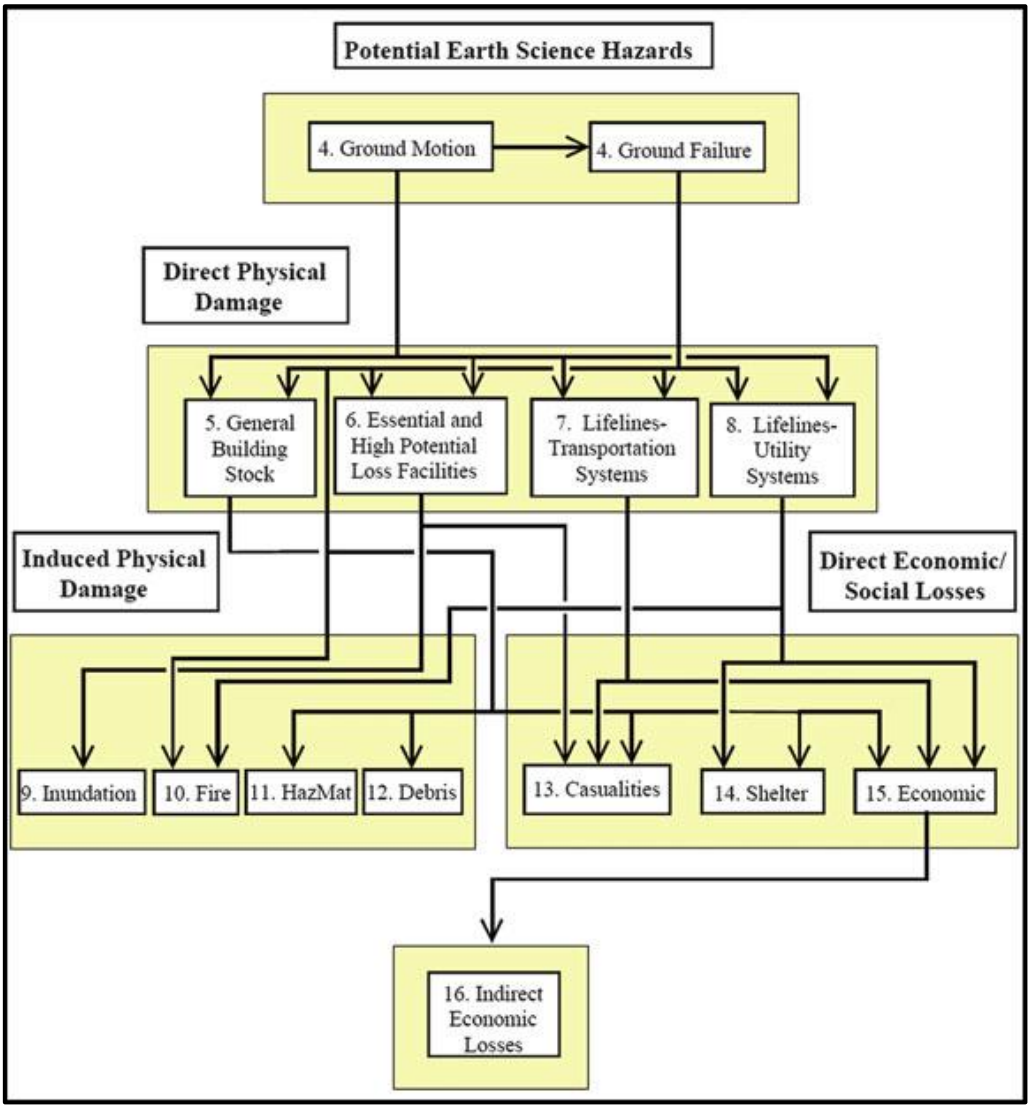
2.4. Περιγραφή λογισμικών

2.4.1 HAZUS

Το HAZUS (Hazards-U.S.) είναι ένα εργαλείο εκτίμησης της επικινδυνότητας από πολλαπλές αιτίες, μεταξύ των οποίων και ο σεισμός, που έχει αρχίσει να αναπτύσσεται στις ΗΠΑ από τη δεκαετία του ‘90 υπό την εποπτεία και τη χρηματοδότηση της FEMA (Federal Emergency Management Agency).

Αρχικά αναπτύχθηκε για κίνδυνο από σεισμό και αργότερα προστέθηκαν και άλλοι κίνδυνοι (πχ, πλημμύρες, καταιγίδες, κλπ.).

Αποτελεί ένα σημείο αναφοράς καθώς πολλά από τα άλλα λογισμικά βασίζονται σε αυτό.



Σχήμα 2: Λογικό διάγραμμα ροής του HAZUS (Hazus manual [3])

Έχει αναπτυχθεί σε γλώσσες προγραμματισμού C++ και Visual Basic για τον κυρίως κώδικα, και σε Microsoft SQL για τις βάσεις δεδομένων.

Επίσης λειτουργεί σε πλατφόρμα GIS (πχ, ArcGis, κ.α.) για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Το HAZUS είναι ένα λογισμικό κλειστού κώδικα αλλά οι αλγόριθμοι και η μεθοδολογία του είναι προσπελάσιμοι τόσο από τα εγχειρίδια του (Technical and Users Manual) όσο και από διάφορα λογισμικά ανοικτού κώδικα που βασίζονται σε αυτό (πχ, EQRM, SELENA, MAEviz, HAZ-Taiwan).

Το γεγονός ότι έχει αναπτυχθεί για τα αμερικανικά δεδομένα (τυποποίηση κτιρίων, γεωγραφικά δεδομένα, σενάρια καταστροφών) και ότι είναι λογισμικό κλειστού κώδικα, το καθιστά δύσκολα προσαρμόσιμο σε άλλες περιοχές.

Η βασική του δομή λειτουργεί ως εξής:

1. Επιλογή περιοχής μελέτης

Έχει ενσωματωμένη έτοιμη βάση δεδομένων που αφορά στα γεωγραφικά και εδαφικά χαρακτηριστικά, στην τυποποίηση των κτιρίων καθώς και στην γεωγραφική τους κατανομή, στην τρωτότητα των κτιρίων και στις καμπύλες τρωτότητας, στην πληθυσμιακή κατανομή. Η βάση δεδομένων αφορά μόνο στην επικράτεια των ΗΠΑ.

2. Προσδιορισμός μεγέθους και επικέντρου του σεισμικού σεναρίου

3. Εισαγωγή πρόσθετων δεδομένων σχετικά με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες και τη γεωλογία

4. Εκτέλεση σεναρίου και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Τα δύο βασικά τμήματα του λογισμικού είναι το τμήμα εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου και του υπολογισμού της τρωτότητας των κατασκευών.

Ακολουθεί έτσι μια περιγραφή των μεθόδων και των δυνατοτήτων του λογισμικού στα τμήματα αυτά.

A) Υπολογισμός Σεισμικού κινδύνου (HAZARD)

Πρώτο βήμα της μεθόδου είναι ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του σεισμικού κινδύνου.

Ο σεισμικός κίνδυνος εκφράζεται υπό μορφή είτε φάσματος απόκρισης (Sa(T), Sd(T)) είτε από τις μέγιστες εδαφικές τιμές ταχύτητας (PGV) και επιτάχυνσης (PGA) που προκαλεί ο σεισμός στο υπόβαθρο των περιοχών ενδιαφέροντος..

Τα μεγέθη αυτά εκτιμώνται με τρεις τρόπους:

1. Αιτιοκρατικός (deterministic)

Με χρήση σχέσεων αποσβέσεως των σεισμικών κυμάτων.

Παρέχεται μεγάλη ποικιλία σχέσεων απόσβεσης στις επιλογές του χρήστη (πχ, Sadigh, chang, Egan, Makdisi, Youngs), που αφορούν αποκλειστικά περιοχές των ΗΠΑ και έχουν καταρτιστεί με βάση τις εκεί γεωλογικές συνθήκες και η τροποποίηση τους δεν είναι εφικτή.

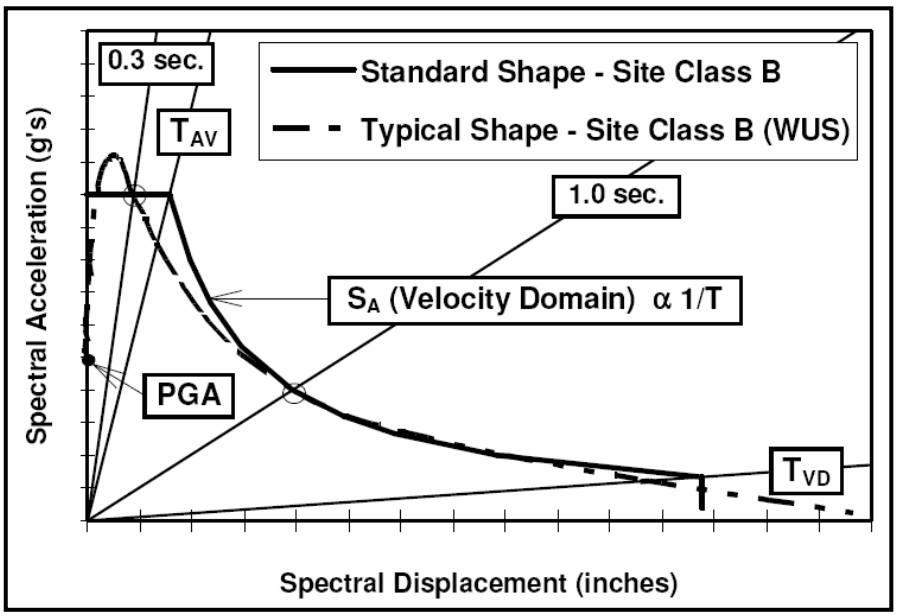
2. Πιθανοκρατικός (propabilistic)

Με χρήση χαρτών με παραμέτρους απόκρισης εδάφους ανά περιοχή για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Οι χάρτες αυτοί δεν τροποποιούνται.

3. Λοιποί ντετερμινιστικοί και πιθανοκρατικοί τρόποι

Εδώ επιτρέπεται στον χρήστη να εισάγει τις παραμέτρους που θέλει.

Πρέπει να εισάγει σε πλατφόρμα GIS την περιοχή ενδιαφέροντος, τις παραμέτρους κίνησης (PGV, PGA, Sa για T=0,3 sec , Sa για T=1 sec, κατηγορία εδάφους) για κάθε στοιχειώδη περιοχή. Το λογισμικό θεωρεί αυτές τις τιμές τελικές, άρα ο χρήστης πρέπει να έχει περιλάβει σε αυτές και την επίδραση της τοπικής εδαφικής ενίσχυσης.



Σχήμα 3: Παράδειγμα δεδομένων εδαφικής κίνησης που πρέπει να εισαχθούν στο HAZUS [3]

Β) Υπολογισμός Τρωτότητας (vulnerability)

Το λογισμικό χρησιμοποιεί μια ταξινόμηση σε 36 βασικούς τύπους κτιρίων ως βάση δεδομένων (οπλ. σκυρόδεμα, μεταλλικοί φορείς, ξύλινες κατασκευές, προκατασκευασμένο σκυρόδεμα, οπλισμένη τοιχοποιία, άοπλη τοιχοποιία) που αφορούν στα συνήθη κτίρια των ΗΠΑ.

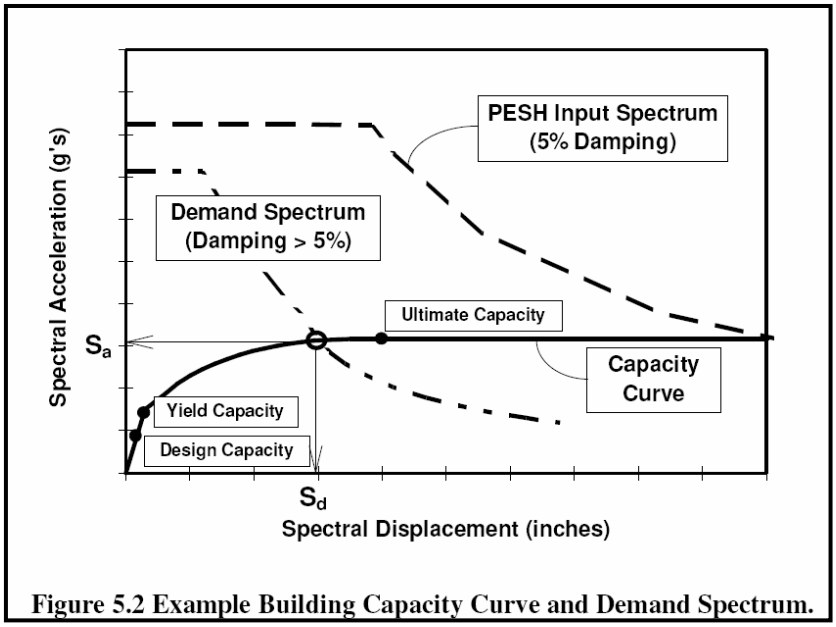
No	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame (≤ 5,000 sq. ft.)		All	1	14
2	W2	Wood, Greater than 5,000 sq. ft.		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1-3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4-7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M	Concrete Shear Walls	Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M	Masonry Infill Walls	Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	13	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4-7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	13	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M	Masonry Infill Walls	Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	13	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M	Concrete Shear Walls	Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	13	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M	with Wood or Metal deck	Mid-Rise	4+	5	50
		Diaphragms				
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M	with Precast Concrete Diaphragms	Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	13	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing	Low-Rise	1-2	1	15
35	URM	Walls	Mid-Rise	3+	3	39
	M					
36	MH	Mobile Homes		All	1	12

Πίνακας 2: Ταξινόμηση κτιρίων κατά HAZUS (Hazus manual [3])

Έχει σαν βάση δεδομένων τις καμπύλες ικανότητας για τα κτίρια αυτά καθώς και τις αντίστοιχες καμπύλες θραυστότητας για τέσσερις στάθμες βλάβης (ελαφρές βλάβες, μεσαίες βλάβες, βαρείες βλάβες, κατάρρευση), για κάθε τύπο κτιρίου.

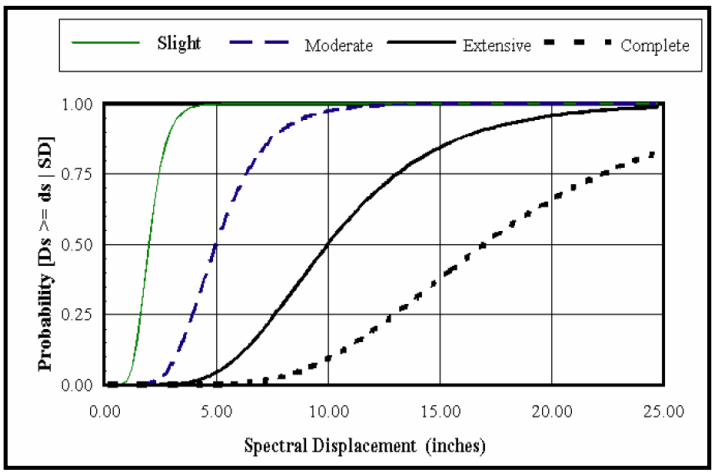
Από το σεισμικό κίνδυνο που προκύπτει ανάλογα του σεναρίου και τον αντισεισμικό κανονισμό προκύπτει η σεισμική απαίτηση υπό μορφή φάσματος.

Με σύγκριση της ικανότητας με τη σεισμική απαίτηση χρησιμοποιώντας μια ανελαστική μέθοδο (πχ CSM (ATC-40)) υπολογίζει το σημείο επιτελεστικότητας του κάθε τύπου κτιρίου, δηλαδή την εκτιμούμενη πιθανή απόκριση του κτιρίου στο σεισμικό σενάριο.



Σχήμα 4: Παράδειγμα καμπύλης ικανότητας και φάσματος ικανότητας του HAZUS (Hazus manual [3])

Από την απόκριση του κτιρίου (συνήθως με όρους μετακίνησης οροφής) χρησιμοποιώντας τις καμπύλες θραυστότητας υπολογίζονται για κάθε κτίριο οι πιθανότητες να ξεπεράσει ένα επίπεδο βλάβης.



Σχήμα 5: Παράδειγμα καμπύλης θραυστότητας του HAZUS για τις 4 στάθμες βλάβης (Hazus manual [3])

Γνωρίζοντας την κατανομή των τυπικών κτιρίων σε μια δεδομένη περιοχή, και έχοντας υπολογίσει τις πιθανότητες του κάθε κτιρίου να ξεπεράσει ένα επίπεδο βλάβης, υπολογίζει την κατανομή των βλαβών στην περιοχή και τις πιθανότητες να συμβεί αυτό.

Τέλος με σχέσεις που έχουν προκύψει από στατιστική επεξεργασία «μεταφράζει» τις βλάβες σε απώλειες ζωής και τραυματισμούς, κόστος ζημιών, κόστος αντικατάστασης, κλπ.

Table 3.6 Default Full Replacement Cost Models (Means, 2002)

HAZUS Occupancy Class Description		Sub-category	Means Model Description (Means Model Number)	Means Cost/SF (2002)
RES1	Single Family Dwelling	See Table 14.2		
RES2	Manufactured Housing	Manufactured Housing	Manufactured Housing (N/A)[1]	$30.90
RES3	Multi Family Dwelling – small	Duplex	SFR Avg 2 St., MF adj, 3000 SF	$67.24
		Triplex/Quads	SFR Avg 2 St., MF adj, 3000 SF	$73.08
	Multi Family Dwelling – medium	5-9 units	Apt, 1-3 st, 8,000 SF (M.010)	$125.63
		10-19 units	Apt., 1-3 st., 12,000 SF (M.010)	$112.73
	Multi Family Dwelling – large	20-49 units	Apt., 4-7 st., 40,000 SF (M.020)	$108.86
		50+ units	Apt., 4-7 st., 60,000 SF (M.020)	$106.13
			Apt., 8-24 st., *145,000 SF* (M.030)	$111.69
RES4	Temp. Lodging	Hotel, medium	Hotel, 4-7 st., 135,000 SF(M.350)	$104.63
		Hotel, large	Hotel, 8-24 st., 450,000 SF (M.360)	$93.47
		Motel, small	Motel, 1 st., 8,000 SF (M.420)	$94.13
		Motel, medium	Motel, 2-3 st., *49,000 SF* (M.430)	$110.03
RES5	Institutional Dormitory	Dorm, medium	College Dorm, 2-3 st, *25,000 SF* (M.130)	$118.82
		Dorm, large	College Dorm, 4-8 st, *85,000 SF* (M.140)	$113.31
		Dorm, small	Frat House, 2 st., 10,000 SF (M.240)	$99.50
RES6	Nursing Home	Nursing home	Nursing Home, 2 st., 25,000 SF (M.450)	$104.62
COM1	Retail Trade	Dept Store, 1 st	Store, Dept., 1 st., 110,000 SF (M.610)	$71.54
		Dept Store, 3 st	Store, Dept., 3 st., 95,000 SF (M.620)	$88.73
		Store, small	Store, retail, 8,000 SF (M.630)	$79.23
		Store, medium	Supermarket, *44,000 SF* (M.640)	$69.09
		Store, convenience	Store, Convenience, 4,000 SF (M.600)	$83.59
		Auto Sales	Garage, Auto Sales, 21,000 SF (M.260)	$70.84
COM2	Wholesale Trade	Warehouse, medium	Warehouse, 30,000 SF (M.690)	$61.91
		Warehouse, large	Warehouse, 60,000 SF (M.690)	$56.58
		Warehouse, small	Warehouse, 15,000 SF (M.690)	$70.43
COM3	Personal and Repair Services	Garage, Repair	Garage, Repair, *10,000 SF* (M.290)	$86.81
		Garage, Service sta.	Garage, Service sta., 1,400 SF (M.300)	$113.91
		Funeral Home	Funeral home, 10,000 SF (M.250)	$97.66
		Laundromat	Laundromat 3,000 SF (M.380)	$135.64
		Car Wash	Car Wash, 1 st., 800 SF (M.080)	$198.28

Πίνακας 3: Παράδειγμα μοντέλου κοστολόγησης του HAZUS για πλήρη αποκατάσταση τύπων κτιρίων (Hazus manual [3])

Τα αποτελέσματα αυτά και η κατανομή τους γεωγραφικά παρουσιάζονται γραφικά μέσω λογισμικού **GIS** που συνεργάζεται με το HAZUS.

2.4.2 SELENA

Είναι ένα λογισμικό εκτίμησης απωλειών λόγω σεισμού που αναπτύχθηκε από το International Centre for Geohazards (ICG) μέσω του **NORSAR** (Νορβηγία) και του πανεπιστημίου του **Alicante** (Ισπανία).

Η τελευταία έκδοση V6 έχει γραφτεί σε κώδικα MATLAB και είναι τύπου «ανοικτού κώδικα», αλλά προσφέρεται και σε εκτελέσιμη μορφή.

Το λογισμικό έχει προσαρμόσει τη βάση δεδομένων του ώστε να λειτουργεί και σε πλατφόρμα **GIS** (πχ, ArcGIS) και συνοδεύεται από το Rise που είναι ο δικός του GIS viewer ή να χρησιμοποιεί την πλατφόρμα του Google Earth μέσω του Rise.

Τα αποτελέσματα όμως παρέχονται και σε μορφή αρχείων *.txt ώστε να μπορούν επεξεργαστούν ανεξάρτητα απο την πλατφόρμα **GIS.**

Βασίζεται στη μεθοδολογία και τυποποίηση του HAZUS [Fema 1999, 2003].

Σημαντικό του πλεονέκτημα όμως σε σχέση με το HAZUS είναι η δυνατότητα χρήσης μεθόδου διακλαδώσεων σεναρίων-παραμέτρων με συντελεστή βαρύτητας που επιτρέπει να ληφθούν υπόψη οι διάφορες αβεβαιότητες (πχ πηγής σεισμού, σχέσεων απόσβεσης, χαρτών σεισμικότητας, τύπου εδάφους, τρωτότητας, κόστος ζημιών).

Τα τελικά αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με συντελεστή βαρύτητας και ταιριάζονται στην κανονική κατανομή ώστε να εξαχθούν οι τελικές μέσες τιμές και τα διάφορα ποσοστά.

Το SELENA είναι προσανατολισμένο σε πλατφόρμα **GIS,** επομένως τόσο τα δεδομένα όσο και τα αποτελέσματα είναι αυτής της μορφής.

Τα αρχεία δεδομένων δημιουργούνται σαν πίνακες στο MS-EXCEL ή στο MS-Access και μετατρέπονται σε μορφή ASCII για να εισαχθούν στο SELENA.

Τα αρχεία αποτελεσμάτων του SELENA είναι σε μορφή ASCII και μπορούν εύκολα εισαχθούν στο MS-EXCEL ή στο MS-Access.

Για να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε πλατφόρμα **GIS** για παρουσίαση, πρέπει να είναι σε μορφή *.dbf και πρέπει να περιέχουν τις πληροφορίες γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και αύξοντα αριθμό της γεωγραφικής μονάδας (geounit).

Η γεωγραφική μονάδα μπορεί να αντιστοιχεί σε ευρύτερη περιοχή ή σε ένα κτίριο.

Η τυπολογία των κτιρίων ακολουθεί τη ταξινόμηση του **HAZUS**, όμως ο χρήστης μπορεί να ορίσει την δική του τυπολογία υπό την προϋπόθεση ότι θα εισάγει αργότερα τις καμπύλες ικανότητας και θραυστότητας που τους αντιστοιχούν.

Ακολουθεί η περιγραφή των δύο βασικών τμημάτων του λογισμικού, δηλαδή το τμήμα εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου και το τμήμα του υπολογισμού της τρωτότητας των κατασκευών.

Α) Στο τμήμα της **<u>εκτίμησης σεισμικού κινδύνου</u>** έχουμε τρεις δυνατότητες:

α) ντετερμινιστική ανάλυση (Deterministic analysis)

Για να εισάγουμε ένα σενάριο σε αυτή τη μέθοδο πρέπει να δώσουμε τα εξής δεδομένα: γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, εστιακό βάθος ρήγματος, μέγεθος M_s ή μέγεθος σεισμικής ροπής M_w , τον προσανατολισμό του ρήγματος, τη γωνία βύθισης (dip), και το είδος του μηχανισμού του ρήγματος.

Έπειτα επιλέγουμε μία από τις σχέσεις απόσβεσης (GMPE) που μας παρέχει το λογισμικό καθώς και τον τύπο του φάσματος σχεδιασμού (πχ EC8, IBC2006).

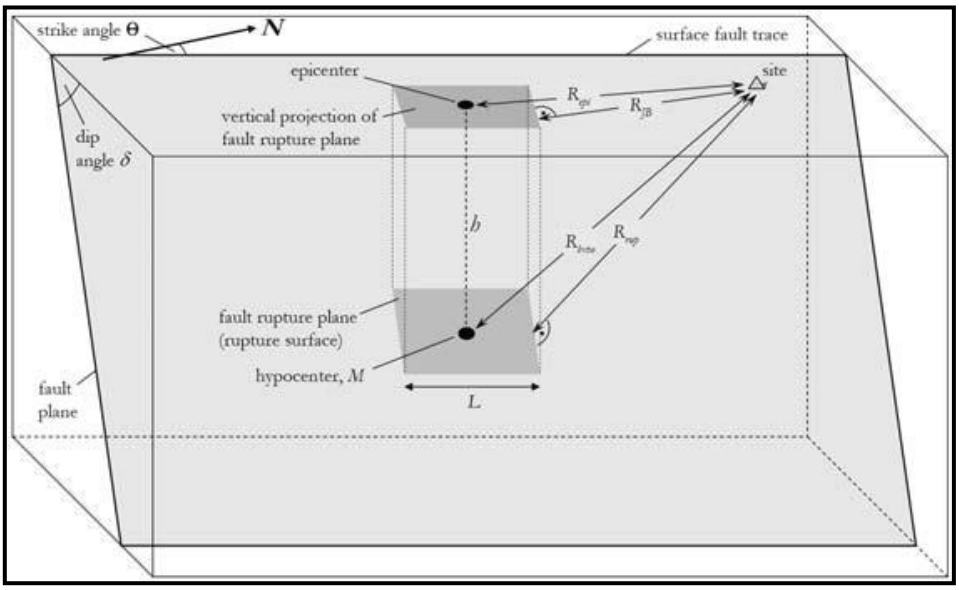
Με αυτά τα δεδομένα, το SELENA, αναλαμβάνει να υπολογίσει τις παραμέτρους της εδαφικής κίνησης (φασματικές επιταχύνσεις, φασματικές μετακινήσεις) σε κάθε γεωγραφική μονάδα της περιοχής ενδιαφέροντος.

Το SELENA παρέχει μεγάλη ποικιλία σχέσεων απόσβεσης δίνει όμως και τη δυνατότητα στο χρήστη να προσθέσει μια δική του εύκολα γράφοντας τον δικό του κώδικα.

Προσοχή θέλει το ότι οι σχέσεις απόσβεσης αναφέρονται σε υπόστρωμα βράχου, μπορεί όμως ο χρήστης σε επόμενο υπολογιστικό βήμα να παράσχει στο λογισμικό εδαφικά χαρακτηριστικά ώστε να υπολογιστεί η εδαφική ενίσχυση.

Η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής:

Έχοντας δώσει τις γεωγραφικές συντεταγμένες του ρήγματος και των περιοχών ενδιαφέροντος και αφού οι σχέσεις απόσβεσης εξαρτώνται από διαφορετικές αποστάσεις, το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τις τέσσερις χαρακτηριστικές αποστάσεις που χρειάζονται οι διάφορες σχέσεις (απόσταση επικέντρου $\mathbf{R_{epi}}$, υποκεντρική απόσταση $\mathbf{R_{hypo}}$, απόσταση joyner-boore $\mathbf{R_{JB}}$, κοντινότερη απόσταση στο ρήγμα $\mathbf{R_{rup}}$).



Σχήμα 6: Γεωμετρική αναπαράσταση υπολογισμού διαφόρων αποστάσεων (SELENA manual v6.0 [4])

Έπειτα υπολογίζει το μήκος ρήγματος **L**, και το πλάτος ρήγματος **W** (και τα δύο σε Km) από τη σχέση των **Wells-Coppersmith(1994)** ανάλογα με τον τύπο του ρήγματος και του μεγέθους M της σεισμικής ροπής:

log10(L)=−2.57+0.62M	**για οριζόντια ρήγματα**	**eq.(1)**
log10(L)=-1,80+0.50M	**για κανονικά ρήγματα**	**eq.(2)**
log10(L)=-2.42+0.58M	**για ανάστροφα ρήγματα**	**eq.(3)**
log10(L)=-2.44+0.59M	**για όλα τα ρήγματα**	**eq.(4)**
log10(W)=−2.57+0.62M	**για οριζόντια ρήγματα**	**eq.(5)**
log10(W)=-1,80+0.50M	**για κανονικά ρήγματα**	**eq.(6)**
log10(W)=-2.42+0.58M	**για ανάστροφα ρήγματα**	**eq.(7)**
log10(W)=-2.44+0.59M	**για όλα τα ρήγματα**	**eq.(8)**

Έπειτα υπολογίζει, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα και τις σχέσεις απόσβεσης που του έχουμε ορίσει, τις τιμές των φασματικών παραμέτρων PGA, Sa για T=0,3 sec, Sa για T=1,0 sec για κάθε γεωγραφική μονάδα ξεχωριστά ανάλογα με τις συντεταγμένες της θέσης τους.

Οι σχέσεις απόσβεσης που παρέχει το λογισμικό είναι:

Table A-1. Empirical ground-motion prediction equations which are implemented in the current SELENA version when standard response spectrum option is selected.

Author(s) (year)	Index		
	mean value (mv)	mv +σ	mv −σ
Boore *et al.* (1993), Boore *et al.* (1994), Boore *et al.* (1997a,b)	01	02	03
Ambraseys *et al.* (1996)	04	05	06
Toro *et al.* (1997)	07	08	09
Campbell and Bozorgnia (1994), Campbell (1997)	10	11	12
Campbell and Bozorgnia (2003)	13	14	15
Abrahamson and Silva (1997)	16	17	18
Sabetta and Pugliese (1996)	19	20	21
Ambraseys *et al.* (2005)	22	23	24
Akkar and Bommer (2007)*	25	26	27
Sadigh *et al.* (1997)	28	29	30
Özbey *et al.* (2003)	31	32	33
Spudich *et al.* (1999)	34	35	36
Bommer *et al.* (2003)	37	38	39
Atkinson and Boore (2003)	40	41	42
Zonno and Montaldo (2002)	43	44	45
Schwarz *et al.* (2002), Ende and Schwarz (2004)	46	47	48
Ambraseys and Douglas (2000), Douglas (2001), Ambraseys and Douglas (2003)	49	50	51
Chapman (1999)	52	53	54
Crouse and McGuire (1996)	55	56	57
Gülkan and Kalkan (2002)	58	59	60
Lussou *et al.* (2001)	61	62	63
Dahle *et al.* (1995)	64	65	66
Bommer *et al.* (1996)	67	68	69
Marmureanu *et al.* (2006) (eq. 17)*	77	78	79
Marmureanu *et al.* (2006) (eq. 3)*	80	81	82
Sharma et al. (2009)	90	91	92
Abrahamson and Silva (2008)- NGA	93	94	95
Boore and Atkinson (2008)- NGA for rock and reverse faults	96	97	98
Marmureanu et al (2006) equation 2 *	100	101	102
Marmureanu et al (2006) equation 4 *	103	104	105
Lungu et al. (2007) Bucharest *	106	107	108
Sokolov et al. (2008) Bucharest mean *	109	110	111
Stamatovska (2002) Vrancea region *	112	113	114
Akkar & Bommer (2010)	115	116	117

* GMPE is only provided for PGA; consequently it can only be used in combination with Eurocode 8 or Indian code provisions

Ανάλογα με το φάσμα σχεδιασμού που έχει επιλεγεί, τα μεγέθη εδαφικής κίνησης που υπολογίστηκαν χρησιμοποιούνται είτε για να καθορίσουν το σχήμα του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού (για επιλογή IBC-2006) είτε για να καθορίσουν μόνο το πλάτος του (για επιλογή EC8).

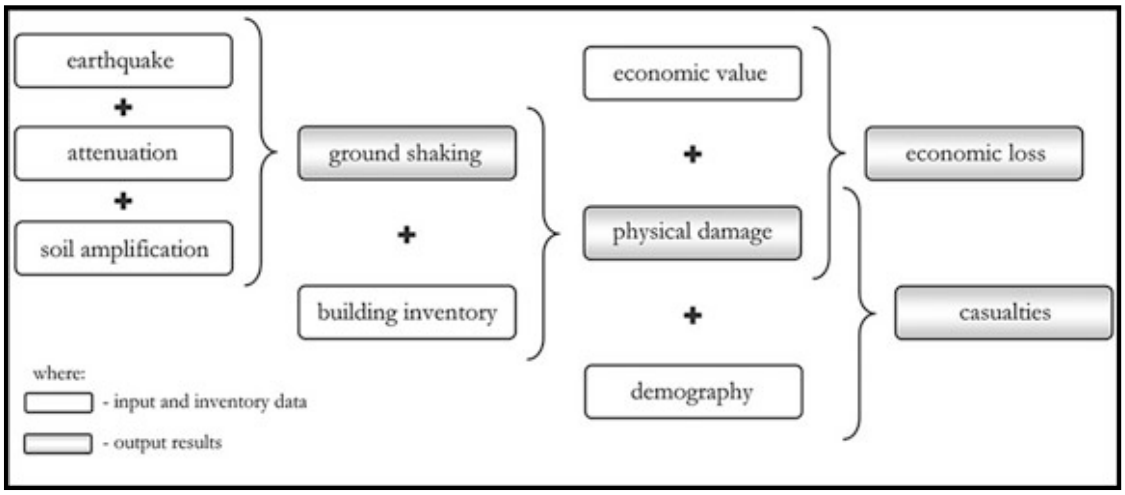
Το τελικό φάσμα που θα προκύψει χρησιμοποιείται σαν φάσμα απαίτησης στις ανελαστικές μεθόδους **MADRS και** I-**DCM** που χρησιμοποιεί αργότερα το λογισμικό για την εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας.

Για την ντετερμινιστική ανάλυση πρέπει να εισαχθούν τα αρχεία :

Earthquake.txt με πληροφορίες για τον σεισμό, και ένα κωδικό για το φάσμα σχεδιασμού (1=US IBC2006, 2=EC8 type1, 3=EC8 type2, 4= Indian code IS1893).

Attenuation.txt με πληροφορίες για τις εμπειρικές σχέσεις απόσβεσης.

Η λογική ροή της ντετερμινιστικής ανάλυσης φαίνεται σχηματικά παρακάτω :



Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση ντετερμινιστικής ανάλυσης του SELENA (SELENA manual v6.0 [4])

β) πιθανοκρατική ανάλυση (Probabilistic analysis)

Σε αυτήν την ανάλυση οι τιμές της φασματικής απόκρισης σε κάθε γεωγραφική μονάδα λαμβάνονται από χάρτες πιθανότητας κινδύνου.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει περισσότερα του ενός σεισμικά σενάρια δίνοντας τις αντίστοιχες εδαφικές κινήσεις και τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας.

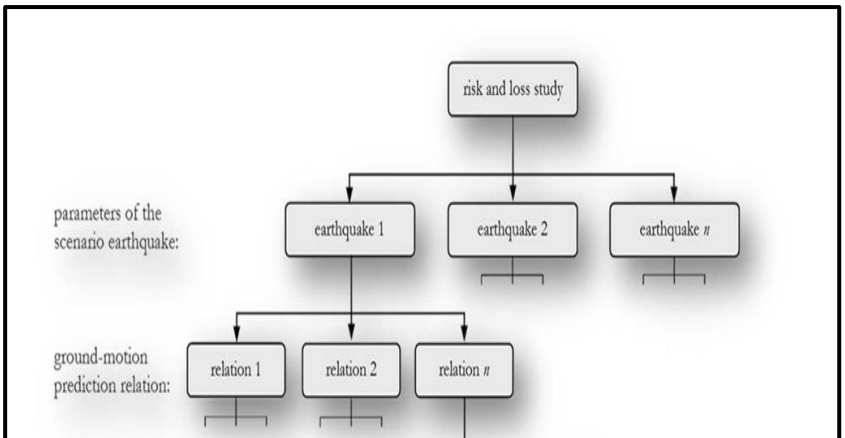
Για κάθε σενάριο πρέπει να δοθούν για κάθε γεωγραφική μονάδα οι τιμές PGA, φασματική επιτάχυνση Sa για T=0,3 sec, φασματική επιτάχυνση Sa για T=1,0 sec, συντεταγμένες των κεντροειδών.

Επίσης, ο χρήστης πρέπει να εισάγει φάσμα σχεδιασμού και εδαφικά χαρακτηριστικά αν τα σενάρια που έχουν δοθεί αναφέρονται σε υπόστρωμα βράχου.

Για αυτή την ανάλυση πρέπει να εισαχθούν τα αρχεία :

Shakesfiles.txt περιέχει το συντελεστή βαρύτητας κάθε σεναρίου, και ένα κωδικό για το φάσμα σχεδιασμού (1=US IBC2006, 2=EC8 type1, 3=EC8 type2, 4= Indian code IS1893) που θα χρησιμοποιηθεί.

Shakecenter(i).txt αντιστοιχεί ένα τέτοιο αρχείο για κάθε σεισμικό σενάριο. Περιλαμβάνει τις φασματικές τιμές (PGA, Sa για T=0,3 sec, Sa για T=1,0 sec σε g) για κάθε γεωγραφική μονάδα και τις συντεταγμένες του αντίστοιχου κεντροειδούς.



Σχήμα 8: Παράδειγμα διάγραμμα ροής λογικού δένδρου σεναρίων του SELENA (SELENA manual v6.0 [4])

γ) ανάλυση με δεδομένα που εισάγονται σε πραγματικό χρόνο (Analysis with real time data)

Σε αυτή τη μέθοδο επειδή τα δεδομένα της εδαφικής κίνησης είναι δύσκολα προσβάσιμα στα κεντροειδή όλων των γεωγραφικών μονάδων το SELENA έχει προβλέψει τη χρήση μιας ειδικής διαδικασίας. Επίσης δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να προσθέσει μια δική του.

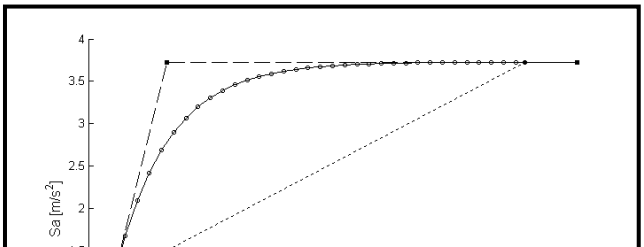
Για αυτή την ανάλυση πρέπει να εισαχθούν τα αρχεία :

Realtimefile.txt περιέχει το μέγεθος σεισμικής ροπήςM_w, και ένα κωδικό για το φάσμα σχεδιασμού (1=US IBC2006, 2=EC8 type1, 3=EC8 type2, 4= Indian code IS1893) που θα χρησιμοποιηθεί.

realmegrid.txt πληροφορίες για PGA, Sa για T=0,3 sec, Sa για T=1,0 sec σε g

Το γεγονός της χρήσης εξωτερικών αρχείων κάνει το λογισμικό πολύ ευέλικτο. Ο χρήστης έτσι μπορεί πολύ εύκολα να αλλάξει τα δεδομένα κάθε σεισμού. Για τη χρήση όμως της πιθανοκρατικής ανάλυσης πρέπει να εισαχθούν τόσα αρχεία όσα τα σεισμικά σενάρια, γεγονός που απαιτεί την ανάλογη προσπάθεια.

Β) Στο τμήμα της **τρωτότητας** ο χρήστης πρέπει να ορίσει την καμπύλη ικανότητας του κάθε κτιρίου που μπορεί να είναι διγραμμική, τριγραμμική ή εξομαλυσμένη.



Σχήμα 9: Παράδειγμα μορφών καμπύλης ικανότητας του SELENA (SELENA manual v6.0 [4])

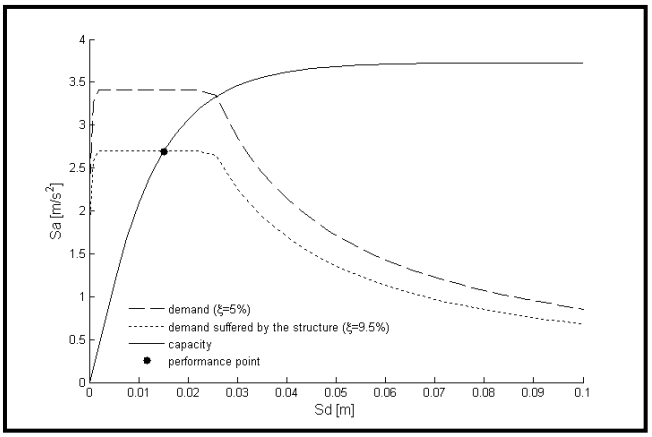
Οι καμπύλες αυτές μπορεί είτε από τις ενσωματωμένες στη βάση δεδομένων του SELENA **(**περιέχει τις καμπύλες των κτιρίων της κατάταξης κατά HAZUS) είτε να εισαχθούν σαν αρχείο μορφής *.txt από τον χρήστη αν θέλει να προσθέσει άλλο τύπο κτιρίου, ή να χρησιμοποιήσει δική του ταξινόμηση.

Η σεισμική απαίτηση, με μορφή φάσματος, υπολογίζεται απο την PGA που του έχουμε εισάγει από χάρτες ή έχει υπολογιστεί απο σχέση απόσβεσης, και το τύπο φάσματος του κανονισμού που του έχουμε ορίσει.

Για την εύρεση του **σημείου επιτελεστικότητας (performance point)** του κάθε κτιρίου το λογισμικό παρέχει δύο μεθόδους:

α) **MADRS** (Modified Acceleration – Displacement Response Spectrum)

β) I-**DCM** (improved -Displacement Coefficient Method)



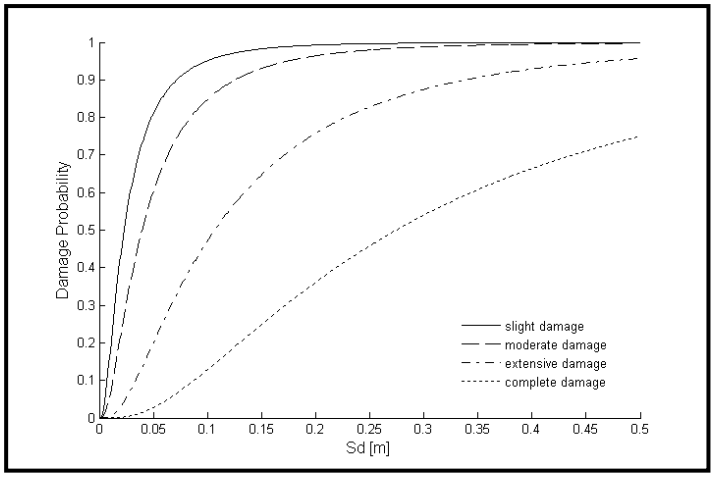
Σχήμα 10: Παράδειγμα υπολογισμού σημείου επιτελεστικότητας χαμηλού κτιρίου από σκυρόδεμα σχεδιασμένου με μέτριο κανονισμό του SELENA (SELENA manual v6.0 [4])

Το SELENA ορίζει **πέντε στάθμες επιτελεστικότητας** (χωρίς βλάβη, μικρή βλάβη, μεσαία βλάβη, μεγάλη βλάβη, αστοχία).

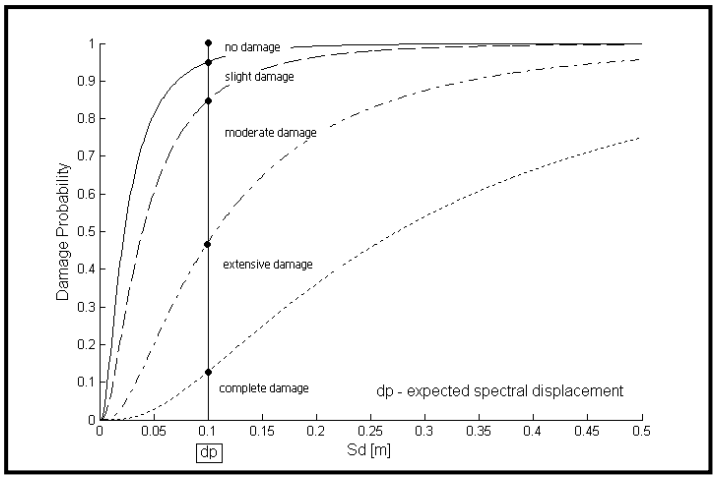
Οι καμπύλες θραυστότητας ακολουθούν την **λογαριθμοκανονική** κατανομή, και οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις για τους τύπους κτιρίων που ακολουθούν την τυπολογία του HAZUS είναι προϋπολογισμένοι σε πίνακες.

Ο χρήστης όμως έχει το δικαίωμα να ορίσει τις δικές του. Σε αυτή την περίπτωση ο χρήστης πρέπει να ορίσει το μέσο όρο **(Χμ)** και τον συντελεστή διασποράς **(Χβ)** για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

Αν ο χρήστης θέλει να ορίσει άλλη κατανομή από την προκαθορισμένη (**λογαριθμοκανονική)**, πρέπει να επέμβει στον «πηγαίο κώδικα».



Σχήμα 11: Παράδειγμα καμπυλών τρωτότητας χαμηλού κτιρίου από σκυρόδεμα σχεδιασμένου με μέτριο κανονισμό του SELENA (SELENA manual v6.0 [4])



Σχήμα 12: Παράδειγμα αναμενόμενης βλάβης από τις καμπύλες τρωτότητας για το συγκεκριμένο σημείο επιτελεστικότητας (SELENA manual v6.0 [4])

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει περιοχές και κατανομές εδαφικής κίνησης όπως και καμπύλες ικανότητας.

Η οικονομική επίπτωση των βλαβών υπολογίζεται βάσει αλγορίθμου ιδίου με του HAZUS.

Τα τελικά αποτελέσματα δίνονται υπό μορφή απωλειών ανά m^2 σε μορφή που είναι επεξεργάσιμη ή ως συνολικός αριθμός βλαμμένων κτιρίων.

2.4.3 ELER

Κάτω από την αιγίδα του προγράμματος **EU FP-6 NERIES project** (Imperial College, NORSAR, ETHZ) έχει αναπτυχθεί μια μεθοδολογία που υλοποιείται στο λογισμικό ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) για τη εκτίμηση των απωλειών λόγω σεισμού στην περιοχή της Ευρώπης και της Μεσογείου.

Παρότι η αρχική πρόθεση ήταν η γρήγορη εκτίμηση των απωλειών μετά τον σεισμό, η μέθοδος είναι ικανή να εκτιμά τις απώλειες που προέρχονται και από διάφορα σενάρια σεισμών.

Η τρέχουσα έκδοση ELER v3.0 έχει αναπτυχθεί σε κώδικα Mat lab, παρέχεται όμως μόνο σε εκτελέσιμη μορφή (compiled). Επομένως ο χρήστης δεν χρειάζεται το Mat lab, από την άλλη όμως δεν μπορεί να επέμβει στον πηγαίο κώδικα.

Το ELER έχει ένα γραφικό περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων (GUI) και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Αποτελείται από δύο τμήματα (modules). Το τμήμα που εκτιμά τον σεισμικό κίνδυνο (earthquake hazard assessment – EHA) και το τμήμα που εκτιμά τις απώλειες εκ του σεισμού (earthquake loss assessment – ELA).

Το **EHA** πραγματοποιεί εκτιμήσεις της εδαφικής κίνησης και κατανομής έντασης χρησιμοποιώντας εξισώσεις πρόβλεψης εδαφικής κίνησης.

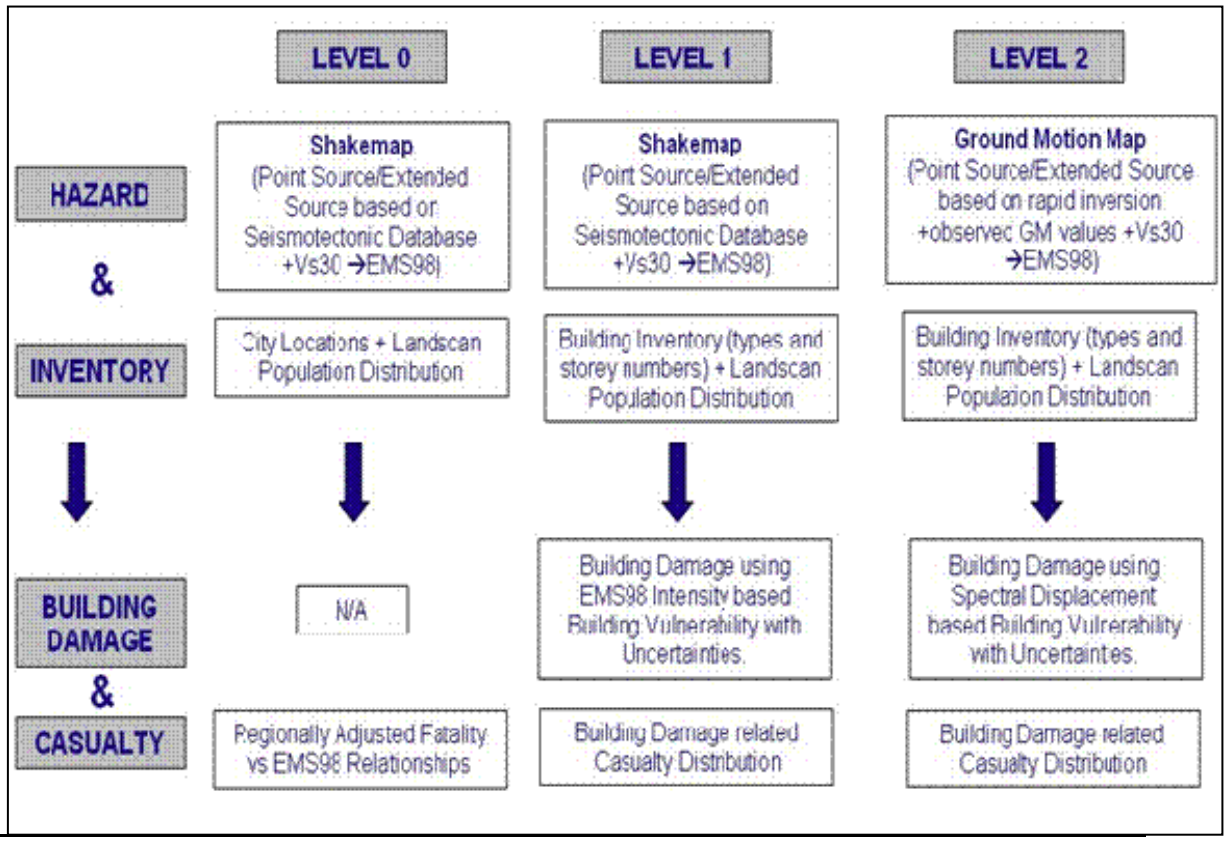
Το **ELA** δέχεται σαν δεδομένα τα αποτελέσματα εδαφικής κίνησης και έντασης από το προηγούμενο τμήμα καθώς και τη δημογραφική και κτιριακή κατανομή στην περιοχή ενδιαφέροντος και με αυτά υπολογίζει τις απώλειες.

Περιλαμβάνει τρία επίπεδα ανάλυσης.

-Το **επίπεδο 0 (level 0)** χρησιμοποιεί γεωγραφικές κατανομές σεισμικής έντασης που υπολογίζονται αναλυτικά για να εκτιμήσει απ' ευθείας τις κοινωνικοοικονομικές απώλειες βασιζόμενο σε εμπειρικές σχέσεις είτε έντασης σεισμού-απωλειών είτε μεγέθους σεισμού απωλειών.

-Το **επίπεδο 1 (level 1)** χρησιμοποιεί γεωγραφικές κατανομές σεισμικής έντασης που υπολογίζονται αναλυτικά για να εκτιμήσει τις βλάβες των κτιρίων και από αυτές εκτιμά τις κοινωνικοοικονομικές απώλειες βασιζόμενο σε εμπειρικές σχέσεις.

-Το **επίπεδο 2 (level 2)** ακολουθεί παρόμοια μεθοδολογία με το HAZUS. Αρχικά υπολογίζει τις φασματικές παραμέτρους, υπολογίζει αναλυτικά το σημείο επιτελεστικότητας του κάθε κτιρίου και από αυτό εκτιμά τις κοινωνικοοικονομικές απώλειες.



Σχήμα 13: Λογικό διάγραμμα ροής των 3 επιπέδων λειτουργίας του ELER (ELER v3.0 manual [6])

ΔΟΜΗ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Α) Υπολογισμός Σεισμικού κινδύνου (Hazard)

Το ΕΗΑ μπορεί να «τρέξει» μόνο του ή σε συνδυασμό με το ΕΛΑ.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων εδαφικής κίνησης ακολουθεί τη μέθοδο **Shakemap** όπως την ανέπτυξε ο **Wald** (1999,2003,2006). Ο χρήστης καθορίζει όλες τις παραμέτρους που αφορούν την πηγή του συμβάντος (πχ τύπος ρήγματος, κλπ) μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) του λογισμικού. Η πηγή του γεγονότος μπορεί να είναι σημειακό ρήγμα ή ευθεία ρήγματος. Η εισαγωγή των δεδομένων μπορεί να γίνει και μέσω αρχείου της μορφής *.xml . Το ELER έχοντας αποθηκευμένη σε βάση δεδομένων τη γεωγραφική κατανομή της V_{s30}, για όλη την περιοχή της Ευρώπης-Μεσογείου, χρησιμοποιεί σχέσεις απόσβεσης που έχουν την V_{s30} για παράμετρο ώστε να υπολογίσει τις παραμέτρους εδαφικής κίνησης. Ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει πώς και αν θα επιδράσουν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στις παραμέτρους εδαφικής κίνησης, αλλιώς υπολογίζονται για υπόβαθρο βράχου. Ο χρήστης επιλέγει και τις σχέσεις απόσβεσης που υπολογίζουν την PGA και την φασματική επιτάχυνση. Οι τιμές του μεγέθους σεισμού , απόσταση από την πηγή και τις τοπικές συνθήκες τοποθετούνται αυτόματα από το λογισμικό βάσει των δεδομένων που έχουν εισαχθεί (τοπικές συνθήκες, συντεταγμένες). Έτσι το λογισμικό υπολογίζει χάρτες με τις κατανομές των εδαφικών παραμέτρων (PGA,PGV,SA) για χρήση στο επίπεδο 2, είτε χάρτες σεισμικής έντασης βάσει MKS 98 για χρήση στο επίπεδο 1.

Β) Καταγραφή εκτεθειμένης σε κίνδυνο Αξίας (Exposure)

Η ταξινόμηση των κτιρίων μπορεί να είναι είτε η Ευρωπαϊκή τυπολογία (**European Building Typology**) όπως αναπτύχθηκε στο EU FP5 Risk UE program, είτε η Αμερικάνικη Τυπολογία όπως αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα **HAZUS-MH** (FEMA 2003). Αναλυτικότερα τα δεδομένα που χρειάζονται σε κάθε επίπεδο είναι:

Β1. Επίπεδο 0

Εδώ δεν χρειάζεται να εισάγουμε δεδομένα εφόσον τα δεδομένα που χρειάζονται, πυκνότητα πληθυσμού, ονόματα πόλεων, πληθυσμό, υπάρχουν σε βάση δεδομένων για όλη την περιοχή της Ευρώπης-Μεσογείου.

Β2. Επίπεδο 1

Χρειάζεται να εισάγουμε την κατανομή κτιρίων που έχουμε ταξινομήσει βάσει μιας από τις δύο προαναφερόμενες μεθόδους ανά γεωγραφική μονάδα, καθώς και την αντίστοιχη κατανομή πληθυσμού.

Β3. Επίπεδο 2

Χρειάζεται να εισάγουμε την κατανομή κτιρίων που έχουμε ταξινομήσει βάσει μιας από τις δύο προαναφερόμενες μεθόδους ανά γεωγραφική μονάδα, καθώς και την αντίστοιχη κατανομή πληθυσμού.

Γ) Υπολογισμός Τρωτότητας (Vulnerability)

Γ1. Επίπεδο 0

Χχρησιμοποιεί γεωγραφικές κατανομές σεισμικής έντασης που υπολογίζονται αναλυτικά για να εκτιμήσει απ' ευθείας τις κοινωνικοοικονομικές απώλειες βασιζόμενο σε κάποια από τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις:

1) Εμπειρική σχέση **Vacareanu** (2004) που συσχετίζει μέγεθος σεισμού με αριθμό θανάτων
2) Εμπειρική σχέση **RGELFE** που συσχετίζει ένταση σεισμού με αριθμό θανάτων
3) Εμπειρική σχέση **Samardjieva and Badal** (2002) που συσχετίζει μέγεθος σεισμού με αριθμό απωλειών

Γ2. Επίπεδο 1

Υπολογίζει αρχικά τις βλάβες των κτιρίων από τις εμπειρικές σχέσεις Giovinazzi-Laomarsino (2005) , που συσχετίζουν βλάβες κτιρίων με την ένταση του σεισμού, βασιζόμενο στους χάρτες σεισμικής έντασης βάσει **MKS 98** που έχει ήδη υπολογίσει στο προηγούμενο στάδιο. Ακολούθως χρησιμοποιεί μία από τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις για να εκτιμήσει τις κοινωνικοοικονομικές απώλειες βάσει των βλαβών των κτιρίων.

1) **Μέθοδος Coburn and Spence** (1992). Υπολογίζει θνησιμότητα με βάση τις ζημιές των κτιρίων

2) **Σχέσεις Risk_UE** (Casualty Vulnerability Relationships). Είναι στατιστικές συσχετίσεις βλαβών κτιρίων με απώλειες ζωής που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος Risk UE βασισμένο στα ευρήματα του Bramerini (1995)

3) **Μέθοδος KOERI** (2002). Είναι συσχετισμός τραυματισμών-απωλειών ζωής με την πιθανότητα ολικής κατάρρευσης των κτιρίων μιας περιοχής

Γ3. Επίπεδο 2

Στο Επίπεδο 2 η συμπεριφορά ενός κτιρίου αντιπροσωπεύεται από το σημείο απόδοσης. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε 4 αναλυτικές μεθόδους που ακολουθούν για τον υπολογισμό του:

1) **CSM** (Capacity Spectrum Method) – ATC 1996

2) **MADRS** (Modified Acceleration-Displacement Response Method) – ATC 2005

3) **RFM** (Reduction Factor Method- **N2**) – Fajfar 2000

4) **DCM** (Displacement Coefficient Method) - ATC 2005

Για μια καταγραφή κτιρίων μιας δοσμένης περιοχής, που ακολουθούν μία από τις δύο τυποποιήσεις κτιρίων που αναφέραμε παραπάνω, και έχοντας σαν βάση δεδομένων τις καμπύλες ικανότητας του κάθε τύπου κτιρίων και για τις τέσσερις διαφορετικές μεθόδους που προαναφέραμε, το λογισμικό υπολογίζει για το δεδομένο σεισμικό γεγονός το σημείο απόδοσης κάθε κτιρίου.

Το ELER χρησιμοποιεί καμπύλες θραυστότητας με τέσσερις στάθμες επιτελεστικότητας για να υπολογίσει την κατανομή πιθανότητας βλάβης κάθε τύπου κτιρίου. Οι καμπύλες θραυστότητας για τους ανωτέρω τύπους κτιρίων υπάρχουν και αυτές αποθηκευμένες σε βάση δεδομένων.

Επιπροσθέτως, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει νέους τύπους κτιρίων, αρκεί να υπολογίσει και να προσθέσει και τις καμπύλες ικανότητας καθώς και τις αντίστοιχες καμπύλες θραυστότητας.

Τέλος, από τις καμπύλες θραυστότητας χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του HAZUS υπολογίζονται οι πιθανές απώλειες για κάθε μία από τις στάθμες επιτελεστικότητας.

2.4.4 Maeviz

Έχει σχεδιαστεί ως εργαλείο για τη μείωση της σεισμικής επικινδυνότητας και βασίζεται στο HAZUS.

Αναπτύχθηκε από το Mid-America Earthquake Center (MAE center) και το National Center for Supercomputing Applications (NCSA).

Έχει αναπτυχτεί υπό μορφή ανεξάρτητων τμημάτων (modules) ώστε εύκολα να μπορεί να προστεθεί ένα νέο τμήμα (νέες εξελίξεις ή άλλης μορφής διακινδύνευση) και παρέχεται σε μορφή ανοικτού κώδικα σε γλώσσα java.

Έχει τη δυνατότητα να παράγει 2D ή 3D χάρτες τόσο από τα δεδομένα όσο και από τα αποτελέσματα.

Δέχεται ως δεδομένα την επικινδυνότητα (από εδαφική κίνηση ή ρευστοποίηση), την καταγραφή της κατανομής των κτιρίων ή των υποδομών ανά περιοχή και μοντέλα τρωτότητας.

Σε σχέση με κτίρια εκτιμά τις βλάβες δομικών και μη δομικών στοιχείων, οικονομικές απώλειες και κίνδυνο ρευστοποίησης.

Για τις γέφυρες υπολογίζει βλάβες, απώλεια λειτουργικότητας, και κόστος επισκευής.

Για τις εγκαταστάσεις δικτύων υπολογίζει βλάβες και ρυθμό επισκευής.

Τέλος, υπολογίζει τις κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις, όπως ανάγκη για προσωρινά καταλύματα, επιπτώσεις από διακοπή εργασιών, κλπ.

Το **Maeviz** έχει τη δική του τυποποίηση κτιρίων, δίνει όμως και τη δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει τους δικούς τύπους, αρκεί να υπολογίσει μόνος του και να παρέχει στο λογισμικό τις αναγκαίες καμπύλες ικανότητας, καμπύλες θραυστότητας, κλπ.

A) Υπολογισμός Σεισμικού κινδύνου (HAZARD module)

Παρέχει δύο επιλογές από εδαφική κίνηση ή ρευστοποίηση.

Η επικινδυνότητα έχει τη μορφή φάσματος απόκρισης και μπορεί να ληφθούν υπόψη τα τοπικά φαινόμενα.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα υποθετικό σεισμό παρέχοντας μια σειρά από δεδομένα, όπως σχέσεις απόσβεσης (attenuation relationships), τύπο φάσματος, θέση πηγής σεισμού, συντεταγμένες περιοχής που μας ενδιαφέρει, τύπο ρήγματος, κλπ.

B) Υπολογισμός Τρωτότητας (VULNERABILITY module)

Παρέχονται ενσωματωμένες έτοιμες καμπύλες θραυστότητας για όλους τους τύπους κτιρίων του Maeviz (αφορά τα τυπικά κέντρο-αμερικάνικα κτίρια καθώς ακολουθεί την τυποποίηση του HAZUS). Δίνει όμως και τη δυνατότητα στον χρήστη μέσω μιας διαδικασίας να ορίσει νέες καμπύλες θραυστότητας για τους δικούς του τύπους κτιρίων.

Από τις καμπύλες θραυστότητας όλων των κτιρίων υπολογίζει έναν μέσο όρο βλαβών που αντιστοιχεί στο ποσοστό των κτιρίων που θα καταρρεύσουν για το δεδομένο σεισμικό σενάριο. Τέλος από αυτόν τον μέσο όρο βλαβών βάσει σχέσεων υπολογίζονται οι οικονομικές απώλειες.

2.4.5 EQRM

Το EQRM (Earthquake Risk Management) είναι ένα λογισμικό για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας που αναπτύχθηκε από την Geosciences Australia (GA) για εφαρμογή στις πόλεις της Αυστραλίας. Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab και βασίζεται στην μεθοδολογία του HAZUS.

Έχει προσαρμόσει την τυπολογία των κτιρίων, τις εδαφικές συνθήκες, αλλά και άλλες παραμέτρους στις συνθήκες της Αυστραλίας . Δεν απαιτεί πλατφόρμα GIS.

2.4.6 HAZ-TAIWAN

Βασίζεται και αυτό στις μεθόδους του HAZUS και έχει εφαρμοστεί σε διάφορες πόλεις της Taiwan (πχ Taipei city).

Έχει την ίδια ταξινόμηση κτιρίων με το HAZUS σαν βάση δεδομένων. Η εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων βασίζεται στη μέθοδο spectral displacement και αφορά τόσο τα δομικά, όσο και τα μη δομικά στοιχεία.

2.4.7 OpenRisk

Είναι ένα σύνολο λογισμικών που έχουν υλοποιηθεί από τον Porter(2000) σε περιβάλλον Jawa. Αποτελεί λογισμικό ανοικτού κώδικα.

Βασίζεται στις σχέσεις CUREE-Caltech για τον υπολογισμό της τρωτότητας, στις καμπύλες θραυστότητας του HAZUS, στις συναρτήσεις απωλειών του HAZUS, υπολογισμό σεισμικού κινδύνου στο OpenSHA.

Έχει δημιουργηθεί σαν τμήμα του προγράμματος AGORA (Alliance for Global openrisk analysis)

2.4.8 CAPRA

Το CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment) είναι αποτέλεσμα μιας πρωτοβουλίας του EIRD που στηρίζεται από επτά Κέντρο-Αμερικάνικες χώρες (Νικαράγουα, Κοσταρίκα, Ονδούρα,

Γουατεμάλα, Ελ Σαλβαντόρ, Παναμά) με σκοπό την ανάπτυξη ενός λογισμικού εκτίμησης της επικινδυνότητας προσαρμοσμένο στις συνθήκες των χωρών αυτών και βασισμένο σε κοινή μεθοδολογία.

Αφορά διάφορες φυσικές καταστροφές. Λειτουργεί σε πλατφόρμα GIS και είναι ανοικτού κώδικα. Έχει αναπτυχθεί με τη μορφή modules για να είναι εύκολα επεκτάσιμο, αλλά δεν είναι ακόμα πλήρως λειτουργικό.

2.4.9 DBELA

Έχει αναπτυχτεί από τα Rose School / EUCENTRE Pavia-Italia. Χρησιμοποιεί μεθόδους μηχανικής για να υπολογίσει την τρωτότητα για κτίρια από σκυρόδεμα και τοιχοποιία.

Τα κτίρια ταξινομούνται ανάλογα του μηχανισμού αστοχίας και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

Έχει αναπτυχθεί σε κώδικα Matlab και FORTRAN και δεν είναι ανοικτού κώδικα.

Η μεθοδολογία του όμως είναι γνωστή από δημοσιεύσεις (Crowley 2004 ,Calvi 2006).

Απαιτεί τουλάχιστον μια καταγραφή με λεπτομέρεια ενός μικρού δείγματος της περιοχής ενδιαφέροντος. Θεωρείται ακριβέστερο του HAZUS αλλά έχει βρεθεί ότι απαιτεί αρκετό υπολογιστικό χρόνο (Daniell 2009).

2.4.10 OpenQuake

Η **GEM** (Global Earthquake Model), έχει έδρα την Pavia στην Ιταλία αλλά αποτελεί μια παγκόσμια συνεργασία, αναπτύσσει ένα φιλόδοξο λογισμικό το **OpenQuake.**
Το **OpenQuake** αναπτύσσεται σε γλώσσα προγραμματισμού Python και είναι ανοικτού κώδικα.
Αναπτύσσεται παράλληλα σε πολλά σημεία του πλανήτη από τοπικούς επιστήμονες και βασίζεται σε μεγάλη ποικιλία μεθόδων στα διάφορα στάδια (υπολογισμού κινδύνου σεισμού, τρωτότητας, κλπ.) που φθάνει μέχρι τις πλέον εξελιγμένες.

Έχει αναπτύξει και κυκλοφορήσει αναλυτικά εγχειρίδια που περιγράφουν τη δομή, τις μεθόδους που χρησιμοποιεί και τις βάσεις δεδομένων για όλα τα σημεία του πλανήτη που έχει δημιουργήσει .

Ο κώδικας, του οποίου η τελευταία έκδοση αναρτάται ελεύθερα στην ηλεκτρονική διεύθυνση της **GEM,** είναι στο δοκιμαστικό στάδιο και εξελίσσεται διαρκώς.

2.5 Σχόλια – Συμπεράσματα

Από την όλη διερεύνηση προκύπτει ότι σημείο αναφοράς για τα λογισμικά αποτελεί η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο HAZUS.

Το λογισμικό HAZUS όμως δεν είναι ανοικτού κώδικα και δεν είναι εύκολα προσαρμόσιμο στα δεδομένα άλλων περιοχών καθώς όλες οι βάσεις δεδομένων του (χάρτες περιοχών, ταξινόμηση κτιρίων, καμπύλες ικανότητας, καμπύλες τρωτότητας, κλπ) αφορούν τις ΗΠΑ .

Πολλά λογισμικά από άλλες περιοχές πέραν της Ευρώπης είτε έχουν προσαρμοστεί στις τοπικές συνθήκες είτε δεν είναι πλήρως λειτουργικά.

Από τα ευρωπαϊκά λογισμικά, που είναι προσανατολισμένα στις Ευρωπαϊκές συνθήκες (τυποποίηση κτιρίων, κανονισμοί, εδαφικές συνθήκες) και έχουν και λεπτομερή manual που αναθεωρούνται τακτικά, σημαντικότερα είναι τα SELENA, ELER και OpenQuake.

Από αυτά το SELENA και το OpenQuake είναι λογισμικά ανοικτού κώδικα.

Το SELENA είναι ανεπτυγμένο σε Matlab, ένα ευέλικτο προγραμματιστικό εργαλείο, παρέχει την δυνατότητα να προσθέσει ο χρήστης τις δικές του σχέσεις απόσβεσης και φάσμα απαίτησης, ταξινόμηση κτιρίων, καμπύλες ικανότητας και θραυστότητας.

Είναι επομένως προσαρμόσιμο στις ιδιαίτερες συνθήκες οποιασδήποτε περιοχής και για οποιεσδήποτε απαιτήσεις ανάλυσης.

Το OpenQuake έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον PYTHON.

Έχει υλοποιήσει σε κώδικα ότι πιο εξελιγμένο υπάρχει από μεθόδους.

Έχει πολλές δημοσιεύσεις που αφορούν τις τελευταίες εξελίξεις και μεθόδους και έχει ελεύθερα προσβάσιμους στο internet πολλούς χάρτες και δεδομένα σεισμών από όλη την υδρόγειο.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

1. GEM1 seismic risk report 2010. GEM Foundation Pavia Italy
   (H. Crowley, M. Colombi, J. Crempien, E. Erduran, M. Lopez, H. Liu, M. Mayfield, M. Milanesi)

2. Comparison and production of open source earthquake loss assessment packages (2009)
   Msc Thesis by James Edward Daniell –
   Supervisors Dr Helen Crowley, Dr Rui Pinho - Universita degli studi di Pavia

3. HAZUS-MH-MR1 Technical and User's Manual (FEMA 2003)

4. SELENA v6.0 User and Technical Manual NORSAR (2014)

5. SELENA v4.0 – v5.0 User and Technical Manual NORSAR (2010)

6. ELER V3.0 Technical Manual (2010)

7. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings - ATC 40 (1996)

8. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings - FEMA 356 (2000)

9. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (2005) - FEMA 440

10. Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings
    In Earthquakes (2006) – New Zealand Society for Earthquake Engineering

11. Report: Development of ELER-Methodology: Vulnerability Relationships. NERIES
    (NEtwork of Research Infrastructures for European Seismology)

12. Seismic Vulnerability of Existing Buildings (2002) – Kerstin Lang, Phd Thesis – ETH Zurich

13. ΕΠΑΝΤΥΚ – ΕΚΔΟΣΗ ΤΕΕ 2006

14. Αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση τις μετακινήσεις - Γιάννης Ψυχάρης (2015)

15. Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας - Γιάννης Ψυχάρης (2015)

16. Αντισεισμικός σχεδιασμός Γεφυρών - Γιάννης Ψυχάρης (2015)

17. Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «ειδικά θέματα τεχνικής σεισμολογίας» ΕΜΠ 2015

18. Δυναμική των κατασκευών Anil K. Chopra

19. Δυναμική των κατασκευών Ray W. Clough-Joseph Penzien

20. Αντισεισμικές κατασκευές Κ. Αναστασιάδη

21. Geotechnical Earthquake Engineering Steven L. Krammer.

Κεφάλαιο 3

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SELENA ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.

3.1. Εισαγωγή - Βασικά στοιχεία

3.2. Σύνθεση και Ανάλυση παραδειγμάτων

3.2.1. Επίλυση με την Ντετερμινιστική μέθοδο

3.2.1.1. Πληροφορίες από τα input αρχεία που αφορούν ειδικά την ντετερμινιστική μέθοδο

3.2.1.2. Πληροφορίες από τα input αρχεία που είναι κοινά και στις δύο μεθόδους.

3.2.1.3. Αποτελέσματα του παραδείγματος της ντετερμινιστικής μεθόδου

3.2.2. Επίλυση με την Πιθανοκρατική μέθοδο

3.2.2.1. Πληροφορίες από τα από τα input αρχεία που αφορούν ειδικά την πιθανοκρατική μέθοδο

3.2.2.2. Πληροφορίες από τα input αρχεία που είναι κοινά και στις δύο μεθόδους.

3.2.2.3. Αποτελέσματα παραδείγματος της πιθανοκρατικής μεθόδου.

3.3. Ανακεφαλαίωση

3.3.1. Ντετερμινιστική μέθοδος

3.3.2. Πιθανοκρατικη μέθοδος

3.4. Σχόλια

3. ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SELENA ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Για την καλύτερη κατανόηση ενός σύγχρονου και αντιπροσωπευτικού λογισμικού υπολογισμού της σεισμικής διακινδύνευσης όπως το **SELENA**, επιλέχθηκε να επιλυθούν δύο παραδείγματα που αντιστοιχούν στις δύο βασικές μεθόδους που υποστηρίζει, την ντετερμινιστική και την πιθανοκρατική.

Τα παραδείγματα βασίζονται σε μια πλήρη καταγραφή 6 περιοχών της πόλης του Βουκουρεστίου που συνοδεύουν το λογισμικό σαν υπόδειγμα.

Παρακάτω ακολουθεί η κατάστρωση των παραδειγμάτων, η ανάλυση των βασικών αρχείων δεδομένων που απαιτούνται, των αρχείων αποτελεσμάτων που εξάγονται και στο τέλος γίνεται η αξιολόγηση και τα σχόλια.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το λογισμικό **SELENA [1],[2]**, που περιγράφτηκε συνοπτικά στο κεφάλαιο 2, είναι ένα από τα πιο σύγχρονα λογισμικά για τον υπολογισμό της σεισμικής διακινδύνευσης την οποία υπολογίζει με δύο τρόπους πιθανοκρατικά και ντετερμινιστικά (σχήμα 1) και έχει υπό εξέλιξη μια τρίτη real-time.

Βασίζεται στη δομή και λειτουργία του λογισμικού **HAZUS,** αλλά είναι ελεύθερα προσβάσιμο με 'ανοικτό' κώδικα και έχει βελτιώσεις και πλεονεκτήματα έναντι αυτού.

Οι βελτιώσεις αφορούν στην προσθήκη των ανελαστικών μεθόδων υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας στην τελευταία έκδοση **V6**(2014) που είναι: η **MADRS,** δηλαδή η εξέλιξη της **CSM** κατά FEMA 440/2005 και η **I-DCM** που είναι η εξέλιξη της **DCM** κατά FEMA 440/2005. Σε σύγκριση το **HAZUS** χρησιμοποιεί τις μεθόδους **DCM** και **CSM** τις οποίες είχε υιοθετήσει και το **SELENA** στις προηγούμενες εκδόσεις **V4-V5**(2010).

Επίσης έχουν προστεθεί νέες εξελιγμένες **σχέσεις απόσβεσης** που αφορούν περιοχές από όλη την υδρόγειο και όχι μόνο την περιοχή των ΗΠΑ όπως συμβαίνει με το HAZUS, το μεγάλο πλεονέκτημα όμως του SELENA σε αυτόν τον τομέα είναι ότι είναι λογισμικό ελεύθερο, με ανοικτό κώδικα σε μορφή **Matlab** και με δομή τέτοια ώστε ο ερευνητής μπορεί να προσθέσει μόνος του όποια σχέση απόσβεσης χρειάζεται υπό μορφή ρουτίνας.

Μια ακόμη σημαντική προσθήκη που έχει συγκριτικά το SELENA είναι το σύστημα διακλαδώσεων που βοηθά στην ταυτόχρονη δημιουργία σεναρίων στο κάθε επιμέρους τμήμα των υπολογισμών (πχ διαφορετικές σχέσεις απόσβεσης με ξεχωριστή βαρύτητα, διαφορετικές μέθοδοι στην τρωτότητα, κλπ).

Κρίνεται επομένως σαν αντιπροσωπευτικό λογισμικό αυτής της κατηγορίας για διεξαγωγή κάποιων παραδειγμάτων για την κατανόηση σε βάθος του λογισμικού και των μεθόδων που χρησιμοποιεί.

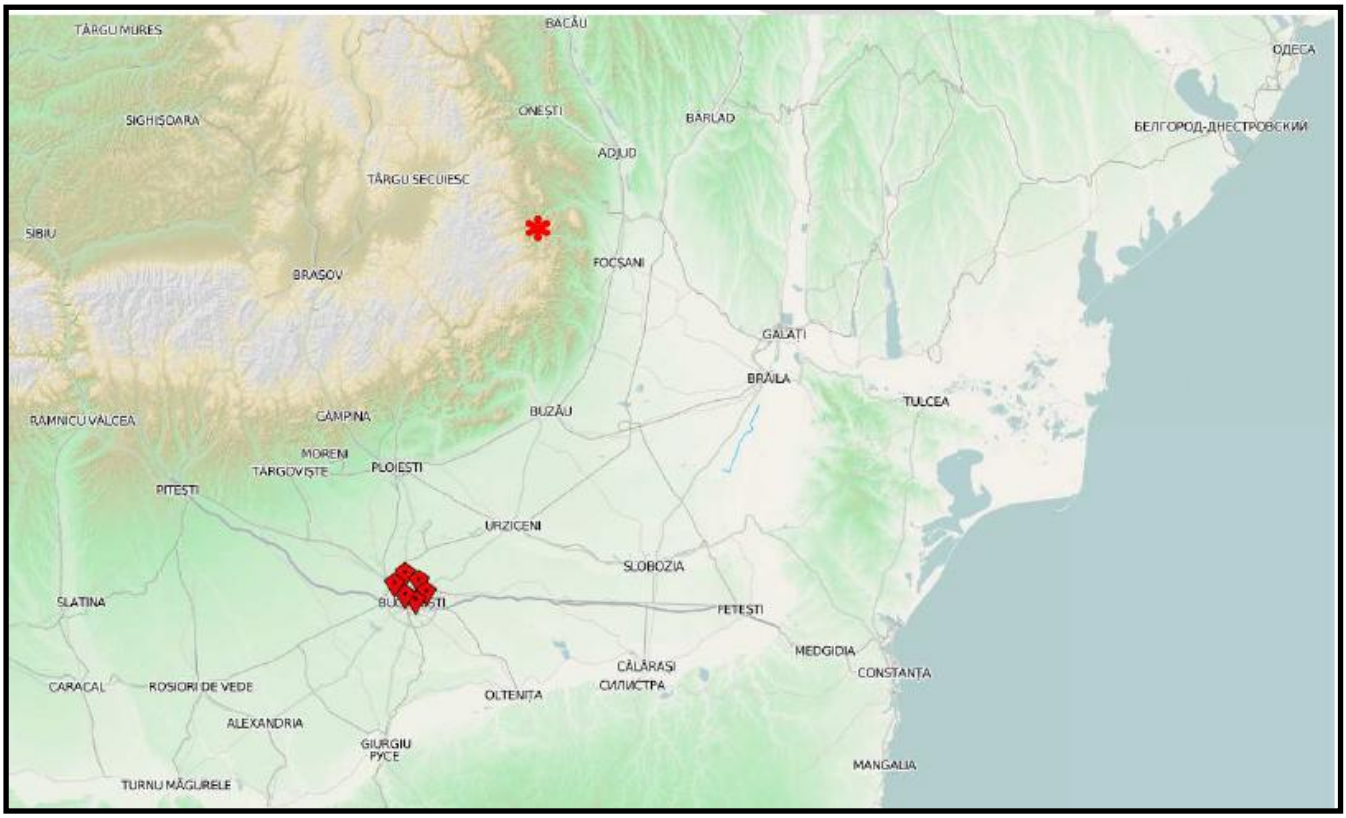
Η έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε είναι η τελευταία αναθεωρημένη **SELENA v6.0** (2014) [2].

Το λογισμικό έχει δομή για να λειτουργεί σε συνεργασία με ένα λογισμικό **GIS** (προτείνεται από τους συγγραφείς το ArcView).

Λειτουργεί όμως και ανεξάρτητα καθώς δέχεται δεδομένα (input files) και εξάγει αποτελέσματα (output files) σε μορφή αρχείων *.txt που είναι επεξεργάσιμα με κάποιο spreadsheet λογισμικό όπως το **EXCEL** (Microsoft).

Το **SELENA** έχει σαν υπόδειγμα μια πλήρη καταγραφή για την πόλη του Βουκουρεστίου (σχήμα- 1) που βασίζεται στην ταξινόμηση κτιρίων κατά HAZUS.

.



Σχήμα 1: Χάρτης με τις 6 περιοχές του Βουκουρεστίου και την θέση του ρήγματος [2] (SELENA v6.0 manual)

Η καταγραφή αφορά τον γεωγραφικό καθορισμό των **6 περιοχών** (συντεταγμένες του κεντροειδούς, εμβαδά περιοχών), και την κατανομή των διαφόρων τύπων κτιρίων και του πληθυσμού σε αυτές.

Για την εκτίμηση των βλαβών παραθέτει σαν δεδομένα τις καμπύλες ικανότητας και θραυστότητας και τα όρια βλάβης, για όλες τις κατηγορίες κτιρίων που χρησιμοποιούνται στο υπόδειγμα, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το HAZUS.

Για τον υπολογισμό των απωλειών παρέχει διάφορες πληροφορίες για την κατανομή των κτιρίων και του πληθυσμού, που βασίζονται στην καταγραφή της περιοχής, και σχέσεις απωλειών του HAZUS όπως:

-Την πληροφορία για το ποιες κατηγορίες κτιρίων, τον αριθμό των κτιρίων και το εμβαδόν των κτιρίων της κατηγορίας που υπάρχουν σε κάθε περιοχή.

-Τα πληθυσμιακά χαρακτηριστικά ανά κατηγορία κτιρίων και περιοχή, την κατανομή των ωρών παρουσίας του πληθυσμού στο κτίριο.

-Το ποσοστό κατοικιών που θα καταρρεύσουν ανά κατηγορία αν φθάσουν το επίπεδο βλάβης “κατάρρευση”.

-Πληροφορία για το ποσοστό τραυματισμών και απωλειών ζωής για κάθε επίπεδο βλάβης σε κάθε κατηγορία κτιρίων, κλπ.

Επέλεξα να επιλύσω δύο παραδείγματα, ένα με την πιθανοκρατική και ένα με την ντετερμινιστική μέθοδο, ώστε να αναδειχθούν και οι δύο μέθοδοι του λογισμικού.

Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων του SELENA αφορά στο κομμάτι του **σεισμικού κινδύνου**.

Στην **ντετερμινιστική** μέθοδο ορίζουμε τον σεισμικό κίνδυνο ή τους σεισμικούς κινδύνους σαν ρήγματα με καθορισμένα θέση, γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μηχανισμό. Οι τιμές PGA και Sa για κάθε περιοχή υπολογίζονται από τις σχέσεις απόσβεσης που επιλέγουμε.

Εφόσον οι σχέσεις απόσβεσης υπολογίζουν τις PGA και Sa σε βράχο, πρέπει να εισάγουμε στο λογισμικό και τις κατηγορίες εδάφους των διαφόρων γεωγραφικών μονάδων ώστε να υπολογίσει τους συντελεστές ενίσχυσης βάσει του κανονισμού που θα επιλέξουμε.

Η **ντετερμινιστική** μέθοδος είναι κατάλληλη για έλεγχο της συμπεριφοράς σημαντικών έργων από συγκεκριμένους κινδύνους και δίνει πολύ καλά αποτελέσματα εκτίμησης βλαβών όταν θέλουμε να ελέγξουμε τις κατασκευές στα δυσμενέστερα σενάρια.

Δεν μας δίνει όμως πληροφορίες για τη χρονική κατανομή του φαινομένου, όπως χρονικό διάστημα που μπορεί να συμβούν αυτά, περίοδο επαναφοράς, κλπ.

Στην **πιθανοκρατική** μέθοδο ορίζουμε τον σεισμικό κίνδυνο απευθείας με τιμές PGA ή με φασματικές τιμές Sa για την κάθε περιοχή.

Εφόσον οι χάρτες αυτοί παρέχουν τιμές PGA και Sa για βράχο, πρέπει να εισάγουμε στο λογισμικό και τις κατηγορίες εδάφους των διαφόρων γεωγραφικών μονάδων ώστε να υπολογίσει τους συντελεστές ενίσχυσης βάσει του κανονισμού που θα επιλέξουμε.

Η πιθανοκρατική μέθοδος είναι κατάλληλη για εκτίμηση της πιθανότητας να ξεπεραστεί ένα επίπεδο βλαβών-απωλειών στα εξεταζόμενα κτίρια σε δεδομένο χρονικό διάστημα για δεδομένη ένταση σεισμού που εκφράζεται με όρους PGA, Sa.

Και στις στις δύο μεθόδους ακολουθείται το ίδιο αναλυτικό μοντέλο εκτίμησης της τρωτότητας των κατασκευών και παρέχεται η δυνατότητα σεναρίων χρησιμοποιώντας το σύστημα διακλαδώσεων με συντελεστές βαρύτητας για το κάθε κλάδο.

Τα σενάρια μπορεί να αφορούν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, θέσεις και μέγεθος σεισμού ενός ρήγματος ή διαφορετικές σχέσεις απόσβεσης ή διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας.

Δημιουργείται έτσι ένα πλέγμα από κλάδους με ανάλογους συντελεστές βαρύτητας και στο τέλος παρέχονται αποτελέσματα ανά κλάδο και συνολικά.

Με αυτό τον τρόπο εισάγονται οι αβεβαιότητες που αφορούν όλα τα στάδια εκτίμησης σεισμικής διακινδύνευσης πχ. αβεβαιότητες μηχανισμού, αποστάσεων, ακρίβειας σχέσεων απόσβεσης, κλπ.

No.	Label	Description	Height			
			range		typical	
			name	stories	stories	ft.
1	W1	Wood, Light Frame (≤ 5,000 sq.ft. / 465 m2)	–	all	1	14
2	W2	Wood, Commercial and Industrial (> 5,000 sq.ft. / 465 m2)	–	all	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1-3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4-7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame	–	all	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4-7	5	60
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Pre-cast Concrete Tilt-Up Walls	–	all	1	15
26	PC2L	Pre-cast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Pre-cast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	39
36	MH	Mobile Homes	–	all	1	12

Σχήμα 2: Η υποστηριζόμενη από το SELENA ταξινόμηση κτιρίων κατά HAZUS [2] (SELENA v6.0 manual)

Περιγραφή διαδικασίας

Για να εκτελέσουμε το λογισμικό από την μορφή του πηγαίου κώδικα πρέπει πρώτα να μπούμε σε περιβάλλον **Matlab**.

Μέσα από το **Matlab** κάνουμε set path στη διεύθυνση που περιέχει τα αρχεία κώδικα (*,m) του SELENA, στην περίπτωση μας δηλαδή C:\SELENA6.

Έπειτα αλλάζουμε την «τρέχουσα» διεύθυνση στη διεύθυνση που υπάρχει το παράδειγμα, δηλαδή C:\SELENA6\example.

Τέλος από τη γραμμή εντολών του Matlab, γράφουμε την εντολή **selena d** αν θέλουμε να εκτελέσουμε την ντετερμινιστική μέθοδο ή **selena p** αν θέλουμε την πιθανοκρατική.

Τα τελικά αποτελέσματα αποθηκεύονται στον υποφάκελο C:\SELENA6\example\output.

Αυτός ο φάκελος δημιουργείται αυτόματα κάθε φορά που κάνουμε επίλυση, έτσι χρειάζεται προσοχή για να μην διαγραφτούν τα αποτελέσματα από την προηγούμενη επίλυση.

Στα παραδείγματα χρησιμοποιείται η ταξινόμηση κτιρίων κατά HAZUS, που υποστηρίζει το λογισμικό (σχήμα 2), με τις αντίστοιχες καμπύλες ικανότητας που υπάρχουν στη βάση δεδομένων. Υπάρχει δυνατότητα όμως ο χρήστης να ορίσει δικές του καμπύλες ικανότητας, τύπους κτιρίων, καθώς και όρια για τις πέντε στάθμες βλάβης (με μέσες τιμές και απόκλιση).

Η βασική ρουτίνα του λογισμικού είναι η **selena.m** (σχήμα 4).

Κατά την εκτέλεση του λογισμικού ζητάει την εισαγωγή ενός χαρακτήρα από τις τρεις επιλογές (**d** ή **p** ή **r**) που κάθε ένας αντιστοιχεί σε μια μέθοδο υπολογισμού και κατόπιν το λογισμικό κατευθύνει το έλεγχο σε αυτή δηλαδή σε μια από τις υπορουτίνες, **computetoold**, **computetoolp**, **computetoolr** αντίστοιχα.

Τα αρχεία δεδομένων που θα ζητήσει για την κάθε μέθοδο φαίνονται παρακάτω:

Έτσι για την **ντετερμινιστική μέθοδο** χρειάζεται τα αρχεία:

earthquake.txt

attenuation.txt

vulnerfiles.txt

soilfiles.txt

ecfiles.txt

cpfile.txt

για την **πιθανοκρατική μέθοδο** χρειάζεται τα αρχεία:

shakefiles.txt

vulnerfiles.txt

soilfiles.txt

ecfiles.txt

cpfile.txt

και για την **real time μέθοδο** χρειάζεται τα αρχεία:

vulnerfiles.txt

soilfiles.txt

ecfiles.txt

cpfile.txt

3.2 Σύνθεση και Ανάλυση Παραδειγμάτων

3.2.1 Επίλυση με την Ντετερμινιστική Μέθοδο

Εδώ το σεισμικό γεγονός περιγράφεται σαν ρήγμα με θέση γεωμετρία και μηχανισμό.

Τα ρήγματα μπορεί να είναι περισσότερα από ένα και τότε μιλάμε για διαφορετικά σεισμικά σενάρια με συντελεστή βαρύτητας και ακολουθείται ένα μοντέλο διακλάδωσης.

Τα διάφορα σενάρια δηλαδή η πληροφορία των σεισμικών γεγονότων δίνεται από τα input files **earthquake.txt** και **attenuation.txt** που περιγράφονται παρακάτω.

Βάσει του τρόπου που αναφέραμε παραπάνω εκτελούμε το SELENA με την επιλογή **d** που αντιστοιχεί στην ντετερμινιστική μέθοδο. Στο τέλος της εκτέλεσης το MATLAB μας πληροφορεί ότι εκτέλεσε το υπολογισμό και σε ποια αρχεία αποθήκευσε τα αποτελέσματα.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Έχουμε δύο σεισμικά σενάρια με ίδιο συντελεστή βαρύτητας 50%. Το ρήγμα έχει γεωγραφικό πλάτος και μήκος σε μοίρες (44.819,25.581), εστιακό βάθος 20 km, μέγεθος M_s=M_w=8.30, ο προσανατολισμός του ρήγματος ως προς τον βορρά είναι 45^0. Στο 1° σενάριο είναι τύπου strike slip (0) με γωνία Dip 90^0 και στο 2° είναι τύπου normal (1) με γωνία Dip 40^0.

Η περιοχή ενδιαφέροντος αποτελείται από έξι γεωγραφικές μονάδες με δοσμένες συντεταγμένες.

Το έδαφος και των έξι έχει ταχύτητα διατμητικών κυμάτων Vs = 250 m/s που βάσει του EC8 που χρησιμοποιούμε ανήκει στην κατηγορία C.

Η σχέση απόσβεσης που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό των PGA, $Sa_{0.3}$, $Sa_{1.0}$ είναι των Boore-Atkinson.

Το φάσμα απαίτησης θα κατασκευαστεί από το λογισμικό βάσει του EC8 για έδαφος κατηγορίας C βάσει των PGA που θα υπολογίσει (για τον EC8 χρειάζεται μόνο η PGA για να υπολογίσει τα φάσματα, έτσι το λογισμικό χρησιμοποιεί μόνο αυτήν).

Οι τύποι κτιρίων που θα χρησιμοποιηθούν στις έξι γεωγραφικές μονάδες είναι οι **32** βάσει της κατάταξης του HAZUS.

Οι καμπύλες ικανότητας του κάθε τύπου κτιρίου είναι αποθηκευμένες στον υποφάκελο capcurves.

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας έχει επιλεγεί να είναι η **MADRS (βελτίωση της CSM βάσει FEMA 440)**.

Εισαγωγή δεδομένων

3.2.1.1 Αρχεία δεδομένων που αφορούν ειδικά την ντετερμινιστική μέθοδο

1) Αρχείο **earthquake.txt**

Εισάγεται ο αριθμός σεισμικών σεναρίων και ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε σεναρίου.

Εισάγεται η θέση κάθε ρήγματος (γεωγραφικό πλάτος και μήκος σε μοίρες), το εστιακό βάθος του ρήγματος (σε km), ο προσανατολισμός του ρήγματος ως προς τον βορρά(οριζόντια γωνία ολίσθησης), ο κωδικός αντισεισμικού κανονισμού, η γωνία βύθισης(dip) και ο μηχανισμός ρήγματος.

2) Αρχείο **attenuation.txt**

Δηλώνεται ο κωδικός των σχέσεων απόσβεσης που θα χρησιμοποιηθούν και οι αντίστοιχοι συντελεστές βαρύτητας.

Μπορούμε δηλαδή να υπολογίσουμε τις τιμές PGA,Sa με περισσότερες από μια σχέσεις απόσβεσης και να δημιουργήσουμε διακλάδωση (υποσενάριο) με αντίστοιχο ποσοστό πιθανότητας μέσα σε κάθε σενάριο.

3.2.1.2 Αρχεία δεδομένων που είναι κοινά (αφορούν και τις 2 μεθόδους)

1) Αρχείο **cpfile.txt**

Δηλώνεται η μέθοδος υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας (MADRS ή I_DCM), σε τι μορφή θα υπολογιστούν οι βλάβες (σε απόλυτο αριθμό κτιρίων ή σε εμβαδόν επιφάνειας βλαβών σε m^2), και με ποια μέθοδο θα υπολογιστούν οι απώλειες ζωής(βασική ή HAZUS)**.**

2) Αρχείο **soilfiles.txt**

Πληροφορεί το λογισμικό σε ποιο ή ποια αρχεία **soilcenteri.txt** θα αναζητήσει τα χαρακτηριστικά του εδάφους κάθε γεωγραφικής μονάδας ανάλογα και τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας.

Αν έχουμε ένα σενάριο εδαφικών χαρακτηριστικών έχουμε ένα αρχείο **soilcenter1.txt** και συντελεστή βαρύτητας 100%.

Αν έχουμε περισσότερα εδαφικά σενάρια αντίστοιχα αρχεία **soilcenteri.txt** και καθορίζουμε και τους αντίστοιχους συντελεστές.

3) Αρχείο **soilcenteri.txt**

Το κάθε αρχείο, που αντιστοιχεί στο i σενάριο, περιέχει τον κωδικό κάθε γεωγραφικής μονάδας και τις συντεταγμένες του κεντροειδούς (γεωγραφικό πλάτος και μήκος σε μοίρες).

Σε κάθε γεωγραφική μονάδα δίνεται η κατηγορία εδάφους σύμφωνα με τον κανονισμό που έχουμε επιλέξει, η ταχύτητα Vs, δηλώνεται αν η Vs προέρχεται από μέτρηση ή εκτίμηση, και το βάθος της στρώσης του βράχου.

4) Αρχείο **vulnerfiles.txt**

Εισάγονται τα ονόματα των αρχείων που περιέχονται οι καμπύλες ικανότητας (capacityi.txt) και οι καμπύλες θραυστότητας (fragilityi.txt) για όλους τους τύπους κτιρίων.

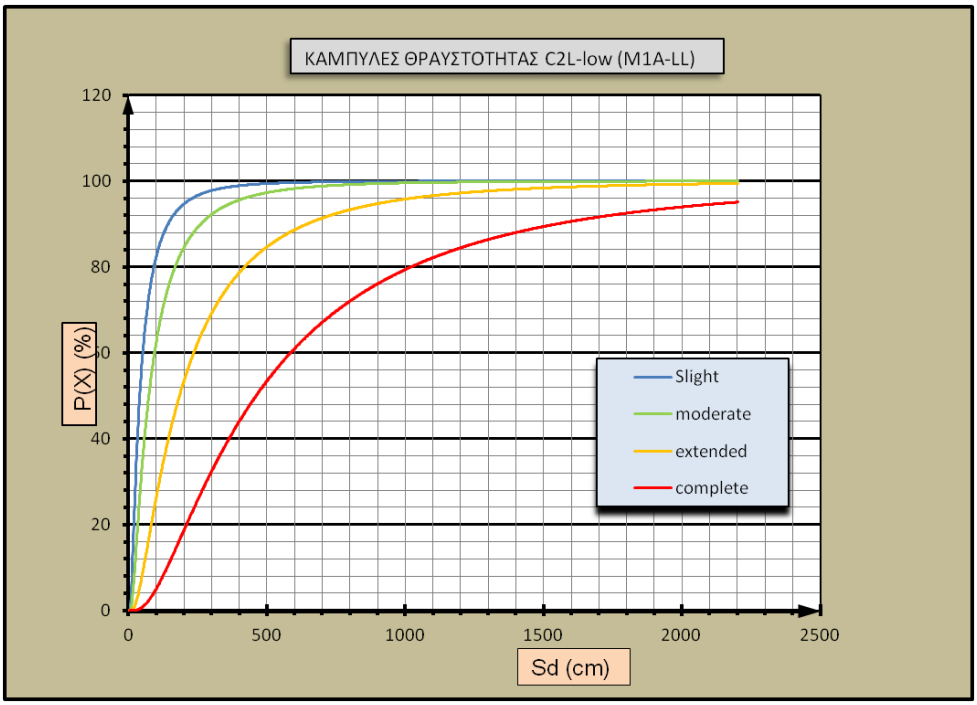
Υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν περισσότερα από ένα σενάρια καμπυλών ικανότητας και θραυστότητας με τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας.

5) Αρχείο **capacityi.txt**

Για κάθε τύπο κτιρίου περιέχει το όνομα του τύπου κτιρίου, το όνομα του αρχείου που περιέχει την καμπύλη ικανότητας του, την παραμόρφωση σε m που είναι το όριο ελαστικής συμπεριφοράς του κτιρίου και το συντελεστή απόσβεσης(%) του.

6) Αρχείο **fragility1.txt**

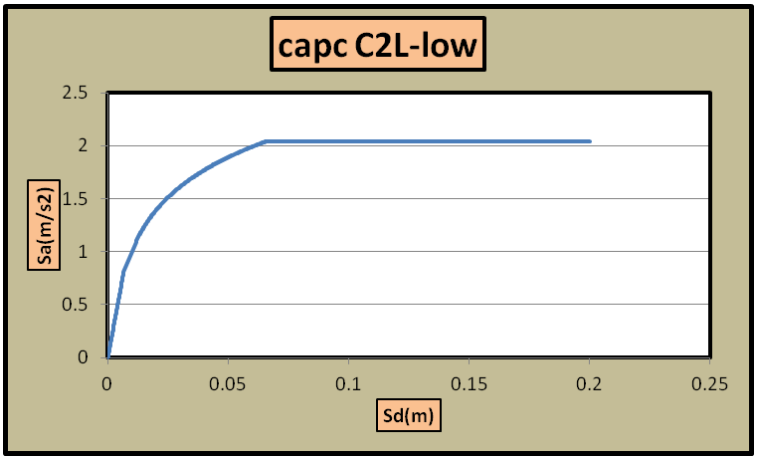
Για κάθε τύπο κτιρίου περιέχει τον α/α του τύπου κτιρίου και τις αντίστοιχες τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης του ορίου για τις 5 στάθμες βλάβης (none,S,M,E,C).



Σχήμα 3: σχεδίαση στο EXCEL των καμπυλών θραυστότητας του τύπου κτιρίου C2L-low

7) Αρχεία **capcurves**

Οι καμπύλες ικανότητας για κάθε τύπο περιέχονται στον υποφάκελο **capcurves** και σε κάθε τέτοιο αρχείο περιέχονται 2 στήλες. Η 1η στήλη αντιστοιχεί στην **Sd**(m) και η 2η στήλη την **Sa**(m/s^2). Για παράδειγμα από το αρχείο capc_C2L-low.txt σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το **EXCEL**, η αντίστοιχη καμπύλη ικανότητας (**Σχήμα 4**).



Σχήμα 4: σχεδίαση στο EXCEL της καμπύλης ικανότητας του τύπου κτιρίου C2L-low

8) από το αρχείο **builtarea.txt**

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει την συνολική δομική επιφάνεια (σε m^2) για κάθε ένα από τους 32 τύπους κτιρίων για όλες τις γεωγραφικές μονάδες.

9) από το αρχείο **numbuild.txt**

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τον συνολικό αριθμό κτιρίων, για κάθε ένα από τους 32 τύπους, για όλες τις γεωγραφικές μονάδες.

10) από το αρχείο **collapserate.txt**

Το αρχείο μας δίνει για κάθε τύπο κτιρίων το ποσοστό που θα καταρρεύσει από όσα θα φθάσουν στη στάθμη βλαβών C (complete).

11) από το αρχείο **population.txt**

Μας πληροφορεί για τον πληθυσμό που περιέχει κάθε γεωγραφική μονάδα, συνολικά και ανά κατηγορία κτιρίων.

12) από το αρχείο **poptime.txt**

Μας πληροφορεί για τα ποσοστά του πληθυσμού που παραμένουν στα κτίρια ή απουσιάζουν για διάφορες ώρες της ημέρας.

Υπάρχουν αρκετά αρχεία ακόμη που αφορούν τον πληθυσμό, τα κόστη, και τον όγκο των διάφορων υλικών ώστε να υπολογίζονται οι απώλειες ως προς το κόστος, τις απώλειες ζωής αλλά και τον όγκο των μπάζων που θα προκύψουν.

Ο καθορισμός των ορίων (μέσος όρος και τυπική απόκλιση) των 5σταθμών βλάβης για κάθε ένα από τους 32 τύπους κτιρίων έχει δοθεί στα αρχεία fragility1.txt και fragility2.txt, για κάθε σενάριο ξεχωριστά.

Ακολούθως θα αναλύσουμε τα input files ώστε να καθορίσουμε πώς εισάγονται τα δεδομένα .

Τα αρχεία διαχωρίζονται σε 2 κατηγορίες ,σε αυτά που αφορούν αποκλειστικά την κάθε μέθοδο και σε αυτά που είναι κοινά και για τις 2.

Με αυτά τα δεδομένα, και με τον τρόπο που περιγράφτηκε παραπάνω, εκτελέστηκε το SELENA.

Τα τελικά αποτελέσματα αποθηκεύονται αυτόματα στον υποφάκελο C:\SELENA6\example\output.

3.2.1.3 Αποτελέσματα του παραδείγματος της Ντετερμινιστικής Μεθόδου

Θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικότερα αρχεία αποτελεσμάτων και θα εξηγήσουμε τα περιεχόμενα τους.

1) Αρχείο **qmotionsceni.txt** που περιέχει για κάθε σενάριο για όλες τις γεωγραφικές μονάδες τις ελαστικές τιμές των PGA, $Sa_{0.3}$, $Sa_{1.0}$ που υπολογίστηκαν , τους συντελεστές ενίσχυσης, και τις ανελαστικές τιμές των PGA, $Sa_{0.3}$, $Sa_{1.0}$

%Geounit	Latitude	Longitude	soil	Vs30	PGA	Sa0_3	Sa1_0	fao	fas	fal	PGAamp	Sa_03amp	Sa1_0amp
1	44.481	26.064	3	250	0.1402	0.3505	0.1402	1.1	1.1	1.1	0.1612	0.4031	0.1612
2	44.455	26.136	3	250	0.1268	0.317	0.1268	1.1	1.1	1.1	0.1458	0.3646	0.1458
3	44.414	26.171	3	250	0.1175	0.2937	0.1175	1.1	1.1	1.1	0.1351	0.3378	0.1351
4	44.38	26.121	3	250	0.1194	0.2985	0.1194	1.1	1.1	1.1	0.1373	0.3433	0.1373
5	44.399	26.065	3	250	0.1288	0.3219	0.1288	1.1	1.1	1.1	0.1481	0.3702	0.1481
6	44.444	26.011	3	250	0.1426	0.3564	0.1426	1.1	1.1	1.1	0.1639	0.4098	0.1639

Σχήμα 5: αποτελέσματα του αρχείου qmotionscen1.txt για το 1° σενάριο

2) Αρχείο **ruptureplanei.txt** που περιέχει για κάθε σενάριο τις συντεταγμένες των ρηγμάτων και το εστιακό βάθος.

%Longitud	Latitude	Depth
26.7788	46.0168	35.1346
26.7788	46.0168	4.8654
24.3832	43.6212	4.8654
24.3832	43.6212	35.1346

Σχήμα 5: αποτελέσματα του αρχείου ruptureplane1.txt για το 1° σενάριο

3) Αρχείο **computeddisti.txt** που περιλαμβάνει για κάθε σενάριο όλων των ειδών τις αποστάσεις , ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις διάφορες σχέσεις απόσβεσης που μπορούν να επιλεγούν.

%Latitude	Longitud	depi	dhypo	djb	drup	azimuth	Fhw	Ztor	Rx	Rw
44.4811	26.064	53.5929	57.2031	56.0052	56.2161	1.5708	1	4.8654	56.0052	30.2691
44.4548	26.1361	59.7433	63.0021	62.7142	62.9026	1.5708	1	4.8654	62.7142	30.2691
44.414	26.1715	64.9027	67.9143	67.9168	68.0908	1.5708	1	4.8654	67.9168	30.2691
44.3797	26.1206	64.8944	67.9064	66.8018	66.9788	1.5708	1	4.8654	66.8018	30.2691
44.3992	26.0649	60.3897	63.6154	61.674	61.8656	1.5708	1	4.8654	61.674	30.2691
44.4438	26.0106	53.8149	57.4112	54.9119	55.127	1.5708	1	4.8654	54.9119	30.2691

Σχήμα 6: αποτελέσματα του αρχείου computeddist1.txt για το 1° σενάριο

4) Αρχείο **douti.txt** που περιέχει για κάθε σενάριο, σε όλες τις γεωγραφικές μονάδες,τις πιθανότητες(%) ώστε κάθε τύπος κτιρίου να φθάσει κάθε μια από τις 5 στάθμες βλάβης (none,S,M,E,C) .

%GEOUNIT	Lat	Lon	Soil	M1A-LL-N	M1A-LL-S	M1A-LL-M	M1A-LL-E	M1A-LL-C
1	44.481	26.064	3	0.5999	0.2129	0.157	0.0286	0.0017
2	44.455	26.136	3	0.6664	0.191	0.1231	0.0187	0.0009
3	44.414	26.171	3	0.7105	0.1736	0.1018	0.0136	0.0005
4	44.38	26.121	3	0.7022	0.177	0.1057	0.0144	0.0006
5	44.399	26.065	3	0.6566	0.1945	0.1279	0.02	0.001
6	44.444	26.011	3	0.5871	0.2165	0.1637	0.0308	0.0019

M1A-ML-N	M1A-ML-S	M1A-ML-M	M1A-ML-E	M1A-ML-C	M1A-HL-N	M1A-HL-S	M1A-HL-M	M1A-HL-E
0.3764	0.3062	0.2655	0.0401	0.0118	0.2726	0.3537	0.2946	0.0661
0.4486	0.2985	0.2182	0.027	0.0078	0.3316	0.3528	0.2549	0.0513
0.507	0.2857	0.1825	0.0192	0.0055	0.3749	0.347	0.2279	0.0427
0.4941	0.289	0.1902	0.0208	0.006	0.3655	0.3486	0.2335	0.0444
0.4374	0.3003	0.2253	0.0287	0.0083	0.3229	0.3535	0.2605	0.0533
0.362	0.3065	0.2753	0.0433	0.0128	0.2624	0.3529	0.3018	0.0691

M1A-HL-C	M1A-LM-N	M1A-LM-S	M1A-LM-M	M1A-LM-E	M1A-LM-C	M1A-MM-N	M1A-MM-S	M1A-MM-M
0.013	0.6828	0.2061	0.0945	0.0165	0.0002	0.5096	0.3304	0.1526
0.0095	0.7227	0.1855	0.079	0.0127	0.0001	0.5613	0.3101	0.1236
0.0075	0.7512	0.1699	0.0684	0.0104	0.0001	0.5999	0.2923	0.1043
0.0079	0.7453	0.1732	0.0706	0.0108	0.0001	0.5917	0.2962	0.1082
0.0099	0.7168	0.1887	0.0812	0.0132	0.0001	0.5534	0.3134	0.1278
0.0138	0.6759	0.2094	0.0973	0.0172	0.0002	0.5009	0.3333	0.1577

M1A-MM-E	M1A-MM-C	M1A-HM-N	M1A-HM-S	M1A-HM-M	M1A-HM-E	M1A-HM-C	M1B-LL-N	M1B-LL-S
0.0061	0.0014	0.2957	0.4217	0.26	0.0192	0.0034	0	0
0.004	0.0009	0.3518	0.4145	0.2179	0.0134	0.0024	0	0
0.0029	0.0007	0.3967	0.4034	0.1881	0.0101	0.0018	0	0
0.0031	0.0007	0.387	0.4061	0.1942	0.0107	0.0019	0	0
0.0043	0.001	0.343	0.4162	0.2241	0.0142	0.0025	0	0
0.0066	0.0015	0.2868	0.422	0.2672	0.0204	0.0036	0	0

M1B-LL-M	M1B-LL-E	M1B-LL-C	M1B-ML-N	M1B-ML-S	M1B-ML-M	M1B-ML-E	M1B-ML-C	M1B-HL-N
0	0	0	0.3821	0.2541	0.2776	0.0697	0.0165	0.3705
0	0	0	0.4863	0.2405	0.2166	0.0466	0.01	0.4418
0	0	0	0.5663	0.2207	0.1729	0.0333	0.0067	0.497
0	0	0	0.549	0.2256	0.1821	0.0359	0.0074	0.4852
0	0	0	0.4699	0.2436	0.2259	0.0497	0.0109	0.4307
0	0	0	0.3663	0.2547	0.2872	0.074	0.0178	0.3583

M1B-HL-S	M1B-HL-M	M1B-HL-E	M1B-HL-C	M1B-LM-N	M1B-LM-S	M1B-LM-M	M1B-LM-E	M1B-LM-C
0.2457	0.2865	0.0809	0.0164	0.8003	0.125	0.0692	0.0054	0.0001
0.2335	0.2501	0.063	0.0117	0.832	0.1086	0.0555	0.0038	0.0001
0.2202	0.2223	0.0515	0.009	0	0	0	0	0
0.2233	0.2282	0.0538	0.0095	0.8493	0.0992	0.0483	0.0031	0.0001
0.2358	0.2557	0.0655	0.0123	0.8273	0.1111	0.0575	0.004	0.0001
0.2471	0.2928	0.0844	0.0174	0.7947	0.1278	0.0717	0.0057	0.0001

M1B-MM-N	M1B-MM-S	M1B-MM-M	M1B-MM-E	M1B-MM-C	M1B-HM-N	M1B-HM-S	M1B-HM-M	M1B-HM-E
0.6736	0.2201	0.1027	0.0027	0.0009	0.4558	0.3051	0.2123	0.0228
0.7291	0.1911	0.0776	0.0016	0.0006	0.5182	0.2878	0.1745	0.0166
0.7669	0.1695	0.0621	0.0011	0.0005	0.5652	0.2713	0.1484	0.0129
0.7592	0.174	0.0652	0.0012	0.0005	0.5551	0.2751	0.1539	0.0136
0.7209	0.1956	0.0811	0.0018	0.0007	0.5086	0.2908	0.1801	0.0174
0.6639	0.2248	0.1074	0.0029	0.001	0.4456	0.3073	0.2188	0.024

M1B-HM-C	M1C-LP-N	M1C-LP-S	M1C-LP-M	M1C-LP-E	M1C-LP-C	M1C-MP-N	M1C-MP-S	M1C-MP-M
0.004	0.4155	0.2332	0.2333	0.1098	0.0082	0.1824	0.261	0.3674
0.0029	0.4929	0.2276	0.1968	0.0787	0.004	0.245	0.2883	0.3303
0.0022	0.543	0.2195	0.1729	0.0621	0.0024	0.298	0.3012	0.2964
0.0023	0.5329	0.2214	0.1777	0.0653	0.0027	0.2864	0.299	0.3039
0.003	0.4825	0.2289	0.2018	0.0825	0.0044	0.2346	0.2847	0.3368
0.0043	0.3957	0.2332	0.2423	0.119	0.0098	0.1724	0.2551	0.3727

M1C-MP-E	M1C-MP-C	M1C-HP-N	M1C-HP-S	M1C-HP-M	M1C-HP-E	M1C-HP-C	M1C-LL-N	M1C-LL-S
0.1455	0.0437	0.1105	0.2823	0.3931	0.1639	0.0502	0.5055	0.2405
0.1084	0.028	0.149	0.3136	0.364	0.1362	0.0372	0.5827	0.2225
0.0848	0.0196	0.1768	0.3297	0.3426	0.1202	0.0307	0.6344	0.2064
0.0895	0.0212	0.1708	0.3266	0.3472	0.1234	0.0319	0.6239	0.21
0.1138	0.0301	0.1426	0.3092	0.3689	0.1403	0.039	0.5718	0.2255
0.1527	0.0472	0.1049	0.2766	0.3972	0.1687	0.0526	0.4882	0.2434

M1C-LL-M	M1C-LL-E	M1C-LL-C	M1C-ML-N	M1C-ML-S	M1C-ML-M	M1C-ML-E	M1C-ML-C	M1C-HL-N
0.1879	0.0628	0.0033	0.2463	0.3053	0.351	0.0693	0.0281	0.1661
0.1504	0.0428	0.0016	0.319	0.3181	0.2998	0.0452	0.018	0.2172
0.1262	0.0321	0.0009	0.3727	0.3187	0.2626	0.0328	0.0131	0.2542
0.1311	0.0341	0.001	0.3609	0.3192	0.2706	0.0352	0.014	0.2466
0.1556	0.0453	0.0018	0.3085	0.3171	0.3071	0.048	0.0192	0.2089
0.1965	0.0681	0.0038	0.2353	0.302	0.3587	0.074	0.0301	0.1585

M1C-HL-S	M1C-HL-M	M1C-HL-E	M1C-HL-C	M2-LL-N	M2-LL-S	M2-LL-M	M2-LL-E	M2-LL-C
0.3348	0.3454	0.1208	0.0329	0.6257	0.148	0.1712	0.0537	0.0014
0.3552	0.3063	0.0973	0.024	0.6837	0.1338	0.1425	0.0392	0.0007
0.363	0.2797	0.0838	0.0194	0.7115	0.126	0.1288	0.0332	0.0005
0.3618	0.2851	0.0864	0.0202	0.7057	0.1277	0.1317	0.0344	0.0006
0.3528	0.3125	0.1007	0.0252	0.678	0.1353	0.1453	0.0405	0.0008
0.3305	0.3514	0.1249	0.0347	0.6145	0.1505	0.1767	0.0568	0.0015

M2-ML-N	M2-ML-S	M2-ML-M	M2-ML-E	M2-ML-C	M2-HL-N	M2-HL-S	M2-HL-M	M2-HL-E
0.3947	0.2245	0.3154	0.0534	0.012	0.3027	0.2612	0.3184	0.1008
0.4702	0.2222	0.2649	0.035	0.0076	0.3581	0.2627	0.2837	0.0826
0.5338	0.2142	0.223	0.0239	0.0052	0.4017	0.2601	0.2573	0.0706
0.5205	0.2163	0.2317	0.0259	0.0056	0.3923	0.2609	0.2629	0.0731
0.4572	0.2232	0.2736	0.0377	0.0083	0.3495	0.2628	0.2891	0.0852
0.383	0.224	0.3233	0.0569	0.0129	0.2938	0.2604	0.324	0.104

M2-HL-C	M2-LM-N	M2-LM-S	M2-LM-M	M2-LM-E	M2-LM-C	M2-MM-N	M2-MM-S	M2-MM-M
0.017	0.6983	0.1615	0.1162	0.0236	0.0005	0.4966	0.2543	0.2273
0.0129	0.7378	0.1455	0.098	0.0184	0.0003	0.5499	0.2415	0.1932
0.0104	0.7658	0.1333	0.0855	0.0152	0.0003	0.5897	0.2296	0.169
0.0109	0.76	0.1359	0.0881	0.0158	0.0003	0.5813	0.2323	0.174
0.0134	0.7319	0.1479	0.1007	0.0191	0.0004	0.5418	0.2437	0.1983
0.0178	0.6915	0.1641	0.1194	0.0245	0.0006	0.4878	0.2561	0.2332

M2-MM-E	M2-MM-C	M2-HM-N	M2-HM-S	M2-HM-M	M2-HM-E	M2-HM-C	M3-LL-N	M3-LL-S
0.0199	0.0018	0.298	0.3126	0.3437	0.0407	0.005	0.6635	0.1401
0.0142	0.0012	0.3526	0.3148	0.2994	0.0297	0.0035	0.7026	0.1305
0.0108	0.0009	0.3962	0.3119	0.2662	0.0231	0.0027	0.728	0.1234
0.0115	0.0009	0.3868	0.3128	0.2732	0.0244	0.0028	0.7227	0.125
0.015	0.0013	0.344	0.3149	0.3062	0.0312	0.0037	0.6973	0.1318
0.0211	0.0019	0.2894	0.3115	0.351	0.0428	0.0053	0.6545	0.1421

M3-LL-M	M3-LL-E	M3-LL-C	M3-ML-N	M3-ML-S	M3-ML-M	M3-ML-E	M3-ML-C	M3-LM-N
0.1511	0.0444	0.0009	0.4257	0.2169	0.2969	0.0504	0.0101	0.7248
0.1313	0.035	0.0006	0.5201	0.2095	0.2354	0.0294	0.0056	0.761
0.1186	0.0296	0.0004	0.5905	0.1966	0.1906	0.0188	0.0035	0.7866
0.1212	0.0307	0.0005	0.5761	0.1998	0.1996	0.0207	0.0039	0.7813
0.134	0.0362	0.0006	0.5051	0.2115	0.2451	0.0321	0.0062	0.7556
0.1557	0.0467	0.001	0	0	0	0	0	0.7185

M3-LM-S	M3-LM-M	M3-LM-E	M3-LM-C	M3-MM-N	M3-MM-S	M3-MM-M	M3-MM-E	M3-MM-C
0.1451	0.1082	0.0215	0.0004	0.5439	0.2383	0.1972	0.0194	0.0012
0.1303	0.0916	0.0168	0.0003	0.596	0.2232	0.166	0.014	0.0008
0.1192	0.0801	0.0139	0.0002	0.6343	0.21	0.1443	0.0107	0.0006
0.1216	0.0825	0.0144	0.0002	0.6263	0.2129	0.1488	0.0114	0.0006
0.1326	0.094	0.0175	0.0003	0.5881	0.2257	0.1706	0.0147	0.0009
0.1475	0.1111	0.0224	0.0004	0	0	0	0	0

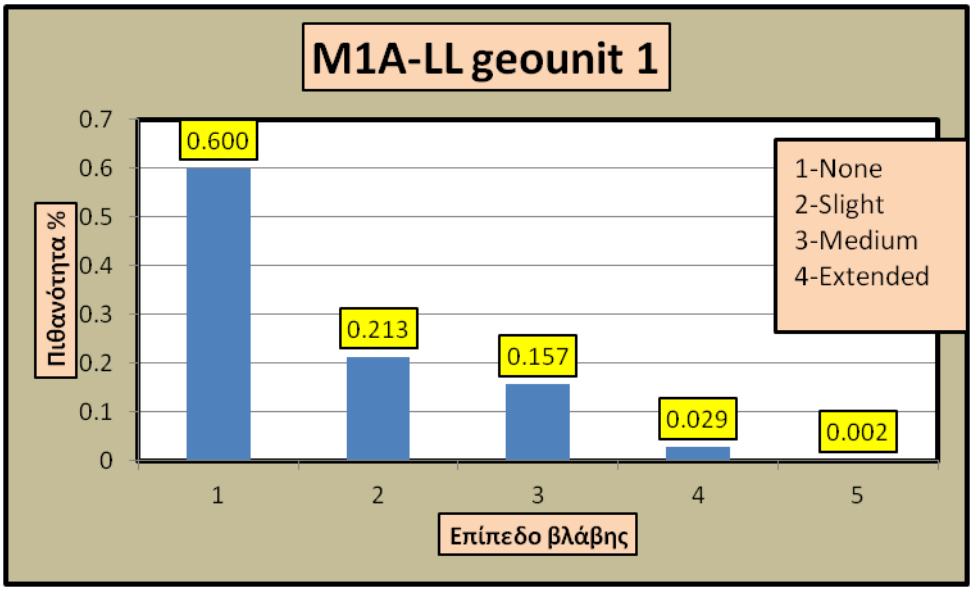
M4-LL-N	M4-LL-S	M4-LL-M	M4-LL-E	M4-LL-C	M4-LM-N	M4-LM-S	M4-LM-M	M4-LM-E
0.6316	0.2661	0.0912	0.0106	0.0005	0.6632	0.2672	0.0661	0.0028
0	0	0	0	0	0.7077	0.2377	0.0522	0.0019
0	0	0	0	0	0.7394	0.2155	0.0433	0.0014
0	0	0	0	0	0.7327	0.2202	0.0451	0.0015
0	0	0	0	0	0.701	0.2422	0.0542	0.002
0	0	0	0	0	0.6556	0.272	0.0686	0.0029

M4-LM-C	M5-LP-N	M5-LP-S	M5-LP-M	M5-LP-E	M5-LP-C	M5-LL-N	M5-LL-S	M5-LL-M
0.0008	0.3981	0.2381	0.2294	0.1018	0.0326	0.4812	0.2466	0.1953
0.0005	0.4352	0.2349	0.2143	0.0892	0.0264	0.5248	0.2364	0.1754
0.0004	0.4637	0.2312	0.2024	0.0803	0.0224	0.5577	0.2273	0.1605
0.0004	0.4576	0.2321	0.2049	0.0822	0.0232	0.5507	0.2293	0.1637
0.0006	0.4295	0.2355	0.2166	0.0911	0.0273	0.5182	0.2381	0.1784
0.0008	0.392	0.2384	0.2319	0.1039	0.0338	0.474	0.248	0.1987

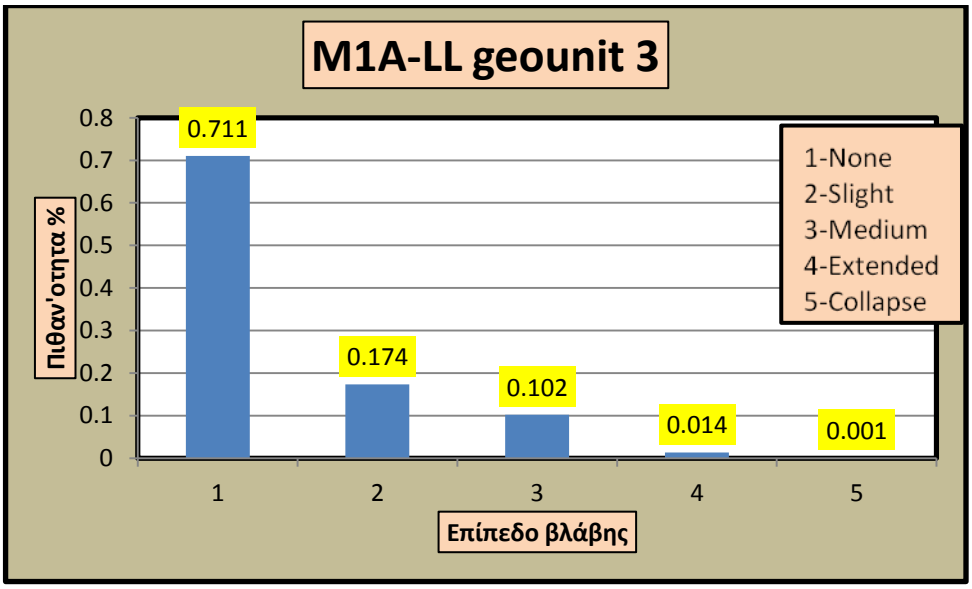
M5-LL-E	M5-LL-C	Numb
0.0637	0.0132	1
0.0533	0.0101	2
0.0463	0.0082	3
0.0478	0.0086	4
0.0548	0.0105	5
0.0656	0.0137	6

Σχήμα 7: Αποτελέσματα του αρχείου dout1.txt για το 1° σενάριο

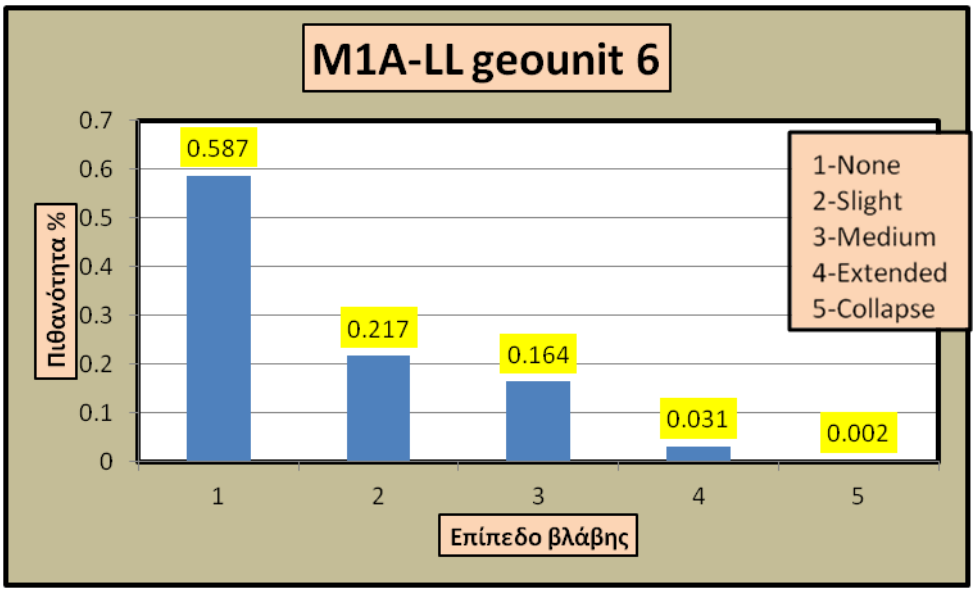
Ας επιλέξουμε εδώ σαν παράδειγμα από το 1° σενάριο ένα τύπο κτιρίων M1A-LL και ας κατασκευάσουμε στο EXCEL τα γραφήματα που αναπαριστούν την κατανομή πιθανοτήτων, των 5 σταθμών βλάβης, για 3 διαφορετικές γεωγραφικές μονάδες 1,3,6.



Σχήμα 8: κατανομή πιθανοτήτων βλάβης του M1A-LL της γεωγρ. Μονάδας 1 για το 1° σενάριο



Σχήμα 9: κατανομή πιθανοτήτων βλάβης του M1A-LL της γεωγρ. Μονάδας 3 για το 1^{ο} σενάριο



Σχήμα 10: κατανομή πιθανοτήτων βλάβης του M1A-LL της γεωγρ. Μονάδας 6 για το 1^{ο} σενάριο

Παρατηρούμε ότι ο ίδιος τύπος κτιρίου έχει διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε περιοχή.

Στην περιοχή 3 έχει μεγάλες πιθανότητες να μη παρουσιάσει βλάβες (71,05%) σε αντίθεση με τις περιοχές 1και 6 αντίστοιχα (59,99% - 58,71%).

Για ολική κατάρρευση στην περιοχή 1 έχουμε τις πιο μικρές πιθανότητες (0,05%) σε αντίθεση με τις 1 και 6 (0,17% - 0,19%).

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για τις ενδιάμεσες στάθμες βλάβης.

Είναι προφανές ότι για τον συγκεκριμένο τύπο κτιρίου οι περιοχές 1,6 έχουν τη δυσμενέστερη επίδραση.

Δημιουργώντας αντίστοιχα διαγράμματα για όλους τους τύπους κτιρίων και περιοχών μπορούμε να δούμε πώς εξελίσσεται το φαινόμενο των βλαβών λόγω του σεισμού του σεναρίου 1, ανάλογα τον τύπο κτιρίου ή τη γεωγραφική μονάδα.

5) Αντίστοιχα με το προηγούμενο είναι τα αρχεία **sqmctdouti.txt** και **nonctdouti.txt που** για κάθε σενάριο i, μας δίνει για κάθε τύπο κτιρίου για όλες τις περιοχές, το εμβαδόν της βλαμμένης επιφάνειας ή τον αριθμό βλαμμένων κτιρίων που αναλογούν σε κάθε μια από τις 5 στάθμες βλάβης.

%GEOUNIT	Lat	Lon	Soil	M1A-LL-N	M1A-LL-S	M1A-LL-M	M1A-LL-E	M1A-LL-C
1	44.481	26.064	3	1826.7	648.28	478.07	87.09	5.18
2	44.455	26.136	3	1452.75	416.38	268.36	40.77	1.96
3	44.414	26.171	3	1094.17	267.34	156.77	20.94	0.77
4	44.38	26.121	3	393.23	99.12	59.19	8.06	0.34
5	44.399	26.065	3	3877.22	1148.52	755.25	118.1	5.91
6	44.444	26.011	3	1080.26	398.36	301.21	56.67	3.5

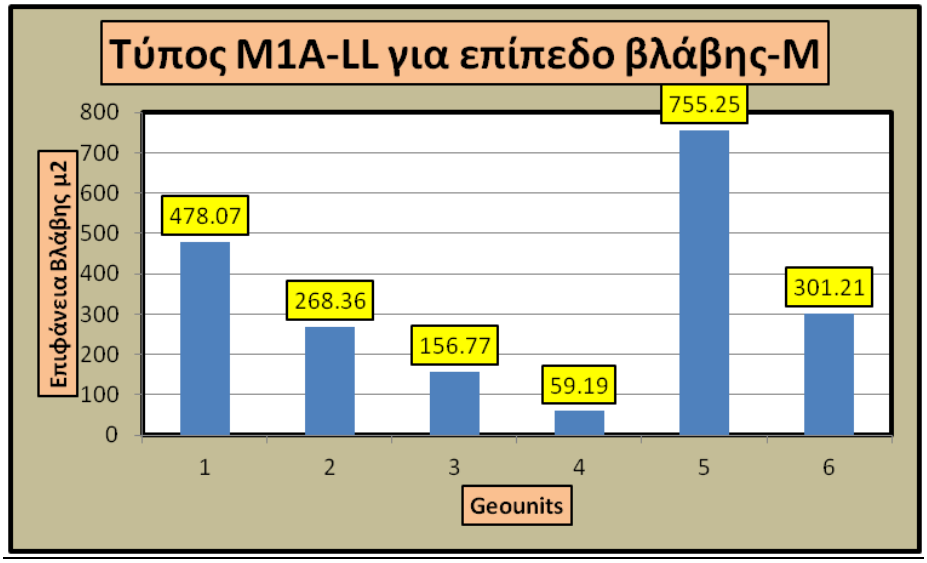
M1A-ML-N	M1A-ML-S	M1A-ML-M	M1A-ML-E	M1A-ML-C	M1A-HL-N	M1A-HL-S	M1A-HL-M	M1A-HL-E
12647.04	10288.32	8920.8	1347.36	396.48	42571.4	55236.62	46007.09	10322.7
20865.28	13883.83	10148.92	1255.82	362.79	302132.7	321448.8	232248.6	46741.28
131791.6	74266	47439.78	4990.92	1429.69	302958.2	280412.1	184166.9	34506.04
197572.8	115560.7	76054.13	8317.17	2399.18	231624.7	220914.8	147973.6	28137.17
78899.96	54169.32	40640.52	5177.02	1497.19	56595.33	61958.65	45658.36	9342
110667.7	93700.73	84162.51	13237.33	3913.11	243011.8	326824.9	279500.6	63994.34

M1A-HL-C	M1A-LM-N	M1A-LM-S	M1A-LM-M	M1A-LM-E	M1A-LM-C	M1A-MM-N	M1A-MM-S	M1A-MM-M
2030.18	2147.41	648.18	297.2	51.89	0.63	49618.73	32170.39	14858.36
8655.79	1329.77	341.32	145.36	23.37	0.18	27764.14	15338.79	6113.75
6060.78	736.18	166.5	67.03	10.19	0.1	76566.44	37306.83	13312.02
5006.39	1088.14	252.87	103.08	15.77	0.15	106506	53316	19476
1735.19	2960.38	779.33	335.36	54.52	0.41	38596.33	21857.77	8913.28
12780.35	6056.06	1876.22	871.81	154.11	1.79	157470.94	104781.52	49577.1

Σχήμα 11: Τμήμα αποτελεσμάτων του αρχείου sqmctdout1.txt για το 1° σενάριο

Σαν παράδειγμα σχεδιάστηκε για το 1° σενάριο η κατανομή της ποσότητας των βλαμμένων κτιρίων τύπου M1A-LL, με βλάβες στάθμης **moderate**, για τις 6 περιοχές (σχήμα 18).

Βλέπουμε εδώ πως στην περιοχή 5 αντιστοιχεί το μεγαλύτερο εμβαδόν βλαμμένης επιφάνειας, των κτιρίων τύπου M1A-LL που έχουν βλάβες στάθμης moderate που είναι 755,25 m^2.



Σχήμα 12: αποτελέσματα του αρχείου sqmctdout1.txt για το 1° σενάριο

6) Τα αρχεία **medianct.txt, 16prctilect.txt, 84 prctilect.txt** προκύπτουν μετά από στατιστική ανάλυση όλων των σεναρίων και καταλήγουν σε συνδυασμένες μέση τιμή και μέση τιμή±τυπική απόκλιση του εμβαδού βλαμμένης επιφάνειας ή του αριθμού βλαμμένων κτιρίων, αναλόγως τι έχουμε επιλέξει στο αρχείο cpfile.txt.

Οι παραπάνω τιμές κατανέμονται ανά γεωγραφική μονάδα, τύπο κτιρίου, και στάθμη βλάβης .

%GEOUNIT	Lat	Lon	Soil	M1A-LL-N	M1A-LL-S	M1A-LL-M	M1A-LL-E	M1A-LL-C
1	44.481	26.064	3	1739	671	525	104	7
2	44.455	26.136	3	1420	428	285	45	2
3	44.414	26.171	3	1077	274	165	23	1
4	44.38	26.121	3	386	102	62	9	0
5	44.399	26.065	3	3784	1180	803	131	7
6	44.444	26.011	3	1016	413	336	70	5

M1A-ML-N	M1A-ML-S	M1A-ML-M	M1A-ML-E	M1A-ML-C	M1A-HL-N	M1A-HL-S	M1A-HL-M	M1A-HL-E
11804	10275	9505	1554	462	39838	54924	47967	11182
20079	13995	10654	1384	402	290242	322132	240039	49520
127659	75254	49922	5511	1586	293705	281826	189824	36243
191175	116960	79953	9157	2639	224210	221897	152600	29626
75761	54548	42679	5727	1669	54212	62038	47245	9912
102291	93257	90032	15484	4647	226527	324371	291540	69458

M1A-HL-C	M1A-LM-N	M1A-LM-S	M1A-LM-M	M1A-LM-E	M1A-LM-C	M1A-MM-N	M1A-MM-S	M1A-MM-M
2257	2109	667	313	56	1	48148	32643	15754
9294	1313	350	152	25	0	27171	15584	6438
6465	729	171	70	11	0	75284	37913	13944
5355	1077	259	107	17	0	104625	54189	20421
1875	2921	800	351	58	0	37728	22206	9395
14216	5942	1931	918	167	2	152551	106306	52642

Σχήμα 13: Τμήμα αποτελεσμάτων του αρχείου medianct.txt.txt

7) Σύμφωνα με την **FEMA(2003)** ένας χρήσιμος συντελεστής για να μπορούμε να συγκρίνουμε την σεισμική διακινδύνευση ανάμεσα σε γεωγραφικές μονάδες μιας πόλης ή ανάμεσα σε πόλεις ή χώρες, είναι ο **μέσος συντελεστής βλάβης MDR** (mean damage ratio). Αυτός στη γενική του μορφή ορίζεται σαν :

$$\mathrm{MDR_i} = \frac{\sum_{j=1}^{mbt}(\mathrm{DR_S^j \cdot N_{Si}^j + DR_M^j \cdot N_{Mi}^j + DR_E^j \cdot N_{Ei}^j + DR_C^j \cdot N_{Ci}^j})}{\mathrm{N_{Ti}^j}}$$

Όπου

$\mathbf{DR_k^J}$ είναι ο συντελεστής βλάβης του τύπου κτιρίου **j** για την στάθμη βλάβης **k** (όπου κ αντιστοιχεί στα 4 επίπεδα βλάβης S,M,E,C)

$\mathbf{NK_{ki}^J}$ είναι το εμβαδόν της επιφάνειας βλάβης που αντιστοιχεί στην στάθμη βλάβης **κ** (κ= S,M,E,C), του τύπου κτιρίου **j** στην γεωγραφική μονάδα **i** .

$\mathbf{NK_{Ti}^J}$ είναι η συνολική επιφάνεια που αντιστοιχεί στον τύπο κτιρίου **j** στην γεωγραφική μονάδα **i** .

Τα δύο βασικά αρχεία αποτελεσμάτων που αναφέρονται στις βλάβες είναι τα **mdri.txt** και το **mdrtoti.txt**. Αφού έχουμε επιλέξει 2 σενάρια, υπάρχουν 2 αρχεία , ένα για κάθε σενάριο, δηλαδή τα **mdr1.txt, mdr2.txt, mdrtot1.txt, mdrtot2.txt.**

Στα **mdr1.txt, mdr2.txt ,** ένα για κάθε σενάριο, η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια γεωγραφική ομάδα , άρα έχουμε συνολικά 6 γραμμές.

Σε κάθε γραμμή η $1^η$ στήλη είναι για τον α/α γεωγραφικής μονάδας ,η $2^η$ στήλη για τον $\mathbf{MDR_i}$ δηλαδή του μέσου συντελεστή βλάβης ανά γεωγραφική μονάδα , και οι επόμενες 32 στήλες (μια για κάθε τύπο κτιρίου κατά HAZUS) όπου περιέχονται οι τιμές του $\mathbf{MDR_i^j}$ δηλαδή του μέσου συντελεστή βλάβης ανά γεωγραφική μονάδα και ανά τύπο κτιρίου (στήλες 3…j+1).

Στα **mdrtot1.txt, mdrtot2.txt ,** ένα για κάθε σενάριο, υπάρχει 1 γραμμή. Σε αυτήν υπάρχουν η $1^η$ στήλη για α/α γεωγραφικής μονάδας , η $2^η$ στήλη για **MDR** δηλαδή του συνολικού μέσου συντελεστή βλάβης για όλες τις γεωγραφικές μονάδες και όλους τους τύπους κτιρίων , και οι επόμενες 32 στήλες για $\mathbf{MDR^j}$ δηλαδή συνολικού μέσου συντελεστή βλάβης για κάθε τύπο κτιρίου.

Ακολουθούν τα αρχεία :

mdr1.txt (σενάριο 1)

Το αρχείο αυτό μας δίνει τον συντελεστή MDR ξεχωριστά για κάθε τύπο κτιρίου ανα γεωγραφική μονάδα για το σενάριο 1.

%GEOUNIT	MDRT	M1A-LL	M1A-ML	M1A-HL	M1A-LM	M1A-MM	M1A-HM	M1B-LL
1	0.073484	0.035958	0.064505	0.082625	0.022022	0.026303	0.047474	-1
2	0.066562	0.02638	0.049073	0.067734	0.01806	0.021449	0.039217	-1
3	0.063819	0.020952	0.039049	0.058615	0.015538	0.018414	0.033762	-1
4	0.065609	0.02191	0.041185	0.060458	0.016024	0.018982	0.034827	-1
5	0.072051	0.02768	0.051169	0.069708	0.018594	0.022185	0.040371	-1
6	0.090203	0.038	0.06809	0.085629	0.022718	0.027221	0.049	-1

M1B-ML	M1B-HL	M1B-LM	M1B-MM	M1B-HM	M1C-LP	M1C-MP	M1C-HP	M1C-LL
0.084172	0.090449	0.01222	0.016912	0.042763	0.091094	0.158383	0.177154	0.0583
0.059754	0.072911	0.009722	0.012974	0.034433	0.067582	0.120971	0.148018	0.04249
0.04504	0.061412	-1	0.010643	0.028941	0.05513	0.097641	0.131699	0.033698
0.048058	0.063715	0.008464	0.011093	0.030017	0.057548	0.102297	0.134897	0.03536
0.063195	0.075368	0.010072	0.013614	0.035554	0.070408	0.126349	0.152271	0.04452
0.088594	0.093858	0.012676	0.017676	0.044357	0.098194	0.165895	0.18225	0.062368

M1C-ML	M1C-HL	M2-LL	M2-ML	M2-HL	M2-LM	M2-MM	M2-HM	M3-LL
0.103932	0.134582	0.04833	0.074711	0.104503	0.02715	0.03955	0.066012	0.041012
0.076921	0.110427	0.037226	0.056017	0.08786	0.02221	0.032436	0.054623	0.03384
0.062115	0.096571	0.0325	0.043719	0.076666	0.019116	0.02778	0.047142	0.029528
0.065024	0.099188	0.033524	0.046031	0.078992	0.019728	0.028683	0.048611	0.03047
0.080231	0.1139	0.038286	0.058957	0.090202	0.022978	0.03349	0.056255	0.034736
0.108986	0.138946	0.05058	0.07814	0.107447	0.028072	0.040876	0.06807	0.042762

M3-ML	M3-LM	M3-MM	M4-LL	M4-LM	M5-LP	M5-LL
0.06931	0.024872	0.035372	0.020242	0.014144	0.111202	0.069495
0.048015	0.020466	0.028852	-1	0.011416	0.097128	0.059003
0.035879	0.017544	0.024569	-1	0.009732	0.087414	0.051932
0.038193	0.018082	0.025427	-1	0.010056	0.089432	0.053442
0.050974	0.021102	0.029811	-1	0.011855	0.09922	0.060487
-1	0.02566	-1	-1	0.01454	0.113708	0.071313

Σχήμα 14: τιμές του MDR ανά τύπο κτιρίου και γεωγρ. Μονάδας για το 1° σενάριο

mdr2.txt (σενάριο 2)

Το αρχείο αυτό μας δίνει τον συντελεστή MDR ξεχωριστά για κάθε τύπο κτιρίου ανα γεωγραφική μονάδα για το σενάριο 2.

%GEOUNIT	MDRT	M1A-LL	M1A-ML	M1A-HL	M1A-LM	M1A-MM	M1A-HM	M1B-LL
1	0.085493	0.046032	0.078017	0.093457	0.024546	0.029486	0.052966	-1
2	0.073146	0.03044	0.055788	0.073925	0.019802	0.023606	0.042886	-1
3	0.069138	0.023582	0.04431	0.063236	0.016792	0.019994	0.036572	-1
4	0.071614	0.024872	0.046574	0.065431	0.017414	0.020725	0.03782	-1
5	0.079723	0.032056	0.058462	0.076387	0.020432	0.024464	0.044321	-1
6	0.103531	0.050812	0.08402	0.097125	0.025402	0.030564	0.054844	-1

M1B-ML	M1B-HL	M1B-LM	M1B-MM	M1B-HM	M1C-LP	M1C-MP	M1C-HP	M1C-LL
0.099632	0.103505	0.013956	0.019673	0.048327	0.182804	0.1843	0.195564	0.07751
0.070458	0.080703	0.010834	0.014805	0.038181	0.07676	0.137954	0.161191	0.04908
0.052867	0.067212	-1	0.011737	0.031674	0.061192	0.109392	0.139854	0.037928
0.056228	0.06997	0.009334	0.012406	0.033019	0.064258	0.114908	0.14356	0.040084
0.074499	0.083714	0.01128	0.015383	0.03964	0.080448	0.144172	0.166165	0.05172
0.104598	0.10822	0.01453	0.020815	0.050255	0.18653	0.192173	0.201837	0.14005

M1C-ML	M1C-HL	M2-LL	M2-ML	M2-HL	M2-LM	M2-MM	M2-HM	M3-LL
0.123859	0.150163	0.056804	0.087657	0.116553	0.030412	0.044233	0.073405	0.048272
0.0881	0.121182	0.04163	0.064638	0.095221	0.02444	0.035573	0.05979	0.036692
0.069534	0.103126	0.034942	0.049734	0.082341	0.020684	0.030109	0.050964	0.031714
0.073085	0.106479	0.036098	0.052798	0.085011	0.02144	0.031223	0.052754	0.032696
0.093089	0.125423	0.043662	0.067674	0.098056	0.025354	0.036797	0.061683	0.037882
0.130938	0.155517	0.05985	0.09333	0.121003	0.03146	0.045895	0.075928	0.051142

M3-ML	M3-LM	M3-MM	M4-LL	M4-LM	M5-LP	M5-LL
0.08277	0.027782	0.039827	0.022474	0.015801	0.11996	0.07621
0.057587	0.022404	0.031769	-1	0.012609	0.103522	0.063672
0.041806	0.01895	0.02673	-1	0.010662	0.092386	0.055609
0.044664	0.019622	0.0278	-1	0.011028	0.094722	0.057241
0.061639	0.023134	0.032959	-1	0.013101	0.105894	0.065546
-1	0.028886	-1	-1	0.016431	0.123034	0.078416

Σχήμα 15: τιμές του MDR ανά τύπο κτιρίου και γεωγρ. Μονάδας για το 2^{ο} σενάριο

mdrtot1.txt (σενάριο 1)

Το αρχείο αυτό μας δίνει τον μέσο συντελεστή MDR όλων των περιοχών ξεχωριστά για κάθε τύπο κτιρίου για το σενάριο 1.

%GEOUNIT	MDRT	M1A-LL	M1A-ML	M1A-HL	M1A-LM	M1A-MM	M1A-HM	M1B-LL
1	0.071843	0.029523	0.049848	0.069746	0.020544	0.023246	0.040022	-1

M1B-ML	M1B-HL	M1B-LM	M1B-MM	M1B-HM	M1C-LP	M1C-MP	M1C-HP	M1C-LL
0.06117	0.074698	0.012232	0.014406	0.03524	0.074492	0.124592	0.151555	0.049938

M1C-ML	M1C-HL	M2-LL	M2-ML	M2-HL	M2-LM	M2-MM	M2-HM	M3-LL
0.087212	0.112177	0.040918	0.058233	0.091771	0.024186	0.035108	0.056273	0.035984

M3-ML	M3-LM	M3-MM	M4-LL	M4-LM	M5-LP	M5-LL
0.053213	0.022088	0.030692	0.020242	0.012351	0.098182	0.06015

Σχήμα 16: τιμές του MDR ανά τύπο κτιρίου συνολικά για το 1^{ο} σενάριο

mdrtot2.txt (σενάριο 2)

Το αρχείο αυτό μας δίνει τον μέσο συντελεστή MDR όλων των περιοχών ξεχωριστά για κάθε τύπο κτιρίου για το σενάριο 2.

%GEOUNIT	MDRT	M1A-LL	M1A-ML	M1A-HL	M1A-LM	M1A-MM	M1A-HM	M1B-LL
1	0.080171	0.035803	0.058391	0.076957	0.022788	0.025801	0.044	-1

M1B-ML	M1B-HL	M1B-LM	M1B-MM	M1B-HM	M1C-LP	M1C-MP	M1C-HP	M1C-LL
0.071965	0.083646	0.013977	0.016583	0.039249	0.109027	0.142169	0.164526	0.077418

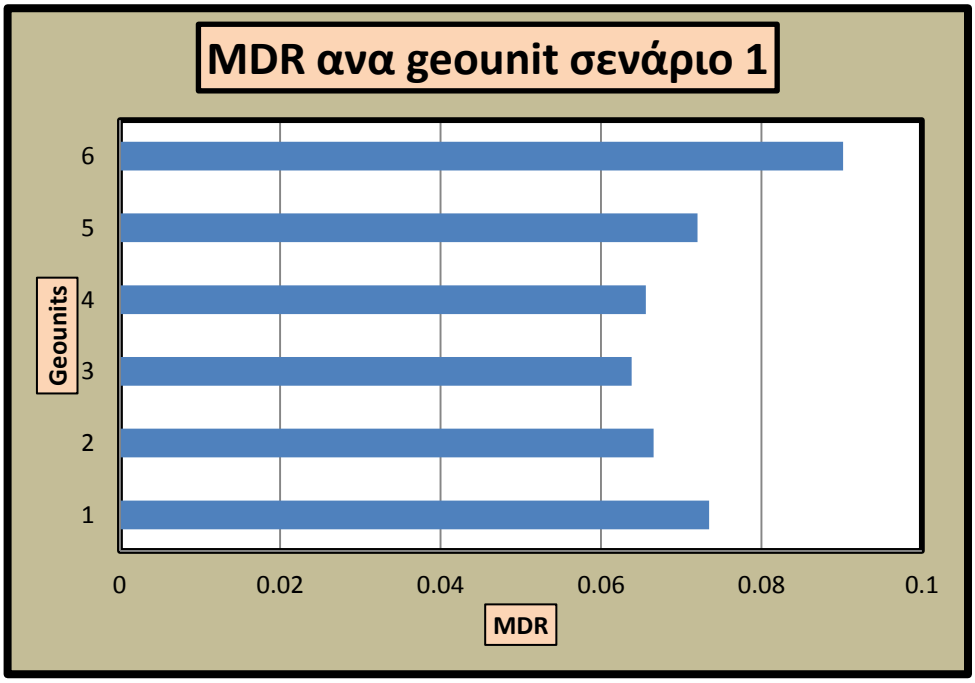
M1C-ML	M1C-HL	M2-LL	M2-ML	M2-HL	M2-LM	M2-MM	M2-HM	M3-LL
0.102238	0.122759	0.04672	0.067529	0.100737	0.026816	0.038877	0.061802	0.040465

M3-ML	M3-LM	M3-MM	M4-LL	M4-LM	M5-LP	M5-LL
0.063443	0.024419	0.034071	0.022474	0.013725	0.10479	0.065169

Σχήμα 17: Τιμές του MDR ανά τύπο κτιρίου συνολικά για το 2^{ο} σενάριο

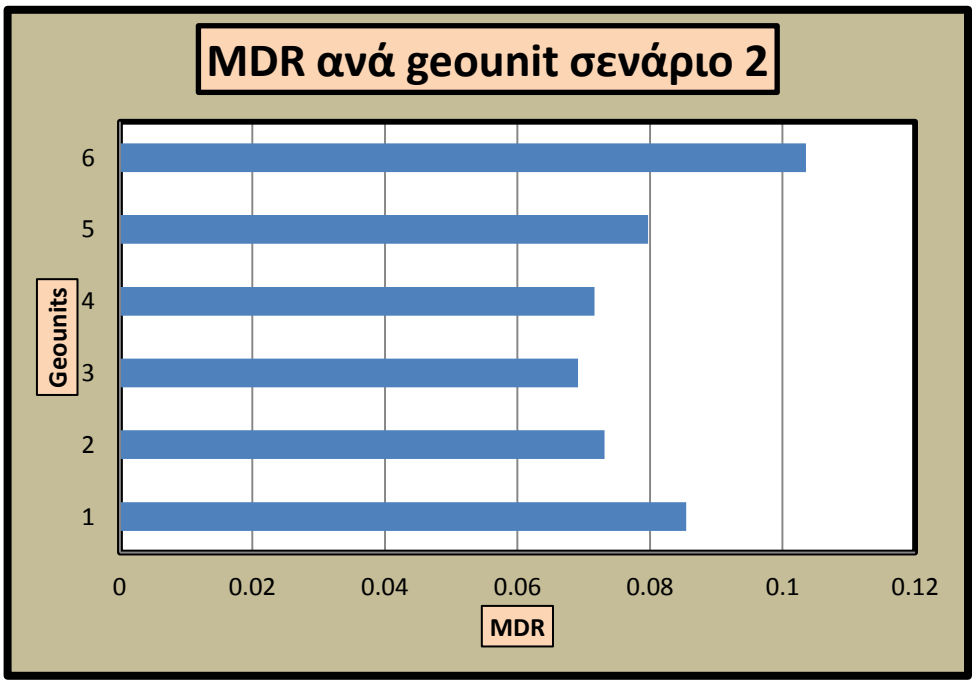
(Σημείωση η τιμή -1 σημαίνει ότι δεν υπάρχει κτίριο αυτού του τύπου σε αυτήν την γεωγραφική μονάδα. Ενώ τιμή 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει βλάβη)

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με **EXCEL** σχεδιάστηκαν τα σχήματα που ακολουθούν με σκοπό την αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Συνολικός MDR για το σενάριο 1 **MDR=0.0718**

Σχήμα 18: σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής του MDR ανά γεωγραφική μονάδα για το 1° σενάριο



Συνολικός MDR για το σενάριο 2 **MDR=0.0802**

Σχήμα 19: Σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής του MDR ανά γεωγραφική μονάδα για το 2° σενάριο

Βλέπουμε ότι με το σενάριο 2 έχουμε ελαφρώς μεγαλύτερη επιβάρυνση σε βλάβες καθώς **MDR_2 >MDR_1** .

Οι διαφορές των 2 σεναρίων είναι ότι το 1° είναι τύπου strike slip (0) με γωνία Dip 90^0 και το 2° είναι τύπου normal (1) με γωνία Dip 40^0. Επομένως η διαφορά στον **MDR** αποδίδεται στην διαφορά του μηχανισμού των ρηγμάτων.

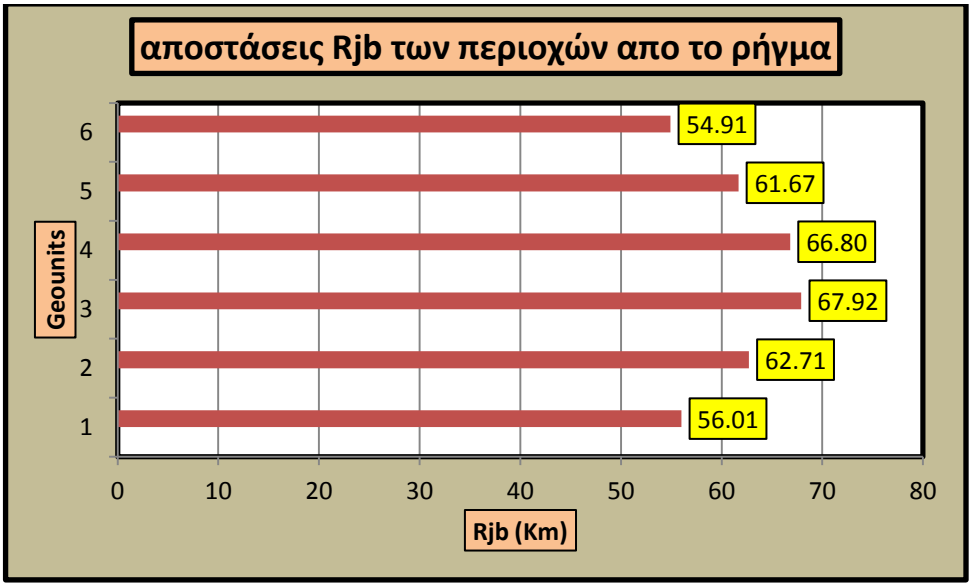
Επίσης και στα 2 σενάρια η περιοχή 6 έχει σημαντικά μεγαλύτερη επιβάρυνση (0,0902 και 0,1035) σε σχέση με τις άλλες περιοχές και ακολουθεί η περιοχή 1.

Ας ελέγξουμε την απόσταση της περιοχής 6 από το ρήγμα καθώς και τα εδαφικά χαρακτηριστικά και την κατανομή κτιρίων για να διερευνήσουμε τα αίτια αυτής της συμπεριφοράς.

Τα εδαφικά χαρακτηριστικά δεν πρέπει να επηρεάζουν καθώς όλες οι περιοχές έχουν δοθεί με τα ίδια Vs=250m/s που αντιστοιχεί στην κατηγορία εδάφους C.

Για να βρούμε την απόσταση των κεντροειδών των γεωγραφικών μονάδων από το ρήγμα θα ανατρέξουμε στο αρχείο **computeddisti.txt** στο οποίο έχουν υπολογισθεί όλων των τύπων οι αποστάσεις από το ρήγμα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα την σχέση απόσβεσης.

Θα επιλέξουμε την απόσταση **R_{JB}**, κατά **Joyner–Boore**, αφού χρησιμοποιείται στην σχέση απόσβεσης **Boore-Atkinson** που έχει επιλεγεί (Σχήμα 27**)**.



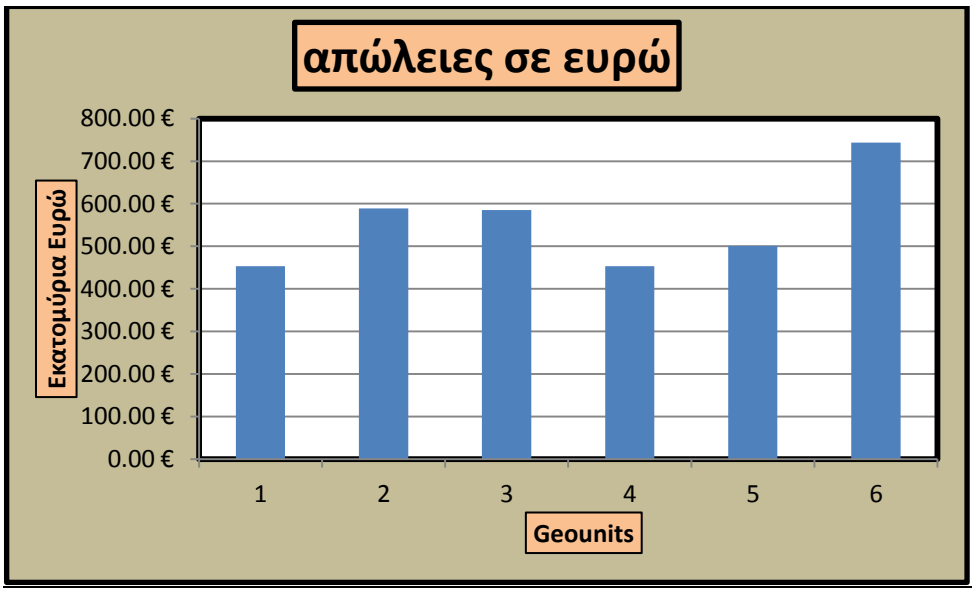
Σχήμα 20: Απόσταση γεωγραφικών μονάδων κατά Joyner-Boore από το ρήγμα

Η απόσταση φαίνεται να επηρεάζει όπως βλέπουμε και στο παραπάνω σχήμα, που δείχνει ότι οι περιοχές 6 και 1 είναι κοντινότερα στο ρήγμα.

Για να βρούμε την κατανομή των διαφόρων τύπων κτιρίων σε κάθε γεωγραφική μονάδα θα ανατρέξουμε στα αρχεία δεδομένων **builtarea.txt** που περιέχει το εμβαδόν (σε m^2) του κάθε τύπου κτιρίου στην κάθε γεωγραφική μονάδα ή στο αρχείο **numbuild.txt** που περιέχει τον αριθμό τύπων κτιρίου σε κάθε γεωγραφική μονάδα.

Βρίσκοντας ποια περιοχή έχει τα πιο ευπαθή κτίρια μπορούμε να ερμηνεύσουμε την τιμή του MDR της κάθε περιοχής.

8) το αρχείο **eclossei.txt** μας δίνει για κάθε σεισμικό σενάριο i, τις συνολικές οικονομικές απώλειες, που προέκυψαν από τις βλάβες, για κάθε γεωγραφική μονάδα.



Σχήμα 21: Σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής οικονομικών απωλειών ανά γεωγραφική μονάδα για το 1° σενάριο

Από το παραπάνω γράφημα αποκτούμε εικόνα της οικονομικής επιβάρυνσης ανά περιοχή.

Φαίνεται ότι η περιοχή 6 έχει τις περισσότερες οικονομικές απώλειες που ήταν φυσικό διότι εκεί υπήρχαν οι περισσότερες βλάβες.

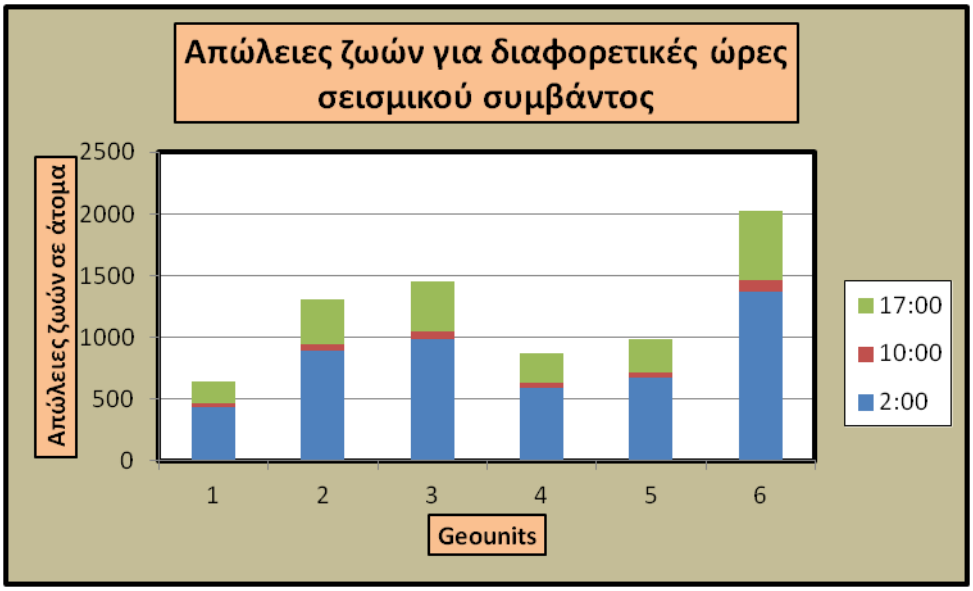
Στην περιοχή 1 όμως βλέπουμε ότι έχουμε τις λιγότερες οικονομικές απώλειες παρότι σε αυτή την περιοχή είχαμε επίσης μεγάλες βλάβες.

Μια εξήγηση θα ήταν ότι υπάρχει διαφορετική κατανομή κτιρίων με διαφορετικό κόστος.

9) το αρχείο **totalinjuri.txt** μας δίνει για κάθε σεισμικό σενάριο i, τις συνολικές απώλειες ζωής(συνολικά από ελαφρά τραυματίες μέχρι νεκρούς), που προέκυψαν από τις βλάβες, για κάθε γεωγραφική μονάδα. Οι υπολογισμοί γίνονται για 3 διαφορετικές ώρες της ημέρας βραδινή 2:00, πρωινή 10:00 και απογευματινή 17:00. (Σχήματα 23-24).

%GEOUNIT	INJUR_2:00	INJUR_10:00	INJUR_17:00
1	438.4	29.5	176.9
2	889.3	60.3	362
3	985.5	66.7	400
4	594	40	240.1
5	670.1	45.4	272.1
6	1374.8	92.6	555.9

Σχήμα 22: Αρχείο totalinjur1.txt απωλειών ζωής ανά γεωγραφική μονάδα και ώρα συμβάντος για το 1° σενάριο



Σχήμα 23: σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής απωλειών ζωής ανά γεωγραφική μονάδα και ώρα συμβάντος για το 1° σενάριο

Φαίνεται ότι η βραδινή ώρα συμβάντος είναι η δυσμενέστερη σε απώλειες ζωής , που είναι φυσιολογικό αποτέλεσμα καθώς είναι η ώρα με την μεγαλύτερη συγκέντρωση πληθυσμού στα κτίρια της περιοχής.

Αντίθετα η πρωινή έχει τις λιγότερες γιατί είναι η ώρα με τις λιγότερες παρουσίες πληθυσμού στην περιοχή.

Και εδώ φαίνεται ότι η περιοχή 6 έχει τις περισσότερες απώλειες ζωής που συμφωνεί με το αντίστοιχο ποσοστό βλάβης της περιοχής.

Στην περιοχή 1 όμως δεν έχουμε την ίδια αντιστοιχία καθώς παρατηρείται ότι έχει τις λιγότερες απώλειες ζωής.

Αυτό μπορεί ίσως να εξηγηθεί από την πυκνότητα πληθυσμού της περιοχής και την χρήση των κτιρίων που την αποτελούν(όσον αφορά την χρονική περίοδο παρουσίας των κατοίκων).

3.2.2. Επίλυση με την Πιθανοκρατική Μέθοδο

Εδώ το σεισμικό γεγονός δηλώνεται από τις φασματικές τιμές PGA,$Sa_{0.30}$, $Sa_{1.00}$ που αντιστοιχούν σε κάθε γεωγραφική μονάδα. Αυτές παρέχονται από σεισμικούς χάρτες των περιοχών.

Στην πιθανοκρατική μέθοδο πρέπει να εισάγουμε αυτές τις τιμές μέσω των αρχείων **shakefiles.txt και shakecenteri.txt.**

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι τύποι κτιρίων οι καμπύλες ικανότητας , οι καμπύλες θραυστότητας, τα όρια βλάβης , οι κατανομές τύπων κτιρίων και πληθυσμών ανά περιοχή καθώς και τα δεδομένα και οι σχέσεις που αφορούν απώλειες παραμένουν ίδια με του πρώτου παραδείγματος.

Εδώ θα έχουμε 1 σενάριο.

Αυτό εκφράζεται με τις τιμές **PGA**=0.2548 και $\mathbf{Sa_{0.3}}$ =0,316, $\mathbf{Sa_{1.0}}$=0,0866 που είναι ίδιες και για τις 6 περιοχές.

Το έδαφος και των 6 περιοχών είναι κατηγορίας C.

Η σχέση υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας θα είναι και εδώ η MADRS.

Εισαγωγή δεδομένων

Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται στα παρακάτω αρχεία.

3.2.2.1 Αρχεία δεδομένων που αφορούν ειδικά την Πιθανοκρατική μέθοδο

1) Αρχείο **shakefiles.txt**

Περιέχεται τα ονόματα των αρχείων shakecenteri.txt για κάθε σενάριο, τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας και τον κωδικό του κανονισμού που θα χρησιμοποιήσουμε.

2) Αρχεία **shakecenteri.txt**

Αντιστοιχεί ένα αρχείο σε κάθε i σενάριο.

Το κάθε αρχείο περιέχει το όνομα και τις συντεταγμένες της κάθε γεωγραφικής μονάδας.

Σε κάθε γεωγραφική μονάδα εισάγεται η αντίστοιχη κατηγορία εδάφους βάσει του κανονισμού που έχουμε ορίσει, η ταχύτητα Vs, και η σεισμική διέγερση σαν PGA,$Sa_{0.30}$,$Sa_{1.00}$.

3.2.2.2 Αρχεία δεδομένων που είναι κοινά και στις 2 μεθόδους

1) Αρχείο **cpfile.txt**

Δηλώνεται η μέθοδος υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας (MADRS ή I_DCM), σε τι μορφή θα υπολογιστούν οι βλάβες (σε απόλυτο αριθμό κτιρίων ή σε εμβαδόν επιφάνειας βλαβών σε m^2), και με ποια μέθοδο θα υπολογιστούν οι απώλειες ζωής(βασική ή HAZUS).

2) Αρχείο **soilfiles.txt**

Πληροφορεί το λογισμικό σε ποιο ή ποια αρχεία **soilcenteri.txt** θα αναζητήσει τα χαρακτηριστικά του εδάφους κάθε γεωγραφικής μονάδας ανάλογα και τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας.

Αν έχουμε ένα σενάριο εδαφικών χαρακτηριστικών έχουμε ένα αρχείο **soilcenter1.txt** και συντελεστή βαρύτητας 100%.

Αν έχουμε περισσότερα εδαφικά σενάρια αντίστοιχα αρχεία **soilcenteri.txt** και καθορίζουμε και τους αντίστοιχους συντελεστές.

3) Αρχείο **soilcenteri.txt**

Το κάθε αρχείο, που αντιστοιχεί στο i σενάριο, περιέχει τον κωδικό κάθε γεωγραφικής μονάδας και τις συντεταγμένες του κεντροειδούς (γεωγραφικό πλάτος και μήκος σε μοίρες).

Σε κάθε γεωγραφική μονάδα δίνεται η κατηγορία εδάφους σύμφωνα με τον κανονισμό που έχουμε επιλέξει, η ταχύτητα Vs, δηλώνεται αν η Vs προέρχεται από μέτρηση ή εκτίμηση, και το βάθος της στρώσης του βράχου.

4) Αρχείο **vulnerfiles.txt**

Εισάγονται τα ονόματα των αρχείων που περιέχονται οι καμπύλες ικανότητας (capacityi.txt) και οι καμπύλες θραυστότητας (fragilityi.txt) για όλους τους τύπους κτιρίων.

Υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν περισσότερα από ένα σενάρια καμπυλών ικανότητας και θραυστότητας με τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας.

5) Αρχείο **capacityi.txt**

Για κάθε τύπο κτιρίου περιέχει το όνομα του τύπου κτιρίου, το όνομα του αρχείου που περιέχει την καμπύλη ικανότητας του, την παραμόρφωση σε m που είναι το όριο ελαστικής συμπεριφοράς του κτιρίου και το συντελεστή απόσβεσης(%) του.

6) Αρχείο **fragilityi.txt**

Για κάθε τύπο κτιρίου περιέχει τον α/α του τύπου κτιρίου και τις αντίστοιχες τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης του ορίου για τις 5 στάθμες βλάβης (none,S,M,E,C).

7) Αρχεία **capcurves**

Οι καμπύλες ικανότητας για κάθε τύπο περιέχονται στον υποφάκελο **capcurves** και σε κάθε τέτοιο αρχείο περιέχονται 2 στήλες.

Η $1^{η}$ στήλη αντιστοιχεί στην Sd(σε m) και η $2^{η}$ στήλη την Sa(σε m/s^2)

8) από το αρχείο **builtarea.txt**

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει την συνολική δομική επιφάνεια (σε m^2) για κάθε ένα από τους 32 τύπους κτιρίων για όλες τις γεωγραφικές μονάδες.

9) από το αρχείο **numbuild.txt**

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τον συνολικό αριθμό κτιρίων, για κάθε ένα από τους 32 τύπους, για όλες τις γεωγραφικές μονάδες.

10) από το αρχείο **collapserate.txt**

Το αρχείο μας δίνει για κάθε τύπο κτιρίων το ποσοστό που θα καταρρεύσει από όσα θα φθάσουν στη στάθμη βλαβών C (complete).

11) από το αρχείο **population.txt**

Μας πληροφορεί για τον πληθυσμό που περιέχει κάθε γεωγραφική μονάδα, συνολικά και ανά κατηγορία κτιρίων.

12) από το αρχείο **poptime.txt**

Μας πληροφορεί για τα ποσοστά του πληθυσμού που παραμένουν στα κτίρια ή απουσιάζουν για διάφορες ώρες της ημέρας.

Υπάρχουν αρκετά αρχεία ακόμη που αφορούν τον πληθυσμό, τα κόστη, και τον όγκο των διάφορων υλικών ώστε να υπολογίζονται οι απώλειες ως προς το κόστος, τις απώλειες ζωής αλλά και τον όγκο των μπαζών που θα προκύψουν.

Βάσει του τρόπου που αναφέραμε παραπάνω εκτελούμε το SELENA με την επιλογή **p** που αντιστοιχεί στην πιθανοκρατική μέθοδο. Στο τέλος της εκτέλεσης το MATLAB εμφανίζει Στο τέλος της εκτέλεσης το MATLAB μας πληροφορεί ότι εκτέλεσε το υπολογισμό και σε ποια αρχεία αποθήκευσε τα αποτελέσματα.

3.2.2.3 Αποτελέσματα παραδείγματος της Πιθανοκρατικής Μεθόδου

Θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικότερα αρχεία αποτελεσμάτων και θα εξηγήσουμε τα περιεχόμενα τους.

1) Αρχείο **gmotionscen1.txt** που περιέχει για όλες τις γεωγραφικές μονάδες τις ελαστικές τιμές των PGA, $Sa_{0.3}$, $Sa_{1.0}$ που υπολογίστηκαν , τους συντελεστές ενίσχυσης, και τις ανελαστικές τιμές των PGA, $Sa_{0.3}$, $Sa_{1.0}$

%Geounit	Latitude	Longitude	soil	Vs30	PGA	Sa0_3	Sa1_0	fao	fas	fal	PGAamp	Sa_03amp	Sa1_0amp
1	44.481	26.064	3	250	0.2548	0.637	0.2548	1.1	1.1	1.1	0.293	0.7326	0.293
2	44.455	26.136	3	250	0.2548	0.637	0.2548	1.1	1.1	1.1	0.293	0.7326	0.293
3	44.414	26.171	3	250	0.2548	0.637	0.2548	1.1	1.1	1.1	0.293	0.7326	0.293
4	44.38	26.121	3	250	0.2548	0.637	0.2548	1.1	1.1	1.1	0.293	0.7326	0.293
5	44.399	26.065	3	250	0.2548	0.637	0.2548	1.1	1.1	1.1	0.293	0.7326	0.293
6	44.444	26.011	3	250	0.2548	0.637	0.2548	1.1	1.1	1.1	0.293	0.7326	0.293

Σχήμα 24: αποτελέσματα του αρχείου gmotionscen1.txt για το 1° σενάριο

2) Αρχείο **dout1.txt** που περιέχει τις πιθανότητες(%) για κάθε τύπο κτιρίου να φθάσει κάθε μια από τις 5 στάθμες βλάβης (none,S,M,E,C) για όλες τις γεωγραφικές μονάδες.

%GEOUNIT	Lat	Lon	Soil	M1A-LL-N	M1A-LL-S	M1A-LL-M	M1A-LL-E	M1A-LL-C
1	44.481	26.064	3	0.1285	0.171	0.3634	0.2589	0.0783
2	44.455	26.136	3	0.1285	0.171	0.3634	0.2589	0.0783
3	44.414	26.171	3	0.1285	0.171	0.3634	0.2589	0.0783
4	44.38	26.121	3	0.1285	0.171	0.3634	0.2589	0.0783
5	44.399	26.065	3	0.1285	0.171	0.3634	0.2589	0.0783
6	44.444	26.011	3	0.1285	0.171	0.3634	0.2589	0.0783

M1A-ML-N	M1A-ML-S	M1A-ML-M	M1A-ML-E	M1A-ML-C	M1A-HL-N	M1A-HL-S	M1A-HL-M	M1A-HL-E
0.0663	0.1624	0.4354	0.2351	0.1008	0.0229	0.1419	0.4469	0.2787
0.0663	0.1624	0.4354	0.2351	0.1008	0.0229	0.1419	0.4469	0.2787
0.0663	0.1624	0.4354	0.2351	0.1008	0.0229	0.1419	0.4469	0.2787
0.0663	0.1624	0.4354	0.2351	0.1008	0.0229	0.1419	0.4469	0.2787
0.0663	0.1624	0.4354	0.2351	0.1008	0.0229	0.1419	0.4469	0.2787
0.0663	0.1624	0.4354	0.2351	0.1008	0.0229	0.1419	0.4469	0.2787

M1A-HL-C	M1A-LM-N	M1A-LM-S	M1A-LM-M	M1A-LM-E	M1A-LM-C	M1A-MM-N	M1A-MM-S	M1A-MM-M
0.1096	0.3867	0.3035	0.2359	0.0714	0.0025	0.1658	0.3081	0.4317
0.1096	0.3867	0.3035	0.2359	0.0714	0.0025	0.1658	0.3081	0.4317
0.1096	0.3867	0.3035	0.2359	0.0714	0.0025	0.1658	0.3081	0.4317
0.1096	0.3867	0.3035	0.2359	0.0714	0.0025	0.1658	0.3081	0.4317
0.1096	0.3867	0.3035	0.2359	0.0714	0.0025	0.1658	0.3081	0.4317
0.1096	0.3867	0.3035	0.2359	0.0714	0.0025	0.1658	0.3081	0.4317

M1A-MM-E	M1A-MM-C	M1A-HM-N	M1A-HM-S	M1A-HM-M	M1A-HM-E	M1A-HM-C	M1B-LL-N	M1B-LL-S
0.0765	0.0179	0.0706	0.2993	0.4989	0.1084	0.023	0	0
0.0765	0.0179	0.0706	0.2993	0.4989	0.1084	0.023	0	0
0.0765	0.0179	0.0706	0.2993	0.4989	0.1084	0.023	0	0
0.0765	0.0179	0.0706	0.2993	0.4989	0.1084	0.023	0	0
0.0765	0.0179	0.0706	0.2993	0.4989	0.1084	0.023	0	0
0.0765	0.0179	0.0706	0.2993	0.4989	0.1084	0.023	0	0

M1B-LL-M	M1B-LL-E	M1B-LL-C	M1B-ML-N	M1B-ML-S	M1B-ML-M	M1B-ML-E	M1B-ML-C	M1B-HL-N
0	0	0	0.0593	0.1352	0.4323	0.2617	0.1114	0.038
0	0	0	0.0593	0.1352	0.4323	0.2617	0.1114	0.038
0	0	0	0.0593	0.1352	0.4323	0.2617	0.1114	0.038
0	0	0	0.0593	0.1352	0.4323	0.2617	0.1114	0.038
0	0	0	0.0593	0.1352	0.4323	0.2617	0.1114	0.038
0	0	0	0.0593	0.1352	0.4323	0.2617	0.1114	0.038

M1B-HL-S	M1B-HL-M	M1B-HL-E	M1B-HL-C	M1B-LM-N	M1B-LM-S	M1B-LM-M	M1B-LM-E	M1B-LM-C
0.1324	0.3937	0.2986	0.1374	0.2473	0.226	0.3762	0.1339	0.0166
0.1324	0.3937	0.2986	0.1374	0.2473	0.226	0.3762	0.1339	0.0166
0.1324	0.3937	0.2986	0.1374	0	0	0	0	0
0.1324	0.3937	0.2986	0.1374	0.2473	0.226	0.3762	0.1339	0.0166
0.1324	0.3937	0.2986	0.1374	0.2473	0.226	0.3762	0.1339	0.0166
0.1324	0.3937	0.2986	0.1374	0.2473	0.226	0.3762	0.1339	0.0166

M1B-MM-N	M1B-MM-S	M1B-MM-M	M1B-MM-E	M1B-MM-C	M1B-HM-N	M1B-HM-S	M1B-HM-M
0.1248	0.2365	0.4989	0.1097	0.0302	0.1206	0.2478	0.4749
0.1248	0.2365	0.4989	0.1097	0.0302	0.1206	0.2478	0.4749
0.1248	0.2365	0.4989	0.1097	0.0302	0.1206	0.2478	0.4749
0.1248	0.2365	0.4989	0.1097	0.0302	0.1206	0.2478	0.4749
0.1248	0.2365	0.4989	0.1097	0.0302	0.1206	0.2478	0.4749
0.1248	0.2365	0.4989	0.1097	0.0302	0.1206	0.2478	0.4749

M1B-HM-E	M1B-HM-C	M1C-LP-N	M1C-LP-S	M1C-LP-M	M1C-LP-E	M1C-LP-C	M1C-MP-N	M1C-MP-S
0.1267	0.0301	0.0743	0.1119	0.2784	0.3262	0.2092	0.0258	0.0833
0.1267	0.0301	0.0743	0.1119	0.2784	0.3262	0.2092	0.0258	0.0833
0.1267	0.0301	0.0743	0.1119	0.2784	0.3262	0.2092	0.0258	0.0833
0.1267	0.0301	0.0743	0.1119	0.2784	0.3262	0.2092	0.0258	0.0833
0.1267	0.0301	0.0743	0.1119	0.2784	0.3262	0.2092	0.0258	0.0833
0.1267	0.0301	0.0743	0.1119	0.2784	0.3262	0.2092	0.0258	0.0833

M1C-MP-M	M1C-MP-E	M1C-MP-C	M1C-HP-N	M1C-HP-S	M1C-HP-M	M1C-HP-E	M1C-HP-C	M1C-LL-N
0.3274	0.3318	0.2317	0.0053	0.0528	0.3278	0.3458	0.2683	0.0877
0.3274	0.3318	0.2317	0.0053	0.0528	0.3278	0.3458	0.2683	0.0877
0.3274	0.3318	0.2317	0.0053	0.0528	0.3278	0.3458	0.2683	0.0877
0.3274	0.3318	0.2317	0.0053	0.0528	0.3278	0.3458	0.2683	0.0877
0.3274	0.3318	0.2317	0.0053	0.0528	0.3278	0.3458	0.2683	0.0877
0.3274	0.3318	0.2317	0.0053	0.0528	0.3278	0.3458	0.2683	0.0877

M1C-LL-S	M1C-LL-M	M1C-LL-E	M1C-LL-C	M1C-ML-N	M1C-ML-S	M1C-ML-M	M1C-ML-E	M1C-ML-C
0.1442	0.3174	0.3101	0.1406	0.0347	0.1175	0.3802	0.2915	0.1762
0.1442	0.3174	0.3101	0.1406	0.0347	0.1175	0.3802	0.2915	0.1762
0.1442	0.3174	0.3101	0.1406	0.0347	0.1175	0.3802	0.2915	0.1762
0.1442	0.3174	0.3101	0.1406	0.0347	0.1175	0.3802	0.2915	0.1762
0.1442	0.3174	0.3101	0.1406	0.0347	0.1175	0.3802	0.2915	0.1762
0.1442	0.3174	0.3101	0.1406	0.0347	0.1175	0.3802	0.2915	0.1762

M1C-HL-N	M1C-HL-S	M1C-HL-M	M1C-HL-E	M1C-HL-C	M2-LL-N	M2-LL-S	M2-LL-M	M2-LL-E
0.0095	0.0845	0.3807	0.32	0.2052	0.1361	0.1247	0.3257	0.3269
0.0095	0.0845	0.3807	0.32	0.2052	0.1361	0.1247	0.3257	0.3269
0.0095	0.0845	0.3807	0.32	0.2052	0.1361	0.1247	0.3257	0.3269
0.0095	0.0845	0.3807	0.32	0.2052	0.1361	0.1247	0.3257	0.3269
0.0095	0.0845	0.3807	0.32	0.2052	0.1361	0.1247	0.3257	0.3269
0.0095	0.0845	0.3807	0.32	0.2052	0.1361	0.1247	0.3257	0.3269

M2-LL-C	M2-ML-N	M2-ML-S	M2-ML-M	M2-ML-E	M2-ML-C	M2-HL-N	M2-HL-S	M2-HL-M
0.0866	0.0707	0.1017	0.4062	0.3071	0.1143	0.0328	0.101	0.4202
0.0866	0.0707	0.1017	0.4062	0.3071	0.1143	0.0328	0.101	0.4202
0.0866	0.0707	0.1017	0.4062	0.3071	0.1143	0.0328	0.101	0.4202
0.0866	0.0707	0.1017	0.4062	0.3071	0.1143	0.0328	0.101	0.4202
0.0866	0.0707	0.1017	0.4062	0.3071	0.1143	0.0328	0.101	0.4202
0.0866	0.0707	0.1017	0.4062	0.3071	0.1143	0.0328	0.101	0.4202

M2-HL-E	M2-HL-C	M2-LM-N	M2-LM-S	M2-LM-M	M2-LM-E	M2-LM-C	M2-MM-N	M2-MM-S
0.3247	0.1214	0.4262	0.2305	0.2542	0.0842	0.0049	0.1689	0.2237
0.3247	0.1214	0.4262	0.2305	0.2542	0.0842	0.0049	0.1689	0.2237
0.3247	0.1214	0.4262	0.2305	0.2542	0.0842	0.0049	0.1689	0.2237
0.3247	0.1214	0.4262	0.2305	0.2542	0.0842	0.0049	0.1689	0.2237
0.3247	0.1214	0.4262	0.2305	0.2542	0.0842	0.0049	0.1689	0.2237
0.3247	0.1214	0.4262	0.2305	0.2542	0.0842	0.0049	0.1689	0.2237

M2-MM-M	M2-MM-E	M2-MM-C	M2-HM-N	M2-HM-S	M2-HM-M	M2-HM-E	M2-HM-C	M3-LL-N
0.4534	0.134	0.02	0.0753	0.1903	0.5245	0.1782	0.0316	0.1616
0.4534	0.134	0.02	0.0753	0.1903	0.5245	0.1782	0.0316	0.1616
0.4534	0.134	0.02	0.0753	0.1903	0.5245	0.1782	0.0316	0.1616
0.4534	0.134	0.02	0.0753	0.1903	0.5245	0.1782	0.0316	0.1616
0.4534	0.134	0.02	0.0753	0.1903	0.5245	0.1782	0.0316	0.1616
0.4534	0.134	0.02	0.0753	0.1903	0.5245	0.1782	0.0316	0.1616

M3-LL-S	M3-LL-M	M3-LL-E	M3-LL-C	M3-ML-N	M3-ML-S	M3-ML-M	M3-ML-E	M3-ML-C
0.119	0.3208	0.3175	0.0811	0.0817	0.1066	0.3994	0.3024	0.1099
0.119	0.3208	0.3175	0.0811	0.0817	0.1066	0.3994	0.3024	0.1099
0.119	0.3208	0.3175	0.0811	0.0817	0.1066	0.3994	0.3024	0.1099
0.119	0.3208	0.3175	0.0811	0.0817	0.1066	0.3994	0.3024	0.1099
0.119	0.3208	0.3175	0.0811	0.0817	0.1066	0.3994	0.3024	0.1099
0.119	0.3208	0.3175	0.0811	0	0	0	0	0

M3-LM-N	M3-LM-S	M3-LM-M	M3-LM-E	M3-LM-C	M3-MM-N	M3-MM-S	M3-MM-M	M3-MM-E
0.4672	0.2149	0.2363	0.0777	0.004	0.2076	0.2345	0.4204	0.1223
0.4672	0.2149	0.2363	0.0777	0.004	0.2076	0.2345	0.4204	0.1223
0.4672	0.2149	0.2363	0.0777	0.004	0.2076	0.2345	0.4204	0.1223
0.4672	0.2149	0.2363	0.0777	0.004	0.2076	0.2345	0.4204	0.1223
0.4672	0.2149	0.2363	0.0777	0.004	0.2076	0.2345	0.4204	0.1223
0.4672	0.2149	0.2363	0.0777	0.004	0	0	0	0

M3-MM-C	M4-LL-N	M4-LL-S	M4-LL-M	M4-LL-E	M4-LL-C	M4-LM-N	M4-LM-S	M4-LM-M
0.0152	0.3584	0.3668	0.2259	0.0445	0.0043	0.3685	0.4016	0.206
0.0152	0	0	0	0	0	0.3685	0.4016	0.206
0.0152	0	0	0	0	0	0.3685	0.4016	0.206
0.0152	0	0	0	0	0	0.3685	0.4016	0.206
0.0152	0	0	0	0	0	0.3685	0.4016	0.206
0	0	0	0	0	0	0.3685	0.4016	0.206

M4-LM-E	M4-LM-C	M5-LP-N	M5-LP-S	M5-LP-M	M5-LP-E	M5-LP-C	M5-LL-N	M5-LL-S
0.0186	0.0053	0.1474	0.1918	0.2974	0.222	0.1414	0.1698	0.2282
0.0186	0.0053	0.1474	0.1918	0.2974	0.222	0.1414	0.1698	0.2282
0.0186	0.0053	0.1474	0.1918	0.2974	0.222	0.1414	0.1698	0.2282
0.0186	0.0053	0.1474	0.1918	0.2974	0.222	0.1414	0.1698	0.2282
0.0186	0.0053	0.1474	0.1918	0.2974	0.222	0.1414	0.1698	0.2282
0.0186	0.0053	0.1474	0.1918	0.2974	0.222	0.1414	0.1698	0.2282

M5-LL-M	M5-LL-E	M5-LL-C	Numb
0.3255	0.1928	0.0836	1
0.3255	0.1928	0.0836	2
0.3255	0.1928	0.0836	3
0.3255	0.1928	0.0836	4
0.3255	0.1928	0.0836	5
0.3255	0.1928	0.0836	6

Για παράδειγμα θα ξανασχεδιαστεί η κατανομή πιθανότητας για κάθε στάθμη βλάβης για τον ίδιο τύπο κτιρίου **MIA-LL** και για τις ίδιες γεωγραφικές μονάδες που είχε σχεδιαστεί στο 1° παράδειγμα, ώστε να γίνει και μια σύγκριση.

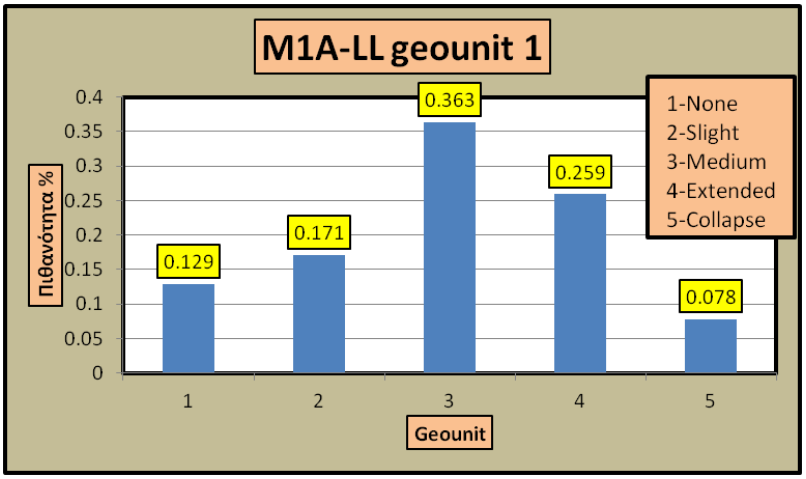
Αρχικά βλέπουμε ότι και οι 3 περιοχές έχουν τις ίδιες τιμές σε αντίθεση με την πρώτη μέθοδο που είχαν διαφορετικές τιμές.

Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στην πρώτη μέθοδο οι τιμές PGA και Sa υπολογίστηκαν για διαφορετικές αποστάσεις των περιοχών από το ρήγμα από την σχέση απόσβεσης, ενώ στην δεύτερη έχουν δοθεί στο αρχείο **shakecenter1.txt** ίδιες σε όλες τις περιοχές.

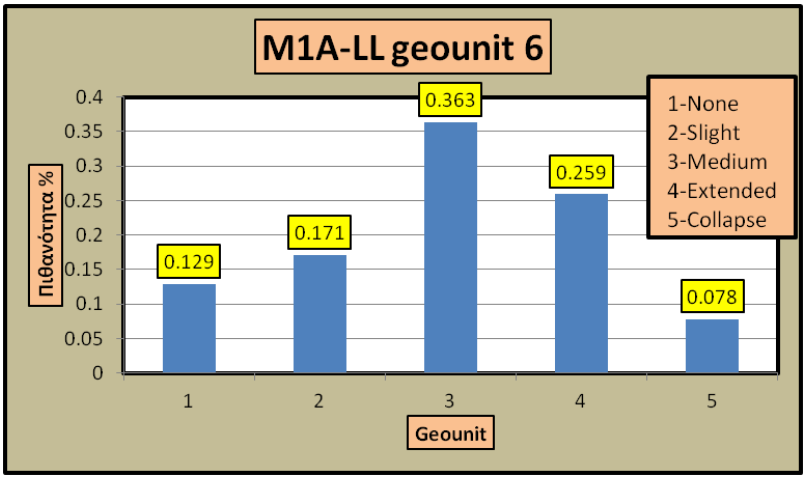
Εφόσον λοιπόν η σεισμική διέγερση είναι η ίδια και η απόκριση του ίδιου τύπου κτιρίου θα είναι ίδια σε όλες τις περιοχές.

Έπειτα παρατηρούμε ότι στο 1° παράδειγμα οι μεγαλύτερες πιθανότητες ήταν για στάθμη βλάβης none , ενώ στο 2° είναι στη στάθμη moderate.

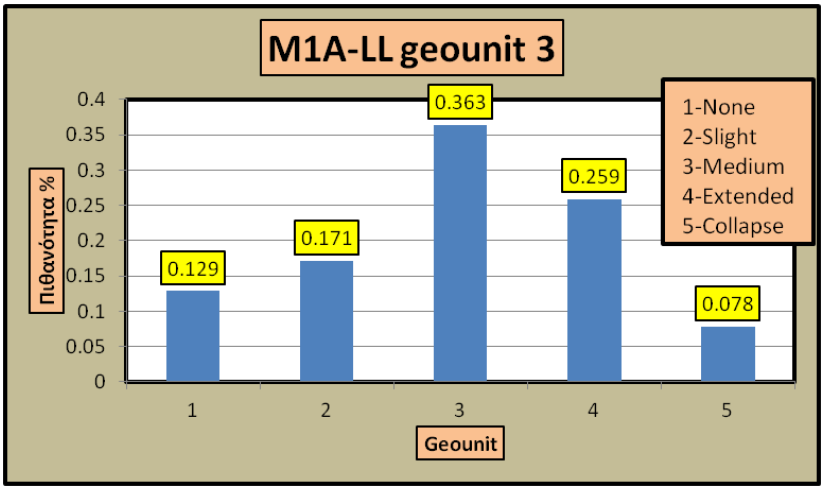
Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο 1° παράδειγμα η τελική της PGA μετά την ενίσχυση PGAamp, κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 0,1351g-0,1639g ενώ στο 2° παράδειγμα όπως φαίνεται από το αρχείο **gmotionscen1.txt** είναι για όλες τις περιοχές 0,293g άρα έχουμε μεγαλύτερη σεισμική επιβάρυνση.



Σχήμα 25: κατανομή πιθανοτήτων βλάβης του M1A-LL της γεωγρ. Μονάδας 1



Σχήμα 26: κατανομή πιθανοτήτων βλάβης του M1A-LL της γεωγρ. Μονάδας 6



Σχήμα 27: κατανομή πιθανοτήτων βλάβης του M1A-LL της γεωγραφικής μονάδας 3

3) αντίστοιχα με το προηγούμενο είναι τα αρχεία **sqmctdout1.txt** και **nonctdout1.txt που** μας δίνει για κάθε τύπο κτιρίου και κάθε περιοχή το εμβαδόν βλαμμένης επιφάνειας ή τον αριθμό βλαμμένων κτιρίων σε κάθε μια από τις 5 στάθμες βλάβης.

Sqmctdout1.txt

%GEOUNIT	Lat	Lon	Soil	M1A-LL-N	M1A-LL-S	M1A-LL-M	M1A-LL-E	M1A-LL-C
1	44.481	26.064	3	391.28	520.7	1106.55	788.35	238.42
2	44.455	26.136	3	280.13	372.78	792.21	564.4	170.69
3	44.414	26.171	3	197.89	263.34	559.64	398.71	120.58
4	44.38	26.121	3	71.96	95.76	203.5	144.98	43.85
5	44.399	26.065	3	758.79	1009.76	2145.88	1528.8	462.36
6	44.444	26.011	3	236.44	314.64	668.66	476.38	144.07

M1A-ML-N	M1A-ML-S	M1A-ML-M	M1A-ML-E	M1A-ML-C	M1A-HL-N	M1A-HL-S	M1A-HL-M	M1A-HL-E
2227.68	5456.64	14629.44	7899.36	3386.88	3576.25	22160.24	69791.48	43524.02
3083.75	7553.55	20251.32	10934.97	4688.41	20865.01	129290.2	407186.7	253933.6
17234.29	42214.91	113179.6	61112.83	26202.36	18505.58	114670	361141.7	225218.6
26510.98	64937.91	174100.8	94008.03	40306.29	14512.19	89924.87	283209.5	176617.8
11959.46	29294.36	78539.19	42408.28	18182.71	4013.73	24871.1	78329.06	48848.31
20268.71	49647.63	133107	71872.89	30815.77	21207.96	131415.3	413879.5	258107.4

M1A-HL-C	M1A-LM-N	M1A-LM-S	M1A-LM-M	M1A-LM-E	M1A-LM-C	M1A-MM-N	M1A-MM-S	M1A-MM-M
17116.01	1216.17	954.51	741.91	224.55	7.86	16143.61	29999.08	42033.77
99860.51	711.53	558.44	434.06	131.38	4.6	8201.13	15239.86	21353.61
88568.2	378.97	297.43	231.18	69.97	2.45	21161.39	39323.42	55098.73
69455.71	564.58	443.11	344.41	104.24	3.65	29844	55458	77706
19209.81	1597.07	1253.45	974.27	294.88	10.33	11563.56	21488.13	30108.48
101501.9	3464.83	2719.36	2113.66	639.74	22.4	52123.54	96859.25	135716.12

M1A-MM-C	M1A-HM-N	M1A-HM-S	M1A-HM-M	M1A-HM-E	M1A-HM-C	M1B-LL-N	M1B-LL-S
1742.89	9822.44	41641.01	69410.96	15081.48	3199.94	-1	-1
885.41	61964.21	262689.6	437874.55	95140.51	20186.64	-1	-1
2284.61	71508.76	303152.6	505321.84	109795.32	23296.06	-1	-1
3222	45891.13	194549.8	324292.98	70461.73	14950.37	-1	-1
1248.42	45948.74	194794	324700.08	70550.19	14969.14	-1	-1
5627.33	72017.08	305307.6	508913.92	110575.8	23461.66	-1	-1

M1B-LL-M	M1B-LL-E	M1B-LL-C	M1B-ML-N	M1B-ML-S	M1B-ML-M	M1B-ML-E	M1B-ML-C	M1B-HL-N
-1	-1	-1	792.72	1807.35	5778.99	3498.41	1489.2	3895.15
-1	-1	-1	1346.35	3069.58	9814.94	5941.64	2529.23	27276.1
-1	-1	-1	8301.53	18926.92	60518.54	36635.91	15595.11	25925.42
-1	-1	-1	14869.59	33901.67	108400.1	65621.8	27933.77	18985.1
-1	-1	-1	6024.41	13735.24	43918.22	26586.63	11317.35	5611.54
-1	-1	-1	10951.52	24968.74	79837.16	48330.76	20573.35	28007.52

M1B-HL-S	M1B-HL-M	M1B-HL-E	M1B-HL-C	M1B-LM-N	M1B-LM-S	M1B-LM-M	M1B-LM-E	M1B-LM-C
13571.53	40355.82	30607.69	14084.05	133.54	122.04	203.15	72.31	8.96
95035.66	282594.7	214332.7	98624.62	103.87	94.92	158	56.24	6.97
90329.64	268601	203719.3	93740.88	-1	-1	-1	-1	-1
66148.1	196695.7	149183	68646.14	44.51	40.68	67.72	24.1	2.99
19551.77	58138.47	44094.86	20290.13	37.09	33.9	56.43	20.08	2.49
97584.1	290172.7	220080.1	101269.3	1149.94	1050.9	1749.33	622.63	77.19

M1B-MM-N	M1B-MM-S	M1B-MM-M	M1B-MM-E	M1B-MM-C	M1B-HM-N	M1B-HM-S	M1B-HM-M
13130.96	24883.58	52492.26	11542.2	3177.52	19626.93	40327.96	77287.13
6520.55	12356.65	26066.53	5731.61	1577.89	121640.05	249937.03	478995.54
17033.7	32279.41	68093.86	14972.73	4121.94	136543.32	280559.16	537681.78
24500.74	46429.68	97944.05	21536.3	5928.86	87928.98	180669.99	346247.69
9467.83	17941.84	37848.55	8322.28	2291.09	86328.37	177381.19	339944.82
39524.66	74900.5	158003.63	34742.43	9564.46	136294.4	280047.7	536701.59

M1B-HM-E	M1B-HM-C	M1C-LP-N	M1C-LP-S	M1C-LP-M	M1C-LP-E	M1C-LP-C	M1C-MP-N	M1C-MP-S
20619.66	4898.59	11678.1	17587.88	43757.52	51270.49	32881.01	8403.78	27133.14
127792.7	30359.58	9551.27	14384.75	35788.32	41933.01	26892.66	6970.95	22506.99
143449.7	34079.22	5244.84	7899.02	19652.26	23026.46	14767.43	21234.84	68560.56
92376.46	21945.79	4692.79	7067.6	17583.74	20602.79	13213.07	23806.38	76863.24
90694.9	21546.3	17493.56	26346.3	65547.89	76802.16	49255.09	15206.93	49098.35
143188.2	34017.09	5258.21	7919.16	19702.37	23085.17	14805.08	19796.44	63916.42

M1C-LL-S	M1C-LL-M	M1C-LL-E	M1C-LL-C	M1C-ML-N	M1C-ML-S	M1C-ML-M	M1C-ML-E	M1C-ML-C
2044.76	4500.73	4397.22	1993.71	4874.38	16505.46	53407.45	40947.59	24751.17
1050.5	2312.26	2259.08	1024.27	2440.1	8262.6	26735.66	20498.28	12390.38
787.33	1733	1693.15	767.68	6348.43	21496.86	69558.35	53330.51	32236.14
1050.5	2312.26	2259.08	1024.27	9060.86	30681.6	99277.82	76116.48	46009.34
3134.91	6900.28	6741.57	3056.64	3505.26	11869.38	38406.28	29446.16	17799.02
2881.12	6341.65	6195.8	2809.19	15084.51	51078.66	165277.5	126718.6	76596.25

M1C-HL-N	M1C-HL-S	M1C-HL-M	M1C-HL-E	M1C-HL-C	M2-LL-N	M2-LL-S	M2-LL-M	M2-LL-E
834.02	7418.42	33422.41	28093.44	18014.92	238953.5	218938.3	571838	573944.9
6520.57	57998.77	261303.3	219640.3	140844.4	176395.8	161620.6	422131.6	423686.9
9389.72	83519.12	376280.8	316285.4	202818	78423.54	71854.63	187674.9	188366.3
5860.51	52127.71	234852.3	197406.7	126587.1	60886.38	55786.42	145706.8	146243.6
6501.42	57828.42	260535.9	218995.2	140430.7	137955.7	126400.3	330140.9	331357.3
7627.97	67848.77	305680.8	256942.1	164764.1	36610.22	33543.68	87611.67	87934.47

M2-LL-C	M2-ML-N	M2-ML-S	M2-ML-M	M2-ML-E	M2-ML-C	M2-HL-N	M2-HL-S	M2-HL-M
152045.4	19248.5	27688.44	110590.4	83609.82	31118.86	11765.49	36229.1	150727.4
112240.1	24338.9	35010.84	139836.8	105721	39348.46	6211.01	19125.36	79569.07
49900.65	32055.95	46111.59	184174.3	139241.6	51824.53	8940.23	27529.37	114533.1
38741.81	5889.59	8472.02	33838.08	25582.66	9521.65	2178.97	6709.63	27914.73
87780.79	18602.02	26758.49	106876.1	80801.7	30073.7	2177.4	6704.78	27894.56
23294.97	13078.93	18813.69	75143.75	56811.04	21144.59	2603.27	8016.17	33350.43

M2-HL-E	M2-HL-C	M2-LM-N	M2-LM-S	M2-LM-M	M2-LM-E	M2-LM-C	M2-MM-N	M2-MM-S
116471.2	43546.67	79426.63	42955.98	47372.71	15691.51	913.16	42331.74	56066.38
61485.19	22988.3	41829.4	22622.42	24948.46	8263.81	480.91	29461.56	39020.44
88502.83	33089.76	20964.78	11338.3	12504.1	4141.8	241.03	27990.11	37071.56
21570.47	8064.84	27210.74	14716.27	16229.4	5375.75	312.84	5703.42	7553.9
21554.88	8059.02	42903.42	23203.28	25589.04	8475.99	493.26	12578.32	16659.39
25770.79	9635.28	32578.73	17619.42	19431.05	6436.25	374.56	26478.12	35069

M2-MM-M	M2-MM-E	M2-MM-C	M2-HM-N	M2-HM-S	M2-HM-M	M2-HM-E	M2-HM-C	M3-LL-N
113636.6	33584.69	5012.64	10067.91	25443.87	70127.75	23826.05	4225.05	146949.3
79087.47	23373.89	3488.64	17184.66	43429.5	119699.3	40668.09	7211.63	132394.8
75137.45	22206.48	3314.4	16917.2	42753.56	117836.3	40035.12	7099.38	49877.03
15310.41	4524.91	675.36	7622.77	19264.45	53096.18	18039.54	3198.93	38311.32
33765.6	9979.25	1489.44	13776.29	34815.77	95958.32	32602.05	5781.28	59598.89
71078.61	21006.91	3135.36	12155.23	30718.99	84666.89	28765.76	5101	22531.08

M3-LL-S	M3-LL-M	M3-LL-E	M3-LL-C	M3-ML-N	M3-ML-S	M3-ML-M	M3-ML-E	M3-ML-C
108211.5	291716.3	288715.5	73747.47	2005.9	2617.24	9806.07	7424.52	2698.26
97493.72	262823.4	260119.8	66443.2	1923.54	2509.79	9403.47	7119.71	2587.49
36728.75	99013.32	97994.79	25031.11	935.3	1220.36	4572.33	3461.88	1258.14
28211.92	76053.66	75271.31	19226.78	354.9	463.07	1734.99	1313.63	477.41
43887.79	118312.6	117095.6	29910.09	333.34	434.93	1629.55	1233.79	448.39
16591.58	44727.54	44267.44	11307.37	-1	-1	-1	-1	-1

M3-LM-N	M3-LM-S	M3-LM-M	M3-LM-E	M3-LM-C	M3-MM-N	M3-MM-S	M3-MM-M	M3-MM-E
52791.26	24282.63	26700.72	8779.71	451.98	3667.05	4142.21	7425.95	2160.31
33594.02	15452.38	16991.15	5587.02	287.62	4668.51	5273.44	9453.96	2750.28
14730.82	6775.8	7450.54	2449.88	126.12	871.92	984.9	1765.68	513.66
17059.81	7847.07	8628.49	2837.22	146.06	353.75	399.59	716.36	208.4
18774.43	8635.76	9495.72	3122.37	160.74	1559.49	1761.56	3158.04	918.72
17160.26	7893.28	8679.3	2853.92	146.92	-1	-1	-1	-1

M3-MM-C	M4-LL-N	M4-LL-S	M4-LL-M	M4-LL-E	M4-LL-C	M4-LM-N	M4-LM-S	M4-LM-M
268.49	36151.81	36999.12	22786.53	4488.72	433.74	1343.18	1463.83	750.87
341.82	-1	-1	-1	-1	-1	641.19	698.78	358.44
63.84	-1	-1	-1	-1	-1	361.13	393.57	201.88
25.9	-1	-1	-1	-1	-1	781.22	851.39	436.72
114.18	-1	-1	-1	-1	-1	915.72	997.98	511.91
-1	-1	-1	-1	-1	-1	631.98	688.74	353.29

M4-LM-E	M4-LM-C	M5-LP-N	M5-LP-S	M5-LP-M	M5-LP-E	M5-LP-C	M5-LL-N	M5-LL-S
67.8	19.32	59251.11	77098.8	119547.4	89238.45	56839.26	10067.44	13529.98
32.36	9.22	97850.75	127325.5	197427.5	147373.6	93867.68	12135.61	16309.45
18.23	5.19	78891.43	102655.2	159174.4	118818.8	75680.11	11945.43	16053.87
39.43	11.24	45507.54	59215.37	91817.79	68539.17	43655.13	10328.93	13881.41
46.22	13.17	164180	213634.5	331256	247272.5	157497	21846.47	29360.21
31.9	9.09	26341.85	34276.58	53148.35	39673.62	25269.59	7161.32	9624.33

M5-LL-M	M5-LL-E	M5-LL-C	Numb
19298.9	11431.11	4956.64	1
23263.49	13779.42	5974.89	2
22898.92	13563.48	5881.26	3
19800.17	11728.02	5085.39	4
41878.83	24805.65	10755.98	5
13727.96	8131.34	3525.83	6

4) Τα δύο βασικά αρχεία αποτελεσμάτων που αναφέρονται στις βλάβες είναι τα **mdr1.txt** και το **mdrtot1.txt.**

Στα **mdr1.txt** η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια γεωγραφική ομάδα , συνολικά 6 γραμμές. Σε κάθε γραμμή υπάρχουν : η $1^{η}$ στήλη για α/α γεωγραφικής μονάδας , η $2^{η}$ στήλη για τον $\mathbf{MDR_i}$ δηλαδή του μέσου συντελεστή βλάβης ανά γεωγραφική μονάδα , και 32 στήλες (μια για κάθε τύπο κτιρίου κατά HAZUS) όπου περιέχονται οι τιμές του $\mathbf{MDR_i^j}$ δηλαδή του μέσου συντελεστή βλάβης ανά γεωγραφική μονάδα και ανά τύπο κτιρίου (στήλες 3…j+1).

Στα **mdrtot1.txt** υπάρχει 1 γραμμή. Σε αυτήν υπάρχουν η $1^{η}$ στήλη για α/α γεωγραφικής μονάδας , η $2^{η}$ στήλη για **MDR** δηλαδή του συνολικού μέσου συντελεστή βλάβης για όλες τις γεωγραφικές μονάδες και όλους τους τύπους κτιρίων , και οι επόμενες 32 στήλες για $\mathbf{MDR^j}$ δηλαδή συνολικού μέσου συντελεστή βλάβης για κάθε τύπο κτιρίου.

Ακολουθούν τα αρχεία :

<u>mdr1.txt</u>

%GEOUNIT	MDRT	M1A-LL	M1A-ML	M1A-HL	M1A-LM	M1A-MM	M1A-HM	M1B-LL
1	0.282551	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1
2	0.282947	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1
3	0.295051	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1
4	0.299245	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1
5	0.285513	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1
6	0.281114	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1

M1B-ML	M1B-HL	M1B-LM	M1B-MM	M1B-HM	M1C-LP	M1C-MP	M1C-HP	M1C-LL
0.288152	0.328765	0.12569	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274
0.288152	0.328765	0.12569	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274
0.288152	0.328765	-1	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274
0.288152	0.328765	0.12569	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274
0.288152	0.328765	0.12569	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274
0.288152	0.328765	0.12569	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274

M1C-ML	M1C-HL	M2-LL	M2-ML	M2-HL	M2-LM	M2-MM	M2-HM	M3-LL
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431

M3-ML	M3-LM	M3-MM	M4-LL	M4-LM	M5-LP	M5-LL
0.30314	0.070778	0.123053	0.056476	0.043213	0.285976	0.217087
0.30314	0.070778	0.123053	-1	0.043213	0.285976	0.217087
0.30314	0.070778	0.123053	-1	0.043213	0.285976	0.217087
0.30314	0.070778	0.123053	-1	0.043213	0.285976	0.217087
0.30314	0.070778	0.123053	-1	0.043213	0.285976	0.217087
-1	0.070778	-1	-1	0.043213	0.285976	0.217087

mdrtot1.txt

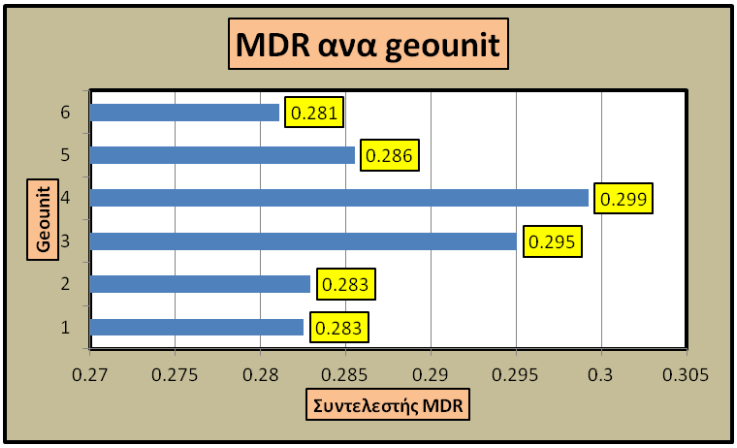
%GEOUNIT	MDRT	M1A-LL	M1A-ML	M1A-HL	M1A-LM	M1A-MM	M1A-HM	M1B-LL
1	0.287809	0.24751	0.265107	0.296527	0.06786	0.105455	0.133128	-1

M1B-ML	M1B-HL	M1B-LM	M1B-MM	M1B-HM	M1C-LP	M1C-MP	M1C-HP	M1C-LL
0.288152	0.328765	0.12569	0.139641	0.145944	0.402378	0.431975	0.475077	0.330274

M1C-ML	M1C-HL	M2-LL	M2-ML	M2-HL	M2-LM	M2-MM	M2-HM	M3-LL
0.362289	0.405005	0.285114	0.310471	0.327838	0.07703	0.136786	0.177007	0.27431

M3-ML	M3-LM	M3-MM	M4-LL	M4-LM	M5-LP	M5-LL
0.30314	0.070778	0.123053	0.056476	0.043213	0.285976	0.217087

Από επεξεργασία στο EXCEL των αποτελεσμάτων προέκυψε το παρακάτω σχήμα.



Συνολικός MDR , MDR=0.2878

Σχήμα 28: Σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής του MDR ανά γεωγραφική μονάδα

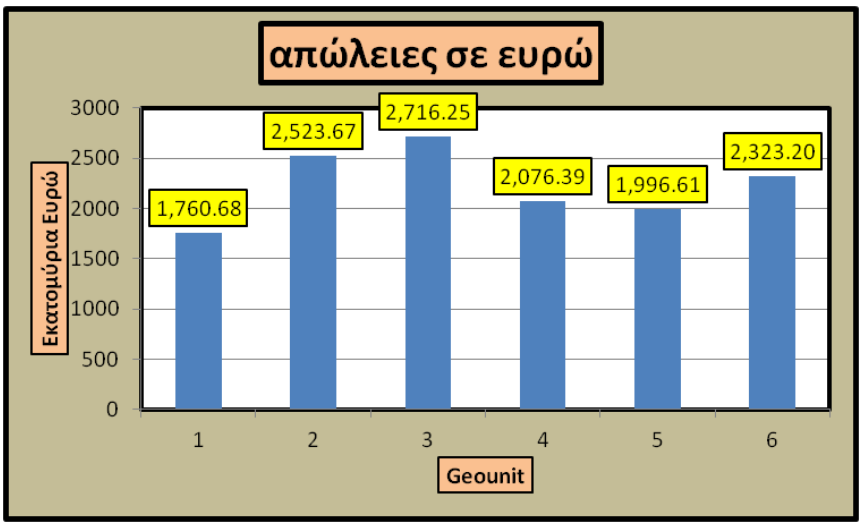
Βλέπουμε ότι ο μεγαλύτερος συντελεστής **MDR** συγκεντρώνεται στην περιοχή 4 σε αντίθεση με το πρώτο παράδειγμα που συγκεντρώνεται στις περιοχές 1 και 6.

Μια εξήγηση εδώ θα ήταν ότι αφού όλα τα εδάφη των γεωγραφικών μονάδων είναι ίδιας κατηγορίας C και επιβαρύνονται με την ίδια φασματική επιτάχυνση, ο δυσμενής **MDR** υποδηλώνει ότι η γεωγραφική μονάδα 4 έχει την ασθενέστερη κατανομή τρωτότητας κτιρίων.

Ο μέσος **MDR** εδώ είναι 0,2878 άρα μεγαλύτερος από τους αντίστοιχους του 1^{ου} παραδείγματος που ήταν 0,07 και 0,08. Αυτό φαίνεται λογικό διότι εδώ έχουμε μεγαλύτερη σεισμική επιβάρυνση όπως είπαμε παραπάνω.

5) το αρχείο **eclosse1.txt** μας δίνει τις συνολικές οικονομικές απώλειες, που προέκυψαν από τις βλάβες, για κάθε γεωγραφική μονάδα.

%GEOUNIT	EUROS
1	1.76E+09
2	2.52E+09
3	2.72E+09
4	2.08E+09
5	2E+09
6	2.32E+09

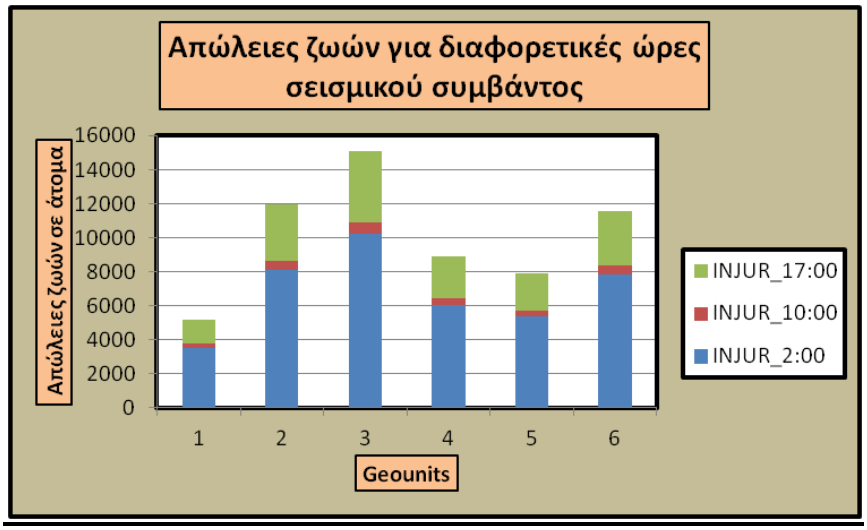


Σχήμα 29: Σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής οικονομικών απωλειών ανά γεωγραφική μονάδα

6) το αρχείο **totalinjur1.txt** μας δίνει τις συνολικές απώλειες ζωής(συνολικά από ελαφρά τραυματίες μέχρι νεκρούς), που προέκυψαν από τις βλάβες, για κάθε γεωγραφική μονάδα.

Οι υπολογισμοί γίνονται για 3 διαφορετικές ώρες της ημέρας βραδινή 02:00, πρωινή 10:00 και απογευματινή 17:00.

%GEOUNIT	INJUR_2:00	INJUR_10:00	INJUR_17:00
1	3521.4	232.7	1396.1
2	8116.3	546.4	3278.2
3	10229.7	692.1	4152.3
4	6056.4	407.9	2447.4
5	5372.7	360.7	2164.2
6	7855.9	530.6	3183.7



Σχήμα 30: Σχεδίαση στο EXCEL της κατανομής απωλειών ζωής ανά γεωγραφική μονάδα και ώρα συμβάντος

Φαίνεται ότι ο μεγαλύτερος αριθμός θυμάτων βρίσκεται στην περιοχή 3 και για τις 3 διαφορετικές ώρες του συμβάντος.

3.3. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

3.3.1. ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Καταρχάς πρέπει να αποφασίσουμε πόσα σεισμικά σενάρια και ποιον συντελεστή βαρύτητας για κάθε σενάριο θέλουμε.

Για κάθε σενάριο χρειάζεται η θέση του ρήγματος (γεωγρ. Πλάτος και γεωγρ. Μήκος), η γεωμετρία και ο μηχανισμός του ρήγματος, καθώς και το μέγεθος του σεισμού που θα δημιουργήσει.

Έπειτα χωρίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος σε στοιχειώδης γεωγραφικές μονάδες και υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κεντροειδούς κάθε γεωγραφικής μονάδας.

Για κάθε γεωγραφική μονάδα πρέπει να εισάγουμε το όνομα της, τις συντεταγμένες του κεντροειδούς της, τον αντισεισμικό κανονισμό που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του φάσματος απόκρισης, και την εδαφική της κατάταξη βάσει του κανονισμού.

Αποφασίζεται ποια ταξινόμηση κτιρίων θα χρησιμοποιηθεί.

Για κάθε τύπο κτιρίου πρέπει να εισαχθεί η πληροφορία για το ποια καμπύλη ικανότητας θα χρησιμοποιηθεί, με ποια μέθοδο θα υπολογιστεί το σημείο επιτελεστικότητας, και οι καμπύλες θραυστότητας που του αντιστοιχούν.

Σε κάθε γεωγραφική μονάδα πρέπει να εισάγουμε την ποσότητα και το εμβαδόν για κάθε τύπο κτιρίου που περιέχει.

Αν θέλουμε εκτός από τις βλάβες να υπολογίσουμε και τις απώλειες πρέπει να επιλέξουμε ποια μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε, να εισάγουμε πληροφορίες για το κόστος αν θέλουμε το κόστος απωλειών, ή να εισάγουμε πληροφορίες για την χωρική και χρονική κατανομή του πληθυσμού αν θέλουμε απώλειες ζωής.

3.3.2. ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η διαφοροποίηση από την προηγούμενη μέθοδο έχει να κάνει με το τμήμα του σεισμικού κινδύνου.

Εδώ η πληροφορία του σεισμικού κινδύνου (PGA, Sa) εισάγεται σε κάθε γεωγραφική μονάδα απευθείας, χωρίς να καθορίζουμε ρήγμα, και αναφέρεται σε χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο έχει συγκεκριμένη πιθανότητα να ξεπεραστεί.

Χωρίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος σε στοιχειώδης γεωγραφικές μονάδες και υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κεντροειδούς κάθε γεωγραφικής μονάδας.

Για κάθε γεωγραφική μονάδα πρέπει να εισάγουμε το όνομα της, τις συντεταγμένες του κεντροειδούς της, τον αντισεισμικό κανονισμό που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του φάσματος απαίτησης, την εδαφική της κατάταξη βάσει του κανονισμού και τον σεισμικό κίνδυνο(PGA, Sa) .

Αποφασίζεται ποια ταξινόμηση κτιρίων θα χρησιμοποιηθεί.

Για κάθε τύπο κτιρίου πρέπει να εισαχθεί η πληροφορία για το ποια καμπύλη ικανότητας θα χρησιμοποιηθεί, με ποια μέθοδο θα υπολογιστεί το σημείο επιτελεστικότητας, και οι καμπύλες θραυστότητας που του αντιστοιχούν.

Σε κάθε γεωγραφική μονάδα πρέπει να εισάγουμε την ποσότητα και το εμβαδόν για κάθε τύπο κτιρίου που περιέχει.

Αν θέλουμε εκτός από τις βλάβες να υπολογίσουμε και τις απώλειες πρέπει να επιλέξουμε ποια μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε, να εισάγουμε πληροφορίες για το κόστος αν θέλουμε το κόστος απωλειών, και να εισάγουμε πληροφορίες για την χωρική και χρονική κατανομή του πληθυσμού αν θέλουμε απώλειες ζωής.

3.4. ΣΧΟΛΙΑ

Η χρήση συστήματος GIS δεν είναι υποχρεωτική για την λειτουργία του λογισμικού.

Τα αρχεία δεδομένων εισάγονται σε μορφή (*.txt) και τα αποτελέσματα εξάγονται πάλι στην ίδια μορφή.

Σε αυτή την μορφή μπορούν να εισαχθούν σε ένα λογισμικό spreadsheet (πχ EXCEL) για περαιτέρω επεξεργασία και παραγωγή διαγραμμάτων.

Για καλλίτερη εποπτεία και παρουσίαση όμως έχουμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε ένα λογισμικό GIS, εφόσον οι συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος σε μοίρες) των κεντροειδών των γεωγραφικών μονάδων και των ρηγμάτων που εισάγονται, προκύπτουν από χάρτες τέτοιων λογισμικών.

Υπάρχει πληθώρα παραμέτρων που έχουμε την δυνατότητα να εισάγουμε, ώστε να προσαρμόσουμε τους υπολογισμούς στις απαιτήσεις μας.

Όπως στην περιγραφή του ρήγματος, την ποικιλία σχέσεων απόσβεσης, την επιλογή τύπων κτιρίων, καμπυλών ικανότητας, μεθόδων υπολογισμού σημείου επιτελεστηκότητας, καθορισμό ορίων στάθμης βλαβών, καθορισμό καμπυλών θραυστότητας κλπ.

Το γεγονός ότι το λογισμικό παρέχεται σε μορφή ανοικτού κώδικα και μάλιστα σε μια διαδεδομένη γλώσσα όπως το Matlab , είναι σημαντικό τόσο για την καλλίτερη εμβάθυνση στο λογισμικό και στον τρόπο που λειτουργεί, όσο και στην δυνατότητα αλλαγής ή συμπλήρωσης του κώδικα (πχ με ελληνικές σχέσεις απόσβεσης).

Το τελευταίο είναι ένα βασικό στοιχείο για την εξέλιξη του λογισμικού και την προσαρμοστικότητα του σε νέες επιστημονικές εξελίξεις.

Σημαντική τέλος είναι η δυνατότητα **διακλάδωσης (logic tree)** καθώς μας δίνει την δυνατότητα να λάβουμε υπόψη την επίδραση από τις αβεβαιότητες των διαφόρων μεθόδων, σχέσεων και δεδομένων από κάθε στάδιο, στο τελικό αποτέλεσμα.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[1] SELENA v6.0 User and Technical Manual NORSAR (2014)

[2] SELENA v4.0 – v5.0 User and Technical Manual NORSAR (2010)

[3] HAZUS-MH-MR1 Technical and User's Manual (FEMA 2003)

[4] Ο πηγαίος κώδικας του SELENA σε μορφή Matlab.

Κεφάλαιο 4

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MADRS ΚΑΙ I-DCM ΟΠΩΣ ΥΛΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ SELENA

4.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

4.2. ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ 2 ΜΕΘΟΔΩΝ

4.3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ 2 ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΑ ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

4.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΘΟΔΟ MADRS

4.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΘΟΔΟ I-DCM

4.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

4.4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Ορισμός του MDR

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MADRS ΚΑΙ I-DCM ΟΠΩΣ ΥΛΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ SELENA

Με αφορμή των παρατηρήσεων της **FEMA 440** περί διαφορών ανάμεσα στις ανελαστικές μεθόδους υπολογισμού της πρόβλεψης της απόκρισης των κατασκευών σε σεισμό, αποφασίστηκε η σύγκριση των μεθόδων αυτών όπως υλοποιούνται μέσα στο λογισμικό του SELENA.

Οι συγκρίσεις αφορούν τόσο τα απευθείας αποτελέσματα των μεθόδων όσο και την τελική επίδραση τους στην πρόβλεψη των βλαβών με σκοπό να διερευνηθεί κατά πόσο οι διαφορές αυτές εμφανίζονται και μέσα από το μοντέλο του SELENA και σε τι βαθμό επιδρούν στα τελικά αποτελέσματα.

4.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Το SELENA για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας χρησιμοποιεί, στην τελευταία έκδοση V6.0, δύο μεθόδους την **MADRS** και την **I-DCM**.

Οι μέθοδοι αυτές είναι βελτιώσεις των μεθόδων **CSM** και **DCM** αντίστοιχα όπως προτάθηκαν το 2005 στην **FEMA 440[1]** που αποτελεί αναφορά των αποτελεσμάτων ενός προγράμματος (**ATC-55 project**) που σκοπό είχε αφενός την ανάπτυξη και πρόταση συστάσεων που θα βελτιώνουν την πρόβλεψη της ανελαστικής συμπεριφοράς των κτιρίων που υπόκεινται σε σεισμό, αφετέρου την αναγνώριση προβλημάτων των μεθόδων πρόβλεψης που θα πρέπει στο μέλλον να διερευνηθούν διεξοδικότερα.

Στα πλαίσια του προγράμματος ATC-55, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των 2 μεθόδων **CSM(ATC-40)** και **DCM(FEMA 356)** τόσο με πειραματικά αποτελέσματα όσο και με αποτελέσματα από ανελαστική δυναμική ανάλυση μονοβαθμίων συστημάτων που υποβλήθηκαν σε χρονοιιστορίες 20 σεισμών.

Παρατηρήθηκε ότι είχαν σημαντικές αποκλίσεις στην εκτίμηση της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης τόσο σε σχέση με αποτελέσματα από πειράματα και ακριβέστερες αναλύσεις με χρονοιστορίες, όσο και μεταξύ τους.

Για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα εκτίμησης των μεθόδων **CSM** και **DCM**, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα πειραμάτων αλλά και η συσσωρευμένη εμπειρία από την εφαρμογή των μεθόδων στην πράξη, και προτάθηκαν στην **FEMA 440** κάποιες βελτιώσεις με τις οποίες προέκυψαν οι νέες μέθοδοι **MADRS** και **I-DCM**.

Οι παρατηρήσεις αυτές της **FEMA 440** περί διαφορών των 2 μεθόδων έδωσαν την ιδέα, με δεδομένη την υλοποίηση των μεθόδων αυτών σε κώδικα στο SELENA, να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων τόσο απευθείας όσο και της επίδρασης που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα της πρόβλεψης των βλαβών με σκοπό να ελέγξουμε αν αυτές οι διαφορές παρουσιάζονται και στο μοντέλο του SELENA και τι επιπτώσεις έχουν στις περεταίρω προβλέψεις των βλαβών.

Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν την ιδέα της αντικατάστασης του πολυβαθμίου (MDOF) μοντέλου του κτιρίου με ισοδύναμο μονοβάθμιο (SDOF) ταλαντωτή, και της καμπύλης ικανότητας του κτιρίου με το αντίστοιχο φάσμα μετακίνησης του μονοβαθμίου για να μπορεί να συγκριθεί με την απαίτηση που είναι σε μορφή φάσματος μονοβαθμίου.

Στη μέθοδο όμως **I-DCM** μας δίνεται απ' ευθείας η μετακίνηση οροφής του κτιρίου από την εμπειρική σχέση :

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * Sa * \frac{Te^2}{4\pi^2} * g$$

Έτσι το σημείο επιτελεστικότητας έχει τεταγμένη την τιμή δ_t με όρους μετακίνησης κτιρίου.

Από την άλλη στην μέθοδο **MADRS μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία υπολ**ογίζεται το σημείο επιτελεστικότητας σαν τομή του φάσματος απαίτησης με το φάσμα ικανότητας με όρους φασματικής επιτάχυνσης προς φασματική μετακίνηση.

Για να υπάρχει επομένως η δυνατότητα απ' ευθείας σύγκρισης των τιμών από τα αποτελέσματα των 2 μεθόδων πρέπει να μετατρέψουμε την φασματική μετακίνηση του σημείου επιτελεστικότητας που προκύπτει από την μέθοδο **MADRS** σε αντίστοιχη μετακίνηση οροφής κτιρίου.

Η μετακίνηση της οροφής συνδέεται με την φασματική μετακίνηση όπως προκύπτει από τις σχέσεις που δίνονται στο **ATC-40 [2]** με την σχέση

$$Sd = \frac{\Delta o\rho o\varphi}{\Gamma * \varphi 1}$$ και η φασματική επιτάχυνση από την $$Sa = \frac{V/M}{a1}$$

Όπου ο **συντελεστής συμμετοχής Γ** (**PF_1** στο **ATC-40**) δίνεται από την σχέση

$$\Gamma = \frac{\Sigma mi * \varphi i}{\Sigma mi * \varphi \iota^2}$$

Το **ποσοστό συμμετοχής της μάζας** της 1ης ιδιομορφής δίνεται από την σχέση

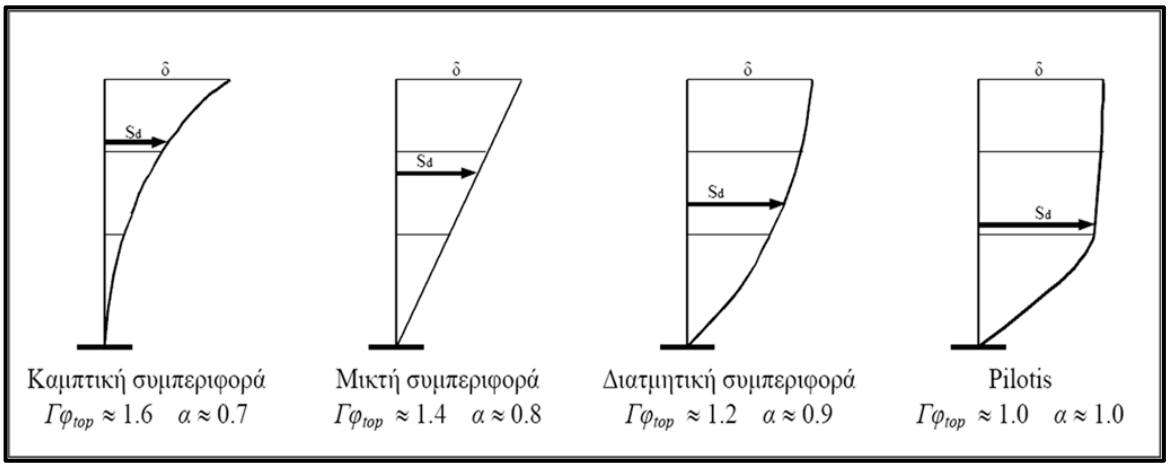
$$a1 = \Gamma * \frac{\Sigma mi * \varphi i}{\Sigma mi}$$

Ενώ **M** = Σmi είναι η συνολική μάζα, **V** είναι η τέμνουσα βάσης , $\Delta o\rho o\varphi$ είναι η μετακίνηση οροφής του κτιρίου και **φi** είναι το πλάτος (amplitude of mode) της 1ης ιδιομορφής .

Για να μετατραπεί η μετακίνηση **Sd** του ισοδύναμου μονοβαθμίου σε μετακίνηση οροφής του κτιρίου βάσει των παραπάνω σχέσεων πρέπει

$$\Delta o\rho o\varphi = Sd * \Gamma * \varphi 1.$$

Στο **ATC-40[2]** παραθέτονται τιμές των **Γ*φ1, α1** για διάφορες βασικές μορφές της θεμελιώδους ιδιομορφής των κτιρίων.



Σχήμα 1: Τιμές Γ,φ1,α1 για διάφορες ιδιομορφές [2] (ATC-40)

Βλέπουμε ότι η πρώτη (**α**) αφορά συμπεριφορά **καμπτικού προβόλου**, η δεύτερη (**β**) αφορά **μικτή** συμπεριφορά, η τρίτη (**γ**) συμπεριφορά **διατμητικού προβόλου** και η τελευταία (**δ**) συμπεριφορά με **εύκαμπτο ισόγειο**.

Είναι γνωστό **[3]** ότι τα πλαίσια εμφανίζουν συμπεριφορά τύπου (**γ**) **διατμητικού προβόλου,** τα πλαίσια με τοιχοποιία τείνουν προς την μικτή συμπεριφορά τύπου (**β**) , τα αμιγή τοιχία προς την συμπεριφορά τύπου (**α**) **καμπτικού προβόλου,** τα κτίρια με μικτό σύστημα εμφανίζουν μικτή συμπεριφορά τύπου **(β),** τα συστήματα τοιχίων με εύκαμπτες δοκούς τύπου **(α)** και τα συστήματα τοιχίων με αμφίπακτες ισχυρές δοκούς τύπου **(β).**

Σαν αντιπροσωπευτικές κατηγορίες κτιρίων επελέγησαν ορισμένες από τις κατηγορίες του HAZUS που περιλαμβάνονται σαν βάση δεδομένων στο SELENA , και συνοδεύονται και από τις αντίστοιχες καμπύλες ικανότητας, φαίνονται δε συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1					
α/α	όνομα	περιγραφή	όροφοι	ύψος	Καμπύλη ικανοτ.
1	C3L	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	2	6	C3L-pre
2	C3L	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	2	6	C3L-low
3	C3M	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	5	15	C3M-pre
4	C3M	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	5	15	C3M-low
5	C2M	Κτίρια με τοιχώματα οπλ. σκυροδέματος	2	5	C2M-mod
6	C2L	Κτίρια με τοιχώματα οπλ. σκυροδέματος	2	6	C2L-mod
7	URLM	Άοπλη τοιχοποιία	1	3	URLM-pre
8	C3H	Πλαίσια σκυρ. Με τοιχοποιία	12	36	C3H-low
9	W1	Ξύλινες κατοικίες	1	3	W1-mod

Από τις κατηγορίες αυτές οι C3L,C3M, τόσο χωρίς κανονισμό (pre-code) όσο και με χαμηλό επίπεδο κανονισμού (low-code) θεωρείται ότι σαν πλαίσια έχουν συμπεριφορά τύπου (γ).

Οι κατηγορίες C2M,C2L για χαμηλό (low-code) και μέτριο κανονισμό (moderate-code) αντίστοιχα αφορούν κτίρια με τοιχία και θεωρείται ότι έχουν συμπεριφορά τύπου (β).

Επίσης και οι κατηγορίες URLM κτίρια από τοιχοποιία προ κανονισμού(pre), C3H πλαίσια οπλ. Σκυροδέματος με τοιχοποιία με χαμηλό επίπεδο κανονισμού (low-code) και W1 που αφορά ξύλινες κατοικίες με μέτριο κανονισμό (moderate code) , θεωρείται ότι έχουν συμπεριφορά τύπου (β).

Με βάση τα ανωτέρω καταρτίστηκε ο πίνακας 2 που σε κάθε κατηγορία αντιστοιχεί τον προβλεπόμενο τύπο συμπεριφοράς και τους συντελεστές **Γ*φ1, α1 ,** όπως προκύπτουν από το σχήμα 1 του ATC-40.

Πίνακας 2					
α/α	όνομα	περιγραφή	**Γ*φ1**	**α1**	Καμπύλη ικανοτ.
1	C3L	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	1,20	0,90	C3L-pre
2	C3L	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	1,20	0,90	C3L-low
3	C3M	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	1,20	0,90	C3M-pre
4	C3M	Πλαίσια οπλ. σκυροδέματος	1,20	0,90	C3M-low
5	C2M	Κτίρια με τοιχώματα οπλ. σκυροδέματος	1,40	0,80	C2M-mod
6	C2L	Κτίρια με τοιχώματα οπλ. σκυροδέματος	1,40	0,80	C2L-mod
7	URLM	Άοπλη τοιχοποιία	1,40	0,80	URLM-pre
8	C3H	Πλαίσια σκυρ. Με τοιχοποιία	1,40	0,80	C3H-low
9	W1	Ξύλινες κατοικίες	1,40	0,80	W1-mod

Οι καμπύλες ικανότητας με κατάληξη **pre** θεωρούνται ότι δεν έχουν κανονισμό (αντίστοιχα με τα ελληνικά προ 1955), όσες έχουν κατάληξη **low** αφορούν κανονισμό χαμηλών απαιτήσεων (θεωρούμε ότι είναι αντίστοιχα με τους κανονισμούς μετά το 1955 και προ του 1987) ενώ όσες έχουν κατάληξη **mod** αφορούν κανονισμό μετρίων απαιτήσεων (θεωρούμε ότι είναι αντίστοιχα με τους κανονισμούς μετά το 1987 και πριν από το 2000).

4.2. ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ 2 ΜΕΘΟΔΩΝ

Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια ρουτίνα στο MATLAB που καλεί απευθείας τις ρουτίνες των 2 μεθόδων (**madrs.m** και **imp_dcm.m**) που με βάση τις καμπύλες pushover των επιλεγμένων τύπων κτιρίων και χρησιμοποιώντας σαν φάσμα απαίτησης το φάσμα του **EC8-τύπου1** μας δίνει σαν αποτέλεσμα τις εκτιμήσεις των 2 μεθόδων για το σημείο επιτελεστικότητας.

Η ρουτίνα είναι η ακόλουθη.

```
 function  testMadrsIDcm %(method)
%
% test MADRS - IDCM (methods)
%
% (c) Παναγιώτης Κλειώσης 2016
%
% method - string, which can be one of '1'/'MADRS','2'/'I_DCM '.
%
% $Revision: 1 $ $Date: 17-3-2016


pga=0.5; % ορίζουμε το υποτιθέμενο σεισμικό συμβάν (g)

% ΟΡΙΖΩ CAPCURVE (C3L-low)από βάση δεδομένων SELENA
  capcurve=[0 0
0.00127 0.44201263
0.00254 0.79743432
0.00381 1.0832283
0.00508 1.3130349
0.00635 1.497822
0.00762 1.646409
0.00889 1.7658876
0.01016 1.8619601
0.01143 1.9392119
0.0127 2.00133
0.01397 2.0512789
0.01524 2.091443
0.01651 2.1237386
0.01778 2.1497077
0.01905 2.1705892
0.02032 2.1873801
0.02159 2.2008816
0.02286 2.2117382
```

```
0.02413 2.2204679
0.0254 2.2274874
0.02667 2.2331319
0.02794 2.2376705
0.02921 2.2413201
0.03048 2.2442547
0.03175 2.2466144
0.03302 2.2485118
0.03429 2.2500375
0.03556 2.2512643];

elasticsd=0.0021; %όριο ελαστικότητας elasticsd της CAPCURVE (C3L-low)
                  % περιέχεται στο αρχείο capacity1.txt
Beta0=0.10;%όχιεπίδραση του εδάφους στην απόσβεση β0=βi βάσει FEMA440
           % βi Elastic damping περιέχεται στο αρχείο capacity1.txt
             (5%(MH), 5-7%(S), 7%(C,P), 7-10%(RM), 10%(URM,M) and 10-15%(W))
           % ΟΡΙΖΩ ΤΟ ec8t1(5,5)(Td,Tc,Tb,S του φάσματος για έδαφος A,B,C,D,E)

ec8t1 = [1.0  2.00  0.15  0.4  1.0
       2.0  2.00  0.15  0.5  1.20
       3.0  2.00  0.20  0.6  1.15
       4.0  2.00  0.20  0.8  1.35
       5.0  2.00  0.15  0.5  1.40];

 pesh= ec8t1;
 % προσθέτω την επίδραση της PGA (=ag)

  for z=1:5
    pesh(z,5)=pesh(z,5)*pga;
  end;

 % η πέμπτη στήλη περιέχει τώρα την PGA ενισχυμένη ανάλογα το έδαφος
 % για να πάρουν οι MADRS και IDCM το φάσμα της σεισμικής απαίτησης

nc=1;% ΟΡΙΖΩ τύπο εδάφους (A.B,C,D,E) για EC8-type 1
spcode=2; % ΟΡΙΖΩ EC8-type 1
periods=10; % ΧΡΕΙΑΖΕΤΑΙ ΜΟΝΟ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ ΙΝΔΙΑΣ
mag=0; % ΧΡΕΙΑΖΕΤΑΙ ΜΟΝΟ ΓΙΑ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ ΚΟΥΒΑΣ

disp('1 for MADRS , 2 for I-DCM');
% meth=1;
meth=input('method=');
switch meth

 case 1  % ΜΕΘΟΔΟΣ MADRS


  % ΚΑΛΩ ΤΗΝ spectrashape  ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΤΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ Sa(T),Sd(T)
  % για την PGA(εδώ ag=PGA)
  [sd,sa]=spectralshape(spcode,mag,nc,pesh,periods);

   % ΚΑΛΩ ΤΗΝ madrs που ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΣΗΜΕΙΟ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤ. (Sa,Sd)
  [MadSd,MadSa]=madrs(Beta0,elasticsd,sa,sd,capcurve);

  disp('MADRS');
```

```
X = [ ' sa(m/sec2)= ', num2str(MadSa), ' sd(m)=',num2str(MadSd)];
disp(X); % εκτυπώνει το σημείο επιτελεστικότητας από MADRS

case 2    % ΜΕΘΟΔΟΣ I-DCM


 % ΚΑΛΩ ΤΗΝ spectrashape ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ Sa(T),Sd(T)
 [sd,sa]=spectralshape(spcode,mag,nc,pesh,periods);

  % ΚΑΛΩ ΤΗΝ IDCM που ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΣΗΜΕΙΟ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤ. (Sd)
 psdi=imp_dcm(elasticsd,sa,sd,capcurve,spcode,nc);

 disp('I-DCM');
 Y = [ ' sd(m)= ', num2str(psdi)];
disp(Y); % εκτυπώνει το σημείο επιτελεστικότητας από I-DCM

otherwise
 disp('Unknown method.')

end
```

Ως φάσμα απαίτησης χρησιμοποιήθηκε το φάσμα του **EC8 τύπου 1** για κατηγορίες **εδάφους Α και Γ** ενώ σαν **σεισμικό γεγονός θεωρήθηκε PGA=0.5g**.

Ο υπολογισμός των τιμών Sa, Sd του φάσματος απαίτησης υπολογίζεται με κλήση της ρουτίνας του SELENA **spectrashape.m** για τον κανονισμό EC8 τύπου 1 για κατηγορία εδάφους Α και Γ που επιλέξαμε.

Οι τιμές του ορίου ελαστικότητας και το β_0 για κάθε κατηγορία κτιρίου περιλαμβάνονται στο αρχείο **capacity1.txt** του SELENA.

Η τιμή μετακίνησης που υπολογίζεται από την μέθοδο **IDCM** αφορά την μετακίνηση της οροφής του κτιρίου **Δοροφ**, ενώ η μετακίνηση που υπολογίζεται από την μέθοδο **MADRS** αφορά την μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου **Sd.** Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα θα πρέπει να μετατρέψουμε τα αποτελέσματα της MADRS σε μετακινήσεις οροφής βάσει της σχέσης **Δοροφ = Sd*Γ*φ1.**

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2									
Κατηγορία εδάφους Α									
Α/Α	Τύπος κτιρίου	Όριο Ελαστικότ.	Βο(%)	MADRS				I-DCM	Λόγος (%)
				Sa(m/s2)	Sd(m)	Γ*φ1	δ(m)	δ(m)	
1	C3L-pre	0.0021	10	2.1777	0.0245	1,20	0,0294	0.0324	90,7
2	C3L-low	0.0021	10	2.2209	0.0242	1,20	0,0290	0.0323	89,8
3	C3M-pre	0.0046	10	1.7767	0.0403	1,20	0,0484	0.0306	158,2
4	C3M-low	0.0046	10	1.787	0.0410	1,20	0,0492	0.0310	158,7
5	C2M-mod	0.0092	7	3.155	0.04	1,40	0,056	0.0266	210,5
6	C2L-mod	0.0043	7	4.1945	0.0253	1,40	0,0354	0.0197	179,7
7	URLM-pre	0.0043	10	3.6109	0.0253	1,40	0,0354	0.0199	177,9
8	C3H-low	0.013	10	1.2264	0.0789	1,40	0,1105	0.0500	221,0
9	W1-mod	0.0064	15	5.7403	0.0250	1,40	0,035	0.0171	204,7
Κατηγορία εδάφους Γ									
Α/Α	Τύπος κτιρίου	Όριο Ελαστικότ.	Βο(%)	MADRS				I-DCM	Λόγος (%)
				Sa(m/s2)	Sd(m)	Γ*φ1	δ(m)	δ(m)	
1	C3L-pre	0.0021	10	2.2031	0.0456	1,20	0,0547	0.1345	40,7
2	C3L-low	0.0021	10	2.2513	0.0453	1,20	0,0544	0.1343	40,5
3	C3M-pre	0.0046	10	1.8157	0.0673	1,20	0,0808	0.0680	118,8
4	C3M-low	0.0046	10	1.8281	0.0677	1,20	0,0812	0.0686	118,4
5	C2M-mod	0.0092	7	3.6797	0.0615	1,40	0,0861	0.0476	180,9
6	C2L-mod	0.0043	7	4.6498	0.0387	1,40	0,0542	0.0495	109,5
7	URLM-pre	0.0043	10	3.842	0.0388	1,40	0,0543	0.0503	108,0
8	C3H-low	0.013	10	1.304	0.1213	1,40	0,1698	0.0767	221,4
9	W1-mod	0.0064	15	7.0589	0.0383	1,40	0,0536	0.0359	149,3

Βλέπουμε ότι για κατηγορία εδάφους Α έχουμε σημαντικές διαφορές στις εκτιμήσεις των 2 μεθόδων που φτάνουν μέχρι το 221%, ενώ η MADRS υπερεκτιμά τις Sd στις περισσότερες των περιπτώσεων εκτός από τις περιπτώσεις των C3L-pre και C3L-low που τις υπερεκτιμά ελαφρά (περίπου 10%) η I-DCM.

Στην κατηγορία εδάφους Γ πάλι έχουμε αντίστοιχη συμπεριφορά με διαφορές που φθάνουν το 221%, όμως για τις κατηγορίες C3M-pre C3M-low C2L-mod URLM-pre οι διαφορές είναι σημαντικά μικρότερες (<20%) .

Εδώ η I-DCM κάνει σημαντική υπερεκτίμηση (περίπου 60%) στις περιπτώσεις των κτιρίων C3L-pre και C3L-low.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός στην πολύ μεγάλη διαφορά της εκτίμησης που κάνουν οι 2 μέθοδοι για τα πολύ ψηλά κτίρια με χαμηλό επίπεδο κανονισμού C3H-low της τάξης 220% η οποία παραμένει και για τις 2 κατηγορίες εδάφους.

Η διαφορά στην απευθείας σύγκριση των 2 μεθόδων φαίνεται να είναι σημαντική, γεγονός που μπορεί να επιδράσει σημαντικά και στα τελικά αποτελέσματα της σεισμικής διακινδύνευσης που θα διερευνήσουμε στην επόμενη παράγραφο .

4.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ 2 ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΑ ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Θα συγκρίνουμε τα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν για το ίδιο σεισμικό σενάριο με μόνη διαφορά την μέθοδο υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας που θα γίνει με τις 2 μεθόδους **MADRS** και **I-DCM.**

Στόχος είναι να διερευνήσουμε την επίδραση τους στο τελικό αποτέλεσμα.

Επιλέξαμε την πιθανοκρατική μέθοδο διότι μπορούμε να προκαθορίσουμε την ίδια PGA απευθείας σε όλες τις περιοχές που θα έχουν και το ίδιο τύπο εδάφους, ώστε να εστιάσουμε στην επίδραση της μεθόδου υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας και τα αποτελέσματα να είναι αντίστοιχα με αυτά της προηγούμενης παραγράφου.

Η χρήση της ντετερμινιστικής μεθόδου που κάνει χρήση σχέσεων απόσβεσης θα περιέπλεκε τα αποτελέσματα καθώς θα έδινε διαφορετικές PGA σε κάθε περιοχή αναλόγως της απόστασης από το ρήγμα, η δε χρήση διαφορετικού τύπου εδάφους θα έδινε πάλι διαφορετική σεισμική διέγερση σε κάθε περιοχή και έτσι δεν θα μπορούσαν να γίνουν συγκρίσεις με τα αποτελέσματα της παραγράφου 2 που έχουν γίνει για PGA=0,50g και για τον ίδιο τύπο εδάφους (A ή C ανά περίπτωση) .

Επιλέξαμε ίδιο κανονισμό EC8 τύπου 1 όπως και στην παράγραφο 2..

Η σύγκριση θα γίνει στις 9 χαρακτηριστικές κατηγορίες κτιρίων από τους τύπους κτιρίων του HAZUS που περιλαμβάνονται στο SELENA, και είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο και φαίνονται στον πίνακα 1.

Η μέθοδος λοιπόν θα είναι η πιθανοκρατική και το σενάριο θα έχει ως εξής :

Οι 6 περιοχές με τα ίδια εδαφικά χαρακτηριστικά (soil type=C, vs30=250m/s) αλλά με διαφορετική κατανομή κτιρίων θα υποβληθούν σε σεισμό ώστε να αναπτυχθεί σε κάθε μια από αυτές PGA=0.50g.

.Στο αρχείο **shakefiles.txt** εισάγω ότι θα χρησιμοποιηθεί ο EC8 type 1 για ένα σενάριο.

1	shakecenter1.txt	2

Στο αρχείο **shakecenter1.txt** εισάγονται οι συντεταγμένες των περιοχών, τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι ίδια σε όλες soil type=C, vs30=250m/s, και η ίδια σε όλες PGA=0.50g.

%GEOUNI	LATITUDE	LONGITUDE	SOIL	Vs30	PGA	SA0_3	SA1_0
1	44.48105	26.06404	3	250	0.2548	0.316	0.0866
2	44.45481	26.13614	3	250	0.2548	0.316	0.0866
3	44.41398	26.17145	3	250	0.2548	0.316	0.0866
4	44.37972	26.12063	3	250	0.2548	0.316	0.0866
5	44.39916	26.06493	3	250	0.2548	0.316	0.0866
6	44.4438	26.01057	3	250	0.2548	0.316	0.0866

Στο αρχείο **vulerfiles.txt** εισάγουμε την πληροφορία ότι οι καμπύλες ικανότητας περιέχονται στο αρχείο capacity1.txt (2η στήλη), και οι καμπύλες θραυστότητας περιέχονται στο αρχείο fragility1.txt (3η στήλη).

1	capacity1.txt	fragility1.txt

Η διαφορετική μέθοδος MADRS ή I-DCM δηλώνεται στο αρχείο cpfiles.txt για κάθε επίλυση ξεχωριστά.

4.3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ MADRS

Στο αρχείο **cpfiles.txt** δηλώνεται ότι για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος **MADRS** (επιλογή 2 στην 1η στήλη), ότι οι βλάβες θα υπολογιστούν σε μορφή εμβαδού εκφρασμένου σε m^2 (επιλογή 1 στην 2η στήλη), και ότι οι απώλειες ζωής θα υπολογιστούν βάσει της μεθόδου του HAZUS (επιλογή 2 στην 3η στήλη).

2	1	2

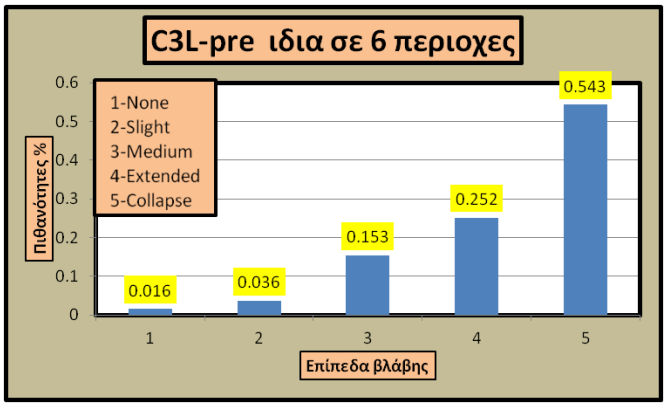
Α) ΒΛΑΒΕΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

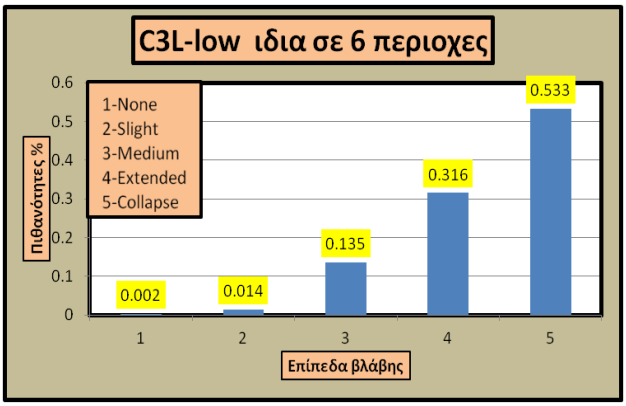
Από την επίλυση στο αρχείο **dout1.txt** φαίνονται οι πιθανότητες που έχει το κάθε κτίριο να αναπτύξει βλάβες 5 επιπέδων (καθόλου-μικρές-μέτριες-μεγάλες-πλήρης βλάβη). Τα επίπεδα βλάβης κάθε τύπου κτιρίου είναι ίδια και στις 6 περιοχές, γεγονός αναμενόμενο εφόσον έχουν την ίδια PGA και τον ίδιο τύπο **εδάφους κατηγορίας C, αφού δεν εμπλέκεται σχέση απόσβεσης που θα έβαζε την παράμετρο της απόστασης (πιθανοκρατική μέθοδος)**.

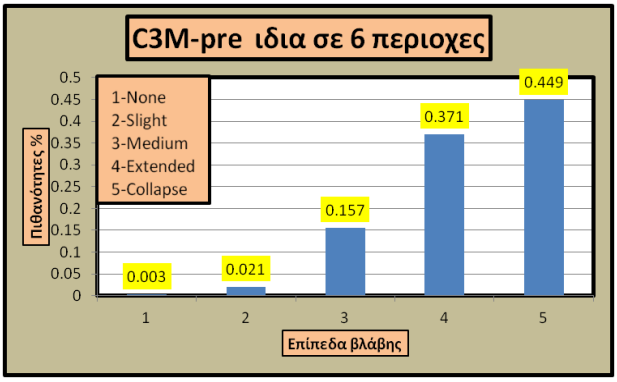
Τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

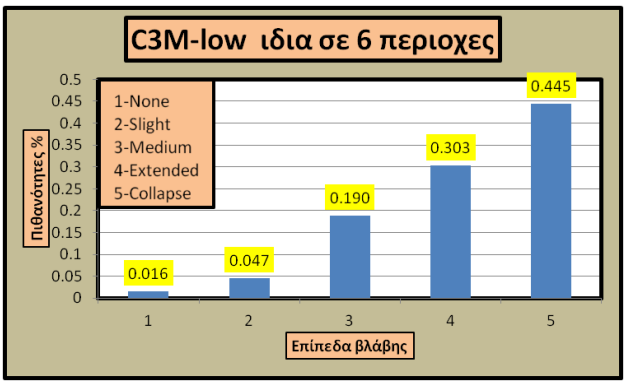
	ΕΠΙΠΕΔΟ ΒΛΑΒΩΝ				
ΤΥΠΟΣ	ΚΑΜΜΙΑ	ΜΙΚΡΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΓΑΛΗ	ΠΛΗΡΗΣ
C3L-pre	0.0156	0.0363	0.1533	0.2515	0.5433
C3L-low	0.0024	0.0136	0.1352	0.3155	0.5333
C3M-pre	0.0031	0.0212	0.1565	0.3706	0.4487
C3M-low	0.0162	0.0466	0.1895	0.3029	0.4448
C2M-mod	0.0105	0.0576	0.3572	0.3893	0.1855
C2L-mod	0.0224	0.1061	0.3366	0.3739	0.1611
URLM-pre	0.0083	0.0347	0.1302	0.2325	0.5942
C3H-low	0.0002	0.0055	0.1381	0.3106	0.5456
W1-mod	0.1083	0.3362	0.4262	0.0955	0.0338

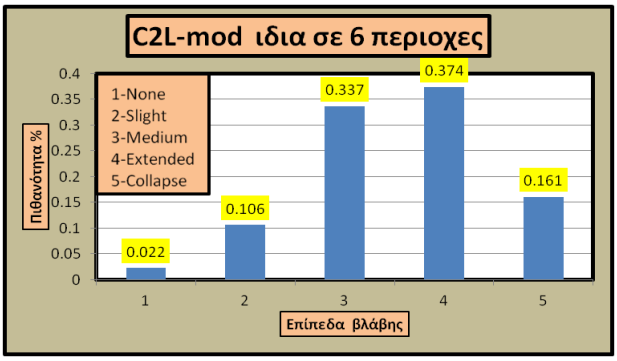
Αναλυτικά τα αποτελέσματα είναι

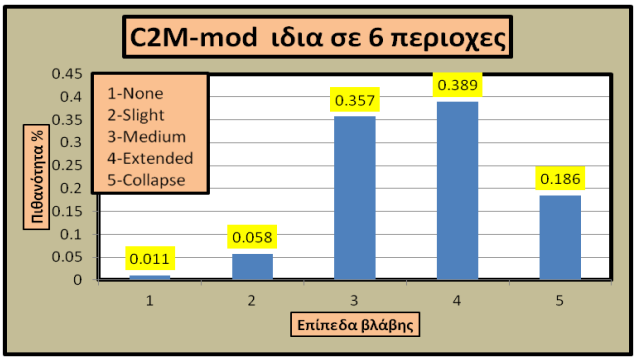


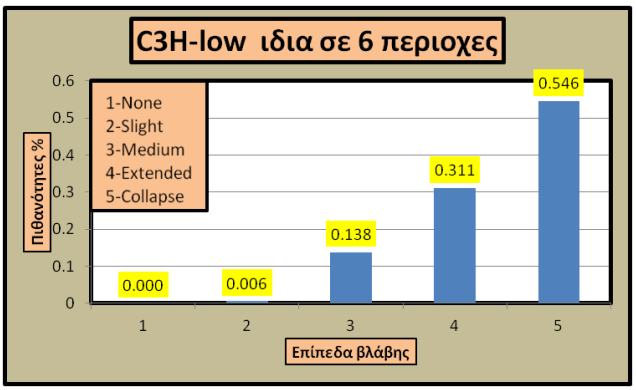


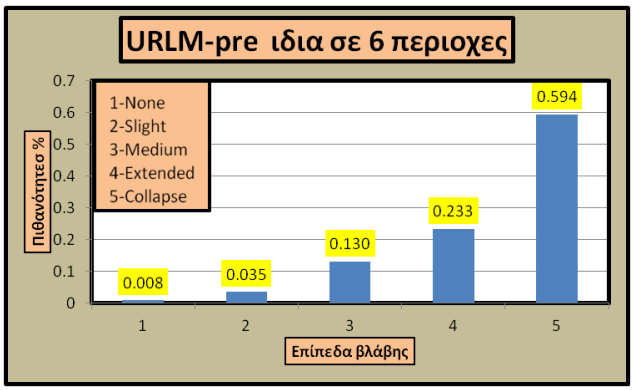

C3M-pre ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
0.003
0.021
0.157
0.371
0.449

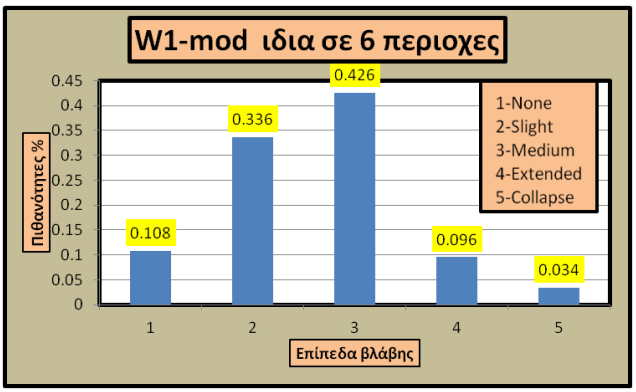

C3M-low ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
0.016
0.047
0.190
0.303
0.445


C2L-mod ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητα %
Επίπεδα βλάβης
0.022
0.106
0.337
0.374
0.161


C2M-mod ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητα %
Επίπεδα βλάβης
0.011
0.058
0.357
0.389
0.186


C3H-low ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
0.000
0.006
0.138
0.311
0.546


URLM-pre ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητεσ %
Επίπεδα βλάβης
0.008
0.035
0.130
0.233
0.594

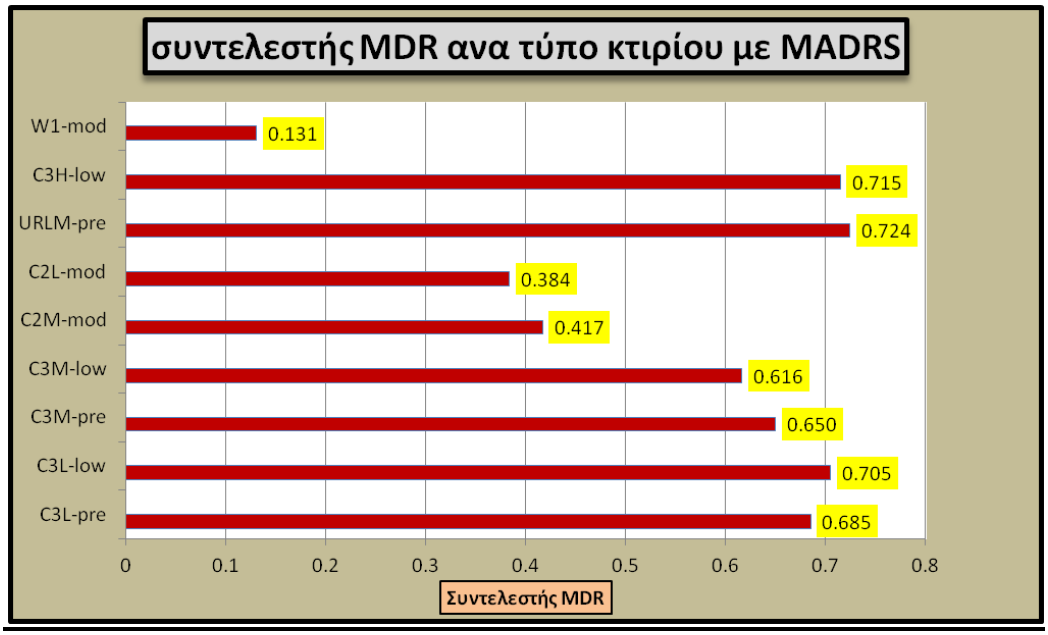

W1-mod ιδια σε 6 περιοχες
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
0.108
0.336
0.426
0.096
0.034

Β) ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ MDR ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

Από την επίλυση στο αρχείο **mdrtot.txt** φαίνεται ο μέσος συντελεστής βλάβης MDR που έχει το κάθε κτίριο ο οποίος είναι ίδιος και στις 6 περιοχές, γεγονός αναμενόμενο εφόσον έχουν την ίδια PGA και τον ίδιο τύπο εδάφους κατηγορίας C **αφού δεν εμπλέκεται σχέση απόσβεσης που θα έβαζε την παράμετρο της απόστασης (πιθανοκρατική μέθοδος)**..

Τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

ΤΥΠΟΣ	mdr
C3L-pre	0.685106
C3L-low	0.70482
C3M-pre	0.650048
C3M-low	0.616132
C2M-mod	0.416988
C2L-mod	0.383832
URLM-pre	0.724164
C3H-low	0.714846
W1-mod	0.130866



Φαίνεται ότι το μικρότερο συντελεστή βλαβών τον έχουν τα 2ώροφα και 5ώροφα κτίρια οπλ. Σκυροδέματος με τοιχία με μέτριο κανονισμό (C2L-mod,C2M-mod) και τα ξύλινα ισόγεια κτίρια με μέτριο κανονισμό (W1-mod).

Τις περισσότερες βλάβες έχουν τα 12ώροφα κτίρια με χαμηλό κανονισμό (C3H-low) καθώς και τα ισόγεια με άοπλη τοιχοποιία χωρίς κανονισμό (URLM-pre).

Ακολουθούν πολύ κοντά σε βλάβες τα 2ώροφα και 5ώροφα κτίρια από οπλ. σκυροδέμα με πλαισιακή λειτουργία χωρίς κανονισμό (C3L-pre, C3M-pre) και τα αντίστοιχα με χαμηλό κανονισμό (C3L-low, C3M-low).

4.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ I-DCM

Στο αρχείο **cpfiles.txt** δηλώνεται ότι για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος **I-DCM** (επιλογή 3 στην 1η στήλη), ότι οι βλάβες θα υπολογιστούν σε μορφή εμβαδού εκφρασμένου σε m^2 (επιλογή 1 στην 2η στήλη), και ότι οι απώλειες ζωής θα υπολογιστούν βάσει της μεθόδου του HAZUS (επιλογή 2 στην 3η στήλη).

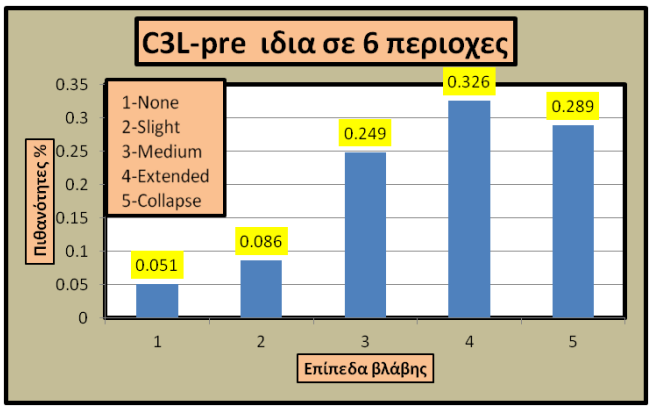
Α) ΒΛΑΒΕΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

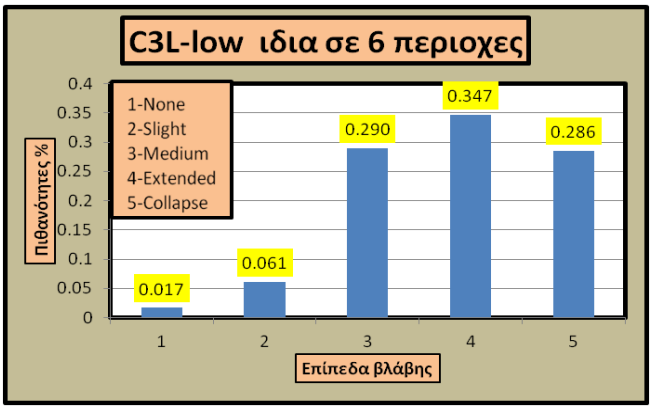
Από την επίλυση στο αρχείο **dout1.txt** φαίνονται οι πιθανότητες που έχει το κάθε κτίριο να αναπτύξει βλάβες 5 επιπέδων (καθόλου-μικρές-μέτριες-μεγάλες-πλήρης βλάβη).τα επίπεδα βλάβης κάθε τύπου κτιρίου είναι ίδια και στις 6 περιοχές, γεγονός αναμενόμενο εφόσον έχουν την ίδια PGA και τον ίδιο τύπο εδάφους κατηγορίας C, **αφού δεν εμπλέκεται σχέση απόσβεσης που θα έβαζε την παράμετρο της απόστασης (πιθανοκρατική μέθοδος)**..

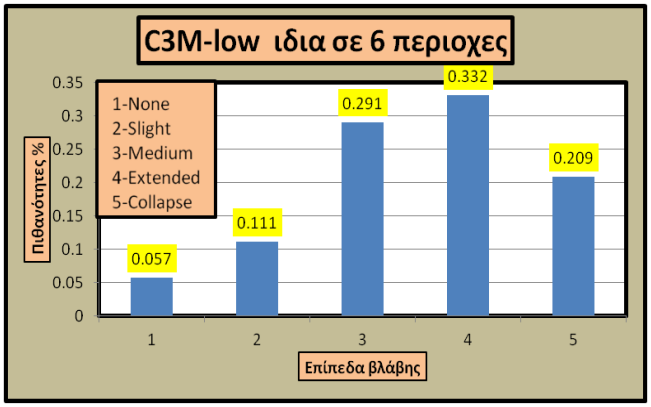
Τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

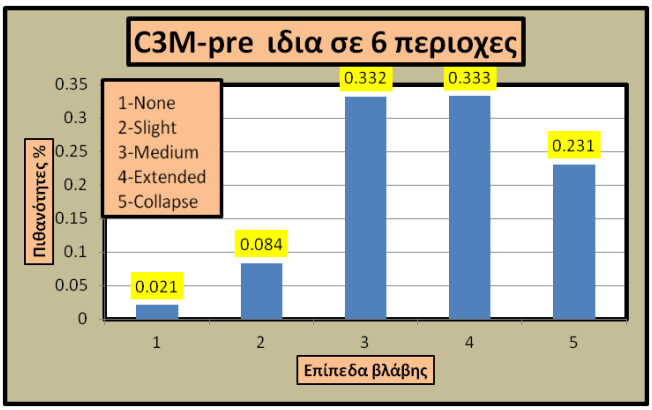
	ΕΠΙΠΕΔΟ ΒΛΑΒΩΝ				
ΤΥΠΟΣ	ΚΑΜΜΙΑ	ΜΙΚΡΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΓΑΛΗ	ΠΛΗΡΗΣ
C3L-pre	0.0505	0.0864	0.2486	0.3255	0.2889
C3L-low	0.0168	0.0613	0.2896	0.3468	0.2856
C3M-pre	0.0206	0.0837	0.3319	0.3326	0.2311
C3M-low	0.0572	0.1112	0.291	0.3315	0.2091
C2M-mod	0.1464	0.2934	0.4496	0.0893	0.0213
C2L-mod	0.2425	0.3002	0.3174	0.1311	0.0088
URLM-pre	0.1002	0.1611	0.289	0.2513	0.1983
C3H-low	0.037	0.1803	0.4294	0.245	0.1084
W1-mod	0.1948	0.395	0.3413	0.0524	0.0165

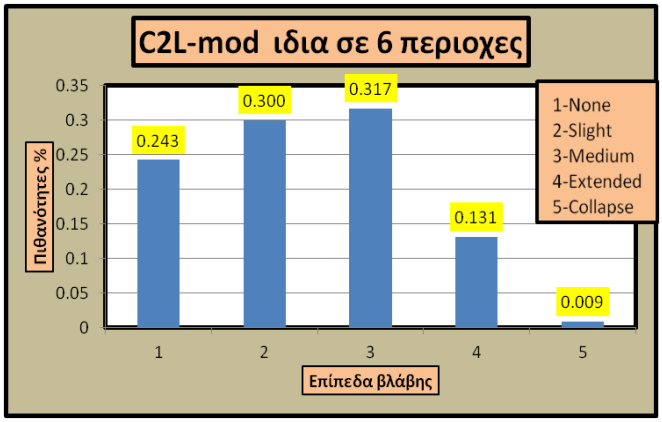
Αναλυτικά τα αποτελέσματα είναι

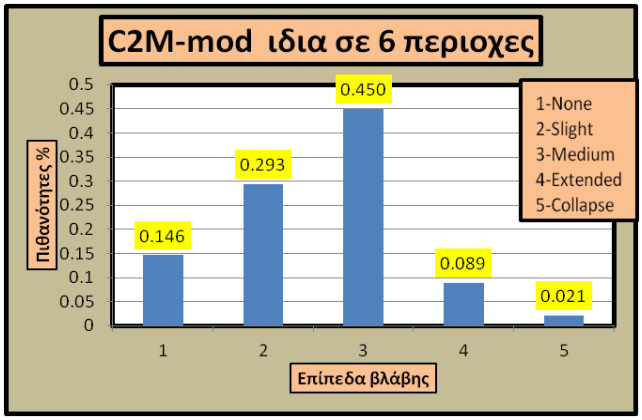


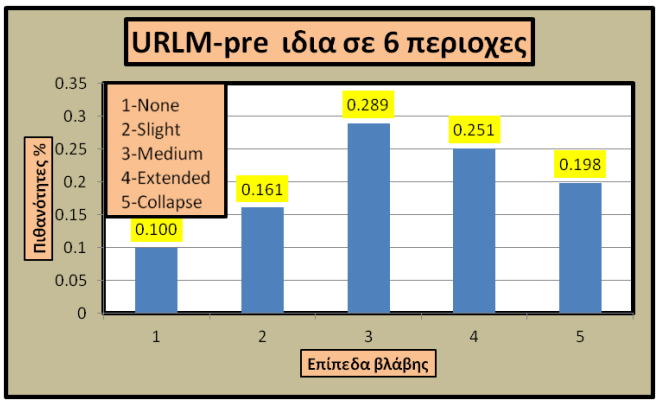


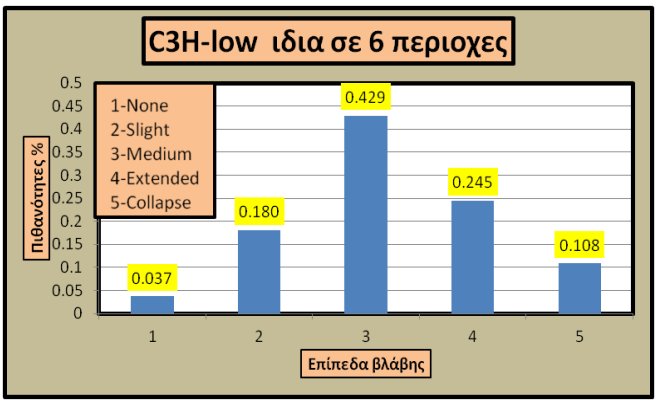

C3M-low ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.057
0.111
0.291
0.332
0.209

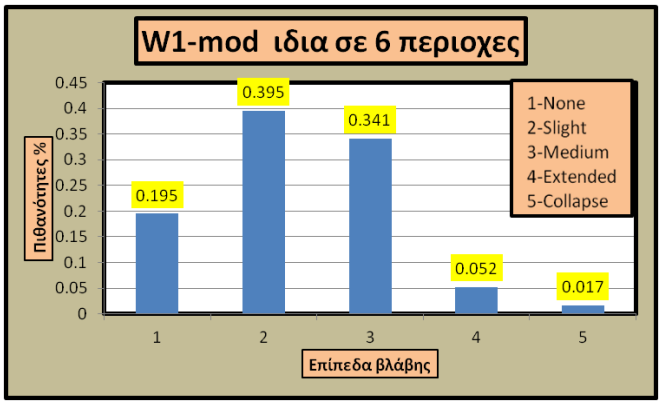

C3M-pre ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.021
0.084
0.332
0.333
0.231


C2L-mod ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.243
0.300
0.317
0.131
0.009


C2M-mod ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.146
0.293
0.450
0.089
0.021


URLM-pre ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.100
0.161
0.289
0.251
0.198


C3H-low ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.037
0.180
0.429
0.245
0.108

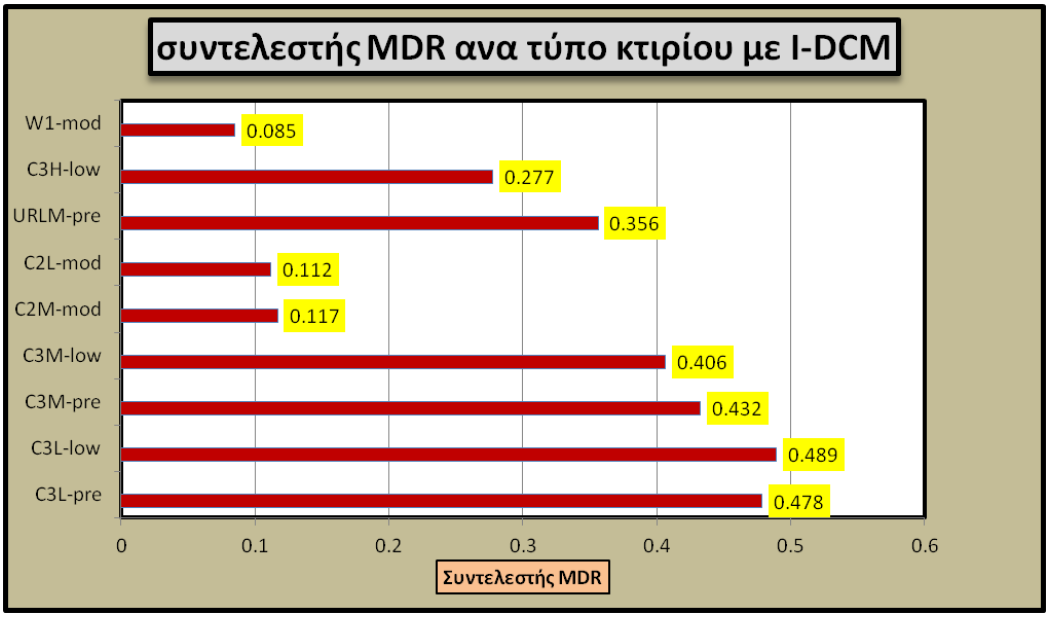

W1-mod ιδια σε 6 περιοχες
Πιθανότητες %
Επίπεδα βλάβης
1-None
2-Slight
3-Medium
4-Extended
5-Collapse
0.195
0.395
0.341
0.052
0.017

Β) ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ MDR ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

Από την επίλυση στο αρχείο **mdrtot.txt** φαίνεται ο μέσος συντελεστής βλάβης που έχει το κάθε κτίριο ο οποίος είναι ιδιος και στις 6 περιοχές, γεγονός αναμενόμενο εφόσον έχουν την ίδια PGA και τον ίδιο τύπο εδάφους κατηγορίας C **αφού δεν εμπλέκεται σχέση απόσβεσης που θα έβαζε την παράμετρο της απόστασης (πιθανοκρατική μέθοδος)**..

Τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

ΤΥΠΟΣ	mdr
C3L-pre	0.478238
C3L-low	0.489156
C3M-pre	0.432233
C3M-low	0.406174
C2M-mod	0.11675
C2L-mod	0.112094
URLM-pre	0.356072
C3H-low	0.277495
W1-mod	0.084705



Φαίνεται ότι το μικρότερο συντελεστή βλαβών τον έχουν τα 2όροφα και 5όροφα κτίρια οπλ. Σκυροδέματος με τοιχία με μέτριο κανονισμό (C2L-mod,C2M-mod) και τα ξύλινα ισόγεια κτίρια με μέτριο κανονισμό (W1-mod).

Τις περισσότερες βλάβες έχουν τα 2όροφα και 5όροφα κτίρια από οπλ. Σκυρόδεμα με πλαισιακή λειτουργία χωρίς κανονισμό (C3L-pre, C3M-pre) και ακολουθούν τα αντίστοιχα με χαμηλό κανονισμό (C3L-low, C3M-low).

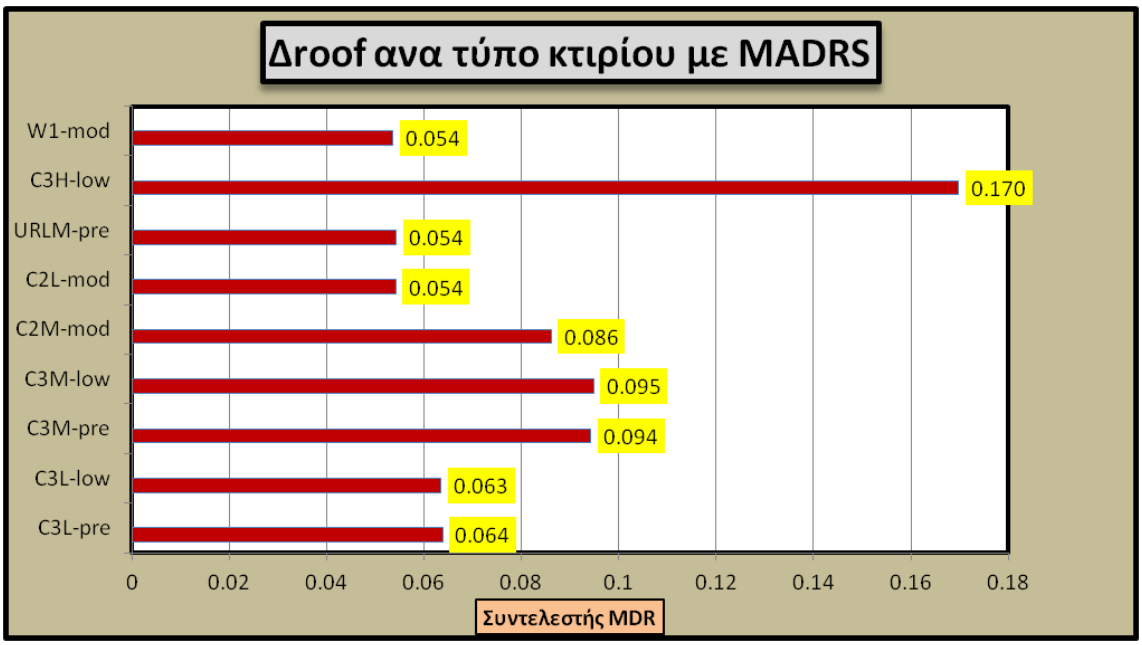
4.3.3. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

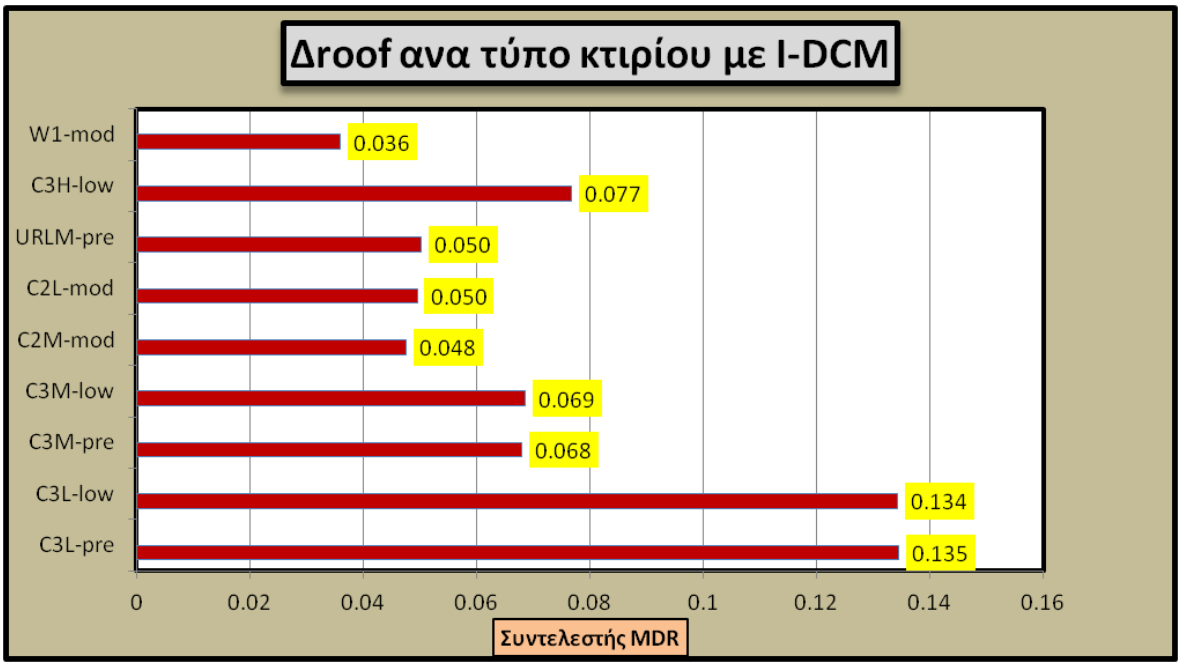
Τα αποτελέσματα που περιλαμβάνουν τα ποσοστά υπέρβασης των διαφόρων επιπέδων βλάβης ανά τύπο κτιρίου με τις 2 μεθόδους ενώ έδειξαν διαφοροποιήσεις ανά μέθοδο και τύπο κτιρίου δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα όπως είναι τα αποτελέσματα του μέσου συντελεστή βλαβών MDR.

Τα αποτελέσματα του μέσου συντελεστή βλαβών MDR με τις 2 μεθόδους όπως και οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν για την μετακίνηση οροφής παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα ώστε να διευκολύνεται η άμεση σύγκριση.

		ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ C					
		MADRS	IDCM		MADRS	IDCM	
	ΤΥΠΟΣ	mdr	mdr	ΛΟΓΟΣ	Δroof	Δroof	ΛΟΓΟΣ
	C3L-pre	0.685106	0.478238	1.432563	0.0547	0.1345	0.406691
	C3L-low	0.70482	0.489156	1.44089	0.0544	0.1343	0.405063
	C3M-pre	0.650048	0.432233	1.503931	0.0808	0.068	1.188235
	C3M-low	0.616132	0.406174	1.516916	0.0812	0.0686	1.183673
	C2M-mod	0.416988	0.11675	3.571618	0.0861	0.0476	1.808824
	C2L-mod	0.383832	0.112094	3.424198	0.0542	0.0495	1.094949
	URLM-pre	0.724164	0.356072	2.033757	0.0543	0.0503	1.079523
	C3H-low	0.714846	0.277495	2.57607	0.1698	0.0767	2.21382
	W1-mod	0.130866	0.084705	1.544957	0.0536	0.0359	1.493036

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται τα αποτελέσματα αναλυτικότερα.





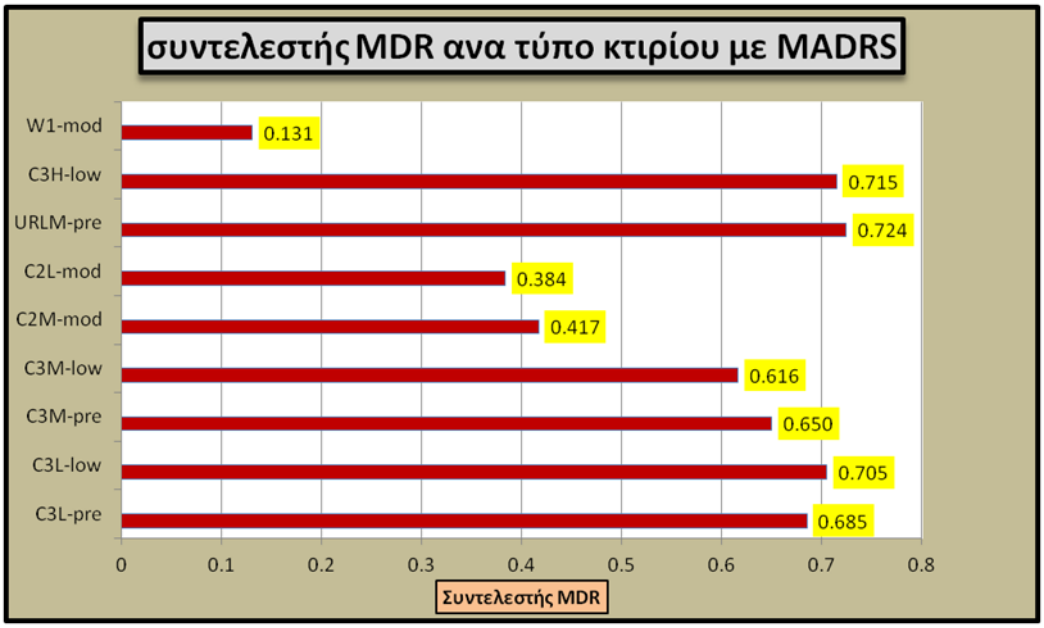
Στην απευθείας σύγκριση των εκτιμήσεων της μετακίνησης οροφής των 2 μεθόδων φαίνεται ότι υπάρχουν ποσοτικές διαφορές ανά τύπο κτιρίου . Διαφορές που φθάνουν και μέχρι το 80%.

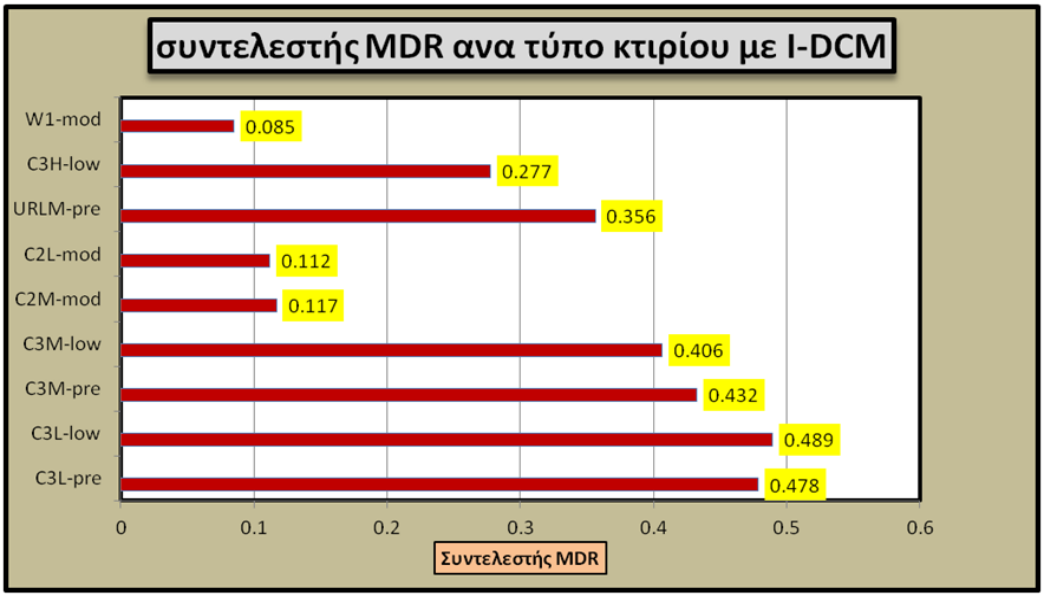
Η μέθοδος MADRS φαίνεται να υπερεκτιμά στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Εκτός από τις διαφορές συγκριτικά στον ίδιο τύπο κτιρίων βλέπουμε ότι η MADRS δίνει την μεγαλύτερη μετακίνηση στα 12όροφα κτίρια με χαμηλό κανονισμό (C3H-low) κάτι που φαίνεται λογικό, ενώ η IDCM στα 2όροφα πλαίσια οπλ. σκυροδέματος χωρίς κανονισμό ή με χαμηλό κανονισμό(C3L-pre,C3L-low) μεγαλύτερη δηλαδή από του 12όροφου κάτι που φαίνεται υπερβολικό.

Εκτός λοιπόν από τις ποσοτικές διαφορές υπάρχουν και ποιοτικές όσο αφορά στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις 2 μεθόδους . Η MADRS μας λέει ότι τα 12όροφα κτίρια με χαμηλό κανονισμό (C3H-low) θα αναπτύξουν μεγαλύτερη μετακίνηση, ενώ η IDCM τα 2όροφα πλαίσια οπλ. σκυροδέματος χωρίς κανονισμό ή με χαμηλό κανονισμό (C3L-pre,C3L-low).

Η κάθε μέθοδος δείχνει να υπερεκτιμά περισσότερο κάποιο τύπο κτιρίων σε σχέση με τους άλλους, και αυτή η τάση αφορά άλλο τύπο κτιρίων για την κάθε μέθοδο.





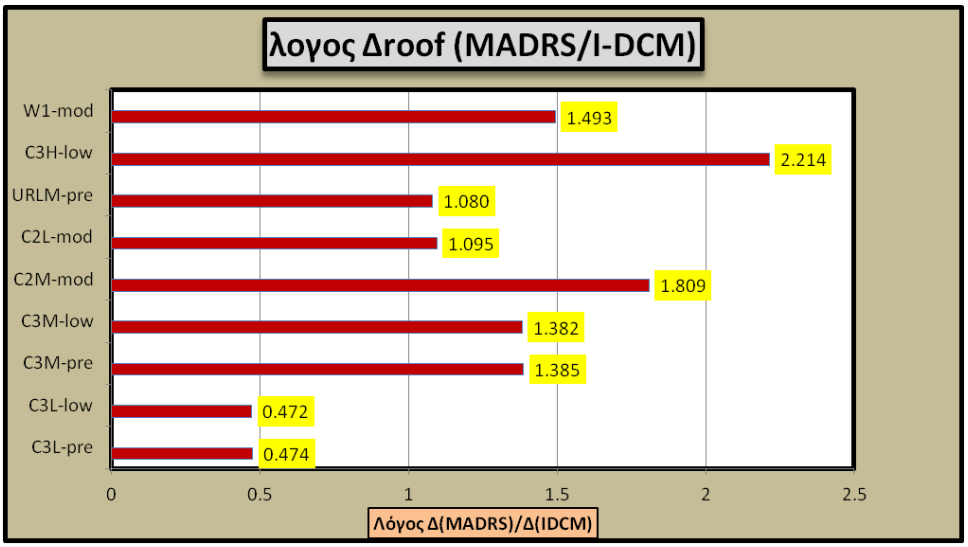
Στα τελικά αποτελέσματα του MDR βλέπουμε ότι η υπερεκτίμηση της MADRS για την μετακίνηση του τύπου C3H-low διατηρήθηκε, καθώς έδωσε τις μεγαλύτερες βλάβες από όλα τα κτίρια.

Είχαμε όμως και περιπτώσεις όπως των τύπων URLM-pre, C3L-low, C3L-pre που ενώ είχαν σχετικά μικρές μετακινήσεις αρχικά στα τελικά αποτελέσματα ανέπτυξαν τα υψηλότερα επίπεδα βλαβών.

Αντίστοιχα βλέπουμε ότι η υπερεκτίμηση της IDCM για την μετακίνηση των τύπων C3L-low, C3L-pre διατηρήθηκε, καθώς έδωσαν τις μεγαλύτερες βλάβες από όλα τα κτίρια.

Και για την IDCM όμως είχαμε τύπους κτιρίων όπως URLM-pre, C3M-low, C3M-pre που είχαν αρχικά μικρές μετακινήσεις σχετικά με τους άλλους τύπους αλλά στα τελικά αποτελέσματα είχαν από τις μεγαλύτερες βλάβες.

Η αιτία που ορισμένοι τύποι κτιρίων με σχετικά μικρές μετακινήσεις οροφής αρχικά στο τέλος ανέπτυξαν υψηλά επίπεδα βλαβών θα πρέπει να αποδοθεί στις καμπύλες θραυστότητας των κτιρίων. Στο γεγονός δηλαδή ότι η ίδια μετακίνηση σε διαφορετικό τύπο κτιρίου σημαίνει άλλο επίπεδο βλάβης.

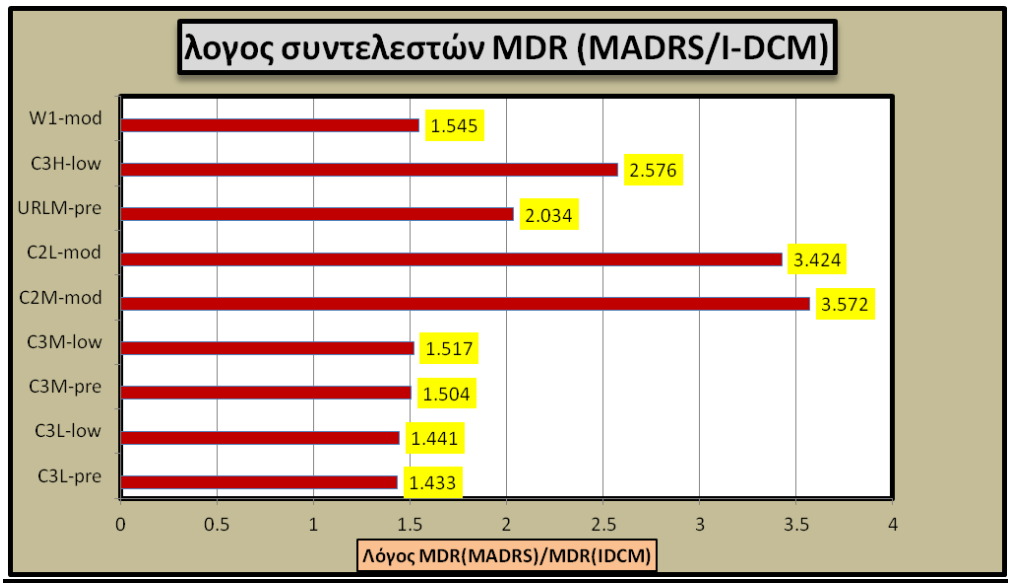


Στους λόγους Δroof βλέπουμε σημαντικές αποκλίσεις των εκτιμήσεων που δίνουν οι 2 μέθοδοι για τις μετακινήσεις οροφής των κτιρίων.

Στους περισσότερους τύπους κτιρίων υπάρχει σημαντική απόκλιση η οποία σε ακραίες περιπτώσεις ξεπερνά και το διπλασιασμό της εκτίμησης (C3H-low).

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι η MADRS υπερεκτιμά τις μετακινήσεις οροφής.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που υπερεκτιμά η IDCM όπως στους C3L-low, C3L-pre.



Στους λόγους MDR βλέπουμε ότι η γενική υπερεκτίμηση των μετακινήσεων της MADRS διατηρήθηκε και στα τελικά επίπεδα βλάβης.

Σε μερικούς τύπους κτιρίων είχαμε ενίσχυση της υπερεκτίμησης στο τελικό επίπεδο βλάβης όπως στους τύπους C2L-mod, C2M-mod που ανέπτυξαν λόγο 3,5 σε σχέση με την IDCM.

Και εδώ οι υπερβολικές αυξήσεις θα πρέπει να αποδοθούν στις καμπύλες θραυστότητας.

Στις καμπύλες θραυστότητας αλλά και στον ορισμό του MDR θα πρέπει να αποδοθεί και η περίπτωση των C3L-low, C3L-pre που ενώ είχαμε υποεκτίμηση της μετακίνησης οροφής τους από την MADRS στο τέλος έχουμε υπερεκτίμηση του επιπέδου βλαβών.

4.4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά το γεγονός ότι το εύρος του δείγματος των συγκρίσεων είναι μικρό για γενικά συμπεράσματα, εντούτοις διαφαίνονται κάποιες “τάσεις”.

Οι αποκλίσεις στις εκτιμήσεις των 2 μεθόδων για την μετακίνηση οροφής ή αλλιώς για το σημείο επιτελεστηκότητας είναι σημαντικές.

Αυτό έχει επίπτωση στην εκτίμηση του τελικού επιπέδου βλαβών, όπως αναμενόταν , άλλοτε ανάλογο και άλλοτε υπερβολικό, κυρίως στους τύπους κτιρίων με καμπύλες θραυστότητας “ευαίσθητες” στις μεταβολές των μετακινήσεων.

Η MADRS φαίνεται να υπερεκτιμά συχνότερα.

Η κάθε μέθοδος φαίνεται να υπερεκτιμά διαφορετικούς τύπους κτιρίων.

Οι διαφορές των μεθόδων στις εκτιμήσεις μπορεί να αποδοθεί:

1. Στο γεγονός ότι και οι δύο μέθοδοι είναι προσεγγιστικές και με διαφορετική μεθοδολογία.
2. Στο ποιοτικό και ποσοτικό εύρος των πειραμάτων και αναλύσεων που βασίστηκε η ανάπτυξη και εξέλιξη τους.
3. Στα όρια ακρίβειας της μεθόδου pushover στην ανάπτυξη της καμπύλης ικανότητας αλλά και στην επιλογή της χαρακτηριστικής καμπύλης για κάθε κτίριο.
4. Στην ακρίβεια των καμπυλών θραυστότητας που είναι ανάλογη του εύρους των πειραμάτων στα οποία βασίζονται αλλά και με την ακρίβεια των μεθόδων στατιστικής ανάλυσης από τις οποίες προέκυψαν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ορισμός του MDR

Σύμφωνα με την **FEMA(2003)** ένας χρήσιμος συντελεστής για να μπορούμε να συγκρίνουμε την σεισμική διακινδύνευση ανάμεσα σε γεωγραφικές μονάδες μιας πόλης ή ανάμεσα σε πόλεις ή χώρες, είναι ο συντελεστής μέσης βλάβης **MDR** (mean damage ratio). Αυτός στη γενική του μορφή ορίζεται σαν:

$$\mathrm{MDR_i} = \frac{\sum_{j=1}^{mbt}(\mathrm{DR_S^j}\cdot\mathrm{N_{Si}^j}+\mathrm{DR_M^j}\cdot\mathrm{N_{Mi}^j}+\mathrm{DR_E^j}\cdot\mathrm{N_{Ei}^j}+\mathrm{DR_C^j}\cdot\mathrm{N_{Ci}^j})}{\mathrm{N_{Ti}^j}}$$

Όπου

$\mathbf{DR_k^J}$ είναι ο **συντελεστής βλάβης** του τύπου κτιρίου **j** για την στάθμη βλάβης **k** (όπου κ αντιστοιχεί στα 4 επίπεδα βλάβης S, M, E, C)

$\mathbf{NK_{ki}^J}$ είναι το **εμβαδόν της επιφάνειας βλάβης** που αντιστοιχεί στην στάθμη βλάβης **κ** (όπου κ= S, M, E, C), του τύπου κτιρίου **j** στην γεωγραφική μονάδα **i** .

$\mathbf{NK_{Ti}^J}$ είναι η **συνολική επιφάνεια που αντιστοιχεί στον τύπο κτιρίου j** στην γεωγραφική μονάδα **i**.

Το **SELENA** υπολογίζει τόσο τους μερικούς όσο και τους ολικούς συντελεστές **MDR ,** ανά τύπο κτιρίου και ανά περιοχή.

Τα δύο βασικά αρχεία αποτελεσμάτων που αναφέρονται στις βλάβες με συντελεστές **MDR** είναι τα **mdr1.txt** και το **mdrtot1.txt.**

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[1] Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures 2005. FEMA 440 (ATC-55 project report)

[2] Applied Technology Council (ATC) 1996. 'Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings', ATC-40.

[3] Αντισεισμικές κατασκευές Ι. (1993) Κ. Αναστασιάδης.

[4] Manual selena v6.0

[5] Κώδικας του selena v6.0 σε γλώσσα Matlab.

[6] Federal Emergency Agency (FEMA) 2000. 'Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings'. FEMA 356

Κεφάλαιο 5

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

5.1. Εισαγωγή

5.2. Περιγραφή μεθόδων

5.2.1 Μέθοδος DBELA

5.2.1.1. Υπολογισμός καμπύλης ικανότητας

5.2.1.2. Μετατροπή καμπύλης ικανότητας σε καμπύλη με όρους μετατόπιση προς ενεργή περίοδο

5.2.1.3. Καθορισμός του φάσματος απαίτησης

5.2.1.4. Παρατηρήσεις – Σχόλια

5.2.2 Μέθοδος SPBELA

5.2.2.1 Μέθοδος SPBELA για οπλισμένο σκυρόδεμα

5.2.2.1.1 Καθορισμός παραμέτρων σαν τυχαίες μεταβλητές

5.2.2.1.2 Υπολογισμός συντελεστή κατάρρευσης λ (collapse multiplier)

5.2.2.1.3 Καθορισμός ορίων για τα επίπεδα βλάβης

5.2.2.1.4 Υπολογισμός των μετακινήσεων στις οριακές καταστάσεις

5.2.2.1.5 Υπολογισμός ιδιοπεριόδων στις οριακές καταστάσεις

5.2.2.1.6 Υπολογισμός της απαίτησης

5.2.2.1.7 Καμπύλες τρωτότητας- ανακεφαλαίωση μεθόδου

5.2.2.1.8 Παρατηρήσεις - Σχόλια

5.2.2.2 Μέθοδος SPBELA για άοπλη τοιχοποιία

5.2.2.2.1 Καθορισμός παραμέτρων σαν τυχαίες μεταβλητές

5.2.2.2.2 Μηχανισμός αστοχίας εντός επιπέδου

5.2.2.2.3 Μηχανισμός αστοχίας εκτός επιπέδου

5.2.2.2.4 Καθορισμός της σεισμικής απαίτησης

5.2.2.2.5 Καμπύλες τρωτότητας- ανακεφαλαίωση μεθόδου

5.2.3 Μέθοδος με χρήση σημείων διασποράς (point dispersion)

5.2.3.1 Ανάλυση της μεθόδου

5.2.3.1.1 Καθορισμός επιπέδων βλάβης

5.2.3.1.2 Δημιουργία των επιπέδων ‘τυχαίων’ πλαισίων

5.2.3.1.3 Αναλύσεις με Pushover

5.2.3.1.4 Μέθοδοι υπολογισμού σημείου επιτελεστικότητας – μετακίνησης στόχου

5.2.3.1.5 Αναλύσεις με Ανελαστική δυναμική ανάλυση

5.2.3.1.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων

5.2.4. Μέθοδος Rossetto-Elnashai δημιουργίας Καμπυλών Τρωτότητας

5.2.5. Μηχανική μέθοδος Giovinazzi - Lagomarsino υπολογισμού της Τρωτότητας

5.2.5.1. Ανάλυση της μηχανικής μεθόδου

5.2.5.1.1 Καθορισμός καμπύλης ικανότητας

5.2.5.1.2 Καθορισμός επιπέδων βλάβης

5.2.5.1.3 Καθορισμός απαίτησης – σημείου επιτελεστικότητας

5.2.5.1.4 Καμπύλες θραυστότητας

5.3. Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης καμπύλων ικανότητας των Giovinazzi - Lagomarsino στα λογισμικά υπολογισμού της Τρωτότητας

5.3.1 Καμπύλες με τη μηχανική μέθοδο Giovinazzi - Lagomarsino

5.3.2 Καμπύλες HAZUS

5.3.3 Σύγκριση καμπυλών από τις 2 μεθόδους

5.4. Γενικά συμπεράσματα

5.1. Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια γνωρίσαμε μεθόδους υπολογισμού σεισμικής διακινδύνευσης που στο τμήμα της τρωτότητας ακολουθούν μια κοινή διαδικασία, εκτιμούν την ικανότητα με αναλυτική μέθοδο (συνήθως ανάλυση pushover), βρίσκουν το σημείο επιτελεστικότητας με κάποια ανελαστική στατική διαδικασία (Nonlinear Static Procedure όπως οι **CSM,DCM,N2**) συγκρίνοντας την απαίτηση με την ικανότητα, και τέλος εκτιμούν το επίπεδο βλάβης με συσχέτιση του σημείου επιτελεστικότητας με τις καμπύλες τρωτότητας.

Είναι μια δημοφιλής και αξιόπιστη μεθοδολογία για την εκτίμηση της τρωτότητας που εφαρμόζεται σε μεγάλο αριθμό ερευνητικών λογισμικών (HAZUS,SELENA,ELER,OPENQUAKE κλπ).

Η κατασκευή όμως της καμπύλης ικανότητας αρκετών ομάδων κτιρίων, ώστε να καλυφθεί το εύρος των κτιρίων μιας ευρείας περιοχής, τόσο με αναλυτικό τρόπο (στατική ανελαστική μέθοδος , μέθοδος ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρονοιστορίες) όσο και με πειραματικές μεθόδους απαιτούν αρκετό χρόνο σε υπολογισμούς και μεγάλο κόστος.

Έχουν αναζητηθεί λοιπόν τρόποι κατασκευής αντιπροσωπευτικών καμπυλών ικανότητας που να είναι παραμετροποιημένες ώστε να καλύπτουν μεγάλο εύρος περιπτώσεων αλλά με απλό και γρήγορο τρόπο να μας δίνουν σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα για την τρωτότητα των κατασκευών.

Η λογική που ακολουθούν αυτές οι μέθοδοι ποικίλει.

Άλλες εκτιμούν την ικανότητα με μεθόδους μηχανισμών κατάρρευσης και παράγουν ‘συνθετικές’ καμπύλες ικανότητας (DBELA, SPBELA) ενώ άλλες θεωρούν σαν αντιπροσωπευτικό κτίριο ένα απλοποιημένο επίπεδο πλαίσιο όπου οι παράμετροι γεωμετρίας και αντοχής είναι τυχαίες μεταβλητές και με στοχαστικές διαδικασίες παράγουν μια αντιπροσωπευτική καμπύλη ικανότητας(μέθοδος με διασπορά σημείων).

Κάποιες εκτιμούν κατευθείαν το ποσοστό βλαβών μιας κατηγορίας κτιρίων με σύγκριση απαίτησης με ικανότητα ανάλογα της ιδιοπεριόδου (DBELA), και άλλες παράγουν τις καμπύλες θραυστότητας με στοχαστικές διαδικασίες(SPBELA, μέθοδος με διασπορά σημείων).

Γίνεται αναφορά έτσι σε ένα φάσμα μεθόδων ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες ταχύτητας υπολογισμών και αξιοπιστίας κατά περίπτωση.

Η έλλειψη αξιόπιστων αντιπροσωπευτικών καμπυλών ικανότητας για τα Ευρωπαϊκά κτίρια είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης των περιοχών.

Ενώ υπάρχουν αξιόλογα ερευνητικά λογισμικά όπως τα προαναφερόμενα που χρησιμοποιούν εξελιγμένες αναλυτικές μεθόδους, το ζητούμενο είναι η εύρεση αυτών των καμπυλών .

Εδώ εκτός από την μεθοδολογία και την αξιοπιστία κάθε μεθόδου εξετάζεται και η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τμήματα αυτών (καμπύλες ικανότητας ή καμπύλες τρωτότητας) για παραγωγή δεδομένων που να μπορεί να εισαχθούν σε λογισμικά όπως τα προαναφερόμενα.

Αυτές οι σύγχρονες εναλλακτικές μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας είναι το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου.

5.2. Περιγραφή Μεθόδων

5.2.1 Μέθοδος DBELA

Η μέθοδος DBELA όπως έχει προταθεί από τους **Glaister & Phino [2]** 2003, που βασίστηκαν στην εργασία του **Calvi [1]** 1999, αφορά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με δομικό σύστημα πλαισίων και εκτιμά το επίπεδο βλάβης βάσει των μετακινήσεων.

Η μέθοδος εκτιμά την τρωτότητα μιας κατηγορίας κτιρίων που αντιπροσωπεύονται από ένα τυπικό για την κατηγορία κτίριο.

Βασικός στόχος της μεθόδου είναι να καθοριστούν οι καμπύλες ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου του αντιπροσωπευτικού κτιρίου και της απαίτησης για διάφορα επίπεδα βλάβης, με όρους μετακίνησης προς ενεργή περίοδο ώστε να είναι συγκρίσιμες (σχήμα 1^{α}).

Η ενεργός περίοδος που αντιστοιχεί στην τομή ικανότητας και απαίτησης αποτελεί το όριο υπέρβασης του επιπέδου βλάβης, έτσι στα κτίρια της ομάδας με περίοδο μικρότερη της οριακής ενεργής έχουμε υπέρβαση του ορίου βλάβης (απαίτηση > ικανότητα) ενώ τα κτίρια με ενεργή περίοδο μεγαλύτερη είναι κάτω από το όριο βλάβης(απαίτηση < ικανότητα).

Η εύρεση της κατανομής του ποσοστού κτιρίων της κατηγορίας ανά επίπεδο βλάβης οδηγεί στην αθροιστική κατανομή πιθανότητας βλάβης με όρους ενεργού ύψους των κτιρίων (σχήμα 1β).

Η μέθοδος ακολουθεί τα παρακάτω βήματα :

1) Καθορισμός του αντιπροσωπευτικού κτιρίου μιας κατηγορίας κτιρίων (υλικό και διαστάσεις).

2) Εύρεση της τέμνουσας βάσης κατάρρευσης **Fy** εφαρμόζοντας μια αυξανόμενη πλευρική κατανομή φόρτισης μέχρι την αστοχία ένα μηχανισμό κατάρρευσης.

3) Αντιστοίχιση του μοντέλου του κτιρίου με ισοδύναμο μονοβάθμιο και της συμπεριφοράς με ιδανική διγραμμική καμπύλη.

4) Υπολογισμός της απόκρισης της μετατόπισης του μονοβαθμίου στα διάφορα όρια βλάβης με την παραδοχή ότι το κτίριο παραμορφώνεται ανάλογα με ένα από τους 2 πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας (**beam-sway** ή **column-sway).**

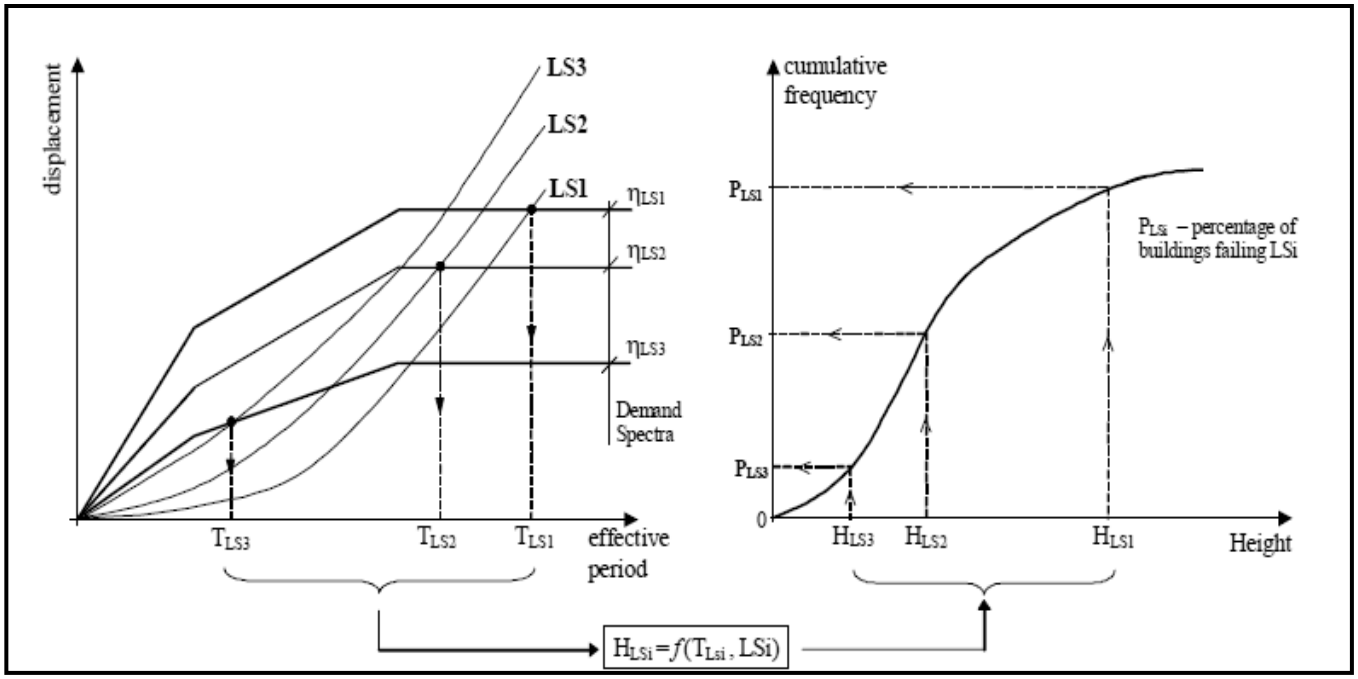
5) Γνωρίζοντας την τέμνουσα βάσης κατάρρευσης **Fy** και τις μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν καθορίζεται η διγραμμική καμπύλη ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου.

6) Μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε μορφή μετατόπιση προς ενεργή περίοδο για κάθε όριο βλάβης ξεχωριστά.

7) Καθορισμός των φασμάτων απαίτησης για τα διάφορα όρια βλάβης **LSi**, διαιρώντας το ελαστικό φάσμα με τους αντίστοιχους συντελεστές η_{LSi} για κάθε όριο ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της απόσβεσης.

8) Σύγκριση καμπυλών ικανότητας με φάσματα απαίτησης του κάθε ορίου, για εκτίμηση του ποσοστού κτιρίων που ξεπερνά το κάθε όριο βλάβης.

9) Μετατροπή της ενεργής περιόδου σε ενεργό ύψος και δημιουργία της καμπύλης αθροιστικής πιθανότητας βλάβης της κατηγορίας κτιρίων σε σχέση με το ενεργό ύψος.



Σχήμα 1: Προτεινόμενη μέθοδος α) καμπύλες ικανότητας μετακίνησης και απαίτησης μετακίνησης σε σχέση με την ενεργή περίοδο β) κατανομή πιθανότητας προς ενεργό ύψος. Glaister & Phino [2] 2003

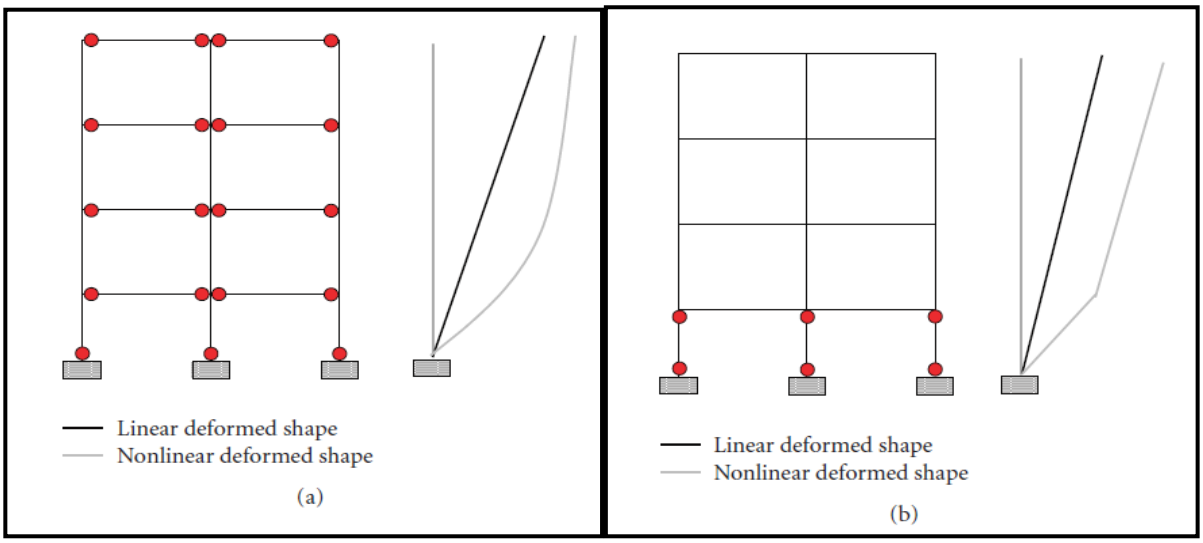
5.2.1.1. Υπολογισμός καμπύλης ικανότητας

Για να υπολογίσουν την καμπύλη ικανότητας οι συγγραφείς θεωρούν ότι τα πλαίσια αστοχούν με ένα από τους 2 τρόπους :

α) Με πλευρικό μηχανισμό δοκών (**beam-sway**) κατά τον οποίο δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις σε όλες τις δοκούς και στην βάση των υποστυλωμάτων του ισογείου (σχήμα 2α). Αυτός είναι ο συνήθης τρόπος αστοχίας των νεώτερων κτιρίων που λόγω ικανοτικού σχεδιασμού έχουν ισχυρότερα υποστυλώματα σε σχέση με τις δοκούς.

Β) Με μηχανισμό υποστυλωμάτων ή αλλιώς μηχανισμό μαλακού ορόφου (**column-sway**) κατά τον οποίο δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις σε όλα τα υποστυλώματα του ισογείου στην κεφαλή και στην βάση. (σχήμα 2β). Με αυτόν τον μηχανισμό αστοχούν συνήθως τα παλαιότερα κτίρια με ισχυρότερες δοκούς σε σχέση με τα υποστυλώματα.

Για κάθε ένα από τους δύο τρόπους θεωρούν ένα αντίστοιχο σχήμα παραμόρφωσης τόσο για την ελαστική όσο και για την ανελαστική περιοχή. (σχήμα 2α,2β).



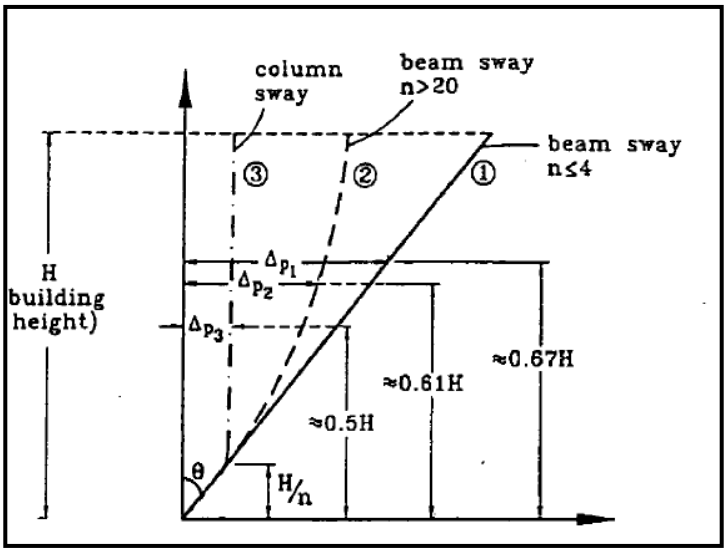
Σχήμα 2: Μηχανισμοί κατάρρευσης και τρόποι παραμόρφωσης a) μηχανισμός δοκών β) μηχανισμός μαλακού ορόφου [11] H. Crowley, B. Borzi, R. Phino, M. Colombi, M. Onida (2008)

Κατ' αυτό τον τρόπο έχουμε τρία πιθανά σχήματα παραμόρφωσης:

1) Το σχήμα για ελαστική και ανελαστική παραμόρφωση των πλαισίων που αστοχούν με μηχανισμό δοκού και έχουν λιγότερους από 4 ορόφους όπως και η ελαστική παραμόρφωση για τον μηχανισμό μαλακού ορόφου(τρόπος 1,σχήμα 3). Αυτό το σχήμα είναι γραμμικό και το ύψος εφαρμογής της σεισμικής δύναμης $\mathbf{H_{csf}}$ = 2/3*H_T του συνολικού ύψους H_T του κτιρίου.

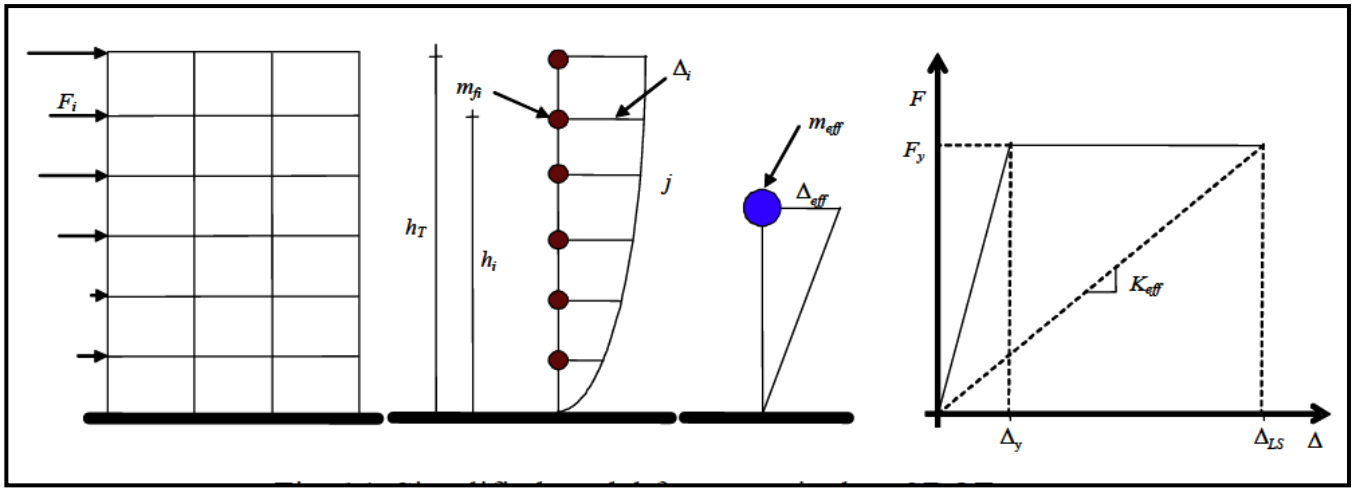
2) Το σχήμα για ελαστική και ανελαστική παραμόρφωσης του μηχανισμού δοκών με πάνω από 20 ορόφους είναι παραβολικό (τρόπος 2,σχήμα 3). Το ύψος εφαρμογής της σεισμικής δύναμης δίνεται από $\mathbf{H_{csf}}$ = 0,61*H_T του συνολικού ύψους $\mathbf{H_T}$ του κτιρίου. Για τα πλαίσια με μηχανισμό δοκών που έχουν από 5 έως 19 ορόφους η μετακίνηση και το ύψος $\mathbf{H_{csf}}$ προκύπτει από γραμμική παρεμβολή των τρόπων 1 και 2.

3) Η ανελαστική παραμόρφωση για τα κτίρια με μηχανισμό αστοχίας μαλακού ορόφου ακολουθεί τον τρόπο 3 που φαίνεται στο σχήμα 3 και το ύψος εφαρμογής της σεισμικής δύναμης H_{csf} = 0,50*H_T του συνολικού ύψους H_T του κτιρίου.



Σχήμα 3: Τρόποι παραμόρφωσης για τους 2 μηχανισμούς αστοχίας. Glaister & Phino [2] 2003

Για να μπορεί να συγκριθεί η ικανότητα με το φάσμα μετακίνησης της απαίτησης το κτίριο αντιστοιχίζεται με ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο (**SDOF**) έτσι ώστε η μετακίνηση του κτιρίου στο σημείο εφαρμογής της συνισταμένης της σεισμικής κίνησης (**H_{csf}**) να είναι ίση με την μετακίνηση του κέντρου βάρους του ισοδύναμου μονοβαθμίου (**H_{SDOF}**).(σχήμα 4).



Σχήμα 4: Απλοποιημένο μοντέλο ισοδύναμου μονοβαθμίου [12] G.M. Calvi, R. Phino, G. Magenes, J.J. Bommer, L.F. Restrepo-Velez, H. Crowley (2006)

Για να βρεθεί το ύψος του ισοδυνάμου μονοβαθμίου **H_{SDOF}** πολλαπλασιάζεται το συνολικό ύψος του κτιρίου **H_T** με τον συντελεστή ενεργού ύψους **ef_h** (effective height coefficient) δηλαδή **H_{SDOF}= ef_h* H_T**.

Ο συντελεστής **ef_h** καθορίζεται από την μέθοδο ως εξής

1. Για το **μηχανισμό δοκών (beam-sway)** με εξάρτηση από τον αριθμό ορόφων **n :**

e_{fh} = 0.64 για n≤4 (1α)

e_{fh} = 0.64-0,0125*(n-4) για 4<n<20 (1β)

e_{fh} = 0.44 για n≥20 (1γ)

2. Για το **μηχανισμό υποστυλωμάτων (column-sway)** με εξάρτηση από την απαιτούμενη πλαστιμότητα:

Ελαστικό τμήμα e_{fh} = 0.67-0,17*$\frac{\varepsilon s(Lsi)-\varepsilon y}{\varepsilon s(Lsi)}$ (2α)

Ανελαστικό τμήμα e_{fh} =1/n (2β)

Όπου η πλαστιμότητα **μ** εκφράζεται από την παραμόρφωση του χάλυβα **ε_s(Lsi)** που αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση **Lsi** (limit state i)**.**

Οι μετατοπίσεις του ισοδύναμου μονοβαθμίου για τα χαρακτηριστικά σημεία της διγραμμικής καμπύλης δίνονται :

Μετατόπιση στη διαρροή για τον μηχανισμό δοκών (Δ_{LSy})

$$\Delta_{LSy} = 0.50 * e_{fh} * H_T * \varepsilon_y * (l_b/h_b) \qquad (3\alpha)$$

Όπου l_b είναι το μήκος των δοκών, h_b είναι το ύψος της διατομής των δοκών, ε_y είναι η παραμόρφωση χάλυβα που αντιστοιχεί στην διαρροή,

Μετατόπιση στη διαρροή για τον μηχανισμό μαλακού ορόφου (Δ_{LSy})

$$\Delta_{LSy} = 0.43 * e_{fh} * H_T * \varepsilon_y * (h_s/h_c) \qquad (3\beta)$$

Όπου h_s είναι το ύψος των υποστυλωμάτων, h_c είναι το ύψος της διατομής των υποστυλωμάτων, ε_y είναι η παραμόρφωση χάλυβα που αντιστοιχεί στην διαρροή.

Μετατόπιση στο ανελαστικό όριο LSi για τον μηχανισμό δοκών (Δ_{LSi})

$$\Delta_{LSi} = 0.50 * e_{fh} * H_T * \{\varepsilon_c(Lsi) + \varepsilon_s(Lsi) - (1.7-(l_b/h_b)) * \varepsilon_y\} \qquad (4\alpha)$$

Όπου $\varepsilon_c(Lsi)$, $\varepsilon_s(Lsi)$ είναι οι παραμορφώσεις του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα στο όριο βλάβης i.

Μετατόπιση στο ανελαστικό όριο LSi για τον μηχανισμό υποστυλωμάτων (Δ_{LSi})

$$\Delta_{LSi} = 0.43 * e_{fh} * H_T * \varepsilon_y * (h_s/h_c) + 0.50 * \{\varepsilon_c(Lsi) + \varepsilon_s(Lsi) - 2.14 * \varepsilon_y) * h_s \qquad (4\beta)$$

Όπου $\varepsilon_c(Lsi)$, $\varepsilon_s(Lsi)$ είναι οι παραμορφώσεις του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα στο όριο βλάβης i.

Για τα **όρια βλάβης** μπορεί να ακολουθηθεί η πρόταση **Calvi [1] 1999** που καθόρισε 4 όρια.

SL1 όριο που αντιστοιχεί σε σχετική μετακίνηση ορόφων μεταξύ 0,10%-0,30% και κάτω από αυτό θεωρείται ότι δεν υπάρχει βλάβη.

SL2 όριο κάτω από το οποίο θεωρείται ότι έχουμε ελαφριές βλάβες στο οποίο πρότεινε σαν οριακές παραμορφώσεις για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα αντίστοιχα τις τιμές ε_c=0.0035 και ε_s=0.010.

SL3 όριο κάτω από το οποίο θεωρείται ότι έχουμε σημαντικές βλάβες και είναι ακόμα επισκευάσιμο στο οποίο πρότεινε σαν οριακές παραμορφώσεις για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα αντίστοιχα τις τιμές ε_c=0.006 έως 0,01 και ε_s=0.03. έως 0,04

SL4 κατάρρευση.

5.2.1.2. Μετατροπή καμπύλης ικανότητας σε καμπύλη με όρους μετατόπιση προς ενεργή περίοδο

Το επόμενο βήμα για την δημιουργία των καμπυλών ικανότητας με όρους μετατόπιση προς ενεργή περίοδο είναι η εύρεση των σχέσεων που συνδέουν τη ενεργό περίοδο με το ύψος.

Για τις σχέσεις που συνδέουν ενεργή περίοδο με το ύψος οι συγγραφείς πρότειναν τα παρακάτω:

Για την **ελαστική περιοχή ανεξαρτήτως μηχανισμού αστοχίας** τη σχέση:

$$H_T(T_{LSy}) = (10 \cdot T_{LSy})^{4/3}\,.$$

Ενώ για την **ανελαστική περιοχή** τις σχέσεις για **beam-sway** και **column-sway** αντίστοιχα

$$H_T(T_{LSi}) = C_3 T_{LSi}^{4/3}$$

$$H_T(T_{LSi}) = \left(\frac{C_2}{3} - \frac{C_1}{ef_h C_2}\right)^2$$

όπου

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y}{0.86\varepsilon_y} h_c$$

$$C_2 = \left[1350 \cdot T_{LSi}^2 + 3\sqrt{3\left(\frac{C_1}{ef_h}\right)^3 + 202500 \cdot T_{LSi}^4}\right]^{1/3}$$

$$C_3 = 10^{4/3}\left(1 + \frac{\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 1.7\varepsilon_y}{\varepsilon_y}\frac{h_b}{1_b}\right)^{-2/3}\,.$$

Τελικά οι σχέσεις μετατόπισης προς ενεργό περίοδο που προκύπτουν είναι

Για μηχανισμό **beam-sway** πριν την διαρροή

$$\Delta_{LSy}(T_{LSy}) = \frac{0.5ef_h 1_b \varepsilon_y}{h_b}(10 \cdot T_{LSy})^{4/3}$$

Για μηχανισμό **beam-sway** μετά την διαρροή

$$\Delta_{LSi}(T_{LSi}) = 0.5ef_h C_3 T_{LSi}^{4/3}\left[\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - \left(1.7 - \frac{1_b}{h_b}\right)\varepsilon_y\right]$$

Για μηχανισμό **column-sway** πριν τη διαρροή

$$\Delta_{LSy}(T_{LSy}) = \frac{0.43 e f_h h_s \varepsilon_y}{h_c}(10 \cdot T_{LSy})^{4/3}$$

Για μηχανισμό **column-sway** μετά τη διαρροή

$$\Delta_{LSi}(T_{LSi}) = \frac{0.43 e f_h h_s \varepsilon_y}{h_c}\left(\frac{C_2}{3} - \frac{C_1}{e f_h C_2}\right)^2 + 0.5(\varepsilon_{C(LSi)} + \varepsilon_{S(LSi)} - 2.14\varepsilon_y)h_s$$

Όπου ο συντελεστής $\mathbf{ef_h}$ δίνεται από τις σχέσεις 1α,1β,1γ και 2α ανάλογα την περίπτωση.

5.2.1.3. Καθορισμός του φάσματος απαίτησης

Τα φάσματα απαίτησης είναι τα ελαστικά φάσματα μετακίνησης για ένα σεισμό τα οποία θα μετατραπούν κατάλληλα ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της απόσβεσης.

ο η_{LSi} είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ικανότητα κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου για κάθε οριακή κατάσταση (limit state) L_{Si} και δίνεται από την σχέση του EC8 :

$$\eta_{LSi} = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{LSi}}}$$

Ο όρος ξ_{LSi} της ισοδύναμης απόσβεσης δίνεται από την σχέση που πρότεινε ο **Calvi [1] (1999)**:

$$\xi_{LSi} = a\left(1 - \frac{1}{\mu_{LSi}^{b}}\right) + \xi_{el}$$

Όπου ξ_{el} είναι ο συντελεστής απόσβεσης στην ελαστική περιοχή πουι συνήθως έχει την τιμή 5%, και οι δύο συντελεστές **α** και **β** κυμαίνονται από 20 έως 30 και από 0,50 έως 1,00 αντίστοιχα. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τις τιμές α=25 και β=0,50**.**

Επομένως για να προκύψουν τα φάσματα απαίτησης για κάθε οριακή κατάσταση L_{Si} θα πολλαπλασιαστεί το φάσμα ελαστικής μετακίνησης επί τον αντίστοιχο συντελεστή η_{LSi}.

Βασικός στόχος της μεθόδου είναι να καθοριστούν οι καμπύλες ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου του αντιπροσωπευτικού κτιρίου και οι καμπύλες της απαίτησης για διάφορα

επίπεδα βλάβης, με όρους μετακίνησης προς ενεργή περίοδο ώστε να είναι συγκρίσιμες (σχήμα 1α).

Η ενεργός περίοδος που αντιστοιχεί στην τομή ικανότητας και απαίτησης αποτελεί το όριο υπέρβασης του επιπέδου βλάβης, έτσι στα κτίρια της ομάδας με περίοδο μικρότερη της οριακής ενεργής έχουμε υπέρβαση του ορίου βλάβης (απαίτηση > ικανότητα) ενώ τα κτίρια με ενεργή περίοδο μεγαλύτερη είναι κάτω από το όριο βλάβης(απαίτηση < ικανότητα).

Η εύρεση της κατανομής του ποσοστού κτιρίων της κατηγορίας ανά επίπεδο βλάβης οδηγεί στην αθροιστική κατανομή πιθανότητας βλάβης με όρους ενεργού ύψους των κτιρίων (σχήμα 1β).

5.2.1.4. Παρατηρήσεις – Σχόλια

1) Κατά την επιλογή του αντιπροσωπευτικού κτιρίου μιας κατηγορίας έχουν επιλεγεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γεωμετρίας και αντοχής του φορέα. Αυτό το γεγονός κάνει, σύμφωνα και με τους συγγραφείς , την μέθοδο ευαίσθητη σε οποιαδήποτε μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών.

2) Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι η χρήση στοχαστικών μεθόδων με θεώρηση των χαρακτηριστικών σαν τυχαίες μεταβλητές όπως γίνεται στην μέθοδο **SPBELA** που θα αναπτύξουμε παρακάτω.

3) Το 2015 η ερευνητική ομάδα του **GEM (Global Earthquake Model)** στα πλαίσιο της ανάπτυξης του **OpenQuake Risk Modeler's Toolkit [3]** που αποτελεί τμήμα του λογισμικού εκτίμησης σεισμικής διακινδύνευσης **OpenQuake** πρότειναν μια πιο απλουστευμένη εκδοχή της μεθόδου.

Συγκεκριμένα κάνοντας χρήση της εργασίας του **Abo El Ezz(2008) [4]** υιοθέτησαν τον δείκτη μηχανισμού βάσει παραμορφώσεων **R (deformation – based sway index).**

$$R=\frac{hb/lb}{hc/lc}$$

Όπου h_b , h_c είναι τα ύψη των διατομών δοκών και υποστυλωμάτων αντίστοιχα ενώ **l_b , l_c** είναι το καθαρό μήκος δοκού και το ύψος ορόφου.

Βάσει αυτού του συντελεστή από τον παρακάτω πίνακα αποφασίζεται με ποιο μηχανισμό αστοχεί το κτίριο, γεγονός που απλουστεύει σημαντικά την διαδικασία και την κάνει πιο εύκολα υλοποιήσιμη σε λογισμικό.

Building Typology	Beam sway	Column sway
Bare frames	$R \leq 1.0$	$R > 1.5$
Fully infilled frames	$R \leq 1.0$	$R > 1.0$

Έτσι με βάσει τον συντελεστή **R** που συσχετίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκών και υποστυλωμάτων αποφασίζεται σε σύγκριση με τον ανωτέρω πίνακα με ποιόν μηχανισμό αστοχεί το κτίριο.

Ανάλογα του μηχανισμού αστοχίας (**beam-sway** ή **column-sway**) υπολογίζεται ο συντελεστής ενεργού ύψους **e_{fh}** από τις προαναφερθείσες σχέσεις των **Glaister & Phino**

βάσει του αριθμού ορόφων **n** και της απαιτούμενης πλαστιμότητας που εκφράζεται από την παραμόρφωση του χάλυβα **ε_s(Lsi)** που αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση **Lsi .**

4) Η μέθοδος έχει αναπτυχθεί από τους **L. Restrepo-Velez, G. Magenes [8]** το 2004 και για κτίρια από άοπλη τοιχοποιία που την ονόμασαν MeBaSe, και αφορά αστοχία τόσο εντός επιπέδου όσο και εκτός επιπέδου.

5.2.2. Μέθοδος SPBELA

5.2.2.1 Μέθοδος SPBELA για κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα

Η μέθοδος **SP-BELA** (simplified pushover-based Earthquake Loss Assessment method) προτάθηκε το 2008 από τους **Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5].**

Η μέθοδος παράγει καμπύλες τρωτότητας για κατηγορίες κτιρίων που βασίζεται στη λογική των μηχανισμών κατάρρευσης για τον υπολογισμό των απλοποιημένων καμπυλών ικανότητας, για να αντιμετωπίσει δε την διασπορά των χαρακτηριστικών των κτιρίων και της σεισμικής απαίτησης χρησιμοποιεί την στοχαστική μέθοδο Monte Carlo.

Η μέθοδος **Monte Carlo** είναι μια στοχαστική διαδικασία που χρησιμοποιείται σε αναλύσεις διακινδύνευσης (risk analysis) για να εκτιμήσει το πιθανότερο αποτέλεσμα και τις πιθανότητες να συμβεί αυτό. Στη μέθοδο μοντελοποιείται μαθηματικά το φαινόμενο που μας ενδιαφέρει και επιλέγονται οι παράμετροι που το επηρεάζουν οι οποίες θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κάποια κατανομή πιθανότητας. Η διαδικασία χρησιμοποιώντας γεννήτρια τυχαίων αριθμών δίνει τιμές στις τυχαίες μεταβλητές υπολογίζει το αποτέλεσμα και καταγράφει το αποτέλεσμα και τις τιμές των μεταβλητών. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές, συνήθως μερικές χιλιάδες, και στο τέλος μας δίνει την κατανομή πιθανότητας των αποτελεσμάτων.

Επειδή η μέθοδος είναι ευαίσθητη στον τρόπο δειγματοληψίας έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι βελτίωσης της δειγματοληψίας όπως η μέθοδος **Latin Hypercube (Mc kay 1979 [6])** που χρησιμοποιείται εδώ.

Το λογικό διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 5.

Οι συγγραφείς ακολούθησαν τα παρακάτω βήματα στην περιγραφή της προτεινόμενης μεθόδου.

5.2.2.1.1 Καθορισμός παραμέτρων σαν τυχαίες μεταβλητές

Καταρχάς επιλέγεται ένα πρότυπο κτίριο (σχήμα 5) και οι παράμετροι του κτιρίου θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές. Οι παράμετροι αυτές είναι:

1) Γεωμετρικές

Τα ανοίγματα **lx, ly** κατά τις διευθύνσεις χ, y θεωρείται ότι ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή και κυμαίνονται από 4μ έως 6μ. Το ύψος ορόφου θεωρείται σταθερό στα 3μ.

2) Αντοχές

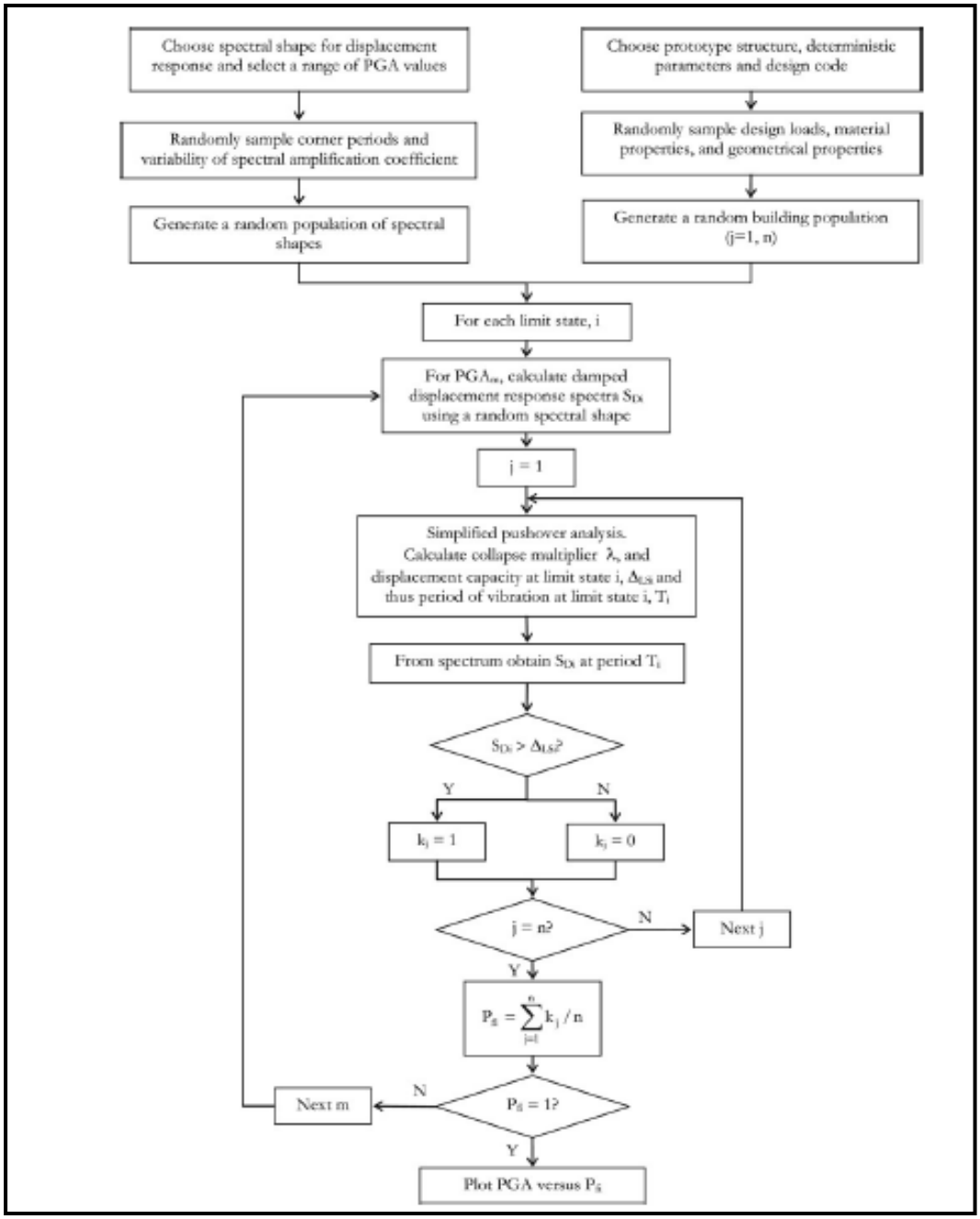
Για τον χάλυβα η τάση διαρροής κυμαίνεται μεταξύ 380 έως 440 Mpa.

Η αντοχή κύβου του σκυροδέματος παίρνει τις διακριτές τιμές 25,30,35 Mpa.

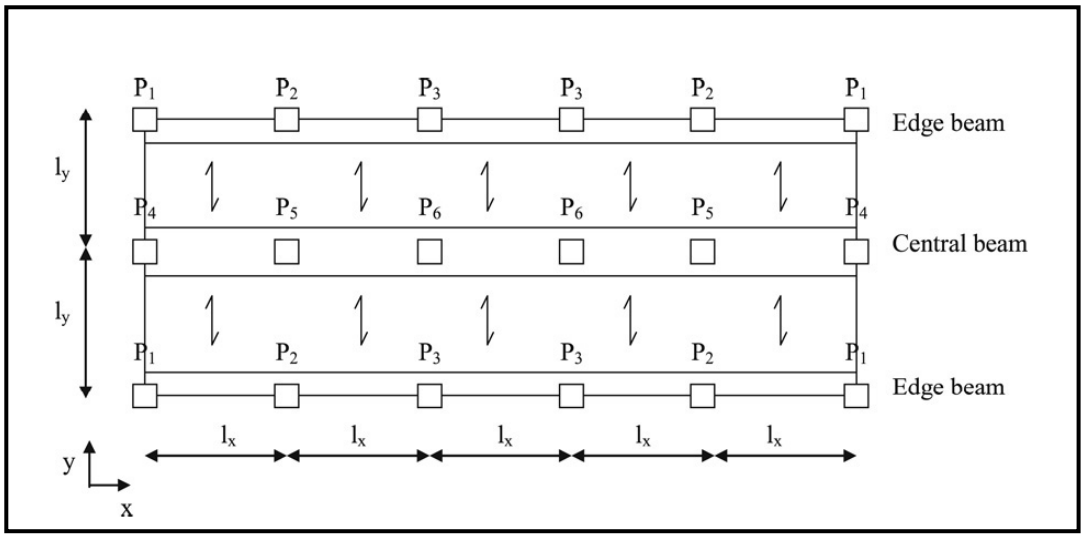
3) Φορτία

Τα φορτία βαρύτητας θεωρείται ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 3 KN/m^2 και τυπική απόκλιση 0,50 KN/m^2. Τα φορτία ανέμου θεωρείται ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0,90 KN/m^2 και τυπική απόκλιση 0,20 KN/m^2. Τα φορτία χιονιού και τα ωφέλιμα επειδή λαμβάνεται μικρό ποσοστό τους στον υπολογισμό της σεισμικής δύναμης θεωρούνται σταθερά σαν 1,60 KN/m^2 και 2,00 KN/m^2 αντίστοιχα.

Οι διαστάσεις των στοιχείων και οι οπλισμοί δεν θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές αλλά υπολογίζονται βάσει της επίλυσης με τον επιλεγμένο κανονισμό για τα παραπάνω τυχαία δεδομένα.



Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής μεθόδου SP-BELA. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)



Σχήμα 6: καθορισμός πρότυπου κτιρίου στη μέθοδο SP-BELA. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

5.2.2.1.2 Υπολογισμός συντελεστή κατάρρευσης λ (collapse multiplier)

Για κάθε κτίριο που προέκυψε τυχαία και έχει διαστασιολογηθεί εφαρμόζεται το σεισμικό φορτίο σαν τριγωνική κατανομή καθ ύψος και γίνεται η επίλυση .

Έπειτα υπολογίζεται η διατμητική αντοχή των υποστυλωμάτων που θεωρείται σαν η μικρότερη από :

α) διατμητική αντοχή υποστυλώματος

β) διατμητική δύναμη που αντιστοιχεί στην καμπτική αντοχή του υποστυλώματος

γ) διατμητική δύναμη που αντιστοιχεί στην καμπτική αντοχή των δοκών που στηρίζει το υποστύλωμα.

Για τις δοκούς μόνο η καμπτική αστοχία λαμβάνεται υπόψη καθότι οι δοκοί θεωρούνται λιγότερο επικίνδυνοι στην διατμητική αστοχία από τα υποστυλώματα.

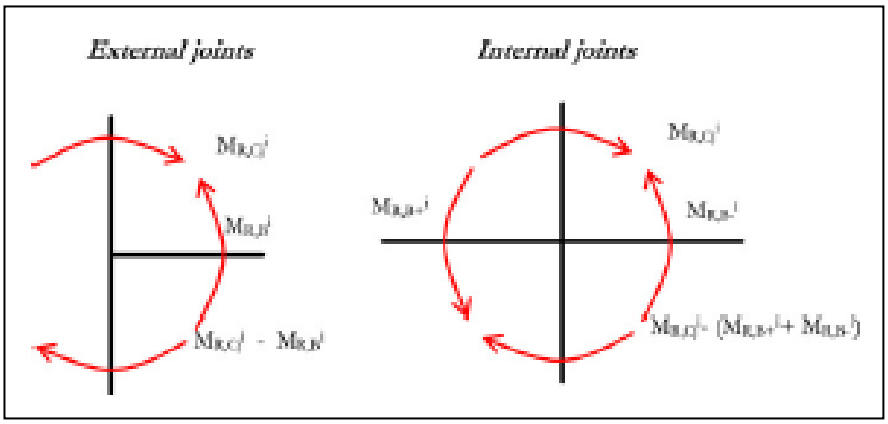
Οι έλεγχοι που γίνονται κατά την διαδικασία για να καθορίσουν τον τρόπο αστοχίας των υποστυλωμάτων φαίνονται στο σχήμα 8.

Η ισορροπία των κόμβων φαίνεται στο σχήμα 7.

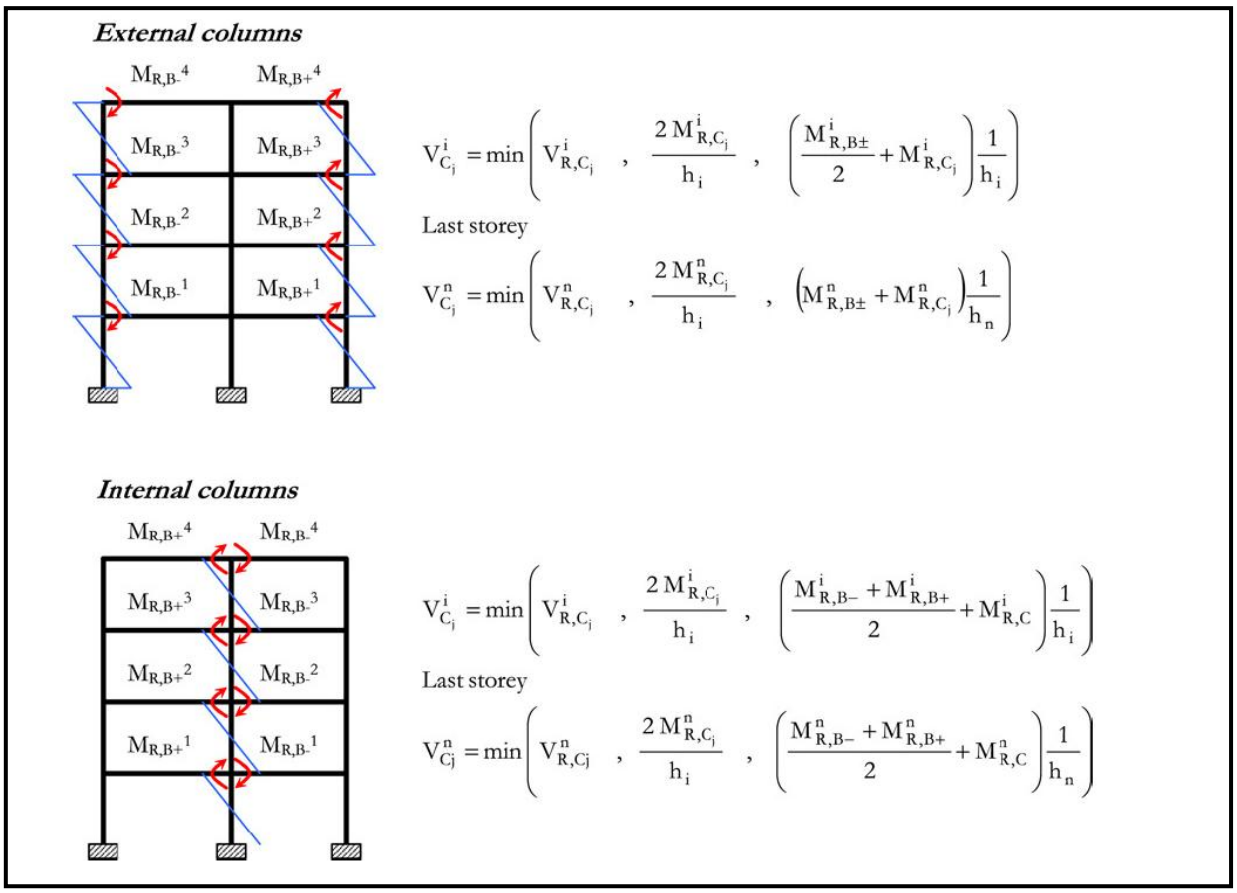
Όταν υπολογισθεί η διατμητική αντοχή κάθε ορόφου τότε υπολογίζεται για τον όροφο ο αντίστοιχος συντελεστής κατάρρευσης **λ** βάσει της παρακάτω σχέσης , όπου $\mathbf{W_T}$ είναι το συνολικό βάρος του κτιρίου,$\mathbf{V_c^i}$ είναι η τέμνουσα του ορόφου I όπως προκύπτει από την κατανομή, **Wi** είναι το βάρος του ορόφου i που βρίσκεται σε ύψος $\mathbf{z_i}$.

$$\lambda^i = \frac{V_C^i}{W_T} \frac{\sum_{j=1}^{n} W_j z_j}{\sum_{k=i}^{n} W_k z_k}$$

Ο τελικός συντελεστής κατάρρευσης θεωρείται ότι είναι ο μικρότερος από όλους τους συντελεστές των ορόφων.



Σχήμα 7: Ισορροπία κόμβων στη μέθοδο SP-BELA. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)



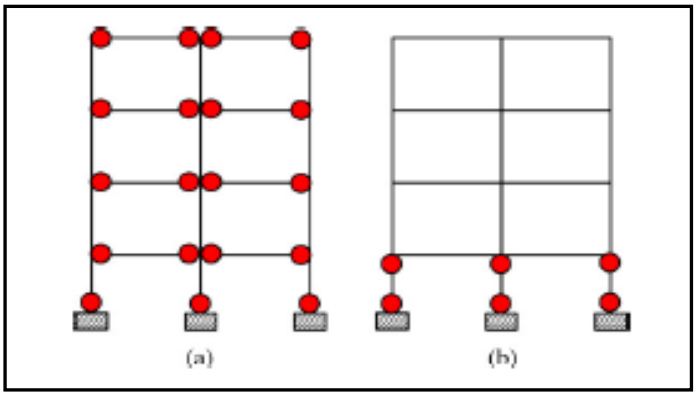
Σχήμα 8: καθορισμός διατμητικής αντοχής υποστυλωμάτων στη μέθοδο SP-BELA. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

Η τελική εκτίμηση του μηχανισμού αστοχίας γίνεται με τα παρακάτω κριτήρια:

1) Αν αστοχήσει έστω και ένα υποστύλωμα η καμπύλη ικανότητας διακόπτεται στην πλευρική δύναμη που προκάλεσε την αστοχία. Αυτό γίνεται διότι λόγω της ψαθυρής φύσης της διατμητικής αστοχίας το κτίριο δεν μπορεί να εισέλθει στην ανελαστική περιοχή.

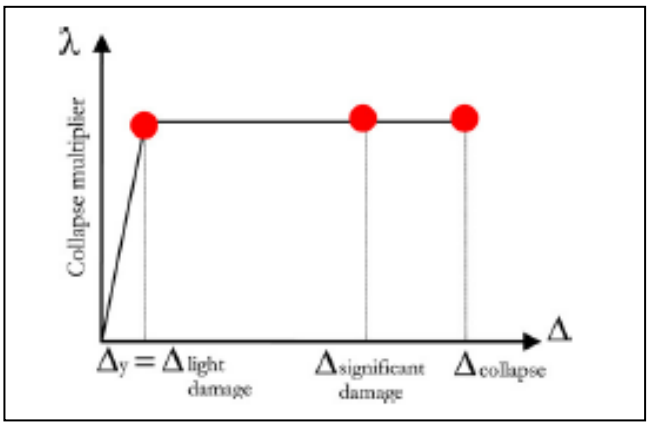
2) Αν αστοχήσουν όλα τα υποστυλώματα ενός ορόφου σε κάμψη τότε έχουμε μηχανισμό αστοχίας μαλακού ορόφου (**column-sway**), (σχήμα 9b)

3) Αν μετά την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων σε όλες τις δοκούς δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις σε όλα τα υποστυλώματα συγκεκριμένου ύψους , τότε έχουμε δημιουργία πλευρικού μηχανισμού δοκών (**beam-sway**), (σχήμα 9a)



Σχήμα 9: Πιθανοί μηχανισμοί α)πλευρικός μηχανισμός δοκών(beam-sway) b) μηχανισμός μαλακού ορόφου (column-sway). Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

Τελικά καθορίζεται η καμπύλη ικανότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Καθορισμός καμπύλης ικανότητας για ιδανική ελαστοπλαστική συμπεριφορά και ορισμός ορίων των επιπέδων βλάβης. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

5.2.2.1.3 Καθορισμός ορίων για τα επίπεδα βλάβης

Στην καμπύλη ικανότητας καθορίζονται τα όρια για τα επίπεδα βλάβης (limit states)

Στην μέθοδο χρησιμοποιούνται 3 επίπεδα βλάβης, ελαφρές βλάβες (**light damage LS1),** σημαντικές βλάβες (**Significant damage LS2**), και όριο κατάρρευσης (**Collapse limit LS3**)

Το κριτήριο είναι αν η στροφή χορδής(chord rotation) των υποστυλωμάτων του ορόφου που ενεργοποιείται ο μηχανισμός κατάρρευσης φθάνει τα προκαθορισμένα όρια, όπως αυτά ορίζονται παρακάτω.

1. όριο ελαφρών βλαβών (LS1)

Η οριακή στροφή χορδής $\boldsymbol{\theta_y}$ αυτού του σταδίου αντιστοιχεί στην στροφή χορδής στη διαρροή

$$\Theta_y = \phi_y \frac{L_V}{3} + 0.0013\left(1 + 1.5\frac{h}{L_V}\right) + 0.13\phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

Όπου $\boldsymbol{\varphi_y}$ είναι η καμπυλότητα διαρροής της διατομής, **h** είναι το ύψος της διατομής, $\mathbf{d_b}$ η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού, $\mathbf{f_y}$ και $\mathbf{f_c}$ οι αντοχές του χάλυβα και του σκυροδέματος αντίστοιχα σε Mpa, $\mathbf{L_v}$ είναι το διατμητικό μήκος (ο λόγος καμπτικής ροπής προς διατμητική δύναμη) που για τα υποστυλώματα θεωρείται ότι ισούται με το μισό ύψος του ορόφου.

Η καμπυλότητα διαρροής υπολογίζεται από την σχέση που πρότεινε ο Priestley

$\boldsymbol{\Phi_y} = 2.14*(\varepsilon_y/h)$

Όπου $\boldsymbol{\varepsilon_y}$ είναι η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού.

2. όριο σημαντικών βλαβών (LS2)

Η οριακή στροφή χορδής θ αυτού του σταδίου αντιστοιχεί στα 3/4 της στροφής χορδής στη αστοχία $\boldsymbol{\theta_u}$ που δίνεται

$$\Theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}\left(\Theta_y + (\phi_u - \phi_y)\, L_{\mathrm{pl}}\left(1 - \frac{0.5L_{\mathrm{pl}}}{L_V}\right)\right)$$

Όπου γ_{el} είναι 1.5 για τα κύρια δομικά στοιχεία και 1.0 για τα δευτερεύοντα, φ_u είναι η καμπυλότητα αστοχίας και L_{pl} είναι το μήκος πλαστικής άρθρωσης.

Το μήκος πλαστικής άρθρωσης δίνεται

$$L_{\mathrm{pl}} = 0.1L_V + 0.17h + 0.24\frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

Ενώ η μέγιστη καμπυλότητα δίνεται

$\boldsymbol{\varphi_u} = (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})/h$

όπου οι $\boldsymbol{\varepsilon_{cu}}$ και $\boldsymbol{\varepsilon_{su}}$ είναι οι μέγιστες παραμορφώσεις αστοχίας για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα αντίστοιχα και κυμαίνονται

για ανεπαρκώς σκυρόδεμα $\boldsymbol{\varepsilon_{cu}}$ = 0,5% - 1,0% και $\boldsymbol{\varepsilon_{su}}$ = 1,5% - 3,0%

για καλά σκυρόδεμα $\boldsymbol{\varepsilon_{cu}}$ = 1,0% - 2,0% και $\boldsymbol{\varepsilon_{su}}$ = 4,0% - 6,0%

3. όριο κατάρρευσης (LS3)

Η οριακή στροφή χορδής θ αυτού του σταδίου αντιστοιχεί στη στροφή χορδής στη αστοχία θ_u όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

Για τα δευτερεύοντα δομικά στοιχεία (**non-structural**) ορίζεται το όριο ελαφρών βλαβών (**NSLD**) όπου η σχετική στροφή του ορόφου ορίζεται από 0,10% έως 0,30 % για ευαίσθητους τοίχους.

5.2.2.1.4 Υπολογισμός των μετακινήσεων στις οριακές καταστάσεις

Η μετακίνηση για κάθε όριο (Limit state LSi) της καμπύλης ικανότητας αντιστοιχεί στη μετακίνηση του κέντρου μάζας του κτιρίου και εξαρτάται από τον μηχανισμό αστοχίας.

Τα όρια έχουν καθοριστεί με βάση την στροφή χορδής των υποστυλωμάτων που αντιστοιχούν στην σχετική μετακίνηση ορόφου (drift).

Για να καθορίσουμε την μετακίνηση της καμπύλης ικανότητας που αντιστοιχεί στη σχετική μετακίνηση ορόφου πρέπει να καθορίσουμε το ύψος του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Έτσι αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής κ_1

$$\kappa_1 = 0.64 \quad \text{for } n \leq 4$$
$$\kappa_1 = 0.64 - 0.0125(n-4) \quad \text{for } 4 < n < 20$$
$$\kappa_1 = 0.44 \quad \text{for } n \geq 20$$

Όπου n= αριθμός ορόφων.

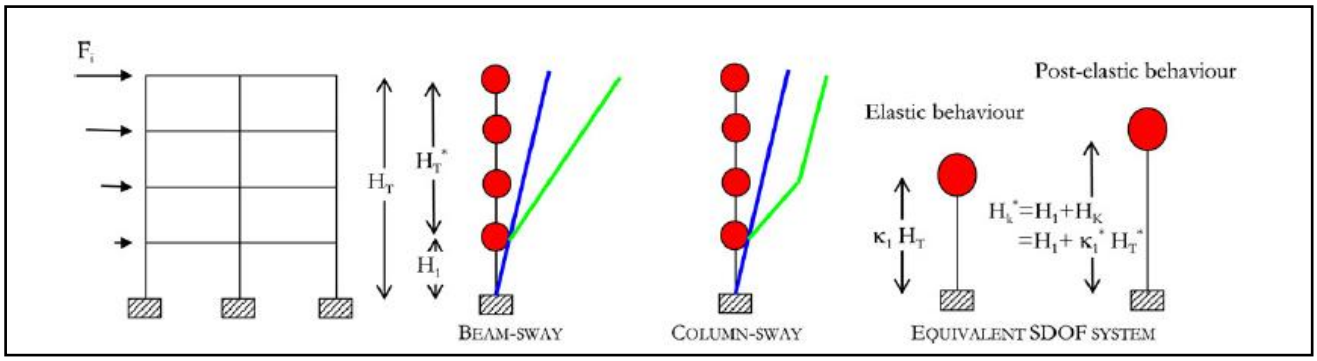
Όταν είμαστε στην ελαστική περιοχή θεωρείται ότι έχουμε γραμμικό σχήμα παραμόρφωσης (σχήμα 7 μπλε γραμμή) και η μετακίνηση Δ_{LS1} του σταδίου LS1 δίνεται και για τους δύο μηχανισμούς από την σχέση

$$\Delta_{LS1} = K_1 * H_T * \theta_y$$

Στην μετελαστική περιοχή δεν έχουμε γραμμικό σχήμα παραμόρφωσης και έτσι η αντίστοιχη μετακίνηση Δ_{LSi} του σταδίου LSι (όπου i=2,3) δίνεται ανάλογα του μηχανισμού κατάρρευσης

$$\Delta_{LSi} = \Delta_{LS1} \frac{H_k^*}{\kappa_1 H_T} + (\Theta_{LSi} - \Theta_y) H_k$$
$$\Delta_{LSi} = \Delta_{LS1} + (\Theta_{LSi} - \Theta_y)\, h_p$$

Για πλευρικό μηχανισμό δοκών (beam-sway) και μηχανισμό μαλακού ορόφου (column-sway) αντίστοιχα, όπου h_p είναι το ύψος ορόφου, H_κ είναι το ισοδύναμο ύψος του τμήματος του κτιρίου πάνω από την ενεργοποίηση του μηχανισμού ενώ H^*_κ ισούται με το ύψος H_κ συν το ύψος ενεργοποίησης του μηχανισμού (σχήμα 11).

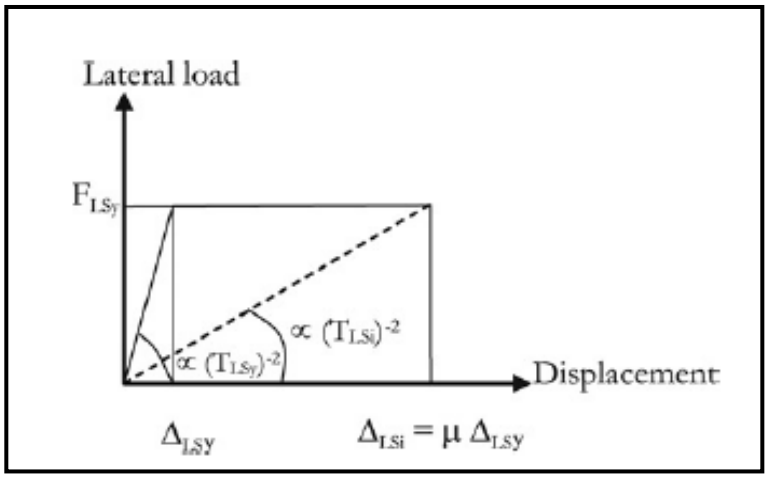


Σχήμα 11: Σχήμα παραμόρφωσης για Beam-sway και Column-sway. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή και η πράσινη στην μετελαστική περιοχή. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

5.2.2.1.5 Υπολογισμός ιδιοπεριόδων στις οριακές καταστάσεις

Για τα όρια που αφορούν κύρια δομικά στοιχεία η ιδιοπερίοδοι του μονοβαθμίου αντιστοιχούν στην εφαπτομενική ακαμψία (secant stiffness) .

Έτσι η σχέση μεταξύ της ιδιοπεριόδου στη διαρροή T_{LSy} και την ιδιοπερίοδο T_{LSi} που αντιστοιχεί στο όριο i είναι $T_{LSi} = T_{LSy} * \sqrt{\mu(LSi)}$ **(σχήμα 12)**



Σχήμα 12: Σχέση μεταξύ ιδιοπεριόδου στην διαρροή και ιδιοπεριόδου στη οριακή κατάσταση LSi . Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

Ωστόσο για τα δευτερεύοντα μη δομικά στοιχεία εφόσον μιλάμε για πολύ μικρές παραμορφώσεις του ορίου βλάβης **NSLD** γίνεται χρήση της προτεινόμενης από τον **Eurocode 8** σχέσης για την ελαστική ιδιομορφή $T_{SL} = 0.075 * H\tau^{3/4}$

5.2.2.1.6 Υπολογισμός της απαίτησης

Η σεισμική απαίτηση έχει την μορφή φάσματος μετακινήσεων με 5% απόσβεση που προέρχεται από το φάσμα επιταχύνσεων του Ιταλικού κανονισμού (**OPCM**) σε σχέση με δεδομένο PGA πολλαπλασιασμένο επί $(T/2\pi)$^2..

Οι σχέσεις που καθορίζουν το φάσμα επιτάχυνσης βάσει των Ιταλικών κανονισμών είναι

$$0 \le T < T_B \quad S_D(T) = SS_T a_g \left(1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \alpha - 1)\right) \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$T_B \le T < T_C \quad S_D(T) = \left(SS_T a_g \cdot \eta \cdot \alpha\right) \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$T_C \le T < T_D \quad S_D(T) = \left(SS_T a_g \cdot \eta \cdot \alpha \left(\frac{T_C}{T} \cdot\right)\right) \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$T_D \le T \quad S_D(T) = \left(SS_T a_g \cdot \eta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2}\right)\right) \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

Όπου $\mathbf{T_B}$ **,** $\mathbf{T_C}$ **,** $\mathbf{T_D}$ είναι οι χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος, **α** είναι ο συντελεστής ενίσχυσης του φάσματος και συνήθως παίρνει την τιμή 2,50, $\mathbf{S,S_T}$ είναι συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη τις εδαφικές συνθήκες και την τοπογραφία και στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι $\mathbf{S^*S_T = 1}$**,** τέλος ο **η** είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ικανότητα κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου για κάθε οριακή κατάσταση (limit state) $\mathbf{L_{Si}}$ και δίνεται από την σχέση του EC8 :

$$\eta_{LSi} = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{LSi}}}$$

Ο όρος $\boldsymbol{\xi_{LSi}}$ της ισοδύναμης βισκοελαστικής απόσβεσης δίνεται από την σχέση που πρότεινε ο **Calvi [1] (1999)** :

$$\xi_{LSi} = a\left(1 - \frac{1}{\mu_{LSi}^{b}}\right) + \xi_{el}$$

Όπου $\boldsymbol{\xi_{el}}$ είναι ο συντελεστής απόσβεσης στην ελαστική περιοχή και συνήθως έχει την τιμή 5%, και οι δύο συντελεστές **α** και **β** κυμαίνονται από 20 έως 30 και από 0,50 έως 1,00 αντίστοιχα. Σε αυτή την εφαρμογή λαμβάνουν τις τιμές α=25 και β=0,50**.**

Για την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo παράμετροι $\mathbf{T_B}$ **,** $\mathbf{T_C}$ θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή και κυμαίνονται $\mathbf{T_B}$ =0,15 έως 0,20 και $\mathbf{T_C}$ = 0,40 έως 0,80. Η $\mathbf{T_D}$ θεωρείται σταθερά και είναι $\mathbf{T_D}$ = 2 sec. Επίσης ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης α θεωρείται τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή με μέση τιμή 2,50 και τυπική απόκλιση 1,10.

5.2.2.1.7 Καμπύλες τρωτότητας- ανακεφαλαίωση μεθόδου

Για τον υπολογισμό των καμπυλών τρωτότητας ακολουθείται το λογικό διάγραμμα ροής (σχήμα1), που συνοπτικά αποτελείται από τα παρακάτω βήματα :

1) Καθορίζεται ένα τυχαίο κτίριο για την κατηγορία κτιρίων που μας ενδιαφέρει με την μέθοδο **Monte Carlo** θεωρώντας σαν τυχαίες μεταβλητές τις παραμέτρους του κτιρίου όπως τις έχουμε περιγράψει.

2) Για κάθε τυχαίο κτίριο, το οποίο διαστασιολογείται και οπλίζεται βάσει των κανονισμών που ισχύουν, υπολογίζεται η καμπύλη ικανότητας και ορίζονται τα όρια των επιπέδων βλάβης ανάλογα του μηχανισμού κατάρρευσης όπως έχουμε περιγράψει.

Να τονιστεί εδώ ότι η διγραμμική καμπύλη ικανότητας για να καθοριστεί χρειάζεται τρείς τιμές. Την τιμή του συντελεστή κατάρρευσης λ, και τις τιμές Δ_y , $\Delta_{collapse}$, που είναι οι μετακινήσεις στην διαρροή και στην κατάρρευση αντίστοιχα (σχήμα 12).

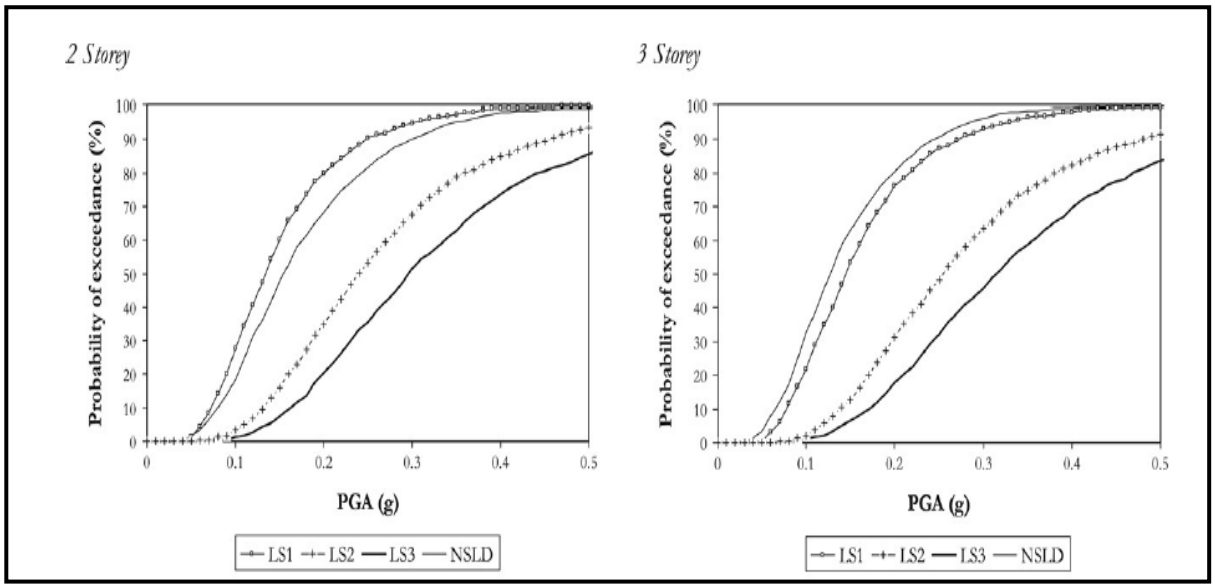
3) καθορισμός του φάσματος απαίτησης

4) Σύγκριση της απαίτησης με την ικανότητα για να οριστεί η κατάταξη του τυχαίου κτιρίου σε επίπεδο βλάβης.

Στο τέλος της μεθόδου **Monte Carlo,** δηλαδή όταν έχει ολοκληρωθεί η κατάταξη όλου του δείγματος τυχαίων κτιρίων της κατηγορίας σε επίπεδα βλάβης , έχουμε τις πιθανότητες να φθάσει ένα κτίριο αυτού του τύπου τα διάφορα επίπεδα βλάβης δηλαδή τις καμπύλες τρωτότητας. Οι επαναλήψεις της μεθόδου **Monte Carlo** είναι μερικές εκατοντάδες και απαιτείται εύλογο χρονικό διάστημα.

Στα πλαίσια της εκτίμησης της μεθόδου οι συγγραφείς κατασκεύασαν Καμπύλες τρωτότητας για κτίρια με 2,3,4,5,6,7,8 ορόφους και θεώρησαν τα κτίρια με 8 ορόφους αντιπροσωπευτικά για όλα τα υψηλότερα κτίρια.

Ενδεικτικά παρατίθενται οι καμπύλες τρωτότητας που υπολόγισαν οι συγγραφείς για κτίρια δύο και τριών ορόφων για τα διάφορα όρια βλάβης, στα πλαίσια της εργασίας τους **[5]**.



Σχήμα 13: Καμπύλες Τρωτότητας για κτίρια οπλισμ. Σκυροδέματος με την μέθοδο SPBELA Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [5] (2008b)

5.2.2.1.8 Παρατηρήσεις - Σχόλια

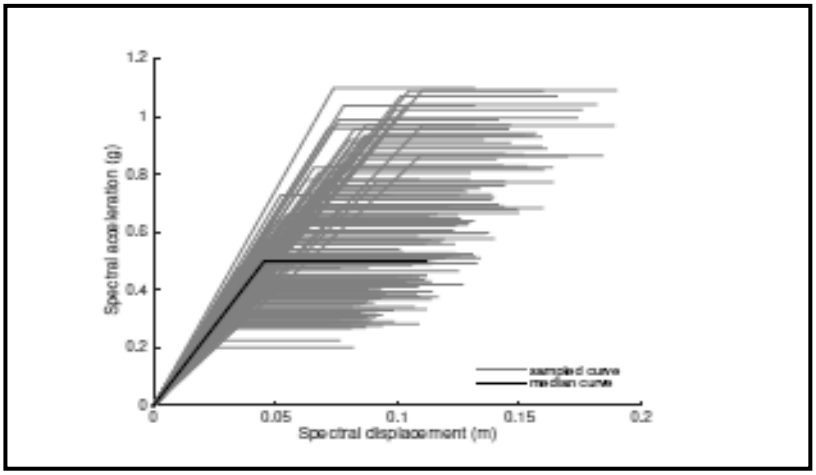
1) Η μέθοδος **SPBELA** θεωρείται βελτίωση της μεθόδου **DBELA** καθώς λαμβάνει υπόψη τη διασπορά των παραμέτρων γεωμετρίας και αντοχής του αντιπροσωπευτικού πλαισίου χρησιμοποιώντας την στοχαστική διαδικασία **Monte-Carlo.**

Είναι μια απλοποιημένη αλλά και παραμετροποιημένη διαδικασία με αξιόπιστα αποτελέσματα που έχει επεκταθεί και σε άλλα υλικά εκτός του οπλισμένου σκυροδέματος, όπως στην άοπλη τοιχοποιία **[7]** την οποία περιγράφουμε παρακάτω, αλλά και σε προκατασκευασμένες κατασκευές **[15].**

2) Ενδιαφέρον παρουσιάζει το τμήμα του υπολογισμού της απλοποιημένης διγραμμικής καμπύλης pushover βάσει του μηχανισμού κατάρρευσης. Θα πρέπει ίσως να διερευνηθεί η αξιοπιστία της χρήσης της σε περιπτώσεις όπου έχουμε έλλειψη καμπυλών pushover σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους για τον καθορισμό της τρωτότητας ομάδων κτιρίων.

3) Η ομάδα του GEM το 2015 **[3]** στα πλαίσια της ανάπτυξης του 'ανοικτού' λογισμικού **Openquake** πρόσθεσε το κομμάτι **OpenQuake Risk Modeler's Toolkit** στο οποίο περιέλαβε σε κώδικα τμήμα της μεθόδου **SP-BELA** για κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος (δεν περιλαμβάνει ακόμα το τμήμα υπολογισμού του συντελεστή κατάρρευσης **λ**) και προανήγγειλε την ολοκλήρωση της μεθόδου στο μέλλον καθώς και την προσθήκη της μεθόδου για κτίρια από τοιχοποιία**.**

Στο σχήμα 10 παρατίθενται ενδεικτικά καμπύλες ικανότητας για μια ομάδα τυχαίων πλαισίων καθώς και της μέσης καμπύλης που προέκυψε από αυτές. Οι καμπύλες έχουν υπολογιστεί με το λογισμικό **OpenQuake** από την ομάδα της GEM με χρήση της μεθόδου SPBELA και της στοχαστικής διαδικασίας **Monte-Carlo. [3] OpenQuake Risk Modeller's Toolkit**



Σχήμα 14: Καμπύλες ικανότητας για κτίρια οπλισμ. Σκυροδέματος με την μέθοδο SPBELA [3] OpenQuake Risk Modeller's Toolkit

4) Ενδιαφέρον παρουσιάζει το τμήμα του υπολογισμού της απλοποιημένης διγραμμικής καμπύλης pushover βάσει του μηχανισμού κατάρρευσης. Θα πρέπει ίσως να διερευνηθεί η αξιοπιστία της χρήσης της σε περιπτώσεις όπου έχουμε έλλειψη καμπυλών pushover σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους για τον καθορισμό της τρωτότητας ομάδων κτιρίων.

Η αυτοματοποίηση της μεθόδου σε μορφή λογισμικού είναι σχετικά εύκολη, άλλωστε υπάρχει και σε ερευνητικά λογισμικά σε μορφή ανοικτού κώδικα όπως προαναφέραμε, όσον αφορά δε την υλοποίηση της μεθόδου **Monte-Carlo** είναι εύκολα προσβάσιμη καθώς υπάρχουν εμπορικά λογισμικά πρόσθετα για το EXCEL που υλοποιούν την μέθοδο **Monte-Carlo** όπως π.χ. το @risk, ενώ το MATLAB έχει ρουτίνα (LHB) του αλγορίθμου Latin Hupercube της μεθόδου.

5.2.2.2 Μέθοδος SP-BELA για κτίρια από άοπλη τοιχοποιία

Η μέθοδος **SP-BELA** (simplified pushover-based Earthquake Loss Assessment method) για κτίρια από τοιχοποιία προτάθηκε το 2008 από τους **Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7]** και είναι η ίδια μεθοδολογία όπως για τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα που είχαν προτείνει οι ίδιοι συγγραφείς προσαρμοσμένη κατάλληλα στις ιδιομορφίες της τοιχοποιίας.

Η μέθοδος όπως προαναφέραμε βασίζεται στην στοχαστική μέθοδο Monte Carlo για να παραχθούν καμπύλες τρωτότητας για διάφορες κατηγορίες κτιρίων, και στη λογική των μηχανισμών κατάρρευσης για τον υπολογισμό των απλοποιημένων καμπυλών ικανότητας και των μετακινήσεων.

Το λογικό διάγραμμα της μεθόδου είναι το ίδιο όπως φαίνεται στο σχήμα 1 της μεθόδου για το οπλισμένο σκυρόδεμα.

Για την άοπλη τοιχοποιία θεωρούνται δύο μηχανισμοί αστοχίας, μηχανισμός αστοχίας εντός επιπέδου **(in-plane**) και μηχανισμός αστοχίας εκτός επιπέδου **(out-of-plane).**

5.2.2.2.1 Καθορισμός παραμέτρων σαν τυχαίες μεταβλητές

Οι παράμετροι που θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές είναι ο αριθμός των ορόφων, το ύψος ορόφου, τα ποσοστά % ρ_A **και** ρ_B της επιφάνειας του τοίχου στην συνολική επιφάνεια του κτιρίου, το ίδιο βάρος της τοιχοποιίας γ_M , η μοναδιαία μάζα του κάθε πατώματος M_i χωρίς ωφέλιμα φορτία τα οποία θεωρούνται σταθερά σαν 200 kgr/m^2 για τα πατώματα και στην στέγη 160 kgr/m^2 χιόνι.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι παράμετροι, οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις και οι κατανομές πιθανότητας που ακολουθούν.

Table 2. Random variables used in simplified pushover-based earthquake loss assessment (SP-BELA) method for the definition of structural capacity of masonry buildings

Variable	Masonry type		Mean (μ)	Standard deviaion (σ)	Distribution	Reference
In-plane failure mechanism						
γ_M	Low-quality natural stone		19 kN/m^3	—	—	Italian regulations (OPCM 3274 (2003))
	Good-quality natural stone		20 kN/m^3	—	—	
	Bricks with high % of voids		9 kN/m^3	—	—	
	Bricks with low % of voids		18 kN/m^3	—	—	
ρ_A	Low-quality natural stone	2 story	0.099	0.034	Normal	Data collection forms (GNDT, Gruppo Nazionale Difesa Terremoti, 2nd level for masonry)
		3 story	0.104	0.028	Normal	
		4 story	0.115	0.038	Normal	
		5 story	—	—	—	
	Good quality natural stone	2 story	0.088	0.035	Normal	
		3 story	0.097	0.034	Normal	
		4 story	0.101	0.038	Normal	
		5 story	—	—	—	
	Bricks with a high % of voids	2 story	0.053	0.022	Normal	
		3 story	0.070	0.040	Normal	
		4 story	—	—	—	
		5 story	—	—	—	
	Bricks with a low % of voids	2 story	0.056	0.017	Normal	
		3 story	0.056	0.013	Normal	
		4 story	0.056*	0.026	Normal	
		5 story	0.057	0.027	Normal	
ρ_B	Low quality natural stone	2 story	0.140	0.056	Normal	Data collection forms (GNDT 2nd level for masonry)
		3 story	0.149	0.037	Normal	
		4 story	0.176	0.09	Normal	
		5 story	—	—	—	
	Good quality natural stone	2 story	0.129	0.055	Normal	
		3 story	0.134	0.045	Normal	
		4 story	0.132	0.050	Normal	
		5 story	—	—	—	
	Bricks with a high % of voids	2 story	0.061	0.016	Normal	
		3 story	0.093	0.050	Normal	
		4 story	—	—	—	
		5 story	—	—	—	
	Bricks with a low % of voids	2 story	0.074	0.027	Normal	
		3 story	0.082	0.027	Normal	
		4 story	0.082*	0.030	Normal	
		5 story	0.087	0.056	Normal	
M_i	Roof	Wood	300 kg/m^2	50 kg/m^2	Normal	Italian structural type
		RC-steel	500 kg/m^2	100 kg/m^2	Normal	
	Floor type	Wood	450 kg/m^2	100 kg/m^2	Normal	
		RC-steel	650 kg/m^2	100 kg/m^2	Normal	
τ_{ki}	Low quality natural stone		30000 N/m^2	14000 N/m^2	Normal	Data collection forms (GNDT

(*Continued*)

Table 2. (*Continued*)

Variable	Masonry type	Mean (μ)	Standard deviaion (σ)	Distribution	Reference
	Good quality natural stone	45000 N/m^2	19000 N/m^2	Normal	2nd level for masonry)
	Bricks with a high % of voids	105000 N/m^2	40000 N/m^2	Normal	
	Bricks with a low % of voids	128000 N/m^2	59000 N/m^2	Normal	
$h_p = h_{pan.}$	All wall types	3.75 m	0.5 m	Lognormal	Italian structural type
γ_{AB}	All wall types	2.50	0.20	Normal	Restrepo-Vélez (2003)
L_T/L_W	All wall types	0.66	0.10	Normal	
Out-of-plane failure mechanism					
t_{panel}	Stones	0.4 m	0.05 m	Normal	Italian structural type
	Bricks	0.3 m	0.05 m	Normal	
$\rho_2 = \Delta_2/\Delta_u$	All wall types	28%	50%	Constant	Restrepo-Vélez (2003)
ψ	All wall types	0.50	0.20	Normal	
ϕ_u	All wall types	0.8	1.0	Constant	

* The mean value of ρ for 4-story buildings has been assumed to be equal to that of its 3-story counterparts, given that the collected field data (based on which the values in this table have been produced) for this type of structures featured some inconsistencies (it gave a value of ρ for buildings with 4 stories that was lower than those with 3 stories).

Πίνακας 1: Στοιχεία παραμέτρων που θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές. **Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7]**

5.2.2.2.2 Μηχανισμός αστοχίας εντός επιπέδου

Για ένα κτίριο από άοπλη τοιχοποιία, που αστοχεί με μηχανισμό εντός επιπέδου, η καμπύλη ικανότητας του αναπαράγεται αξιόπιστα από μία καμπύλη pushover που συσχετίζει την τέμνουσα βάσης του κτιρίου, διανεμημένη σαν πλευρική κατανομή δυνάμεων, με την μετακίνηση ενός κόμβου ελέγχου.

Όταν χρησιμοποιείται η καμπύλη pushover σε ένα πιθανοκρατικό πλαίσιο, όπως αυτό που καθορίζει τις καμπύλες τρωτότητας μιας κατηγορίας κτιρίων, δεν χρειάζεται να είναι εξαιρετικά ακριβής.

Επομένως μπορεί να υιοθετηθεί μια απλουστευμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της όπως αυτή που πρότειναν οι **Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7]** το 2008 γνωστή σαν **SPBELA** για κτίρια από τοιχοποιία και είναι ανάλογη της μεθόδου που είχαν προτείνει οι ίδιοι συγγραφείς για κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα **[5].**

Όπως είναι γνωστό κατά την διάρκεια της ανάλυσης pushover η πλευρική κατανομή δυνάμεων αυξάνεται, ή ισοδύναμα πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή λ, μέχρι να επιτευχθεί η αστοχία που εδώ αντιστοιχεί στο όριο κατάρρευσης (**LS3 collapse limit**) που θα ορίσουμε παρακάτω.

Για την απλοποίηση της διαδικασίας η καμπύλη pushover εξιδανικεύεται με διγραμμική καμπύλη και η συμπεριφορά θεωρείται αρχικά ελαστική και μετά ιδεατώς πλαστική. Επομένως για τον σχηματισμό της καμπύλης χρειάζονται μόνο ο συντελεστής λ κατά την αστοχία και οι μετατοπίσεις κατά την διαρροή και την αστοχία.

Καθορισμός ορίων για τα επίπεδα βλάβης

Για την αστοχία εντός επιπέδου η **SPBELA** ορίζει τρία επίπεδα βλάβης όπως και για το οπλισμένο σκυρόδεμα, επίπεδο με ελαφριές βλάβες, επίπεδο με σημαντικές βλάβες και όριο κατάρρευσης.

Το επίπεδο ελαφριών βλαβών αντιστοιχεί στην κατάσταση που το κτίριο μετά τον σεισμό δεν χρειάζεται επισκευή ή ενίσχυση για να κατοικηθεί. Όταν ξεπεραστεί το όριο σημαντικών βλαβών το κτίριο για χρησιμοποιηθεί χρειάζεται ενίσχυση , ενώ από οικονομικής πλευράς το υπερβολικό κόστος επισκευής και ενίσχυσης μπορεί να κάνει απαγορευτική την περαιτέρω χρήση του. Όταν το κτίριο φθάσει στο όριο κατάρρευσης το κτίριο δεν μπορεί να αναλάβει ούτε τα φορτία του ιδίου βάρους για τα οποία έχει σχεδιαστεί, ούτε οποιοδήποτε οριζόντιο φορτίο λόγω σεισμού και επομένως κάνει την διαμονή σε αυτό επικίνδυνη.

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι το επίπεδο βλάβης έχει μεγάλη εξάρτηση από την σχετική μετακίνηση ορόφων (interstory drift) όσον αφορά τα κτίρια από τοιχοποιία. Για αυτό το λόγο στην μέθοδο τα όρια για τα επίπεδα βλάβης εκφράζονται με όρους σχετικής μετακίνησης ορόφων υπό μορφή κατανομής πιθανοτήτων.

1) όριο ελαφριάς βλάβης LS1

Εδώ η μέση τιμή της σχετικής μετακίνησης ορόφων (interstory drift) είναι 0,13% με συντελεστή διασποράς (cov) 35% και θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή.

2) όριο σημαντικής βλάβης LS2

Εδώ η μέση τιμή της σχετικής μετακίνησης ορόφων (interstory drift) είναι 0,34% με συντελεστή διασποράς (cov) 30% και θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή.

3) όριο σημαντικής βλάβης LS3

Εδώ το όριο ποικίλει ανάλογα του είδους της τοιχοποιίας :α) για τοιχοποιία από τούβλο με χαμηλό λόγο κενών (<55%) η μέση τιμή της σχετικής μετακίνησης ορόφων (interstory drift) είναι 0,72% με

συντελεστή διασποράς (cov) 35% και θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή.

β) για τοιχοποιία με υψηλό δείκτη κενών (>55%) δεν υπάρχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα και για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι γενικές τιμές που προτείνουν οι Restrepo-Velez(2003) για τοιχοποιία δηλαδή η μέση τιμή είναι 0,45% με συντελεστή διασποράς (cov) 30% και θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή.

γ) για τοιχοποιία από φυσική πέτρα η μέση τιμή είναι 0,61% με συντελεστή διασποράς (cov) 25% και θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή (Tomazevic 1992).

Καθορισμός των σημείων της καμπύλης pushover

Ένας τοίχος που φορτίζεται με πλάγιες φορτίσεις εντός του επιπέδου του αντιστέκεται με μηχανισμό αντίστασης σε διάτμηση, με μηχανισμό αντίστασης σε κάμψη και με μηχανισμό αντίστασης στον λικνισμό.

Οι τοίχοι που έχουν καλή στήριξη έχουν μεγάλη συμμετοχή του μηχανισμού αντίστασης σε διάτμηση, ενώ οι λεπτοί τοίχοι καθώς και αυτοί με λιγότερη στήριξη έχουν μεγαλύτερη συμμετοχή των μηχανισμών αντίστασης σε κάμψη και σε λικνισμό.

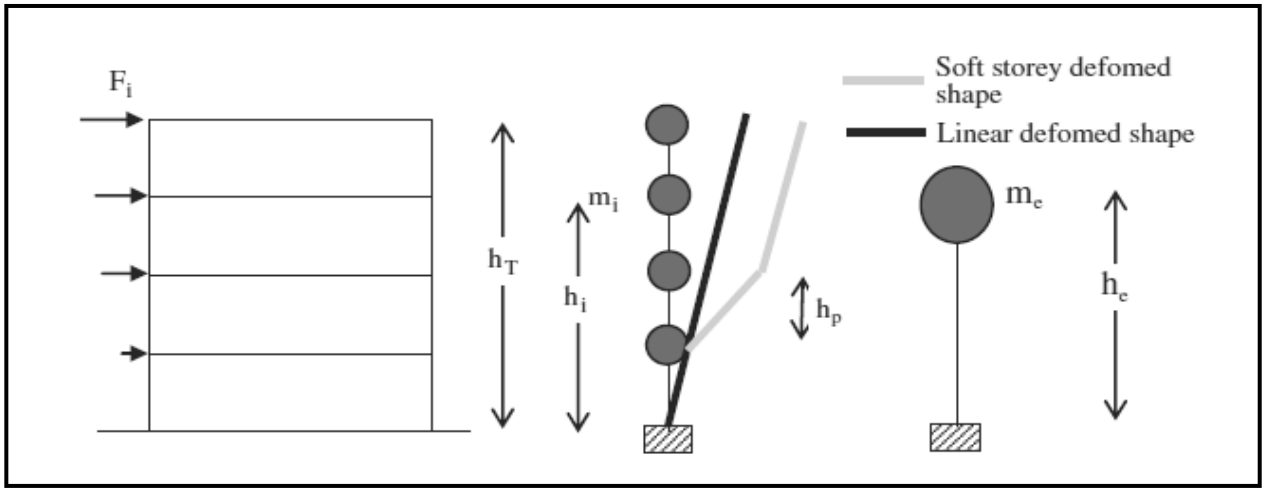
Σημαντικό ρόλο επίσης παίζει και η σχέση αντοχής του κονιάματος με την αντοχή της πλίνθου όπως και η συνάφεια μεταξύ τους διότι καθορίζει που και πώς θα δημιουργηθούν οι ρωγμές εξαιτίας της διάτμησης.

Στην μέθοδο **SPBELA** προτείνεται η αντιπροσώπευση της συμπεριφοράς του αρχικού πολυβαθμίου συστήματος **(MDOF)** με ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο **(SDOF)** όσον αφορά την μάζα την ακαμψία και την ικανότητα της μετακίνησης.

Το αρχικό πολυβάθμιο έχει μάζες (**m_i**) συγκεντρωμένες στις πλάκες (μάζα πλάκας και μάζα τμήματος του τοίχου) και υπόκεινται σε οριζόντιες δυνάμεις (**F_i**) που για κτίρια με λιγότερους από 5 ορόφους θεωρείται αξιόπιστα τριγωνικά κατανεμημένη καθ' ύψος.

Για να υπολογίσουμε τις μετακινήσεις του μονοβαθμίου **(SDOF)** της καμπύλης pushover που αντιστοιχούν στα όρια των επιπέδων βλάβης θα υποθέσουμε ένα σχήμα παραμόρφωσης για κάθε όριο και από τις τιμές της σχετικής μετακίνησης ορόφων που έχουμε ορίσει για κάθε όριο θα προκύψουν οι αντίστοιχες μετακινήσεις.

Για την ελαστική περιοχή θεωρείται γραμμικό τριγωνικό σχήμα παραμόρφωσης ενώ για τά όρια που βρίσκονται στην μετελαστική περιοχή προβλέπεται μηχανισμός «μαλακού ορόφου» και ότι η βλάβη συγκεντρώνεται στο ύψος **h_p** αυτού του ορόφου (σχήμα15).



Σχήμα 15: Αντιστοιχία πολυβαθμίου με μονοβάθμιο και τρόποι παραμόρφωσης. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7] (2008b)

Έτσι για το όριο **LS1** η ικανότητα μετακίνησης του μονοβαθμίου **(SDOF)** δίνεται :

$$\Delta_y = K_1 * h_T * \delta_y$$

Όπου K_1 είναι ο συντελεστής που ισούται με τον λόγο του ύψους h_e του ισοδυνάμου μονοβαθμίου προς το συνολικό ύψος h_T του κτιρίου, και δ_y είναι η σχετική μετακίνηση ορόφου στην διαρροή. Όταν το κτίριο έχει κανονική κατανομή της μάζας καθ' ύψος ο συντελεστής K_1 θεωρείται προσεγγιστικά ίσος με 0,67.

Για τα άλλα δύο όρια που βρίσκονται στην μεταλαστική περιοχή το σχήμα παραμόρφωσης είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα11 και η μετακίνηση δίνεται από την σχέση

$$\Delta_{LSi} = K_1 * h_T * \delta_y + K_1 * (\delta_{LSi} - \delta_y) * h_p$$

Όπου δ_{LSi} είναι η σχετική μετακίνηση ορόφων (interstory drift) όπως έχει για τα όρια **LS2, LS3** παραπάνω. Οι συντελεστές K_1 και K_2 , για κτίρια με ομοιόμορφη κατανομή της μάζας καθ' ύψος και για μάζα τοίχου ισης με το 30% της μάζας της πλάκας του πατώματος, δίνονται από τις τιμές που πρότειναν οι **Restrepo-Velez** (2003) και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Table 1. k_1 and k_2 coefficients as a function of number of floors (Restrepo- Vélez, 2003)

Floors	k_1	k_2
1	0.790	0.967
2	0.718	0.950
3	0.698	0.918
4	0.689	0.916
5	0.684	0.900
6	0.681	0.881

Πίνακας 2: συντελεστές K1 και K2 ανάλογα του αριθμού ορόφων. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7] (2008b)

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές των **K1** και **K2** είναι αξιόπιστες όταν ο μηχανισμός αστοχίας συμβαίνει μέσα στα 2/3 του ύψους του κτιρίου.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή κατάρρευσης **λ** που υπολείπεται για να καθοριστεί πλήρως η καμπύλη pushover χρησιμοποιείται από την μέθοδο η σχέση που πρότειναν οι **Restrepo-Velez-Magenes** (2004) που μας δίνει τον συντελεστή λ_i του ορόφου i

$$\lambda_i = \frac{1}{W_T \frac{\sum_{k=i}^{n} h_k W_k}{\sum_{j=1}^{n} h_j W_j}} A_i \tau_{ki} \left[1 + \frac{\sum_{k=i}^{n} W_k}{1.5 \tau_{ki} A_i (1 + \gamma_{AB})} \right]^{1/2}$$

Όπου $\mathbf{W_T}$ είναι το συνολικό βάρος του κτιρίου, $\mathbf{W_i}$ είναι το βάρος του ορόφου i, $\boldsymbol{\tau_{ki}}$ είναι η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας στον όροφο i, $\mathbf{A_i}$ είναι η ολική επιφάνεια του τοίχου του ορόφου i στην διεύθυνση επιβολής των φορτίων, $\mathbf{B_i}$ είναι η μέγιστη περιοχή ανάμεσα σε τοίχο με διεύθυνση ίδια με την φόρτιση και της κάθετης διεύθυνσης, $\boldsymbol{\gamma_{AB}}$ είναι ο λόγος $\mathbf{A_i}$/ $\mathbf{B_i}$ και **n** είναι ο αριθμός των ορόφων.

Ο τελικός συντελεστής λ θεωρείται ότι είναι ο μικρότερος από όλους τους συντελεστές των ορόφων $\boldsymbol{\lambda = \min\{\lambda_i\}}$**.**

Επειδή η προηγούμενη σχέση για το λ_i αγνοεί φαινόμενα όπως η στρέψη λόγω απόστασης του κέντρου ακαμψίας και του κέντρου μάζας οι **Restrepo-Velez-Magenes** (2004) πρότειναν ένα διορθωτικό συντελεστή $\boldsymbol{\varphi_c}$ ώστε $\boldsymbol{\lambda = \varphi_c^{-1} \min\{\lambda_i\}}$**.**

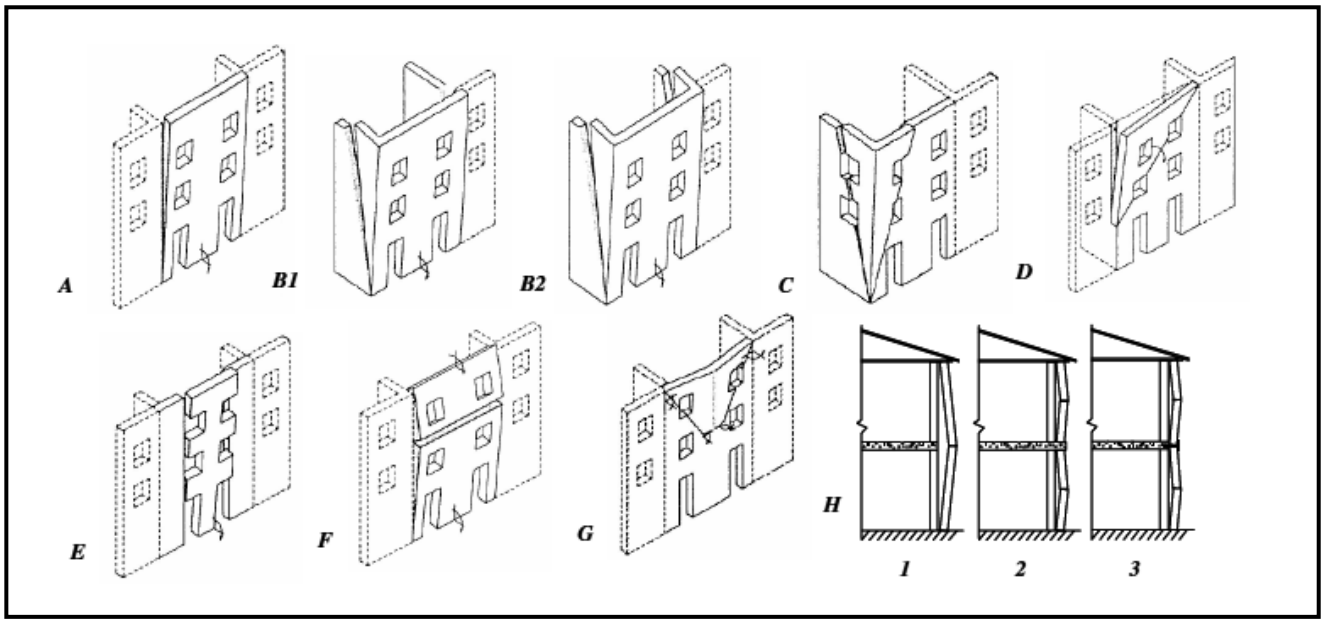
Όρισαν δε τον $\boldsymbol{\varphi_c}$ σαν

$$\phi_c = 5.5\frac{\tau_{ki}}{\frac{L_W}{L_T}} + 0.5$$

Όπου $\mathbf{L_T}$ είναι το συνολικό ύψος των τοίχων στην διεύθυνση της οριζόντιας φόρτισης, και $\mathbf{L_W}$ είναι το ολικό μήκος των τοίχων χωρίς ανοίγματα στην ίδια διεύθυνση.

5.2.2.2.3 Μηχανισμός αστοχίας εκτός επιπέδου

Ο μηχανισμός αστοχίας εκτός επιπέδου είναι ένας πολύπλοκος μηχανισμός και εξαρτάται από το πόσο καλά υποστηρίζεται ένας τοίχος κατά την κάθετη διεύθυνση στο επίπεδο του. Σαν συνέπεια των καθέτων σεισμικών φορτίων στο επίπεδο τους οι τοίχοι αστοχούν με ένα μηχανισμό λικνισμού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



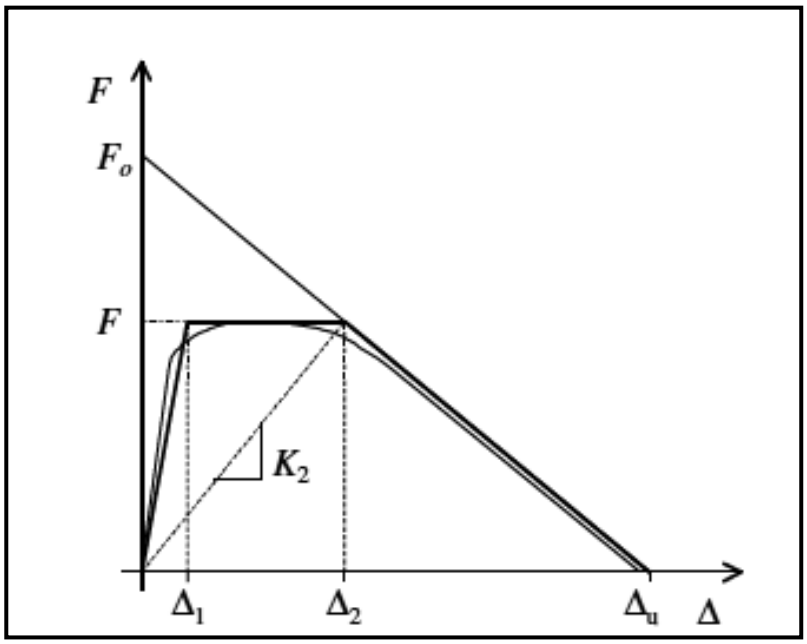
Σχήμα 16: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων τύπων εκτός επιπέδου αστοχίας όπως προτείνεται από τους D' Ayala-Speranza 2003. Από L. Restrepo-Velez, G. Magenes [8] (2004)

Η απλοποιημένη καμπύλη που περιγράφει την σχέση δύναμης μετακίνησης για μηχανισμό αστοχίας εκτός επιπέδου του ισοδυνάμου μονοβαθμίου (SDOF) φαίνεται στο σχήμα 17.

Το σημείο F_0=λ*W αντιστοιχεί στην δύναμη που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός λικνισμού. Η Δ_u είναι η μετατόπιση που αντιστοιχεί στο σημείο της στατικής αστάθειας. Η γραμμή που ενώνει αυτά τα δύο σημεία σημαίνει ότι ο τοίχος θραύεται πριν ξεκινήσει ο λικνισμός.

Για τον μηχανισμό αστοχίας εκτός επιπέδου υπάρχει μόνο ένα όριο που ξεχωρίζει την κατάρρευση από την μη-κατάρρευση, δηλαδή καθορίζει την σταθερότητα ή την αστάθεια ενός τοίχου.

Στην μέθοδο SPBELA δεν περιλαμβάνονται όλοι οι μηχανισμοί αστοχίας εκτός επιπέδου μηχανισμοί που περιγράφονται από τους **Restrepo-Velez** και **Magenes [8] 2004** αλλά μόνο οι τρείς παρακάτω περιπτώσεις για τις οποίες καθορίζονται οι οριακές μετακινήσεις και η οριακή ιδιοπερίοδος.



Σχήμα 17: Τριγραμμικό απλοποιημένο μοντέλο σχέσης δύναμης-μετακίνησης για το μηχανισμό εκτός επιπέδου. Από L. Restrepo-Velez, G. Magenes [8] (2004)

Για τοίχους που υποστηρίζονται και στα δύο άκρα με συγκεντρωμένο φορτίο στην κορυφή :

$\Delta_{SL} = \varphi_u * \Delta_u = \varphi_u * \frac{1+0.75*\Psi}{1+\Psi} * t$

Για τοίχους που υποστηρίζονται και στα δύο άκρα με κατανεμημένο φορτίο στην κορυφή :

$\Delta_{SL} = \varphi_u * \Delta_u = \varphi_u * t$

Για τοίχους που υποστηρίζονται στη βάση και είναι ελεύθερο στην κορυφή :

$\Delta_{SL} = \varphi_u * \Delta_u = \varphi_u * t$

Η περίοδος δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$T_{SL} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \rho_2 \Delta_{SL} h}{\phi_u (1-\rho_2)(1+\Psi) g t}}$$

Όπου **t** είναι το πάχος του τοίχου, $\boldsymbol{\varphi_u}$ είναι συντελεστής ασφαλείας που κυμαίνεται από 0,80 έως 1.00, **Ψ** είναι ο λόγος του αξονικού φορτίου και του βάρους του τμήματος του τοίχου που υπόκειται σε

λικνισμό , **h** είναι το ύψος του τοίχου, και ρ_2 είναι ο λόγος Δ_2/Δ_u που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κονιάματος.

5.2.2.2.4 Καθορισμός της σεισμικής απαίτησης

Η σεισμική απαίτηση καθορίζεται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα του τρόπου αστοχίας, που περιγράφονται παρακάτω.

Α) Καθορισμός φάσματος μετακινήσεων για τον εντός επιπέδου μηχανισμό

Η σεισμική απαίτηση έχει την μορφή φάσματος μετακινήσεων με 5% απόσβεση που προέρχεται από το φάσμα επιταχύνσεων του Ιταλικού κανονισμού (**OPCM**) σε σχέση με δεδομένο PGA πολλαπλασιασμένο επί $(T/2\pi)$^2..

Οι σχέσεις που καθορίζουν το φάσμα επιτάχυνσης βάσει των Ιταλικών κανονισμών είναι

$$0 \le T < T_B \quad S_D(T) = SS_T a_g \left(1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \alpha - 1)\right)\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$T_B \le T < T_C \quad S_D(T) = \left(SS_T a_g \cdot \eta \cdot \alpha\right)\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$T_C \le T < T_D \quad S_D(T) = \left(SS_T a_g \cdot \eta \cdot \alpha \left(\frac{T_C}{T} \cdot\right)\right)\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$T_D \le T \quad S_D(T) = \left(SS_T a_g \cdot \eta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2}\right)\right)\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

Όπου T_B , T_C , T_D είναι οι χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος, **α** είναι ο συντελεστής ενίσχυσης του φάσματος και συνήθως παίρνει την τιμή 2,50, S, S_T είναι συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη τις εδαφικές συνθήκες και την τοπογραφία και στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι $S*S_T = 1$, τέλος ο **η** είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ικανότητα κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου για κάθε οριακή κατάσταση (limit state) L_{Si} και δίνεται από την σχέση του EC8 :

$$\eta_{LSi} = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{LSi}}}$$

Ο όρος ξ_{LSi} της ισοδύναμης απόσβεσης δίνεται από την σχέση που πρότεινε ο **Calvi [1] (1999)** :

$$\xi_{LSi} = a\left(1 - \frac{1}{\mu_{LSi}^{b}}\right) + \xi_{el}$$

Όπου ξ_{el} είναι ο συντελεστής απόσβεσης στην ελαστική περιοχή και συνήθως έχει την τιμή 5%, και οι δύο συντελεστές **α** και **β** κυμαίνονται από 20 έως 30 και από 0,50 έως 1,00 αντίστοιχα. Σε αυτή την εφαρμογή λαμβάνουν τις τιμές α=25 και β=0,50**.**

Για την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo παράμετροι $\mathbf{T_B}$, $\mathbf{T_C}$ θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή και κυμαίνονται $\mathbf{T_B}$ =0,15 έως 0,20 και $\mathbf{T_C}$ = 0,40 έως 0,80. Η $\mathbf{T_D}$ θεωρείται σταθερά και είναι $\mathbf{T_D}$ = 2 sec. Επίσης ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης α θεωρείται τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή με μέση τιμή 2,50 και τυπική απόκλιση 1,10

B) Καθορισμός φάσματος μετακινήσεων για τον εκτός επιπέδου μηχανισμό

Για τον καθορισμό της φασματικής μετακίνησης για τον εκτός επιπέδου μηχανισμό η μέθοδος SPBELA αρχικά υπολογίζει την φασματική επιτάχυνση για την οποία υιοθετεί την σχέση που προτείνει ο EC8 για τα μη δομικά μέλη (non structural elements)

$$S_A(T) = SS_T PGA \left[\frac{3(1 + z/H)}{1 + (1 - T_a/T)^2} - 0.5 \right]$$

Όπου **z** είναι το ύψος που βρίσκεται ο τοίχος, **H** είναι το συνολικό ύψος του κτιρίου, **Τα** και **T** είναι οι ιδιοπερίοδοι του τοίχου και του κτιρίου αντίστοιχα.

Η μέθοδος κάνει τις παρακάτω απλοποιήσεις :

1. Θεωρεί το $\mathbf{S*S_T}$ = 1

2. Θεωρεί το **z/H** =1 με το σκεπτικό ότι οι τοίχοι που είναι ψηλότερα τείνουν να λικνιστούν πρώτοι καθώς έχουν την μεγαλύτερη δυναμική ενίσχυση και το μικρότερο πάχος.

3. για την περίοδο **T** χρησιμοποιεί την τιμή της ελαστικής ιδιοπεριόδου

Τέλος για τον υπολογισμό της φασματικής μετακίνησης πολλαπλασιάζει την φασματική επιτάχυνση επί $(T/2\pi)$^2. Επισημαίνει δε ότι η σχέση αυτή της επιτάχυνσης με μετακίνηση για τα μη δομικά μέλη δεν έχει επαρκώς επαληθευτεί.

5.2.2.2.5 Καμπύλες τρωτότητας- ανακεφαλαίωση μεθόδου

Για τον υπολογισμό των καμπυλών τρωτότητας ακολουθείται το ίδιο λογικό διάγραμμα ροής με αυτό που χρησιμοποιείται από την μέθοδο και στην περίπτωση των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (σχήμα 1 SPBELA για οπλ. σκυρόδεμα), που συνοπτικά αποτελείται από τα παρακάτω βήματα :

1) Καθορίζεται ένα τυχαίο κτίριο για την κατηγορία κτιρίων που μας ενδιαφέρει με την μέθοδο **Monte Carlo** θεωρώντας σαν τυχαίες μεταβλητές τις παραμέτρους του κτιρίου όπως τις έχουμε περιγράψει.

2) Για κάθε τυχαίο κτίριο, το οποίο διαστασιολογείται και οπλίζεται βάσει των κανονισμών που ισχύουν, υπολογίζεται η καμπύλη pushover και ορίζονται τα όρια των επιπέδων βλάβης ανάλογα του μηχανισμού κατάρρευσης όπως έχουμε περιγράψει.

Να τονιστεί εδώ ότι η διγραμμική καμπύλη pushover για να καθοριστεί χρειάζεται τρείς τιμές. Την τιμή του συντελεστή κατάρρευσης **λ**, και τις τιμές $\mathbf{\Delta_y}$, $\mathbf{\Delta_{collapse}}$, που είναι οι μετακινήσεις στην διαρροή και στην κατάρρευση αντίστοιχα .

3) καθορισμός του φάσματος απαίτησης

4) Σύγκριση της απαίτησης με την ικανότητα για να οριστεί η κατάταξη του τυχαίου κτιρίου σε επίπεδο βλάβης.

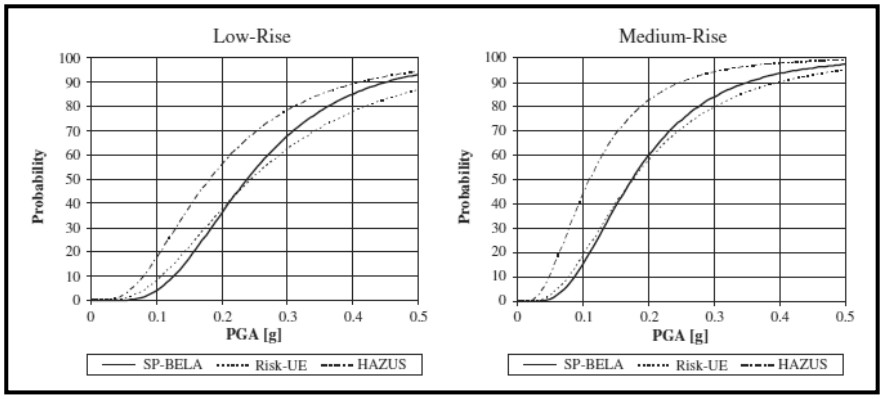
Στο τέλος της μεθόδου **Monte Carlo,** δηλαδή όταν έχει ολοκληρωθεί η κατάταξη όλου του δείγματος τυχαίων κτιρίων της κατηγορίας σε επίπεδα βλάβης , έχουμε τις πιθανότητες να φθάσει ένα κτίριο αυτού του τύπου τα διάφορα επίπεδα βλάβης δηλαδή τις καμπύλες τρωτότητας. Οι επαναλήψεις της μεθόδου **Monte Carlo** είναι μερικές εκατοντάδες και απαιτείται εύλογο χρονικό διάστημα.

Στα πλαίσια της εργασίας τους οι **Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7]** αφού παρήγαγαν καμπύλες τρωτότητας για πολλές κατηγορίες τοιχοποιίας και αριθμό ορόφων με την προτεινόμενη **SPBELA** συνέκριναν τις καμπύλες με τις αντίστοιχες που υπολογίσθηκαν με την Αμερικάνικη μέθοδο **HAZUS 99** (FEMA 1990) καθώς και με την Ευρωπαϊκή μέθοδο **RISK-UE**(2001) .

Από την σύγκριση προκύπτει σύγκλιση αποτελεσμάτων με την Ευρωπαϊκή μέθοδο RISK-UE(2001) της οποίας οι κατηγορίες κτιρίων αφορούν τον Ευρωπαϊκό τρόπο μελέτης και κατασκευής παρόμοιο δηλαδή με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην SPBELA , ενώ γενικά η HAZUS 99 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τρωτότητας , διαφορά που φαίνεται λογική λόγω του διαφορετικού τρόπου μελέτης και κατασκευής.

Παρά το ότι ο σκοπός των εισηγητών της παραπάνω εργασίας ήταν η παρουσίαση της μεθόδου και όχι η αξιολόγηση της φαίνεται ότι τα πρώτα δείγματα εφαρμογής της μεθόδου που διεξήγαγαν δείχνουν ότι παρέχει λογικά αποτελέσματα. Αναφέρουν φυσικά την ανάγκη για περεταίρω αξιολόγησης της μεθόδου και πιθανή βελτίωση της.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ενδεικτικά η σύγκριση που έκαναν οι συγγραφείς για τα χαμηλά και τα μεσαίου ύψους κτίρια για τις τρείς μεθόδους.



Σχήμα 18: Παράδειγμα σύγκρισης καμπυλών τρωτότητας με τις μεθόδους SPBELA, HAZUS, RISK-UE. Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley [7] (2008b)

5.2.3 Μέθοδος με σημεία διασποράς

Το 2012 οι V. Silva - R. Phino - H. Crowley - H. Varum - R. Sousa [9] ανακοίνωσαν μια μέθοδο με χρήση απλοποιημένης μεθόδου pushover και της στοχαστικής μεθόδου **Monte-Carlo** για την παραγωγή τεχνητών καμπύλων τρωτότητας.

Το 2015 η ομάδα του GEM (Global Earthquake Model) στην οποία συμμετέχουν και οι ανωτέρω ερευνητές στα πλαίσια της ανάπτυξης του λογισμικού ανάλυσης διακινδύνευσης **OpenQuake** ονόμασαν τις μεθόδους αυτού του τύπου μεθόδους με χρήση διασποράς σημείων (point dispersion methods).

Η μέθοδος βασίζεται στην επιλογή ενός 2-σδιάστατου πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα **αντιπροσωπευτικού** μιας κατηγορίας κτιρίων στο οποίο οι **γεωμετρικές παράμετροι** και οι **παράμετροι αντοχής** θεωρούνται **τυχαίες μεταβλητές**.

Με την χρήση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών στα πλαίσια της μεθόδου **Monte-Carlo** δίνονται **επαναληπτικά** τυχαίες τιμές στην ομάδα των παραμέτρων αυτών και σε κάθε ομάδα αντιστοιχεί ένα **'τυχαίο'** πλαίσιο.

Το '**τυχαίο**' πλαίσιο με αυτοματοποιημένη διαδικασία διαστασιολογείται και οπλίζεται για τα φορτία βαρύτητας με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς. Στα πλαίσια της εργασίας που αναφέρουμε και αφορούσε Τουρκικά κτίρια επελέγησαν οι Τουρκικοί κανονισμοί του 1999.

Για κάθε '**τυχαίο**' πλαίσιο δημιουργείται η καμπύλη pushover (με χρήση συμβατικής pushover , αναπροσαρμοζόμενης –adaptive- pushover , καθώς και με ανελαστική δυναμική ανάλυση με χρονοιστορίες για σύγκριση).

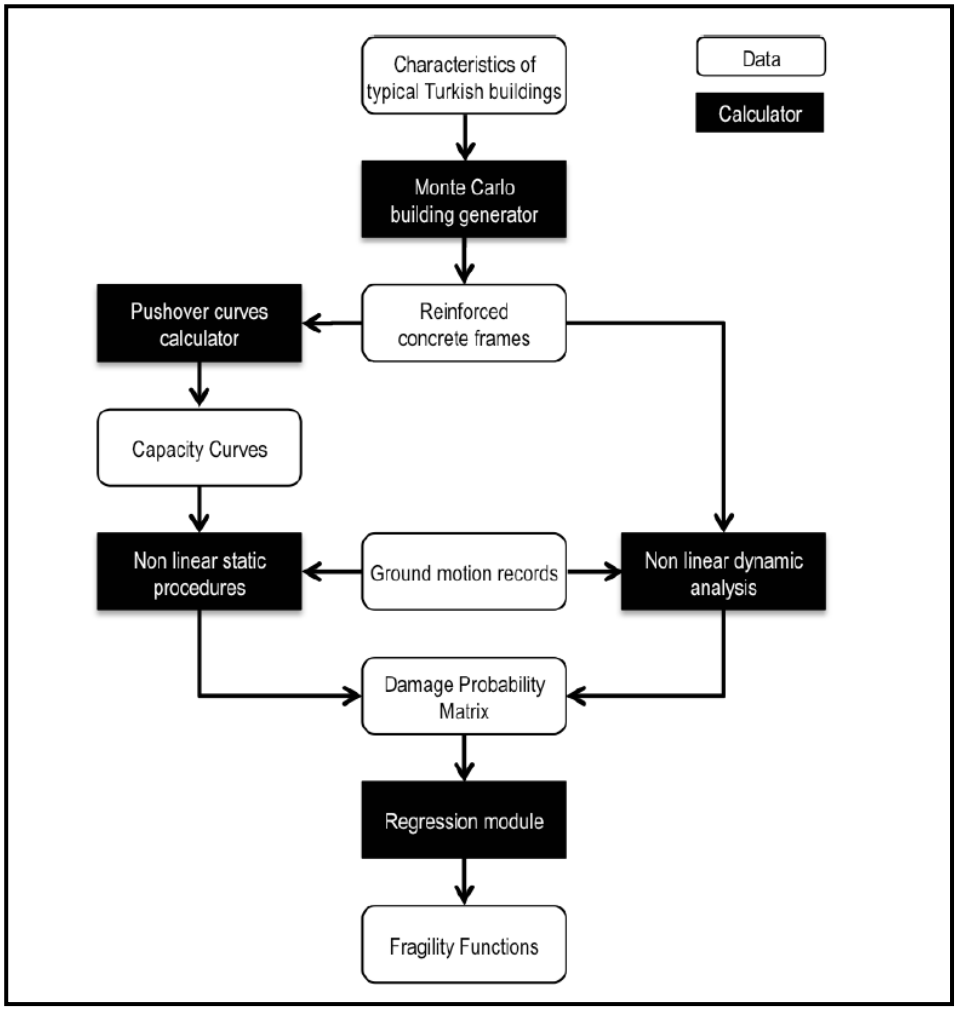
Ακολούθως οι καμπύλες μετατρέπονται σε καμπύλες ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου (SDOF).

Ακολουθεί υπολογισμός του σημείου επιτελεστικότητας, δηλαδή της απόκρισης του 'τυχαίου' πλαισίου με στατικές ανελαστικές μεθόδους (Nonlinear Static Procedures –**NSP**, εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι **DCM, CSM, K2**), και ελέγχεται σε ποιο επίπεδο βλάβης αντιστοιχεί αυτό (εδώ έχουν οριστεί τρείς οριακές τιμές) για μεγάλο εύρος σεισμικών καταγραφών.

Για το σύνολο των '**τυχαίων**' πλαισίων (εδώ θεωρήθηκε ότι απαιτούνταν 100 πλαίσια για την σύγκλιση της μεθόδου) δημιουργούνται τα μητρώα τρωτότητας της κατηγορίας κτιρίων δηλαδή οι διακριτές τιμές κατανομής πιθανότητας υπέρβασης ορίων βλάβης.

Στο τέλος με ανάλυση παλινδρόμησης (**Regression analysis**) τα μητρώα αυτά προσαρμόζονται σε καμπύλες που αποτελούν τις καμπύλες τρωτότητας.

Το λογικό διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 19: Σχηματικό λογικό διάγραμμα μεθόδου με σημεία διασποράς. V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

5.2.3.1 Ανάλυση της μεθόδου

Παρακάτω ακολουθεί διεξοδικότερη περιγραφή και σχολιασμός των διαφόρων σταδίων και διαδικασιών που χρησιμοποιούνται.

5.2.3.1.1 Καθορισμός επιπέδων βλάβης

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη βάσει των οποίων γίνεται η κατάταξη μιας κατηγορίας κτιρίων σε επίπεδο βλάβης ποικίλουν και μπορεί να είναι η μέγιστη μετακίνηση οροφής, η σχετική μετακίνηση ορόφου, τα επίπεδα παραμόρφωσης της διατομής του χάλυβα και του σκυροδέματος, η μέγιστη τέμνουσα βάσης κ.λπ., στην αναφερόμενη εργασία οι συγγραφείς επέλεξαν την μέγιστη μετακίνηση οροφής.

Έτσι καθορίστηκαν 3 όρια βλάβης βάσει της μετακίνησης οροφής

LS1 : η μετακίνηση οροφής που αντιστοιχεί στο 75% της μέγιστης ικανότητας τέμνουσας βάσης

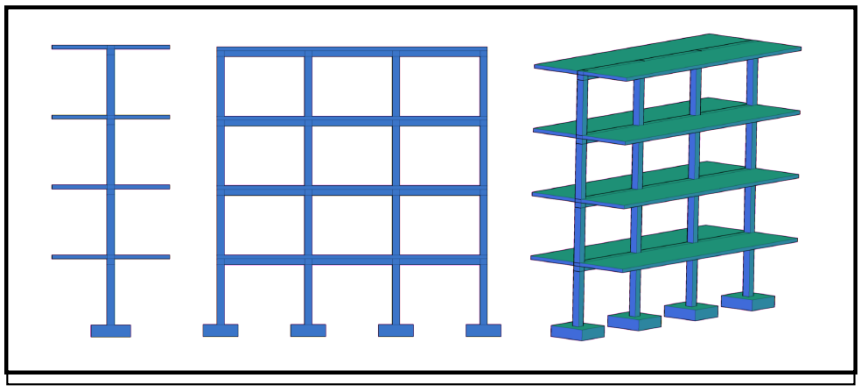
LS2 : η μετακίνηση οροφής που αντιστοιχεί στην μέγιστη ικανότητα τέμνουσας βάσης

LS3 : (κατάρρευση) η μετακίνηση οροφής που αντιστοιχεί σε πτώση της ικανότητας τέμνουσας βάσης κατά 20%

5.2.3.1.2 Δημιουργία των επιπέδων 'τυχαίων' πλαισίων

Η λογική της μεθόδου είναι ότι είναι ότι για την εκτίμηση της τρωτότητας είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο δείγμα τυχαίων πλαισίων παρά ένα αντιπροσωπευτικό πλαίσιο όλης της κατηγορίας με μέσες τιμές των παραμέτρων που επηρεάζουν, διότι έτσι λαμβάνεται καλλίτερα υπόψη η αβεβαιότητα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της αντοχής.

Έτσι για κάθε μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ενός τυπικού Τουρκικού κτιρίου έγιναν εκατοντάδες προσομοιώσεις με την μέθοδο Monte-Carlo θεωρώντας σαν τυχαίες μεταβλητές τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις αντοχές. Στα πλαίσια της εργασίας, που κύριος στόχος ήταν η ανάδειξη της μεθόδου, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σαν μοντέλο ένα 2-σδιάστατο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος με 4 ορόφους και 3 ανοίγματα (σχήμα 20).



Σχήμα 20: Μοντέλο δισδιάστατου παραμετροποιημένου πλαισίου.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

Για το μοντέλο που επιλέχθηκε οι παράμετροι που επιλέχτηκαν σαν τυχαίες μεταβλητές (αντοχές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά) καθώς και οι μέσες τιμές, η διασπορά, τα όρια και η κατανομή πιθανότητας που ακολουθούν φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Table 2.2. Probabilistic distributions of the material and geometric properties.

Parameter	Mean	COV	A*	B*	Type of distribution
Steel modulus (GPa)	210	5%	-	-	Normal
Steel yield strength (MPa)	371.1	24%	-	-	Normal
Concrete yield strength (MPa)	16.7	50%	2	40	Gamma
Regular height (m)	2.84	8%	-	-	Lognormal
Ground/regular height ratio	1.13	14%	1	1.4	Exponential
Beam length (m)	3.37	38%	-	-	Gamma
Column depth (m)	0.49	30%	0.4	1	Lognormal

*A and B indicate the lower and the upper bounds respectively of the truncated distribution.

Πίνακας 3: Καθορισμός παραμέτρων κτιρίου σαν τυχαίες μεταβλητές.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

Για κάθε ομάδα τιμών που δημιουργείται για τις παραμέτρους οι διατομές των στοιχείων του τυχαίου πλαισίου διαστασιολογούνται και οπλίζονται για τα φορτία βαρύτητας με βάσει τους Τουρκικούς κανονισμούς του 1999.

Εκτιμήθηκε ότι για να υπάρξει σύγκλιση της μεθόδου απαιτείται η δημιουργία τουλάχιστον 100 τυχαίων πλαισίων.

Για τις διάφορες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό **OpenSEES** που έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο του Berkley.

Ο κάθε κόμβος του δισδιάστατου πλαισίου θεωρήθηκε ότι έχει 3 βαθμούς ελευθερίας (2 μεταφορικούς και 1 περιστροφικό), ενώ οι διατομές δοκών και υποστυλωμάτων προσομοιώθηκαν με διατομές χωρισμένες σε ίνες για να περιγραφεί η ανελαστική συμπεριφορά των υλικών.

Η συμπεριφορά του περισφιγμένου και μη-περισφιγμένου σκυροδέματος θεωρήθηκε ότι ακολουθεί το μοντέλο **Kent-Park** όπως τροποποιήθηκε από τον Scott(1982) με συντελεστή περίσφιγξης 1,15 , ενώ η συμπεριφορά του χάλυβα ότι ακολουθεί το μοντέλο συμπεριφοράς των **Giuffre και Pinto** (1970).

Τα φορτία βαρύτητας θεωρήθηκαν σαν ομοιόμορφα κατανεμημένα στις δοκούς.

Λαμβάνει δε υπόψη τη γεωμετρική μη γραμμικότητα ώστε να φανεί η επιρροή των φαινομένων **P-Δ**.

5.2.3.1.3 Αναλύσεις με Pushover

Α) Συμβατική Pushover

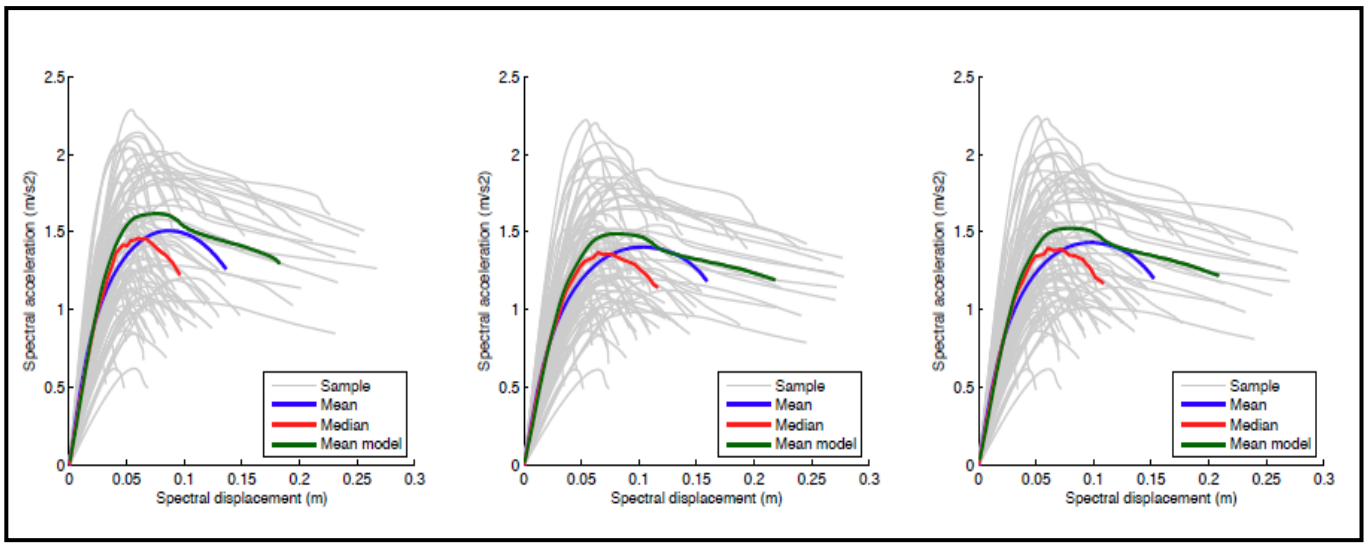
Η καμπύλη Pushover αναπαριστά την σχέση μεταξύ της τέμνουσας βάσης με την μετακίνηση της οροφής του πολυβάθμιου (MDOF) μοντέλου ενός κτιρίου.

Είναι γνωστά τα μειονεκτήματα της μεθόδου όπως ότι δεν λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα P-Δ , την απόσβεση, την επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών παραμόρφωσης κ.λπ. αποτελεί όμως μια γρηγορότερη και σχετικά αξιόπιστη προσέγγιση της δυναμικής ανελαστικής μεθόδου με χρονοιστορίες.

Οι πλευρικές φορτίσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η ομοιόμορφη, η τριγωνική, και η κατανομή με μορφή της 1^{ης} ιδιομορφής. Εδώ δεν χρησιμοποιήθηκε η κατανομή με σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής διότι θεωρήθηκε πολύ κοντά στην τριγωνική, αντί αυτής όμως χρησιμοποιήθηκε μια κατανομή (modal) με βάση το σχήμα των 3 πρώτων ιδιομορφών.

Ακολούθως γίνεται η μετατροπή της καμπύλης pushover του πολυβαθμίου μοντέλου (MDOF) σε καμπύλη του ισοδύναμου μονοβαθμίου (SDOF) σε μορφή ADRS δηλαδή με όρους φασματικής επιτάχυνσης (Sa) προς φασματική μετακίνηση (Sd) ώστε να είναι συγκρίσιμη με την σεισμική απαίτηση.

Τα αποτελέσματα των εκατοντάδων καμπυλών από τα τυχαία πλαίσια για τις 3 διαφορετικές κατανομές φόρτισης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Στο σχήμα έχουν τονιστεί η μέση καμπύλη (mean-η καμπύλη του μέσου όρου των τιμών από όλες τις καμπύλες), η ενδιάμεση καμπύλη (median-η καμπύλη των ενδιάμεσων τιμών των καμπυλών), και η καμπύλη του κτιρίου με χαρακτηριστικά τις μέσες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 21: Καμπύλες ικανότητας για α) ομοιόμορφη β) τριγωνική γ) ιδιομορφική κατανομή φόρτισης.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

Η μεγάλη διασπορά των τιμών των διαφόρων καμπυλών μας δείχνει ότι η χρήση μιας καμπύλης είναι ανεπαρκής για να αντιπροσωπεύσει όλη την κατηγορία κτιρίων .

Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι η καμπύλη του κτιρίου με μέσες τιμές χαρακτηριστικών δείχνει σημαντικά μεγαλύτερη ικανότητα μετακίνησης (Sd) από την μέση καμπύλη γεγονός που θα οδηγούσε σε υποεκτίμηση των απωλειών εάν χρησιμοποιούνταν όπως συνηθίζεται.

Όσον αφορά την επίδραση της κατανομής φόρτισης φαίνεται ότι η ομοιόμορφη κατανομή οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ικανότητας σε τέμνουσα βάσης ενώ η τριγωνική σε μεγαλύτερη ικανότητα μετακίνησης, η ιδιομορφική κυμαίνεται ανάμεσα στις δύο προηγούμενες.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται για τις τρείς διαφορετικές φορτίσεις οι τιμές που παίρνουν οι μέσες καμπύλες στα όρια βλαβών που έχουν προκαθοριστεί.

	Uniform		Triangular		Modal	
	Sd (m)	Sa (g)	Sd (m)	Sa (g)	Sd (m)	Sa (g)
LS1	0.030	1.191	0.035	1.123	0.033	1.140
LS2	0.064	1.579	0.080	1.487	0.072	1.508
LS3	0.136	1.260	0.218	1.189	0.152	1.200

Πίνακας 4: Τιμές των μέσων καμπυλών στα όρια βλάβης για τις τρείς φορτίσεις.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012

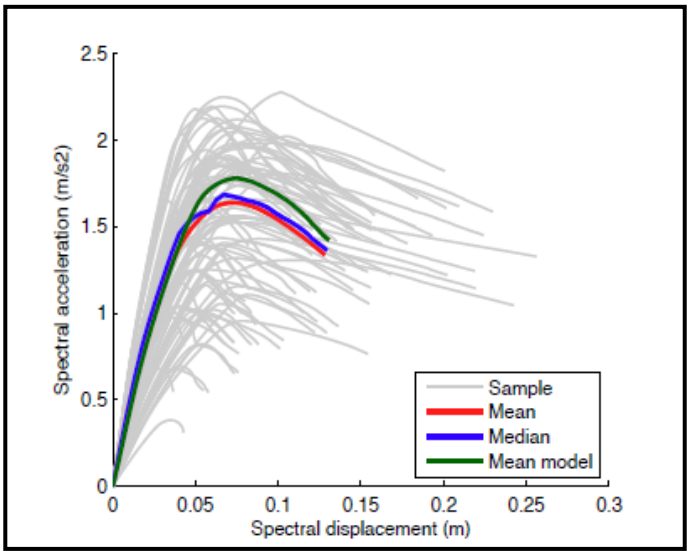
B) Προσαρμοστική Pushover

Για να αντιμετωπιστούν οι αδυναμίες της συμβατικής pushover διάφοροι ερευνητές (Bracci 1997 – Elashnai 2001 – Antoniou&Pinto 2004) έχουν αναπτύξει την προσαρμοστική (adaptive) και πλήρως προσαρμοστική (fully adaptive) pushover.

Σε αυτές τις μεθόδους, αντί για την εφαρμογή σταθερού σχήματος φόρτισης όπως στην συμβατική pushover, σε κάθε βήμα γίνεται επαναξιολόγηση των ιδιοτήτων του μοντέλου και ανακατανομή των φορτίων.

Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της ακαμψίας στα διάφορα στάδια καθώς και η επακόλουθη επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου.

Τα αποτελέσματα για τις καμπύλες και τις τιμές της μέσης καμπύλης στα όρια βλάβης φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα και πίνακα.



Σχήμα 22: Καμπύλες ικανότητας με προσαρμοστική pushover.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

	Adaptive capacity curve	
	Sd (m)	Sa (g)
LS1	0.033	1.140
LS2	0.072	1.508
LS3	0.152	1.200

Πίνακας 5: Τιμές της μέσης καμπύλης στα όρια βλάβης για την προσαρμοστική pushover.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

Φαίνεται και εδώ ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά τιμών στις καμπύλες, αλλά εδώ η μέση καμπύλη και η καμπύλη του κτιρίου με χαρακτηριστικά τις μέσες τιμές των παραμέτρων είναι πολύ κοντά.

Συγκρίνοντας τις μέσες καμπύλες της συμβατικής και της προσαρμοστικής pushover βλέπουμε ότι οδηγεί σε ελαφρώς μεγαλύτερη ικανότητα παραλαβής τέμνουσας βάσης και αρκετά μεγαλύτερη μετακίνηση οροφής.

Αξιοσημείωτο γεγονός επίσης είναι, συγκρίνοντας τους αντίστοιχους πίνακες, ότι οι τιμές που δίνει η μέση καμπύλη της προσαρμοστικής pushover και της μέσης καμπύλης της συμβατικής pushover με σχήμα φόρτισης βάσει των 3 πρώτων ιδιομορφών είναι ταυτόσημες.

5.2.3.1.4 Μέθοδοι υπολογισμού σημείου επιτελεστικότητας – μετακίνησης στόχου

Οι μέθοδοι αυτές που στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται σαν Nonlinear Static Procedures (**NSP**) τις έχουμε περιγράψει στα αρχικά κεφάλαια.

Εδώ χρησιμοποιούνται 3 από αυτές η **CSM** (Capacity Spectrum Method FEMA 273 και FEMA 440) , η **DCM** (Displacement Coefficient Method ATC-40 και FEMA 440) και η **N2** (Fajfar 1999).

Οι μέθοδοι αυτές έχουν από μια διαδικασία (συνήθως επαναληπτική) που εφαρμόζεται στην καμπύλη ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου (SDOF) σε μορφή ADRS του κτιρίου για να εκτιμήσουν το σημείο επιτελεστικότητας ή αλλιώς την μετακίνηση στόχο που αποτελεί την απόκριση του κτιρίου σε δεδομένο σεισμικό γεγονός (απαίτηση).

Η μετακίνηση στόχος χρησιμοποιείται ώστε να εκτιμηθεί το επίπεδο βλάβης του κτιρίου αφού συγκριθεί με τα προκαθορισμένα επίπεδα βλάβης.

Η κατανομή της ποσότητας (%) των κτιρίων σε κάθε επίπεδο βλάβης για τις διάφορες σεισμικές εντάσεις (Sa,PGA) χρησιμοποιείται ώστε να εξαχθούν οι καμπύλες θραυστότητας για κάθε επίπεδο βλάβης που περιγράφεται με λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή λ και λογαριθμική τυπική απόκλιση ζ.

Συνοπτικά η όλη διαδικασία έχει ως εξής

1. Τυχαία δημιουργία ενός πληθυσμού επιπέδων πλαισίων με μέθοδο Monte-Carlo.

2. Υπολογισμός καμπύλης Pushover για κάθε ‘τυχαίο’ πλαίσιο και μετατροπή της σε καμπύλη ικανότητας του ισοδυνάμου μονοβαθμίου σε μορφή ADRS.

3. Εκτίμηση της μετακίνησης στόχου με μια από τις μεθόδους **NSP** που αναφέραμε.

4. Αναγνώριση του επιπέδου βλάβης μέσω σύγκρισης της μετακίνησης στόχου με τα όρια βλάβης.

5. Αναπαράσταση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (%) των κτιρίων για κάθε επίπεδο βλάβης σε σχέση με μια αντιπροσωπευτική τιμή του κάθε επιταχυνσιογραφήματος (πχ Sa(T) , PGA).

6. Χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης για υπολογισμό των τιμών λ, ζ για τις καμπύλες θραυστότητας που υποθέτουμε ότι ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή.

Με αυτό τον τρόπο για κάθε μία μέθοδο NSP και για όλες τις pushover αναλύσεις προέκυψαν οι τιμές των στατιστικών μεγεθών που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

1. Αποτελέσματα από CSM (Capacity Spectrum Method)

	Uniform		Triangular		Modal		DAP	
	λ	ζ	λ	ζ	λ	ζ	λ	ζ
LS1	-2.071	0.225	-2.121	0.261	-2.169	0.259	-2.070	0.317
LS2	-1.439	0.323	-1.364	0.254	-1.438	0.285	-1.327	0.291
LS3	-1.084	0.575	-1.043	0.508	-1.043	0.552	-0.975	0.408

2. Αποτελέσματα από DCM (Displacement Coefficient Method)

	Uniform		Triangular		Modal		DAP	
	λ	ζ	λ	ζ	λ	ζ	λ	ζ
LS1	-2.133	0.269	-2.055	0.194	-2.126	0.296	-2.080	0.292
LS2	-1.424	0.376	-1.384	0.383	-1.394	0.376	-1.471	0.362
LS3	-0.932	0.607	-0.856	0.673	-0.882	0.660	-0.823	0.526

3. Αποτελέσματα από μέθοδο N2

	Uniform		Triangular		Modal		DAP	
	λ	ζ	λ	ζ	λ	ζ	λ	ζ
LS1	-2.133	0.313	-2.047	0.193	-2.061	0.235	-2.112	0.292
LS2	-1.477	0.359	-1.432	0.354	-1.414	0.353	-1.440	0.346
LS3	-0.941	0.627	-0.864	0.676	-0.878	0.661	-0.813	0.536

5.2.3.1.5 Αναλύσεις με Ανελαστική δυναμική ανάλυση

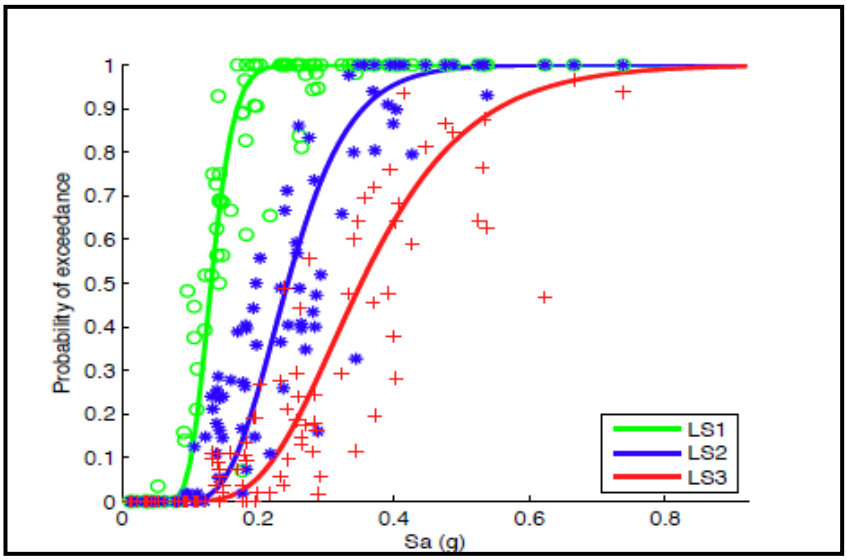
Η ανελαστική δυναμική ανάλυση θεωρείται σαν η πιο ακριβής και αξιόπιστη μέθοδος για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών.

Είναι όμως απαιτητική στο τμήμα που αφορά την περιγραφή του μοντέλου του κτιρίου, της περιγραφής των μαζών στον φορέα, στην μοντελοποίηση της απόσβεσης, στον καθορισμό του αλγορίθμου για την ολοκλήρωση στον χρόνο, και στο τρόπο εισαγωγής της σεισμικής κίνησης. Η πολυπλοκότητα αυτή μεταφράζεται σε περισσότερο υπολογιστικό κόπο και χρόνο.

Στην εργασία που περιγράφουμε οι συγγραφείς ανέλυσαν μερικά μόνο '**τυχαία**' πλαίσια για μια ομάδα καταγεγραμμένων επιταχυνσιογραφημάτων.

Για κάθε επιταχυνσιογράφημα υπολογίστηκε το ποσοστό κτιρίων που αντιστοιχεί σε κάθε καθορισμένο επίπεδο βλάβης και οι καμπύλες θραυστότητας που προέκυψαν με ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Οι τιμές της μέσης τιμής και της διασποράς της λογαριθμικής κατανομής που προσέγγισε τις καμπύλες φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 23: Καμπύλες θραυστότητας από την ανελαστική δυναμική ανάλυση. V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012).

Οι τιμές της μέσης τιμής και της διασποράς της λογαριθμικής κατανομής που προσέγγισε τις καμπύλες για τα τρία όρια βλάβης φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.

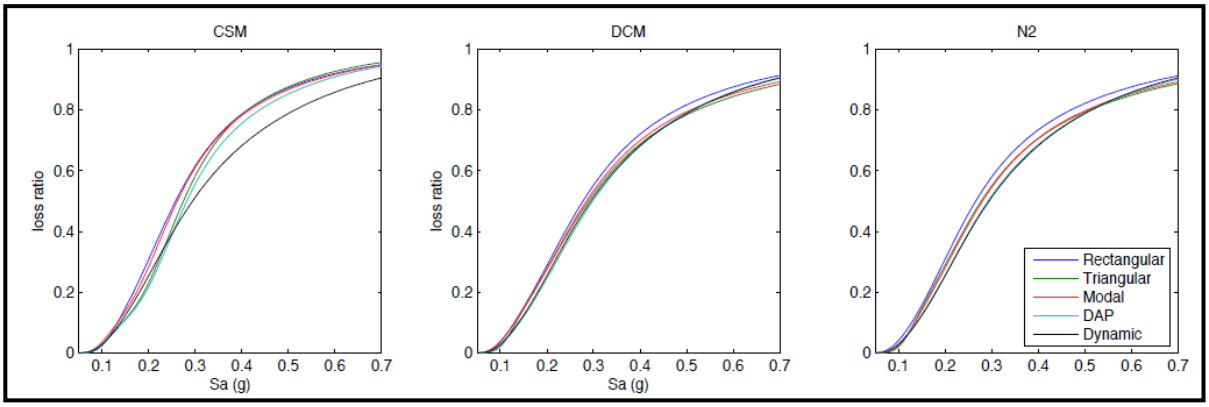
	λ	ζ
LS1	-2.098	0.298
LS2	-1.448	0.354
LS3	-0.809	0.514

Πίνακας 6: τιμές μεγεθών από ανάλυση παλινδρόμησης των αποτελεσμάτων της ανελαστικής δυναμικής. V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012)

5.2.3.1.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις καμπύλες ικανότητας φαίνεται ότι γενικά η συμβατική pushover υποτιμά την ικανότητα σε σχέση με την προσαρμοστική pushover.

Όσον αφορά την επίδραση τους στη τελική εκτίμηση απωλειών οι καμπύλες θραυστότητας από κάθε μέθοδο συνδυάστηκαν με συναρτήσεις συνεπειών (consequence functions – αναλογία κόστους επισκευής προς κόστος αντικατάστασης σε κάθε επίπεδο βλάβης) για να προκύψουν οι καμπύλες τρωτότητας (vulnerability functions – αναλογία απώλειας προς την φασματική επιτάχυνση) που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 24: Καμπύλες τρωτότητας για όλες τις μεθόδους.
V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa [9] (2012).

Φαίνεται ότι ανεξάρτητα από την μέθοδο υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας η προσαρμοστική pushover οδηγεί σε μικρότερες απώλειες.

Για την συμβατική pushover ο συνδυασμός με την CSM δίνει συγκριτικά τις μεγαλύτερες απώλειες , ενώ οι συνδυασμοί με DCM και N2 δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.

Η πιο συντηρητική τρωτότητα βγαίνει από τον συνδυασμό N2 + προσαρμοστική pushover ενώ τις μεγαλύτερες απώλειες τις δίνει ο συνδυασμός CSM + συμβατική pushover με ομοιόμορφη φόρτιση.

Τα αποτελέσματα που πλησιάζουν περισσότερο αυτά της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης προκύπτουν από τον συνδυασμό N2 + προσαρμοστική pushover.

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα του συνδυασμού N2 ή DCM με προσαρμοστική pushover ή pushover με φόρτιση ιδιομορφική παρέχουν αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα με πολύ λιγότερη υπολογιστική προσπάθεια.

5.2.4. Μέθοδος Rossetto-Elnashai δημιουργίας Καμπυλών Τρωτότητας

Το 2003 **Rossetto-Elnashai [17]** παρουσίασαν μια εργασία για τον υπολογισμό Καμπυλών Τρωτότητας για Ευρωπαϊκού τύπου κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με βάση τα δεδομένα καταγραφών από τα αποτελέσματα πολλών σεισμών.

Η βάση δεδομένων περιελάμβανε 99 κατανομές ζημιών που παρατηρήθηκαν μετά από 19 σεισμούς και αφορούσαν 340000 κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος. Οι σεισμοί ήταν από διάφορες περιοχές της γης και αφορούσαν πολλές χώρες όπως Αλγερία , Χιλή, Ελλάδα, Ιταλία, Ιαπωνία, Μεξικό, Φιλιππίνες, Τουρκία, Η.Π.Α.

Τα αποτελέσματα φυσικά ήταν καταγεγραμμένα με διαφορετικές κλίμακες βλαβών και εντάσεων με αποτέλεσμα οι συγγραφείς να προτείνουν μια νέα κλίμακα την Ομογενοποιημένη Κλίμακα Βλαβών (Homogenized reinforced concrete damage scale - **HRC scale**) προκειμένου οι καταγραφές να ομογενοποιηθούν και να είναι διαχειρίσιμες.

Έτσι όρισαν 7 επίπεδα βλάβης που τα όρια τους ορίσθηκαν βάσει του δείκτη βλαβών (**DI_{HRC}**) της μεθόδου που βαθμονομείται πειραματικά από τη μέγιστη γωνία στροφής ορόφου (inter-storey drift ratio) **$ISD_{max\%}$**. Καθόρισαν δε την αντιστοιχία των διαφόρων μεθόδων σε σχέση με αυτήν όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

The equivalence between existing damage scales and HRC-Scale for general RC structures

DI_{HRC}	HRC	HAZUS 1999 [17]	VISION 2000 [18]	FEMA 273 [19]	EMS98 [20]	MSK [2]	AIJ [5]	ATC-13 [7]	ATC-21 [21]	EPPO [22]
0	None	No damage limit state								
10	Slight	Slight damage	Fully operational	Immediate occupancy	Grade 1	D1	Light	Slight	Green Tag	Green Tag
20	Light							Light		
30			Operational		Grade 2	D2	Minor			
40				Damage control				Moderate		
50	Moderate	Moderate damage			Grade 3	D3			Yellow Tag	Yellow Tag
60			Life safe	Life safe			Moderate			
70								Heavy		
80	Extensive	Extensive damage	Near collapse	Limited safety	Grade 4	D4				
90				Collapse prevention			Major	Major	Red Tag	Red Tag
100	Partial Collapse		Collapse				Partial collapse			
	Collapse	Collapse limit state								

Πινακας 6: Ισοδυναμία της κλίμακας HRC με τις υπάρχουσες άλλες κλίμακες.
[17] T. Rossetto, A. Elnashai 2003

Τα δεδομένα αφού ομογενοποιήθηκαν βάση της κλίμακας **HRC** κατόπιν επεξεργάστηκαν στατιστικά και ταιριάστηκαν με καμπύλες ώστε να προκύψουν οι καμπύλες τρωτότητας.

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδιναν καλύτερα σχετικά αποτελέσματα σε σχέση με παλαιότερες εμπειρικές σχέσεις εξακολουθούσαν όμως να υπάρχουν αποκλίσεις καθώς και αδυναμία πρόβλεψης τρωτότητας κτιρίων που δεν είχαν αρκετό δείγμα ή δεν είχαν καθόλου δείγμα στο σύνολο των δεδομένων, όπως κτίρια με νέους κανονισμούς, κτίρια με τοιχία κ.λπ.

Στο τέλος της εργασίας οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η δημιουργία καμπυλών τρωτότητας αποκλειστικά με εμπειρικές μεθόδους δεν είναι ικανή να παράξει αποτελέσματα με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και ότι στο μέλλον πρέπει να βελτιωθούν υποστηριζόμενα με αναλυτικές μεθόδους.

Έτσι οι ίδιοι συγγραφείς**[18]** το 2005 επανήλθαν προτείνοντας μια νέα αναλυτική μέθοδο υπολογισμού της Τρωτότητας κτιρίων οπλ. Σκυροδέματος βασισμένη στις μετακινήσεις.

Η μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση ενός αντιπροσωπευτικού κτιρίου για κάθε ομάδα κτιρίων του οποίου οι παράμετροι αντοχής τυχαίες μεταβλητές και το οποίο υπόκειται σε φόρτιση με ένα σύνολο σεισμικών κινήσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος περιλαμβάνει 4 βασικά βήματα:

ΒΗΜΑ 1^{ον} Καθορισμός του συστήματος

Εδώ γίνεται η επιλογή του κτιρίου με διάταξη και χαρακτηριστικά αντοχής αντιπροσωπευτικά της κατηγορίας, το οποίο διαστασιολογείται και οπλίζεται ανάλογα με τους κανονισμούς της κατηγορίας.

ΒΗΜΑ 2^{ον} Καθορισμός της σεισμικής φόρτισης

Επιλέγονται διαφορετικές ομάδες επιταχυνσιογραφημάτων ανάλογα το όριο βλάβης που εξετάζουμε.

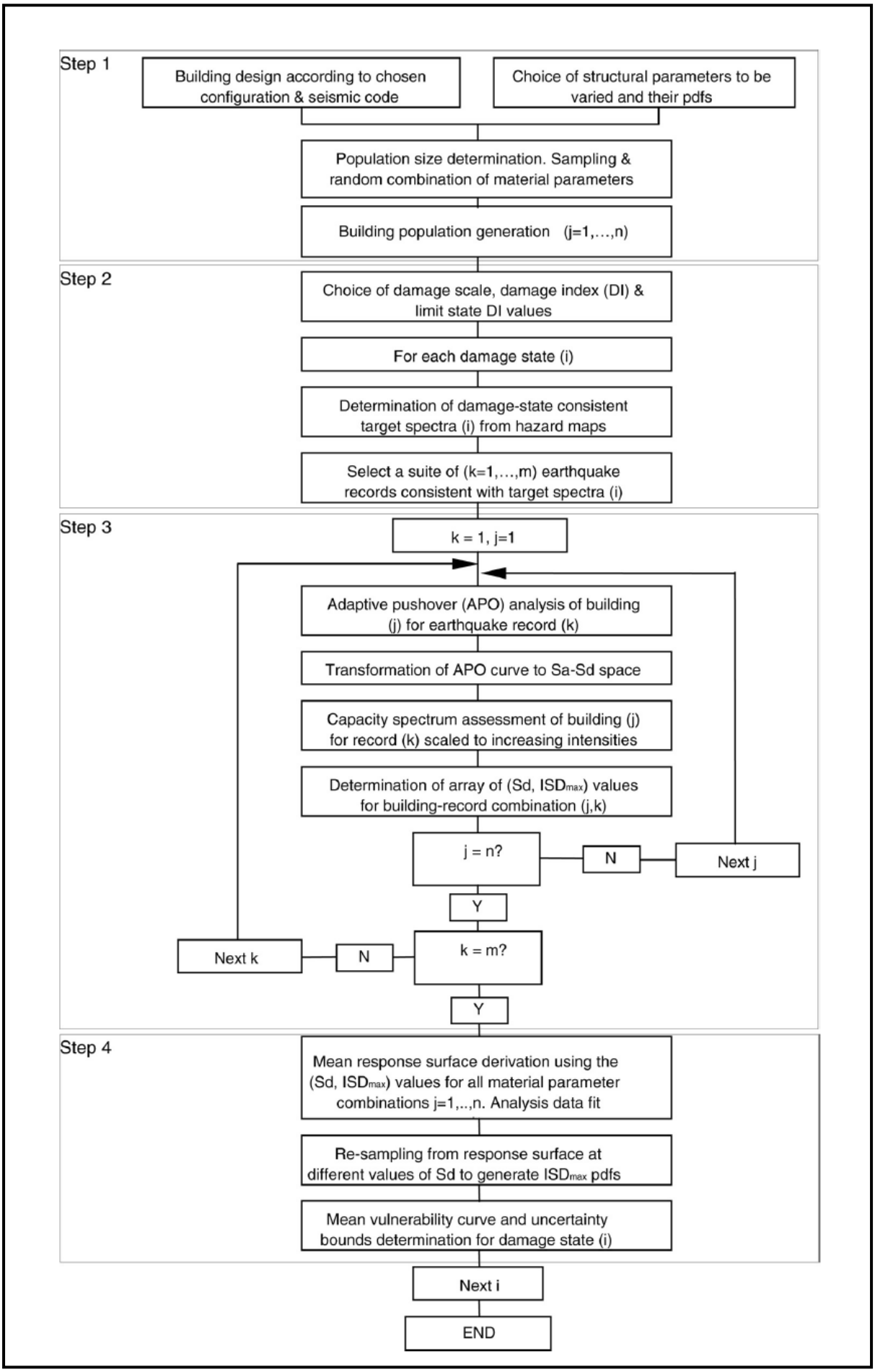
ΒΗΜΑ 3^{ον} Αξιολόγηση του μοντέλου

Για την εκτίμηση της ικανότητας χρησιμοποιείται η μέθοδος της adaptive pushover, ενώ η εύρεση του σημείου επιτελεστικότητας γίνεται με μια τροποποιημένη μέθοδο σύγκρισης φασμάτων ικανότητας και απαίτησης.

ΒΗΜΑ 4^{ον} Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Εδώ καθορίζονται οι επιφάνειες της απόκρισης για κάθε σεισμικό σενάριο που συσχετίζουν την απόκριση του κτιρίου με όρους σχετικής μετακίνησης ορόφων με τις ιδιότητες του κτιρίου και με τις τιμές του σεισμικού γεγονότος. Τέλος χρησιμοποιείται μια στατιστική μέθοδος αναδειγματοληψίας ώστε από τις επιφάνειες απόκρισης να παραχθούν οι καμπύλες τρωτότητας.

Το λογικό διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 25: Λογικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθόδου. [18] T. Rossetto, A. Elnashai 2005

Στη συνέχεια για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου οι συγγραφείς επιλέγουν να αναλύσουν την μέθοδο μέσα από ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα.

ΒΗΜΑ 1ον Καθορισμός του συστήματος

Επιλέχθηκε ένα 3ώροφο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος με τοίχους πλήρωσης ως αντιπροσωπευτικό της κατηγορίας χαμηλών κτιρίων οπλ. σκυροδέματος με τοίχους πλήρωσης.

Το κτίριο διαστασιολογήθηκε και οπλίσθηκε με βάση τους Ιταλικούς κανονισμούς του 1982 με σκοπό να αποτελεί των ευρωπαϊκών κτιρίων με αντίστοιχο κανονισμό.

Το πλαίσιο έχει 4 πλαίσια με σταθερό ύψος ορόφων, ανοίγματα 3.00 μ και 4.50μ αντίστοιχα, είναι συμμετρικό σε κάτοψη και ανήκει σε μέση σεισμική ζώνη (ζώνη 2, S=9) που αντιστοιχεί σε pga=0.07g (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη) και μας δίνει τέμνουσα βάσης 8,4% του βάρους του κτιρίου. Οι αντοχές είναι για το σκυρόδεμα fck=30 Mpa και για τον χάλυβα fyk=380 Mpa, ενώ από την διαστασιολόγηση δεν προέκυψε αξιόλογη περίσφιγξη.

Το κτίριο μοντελοποιήθηκε με το λογισμικό INDYAS έχει δυνατότητες ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Οι οπλισμοί στις διατομές τοποθετήθηκαν στο μοντέλο μία-μία και ελήφθη υπόψη η μη γραμμικότητα των υλικών.

Για την περιγραφή της περίσφιγξης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του **Mander** και η συμπεριφορά του χάλυβα θεωρήθηκε διγραμμική ελαστοπλαστική.

Οι τοίχοι πλήρωσης μοντελοποιήθηκαν σαν διαγώνιοι ράβδοι που λειτουργούν μόνο σε θλίψη.

Για το μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων των διαγωνίων ράβδων ακολουθήθηκε η πρόταση των **Panagiotakos-Fardis** τροποποιημένο βάσει της πρότασης του **Mosalam** για να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ανοιγμάτων.

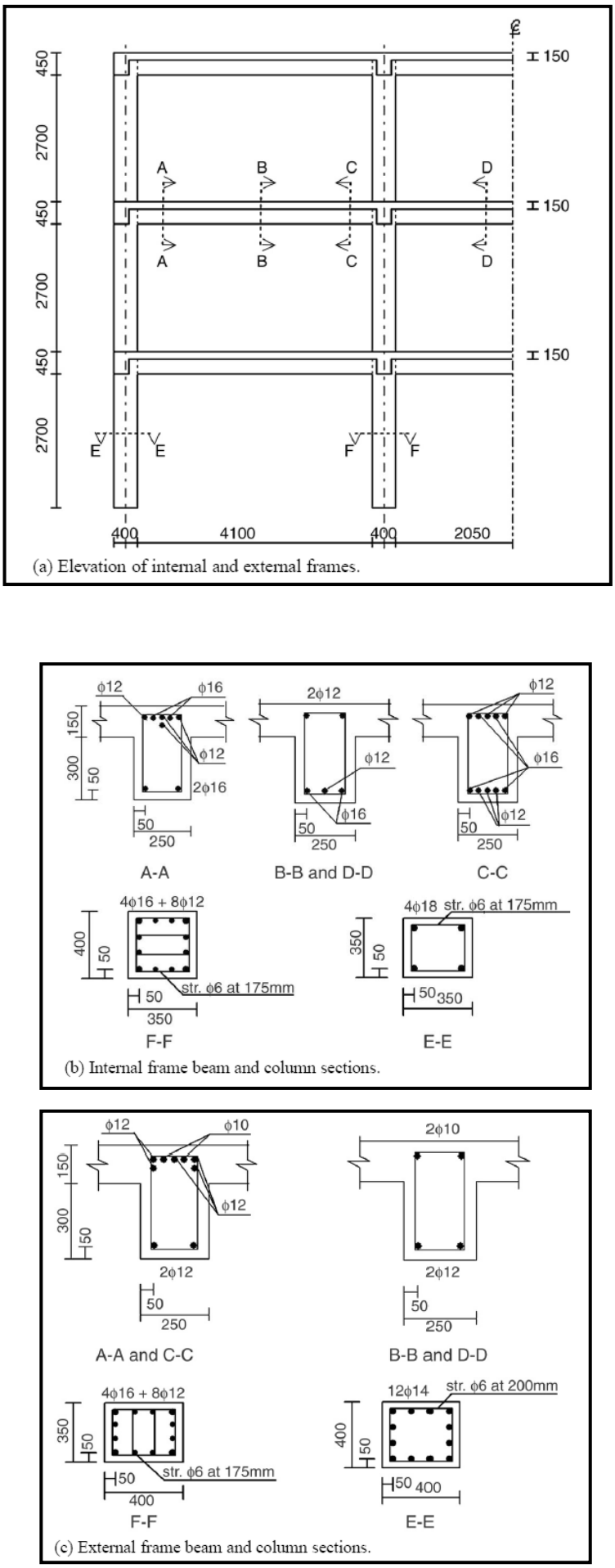
Στο παρακάτω σχήμα 26 φαίνονται οι διατομές και οι οπλισμοί του αντιπροσωπευτικού κτιρίου.

Στην συνέχεια θεωρούνται σαν **τυχαίες μεταβλητές** η αντοχή του σκυροδέματος $\mathbf{f_c}$, η τάση διαρροής του χάλυβα $\mathbf{f_y}$ και η αντοχή θλίψης του τοίχου πλήρωσης $\mathbf{f_{cw}}$.

Έπειτα επιλέγονται 25 συνδυασμοί αυτών τυχαίων μεταβλητών, με τον αλγόριθμο **latin hypercube** της μεθόδου **Monte-Carlo**. Ο αριθμός 25 υπολογίσθηκε ώστε αργότερα να μπορεί να υπάρξει σύγκλιση στις καμπύλες τρωτότητας.

Για κάθε συνδυασμό από τις τυχαίες μεταβλητές έγινε ανάλυση του κτιρίου με την μέθοδο **adaptive pushover**.

Από τις 25 επιλύσεις του πλαισίου με τις **τυχαίες μεταβλητές,** προέκυψε συντελεστής διακύμανσης (cov) 14% της αρχικής ακαμψίας, 37% της μετακίνησης στην διαρροή, 10% ελαστικής περιόδου και 22% της απόκρισης της μετακίνησης Sd σαν αποτέλεσμα στην διακύμανση των αντοχών του υλικού. Για το $\mathbf{ISD_{max\%}}$ ο συντελεστής cov προέκυψε 22%.



Σχήμα 26: Διατομές και οπλισμός του αντιπροσωπευτικού κτιρίου. [18] T. Rossetto, A. Elnashai 2005

ΒΗΜΑ 2ον Καθορισμός της σεισμικής φόρτισης

Στα πλαίσια του αναλυτικού υπολογισμού της καμπύλης ικανότητας ο δεδομένος σεισμός αντιπροσωπεύεται από μια καθορισμένη τιμή ενός μεγέθους (πχ pga). Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των σεισμών που μας δίνουν αυτή την τιμή pga ποικίλουν και επηρεάζουν διαφορετικά το τελικό αποτέλεσμα.

Τα επιταχυνσιογραφήματα λοιπόν που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να ποικίλουν ως προς το συχνοτικό περιεχόμενο, διάρκεια , αριθμό κύκλων, πλάτος παλμού κλπ.

Οι συγγραφείς λοιπόν επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν 3 σεισμικά σενάρια ανάλογα της περιόδου επαναφοράς του σεισμού για περιόδους 95,475 και 2475 έτη.

Σε κάθε ένα από αυτά αντιστοίχισαν ένα φάσμα στόχο που καθορίζεται από μέσες τιμές pga, μεγέθους σεισμού M_s και απόσταση από το ρήγμα r.

Οι τιμές που καθόρισαν για τα 3 φάσματα στόχους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 7 για 3 κατηγορίες εδάφους

Characteristics of the earthquake events defining the "Target" spectra

Soil category	Rock			Firm			Soft		
Return period (years)	95	475	2475	95	475	2475	95	475	2475
Target *pga* (g cm/s^2)	6.70	12.20	21.70	6.10	11.90	20.70	6.10	11.80	22.30
Lower bound *pga* (g cm/s^2)	4.10	7.60	13.80	3.50	7.30	12.80	3.50	7.20	14.40
Upper bound *pga* (g cm/s^2)	9.30	18.50	34.90	8.70	18.20	33.90	8.70	18.10	35.50
Surface magnitude (M_s)	5.75	6.05	6.25	5.55	5.85	6.15	4.95	5.35	5.45
Fault distance (r, km)	22	14	8	30	18	12	16	10	4

Πινακας 7: Χαρακτηριστικά των 3 φασμάτων στόχων. [18] T. Rossetto, A. Elnashai 2005

Για κάθε φάσμα στόχο επέλεξαν από την Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων των σεισμών 10 επιταχυνσιογραφήματα που το φάσμα που έδιναν πλησίαζε σε τιμές το φάσμα στόχο όπως έχει οριστεί. Έτσι στο τέλος επελέγησαν 30 επιταχυνσιογραφήματα.

Ο συντελεστής διακύμανσης cov που προέκυψε για τον **$ISD_{max\%}$** κατ' αυτό τον τρόπο ήταν 37,2% . Η επίδραση δηλαδή της αβεβαιότητας των χαρακτηριστικών του σεισμού προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη από την επίδραση της αβεβαιότητας της αντοχής των υλικών που είδαμε πριν.

ΒΗΜΑ 3ον Εκτίμηση σημείου επιτελεστικότητας

Για την εκτίμηση της καμπύλης ικανότητας οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν την μέθοδο adaptive pushover (DAP), που έχει προταθεί από τον Stelios Antoniou (2005), διότι αφενός απαιτεί σημαντικά λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από την ανελαστική δυναμική ανάλυση με χρονοιστορίες, αφετέρου θεωρείται ακριβέστερη από την συμβατική pushover.

Η συμβατική pushover δεν λαμβάνει υπόψη την ανακατανομή δυνάμεων λόγω σταδιακής μείωσης ακαμψίας , αλλά και το σχήμα παραμόρφωσης δεν είναι σωστό όταν στο κτίριο δεν επικρατεί η θεμελιώδης ιδιομορφή.

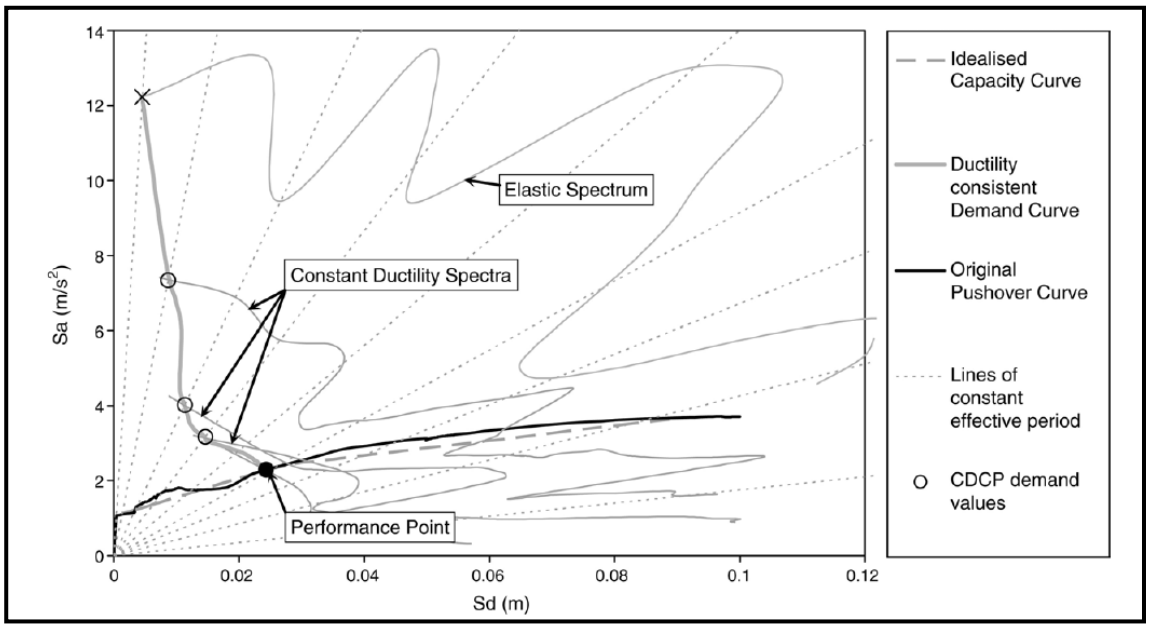
Η adaptive pushover (DAP) που χρησιμοποιείται εδώ σε κάθε νέο βήμα φόρτισης επαναϋπολογίζει την πλευρική κατανομή φορτίων λαμβάνοντας υπόψη την στιγμιαία ακαμψία του φορέα και τις ιδιομορφικές του ιδιότητες.

Η μέθοδος DAP περιέχεται στο λογισμικό **INDYAS** που χρησιμοποιήθηκε και από την χρήση της προέκυψαν 750 καμπύλες ικανότητες (25 κτίρια με χαρακτηριστικά τυχαίες μεταβλητές επί 30 σεισμικά γεγονότα).

Η συνήθης μέθοδος υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας CSM δεν χρησιμοποιήθηκε εδώ καθότι βασίζεται στην υπόθεση ότι το κτίριο αποκρίνεται βάση της θεμελιώδους ιδιομορφής αλλά και διότι λόγω της επαναληπτικής διαδικασίας επιβραδύνει τους υπολογισμούς.

Αντί για αυτή πρότειναν μια νέα μέθοδο που βασίζεται και αυτή στα φάσματα που την ονόμασαν μέθοδο με capacity demand checking points (CDCP) , η οποία υπολογίζει απ' ευθείας το σημείο επιτελεστικότητας χωρίς επαναληπτικές διαδικασίες (ανάλογη της μεθόδου N2).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σαν παράδειγμα η αναπαράσταση της μεθόδου με capacity demand checking points (CDCP).



Σχήμα 27: Αναπαράσταση της μεθόδου με capacity demand checking points (CDCP).
[18] T. Rossetto, A. Elnashai 2005

ΒΗΜΑ 4ον Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων

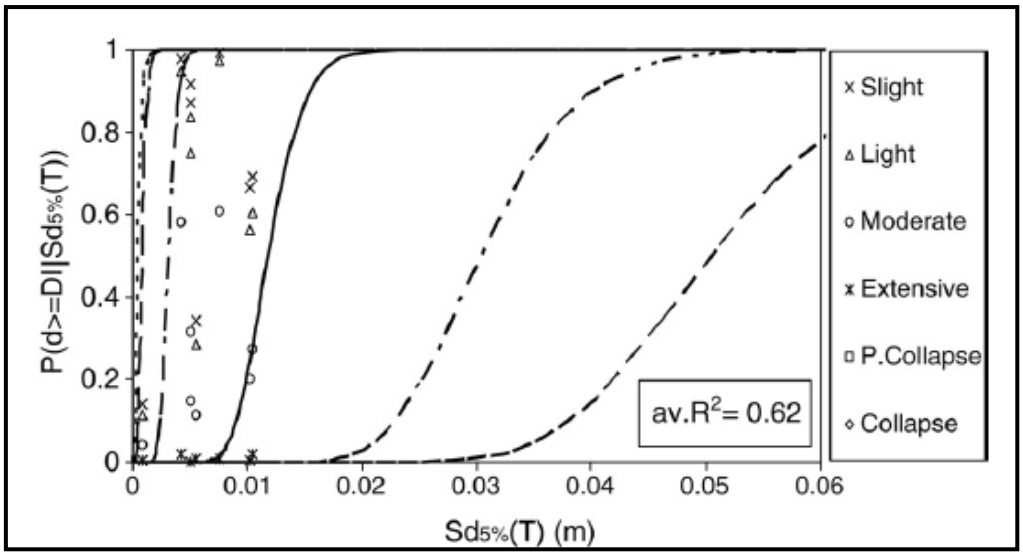
Για κάθε πλαίσιο που επιλύεται με συγκεκριμένες τιμές χαρακτηριστικών (f_c, f_{cw}, f_y, f_{yb}) προκύπτει μια μέγιστη τιμή της σχετική κίνησης ορόφου $\mathbf{ISD_{max}}$.

Τα αποτελέσματα από όλες τις επιλύσεις χρησιμοποιούνται για την παρασκευή επιφανειών απόκρισης δευτέρας τάξεως με βάση την παρακάτω εξίσωση

$$\frac{\mathrm{ISD}_{\max}}{S_{d5\%}(T)} = a_1 f_c^2 + a_2 f_{cw}^2 + a_3 f_{yc}^2 + a_4 f_{yb}^2 + a_5 f_c + a_6 f_{cw} + a_7 f_{yc} + a_8 f_{yb} + a_9 f_c f_{cw} + a_{10} f_c f_{yc} + a_{11} f_c f_{yb} + a_{12} f_{cw} f_{yc} + a_{13} f_{cw} f_{yb} + a_{14} f_{yc} f_{yb} + C.$$

Παράγεται μία τέτοια καμπύλη για κάθε σενάριο επιπέδου βλάβης.

Στο τέλος με κατάλληλη στατιστική επεξεργασία παράγονται οι καμπύλες τρωτότητας όπως αυτή που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 28: Παράδειγμα καμπυλών τρωτότητας που προκύπτουν από την μέθοδο.
[18] T. Rossetto, A. Elnashai 2005

5.2.5. Μηχανική μέθοδος Giovinazzi - Lagomarsino υπολογισμού της Τρωτότητας

Τελευταία αφήσαμε μια απλουστευμένη μέθοδο υπολογισμού της τρωτότητας των **Giovinazzi-Lagomarsino** που έχει διπλή χρησιμότητα.

Πέραν της απλότητας και της δυνατότητας για γρήγορη και αξιόπιστη εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης, παρέχει και την δυνατότητα εύκολης και γρήγορης παραγωγής απλουστευμένων καμπυλών ικανότητας και καμπυλών τρωτότητας των Ευρωπαϊκών κτιρίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με λογισμικά σεισμικής διακινδύνευσης (όπως HAZUS, SELENA κλπ).

Η αξιοπιστία των λογισμικών αυτών, που έχουν μεγάλες δυνατότητες και ποικιλία μεθόδων υπολογισμού της σεισμικής διακινδύνευσης, εξαρτάται και από τις καμπύλες ικανότητας και καμπύλες τρωτότητας που τους εισάγουμε για τις διάφορες κατηγορίες κτιρίων.

Η έλλειψη τέτοιων καμπυλών για τα Ευρωπαϊκά κτίρια έκανε αναγκαία την χρήση των καμπυλών του HAZUS, που έχουν προκύψει για τα Αμερικανικά κτίρια με άλλους κανονισμούς και κατασκευαστικές συνήθειες, και έθετε σε αμφιβολία την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Με την χρήση αυτών των απλουστευμένων καμπυλών στα ανωτέρω λογισμικά αναιρείται εν μέρει η πηγή της αμφιβολίας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια του προγράμματος **UE-RISK 1999** με σκοπό την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης των Ευρωπαϊκών περιοχών οι **Giovinazzi-Lagomarsino [19],[20]** ανέπτυξαν δύο μεθόδους εκτίμησης της τρωτότητας, την μακροσεισμική και την μηχανική μέθοδο.

Ανέπτυξαν δε σχέσεις που συνδέουν τις δύο μεθόδους ώστε να είναι δυνατή η διασταύρωση των αποτελεσμάτων τους και η περαιτέρω βελτίωση τους.

Στην παρούσα εργασία θα περιγράψουμε σαν πιο ενδιαφέρουσα για τους λόγους που προαναφέραμε, τη μηχανική μέθοδο.

5.2.5.1. Ανάλυση της μηχανικής μεθόδου

Η μηχανική μέθοδος **[21],[23],[24]** έχει υιοθετήσει μια μεθοδολογία βασισμένη στα φάσματα παρόμοια με του HAZUS προκειμένου να υπολογίσει το σημείο επιτελεστικότητας που το ορίζει σαν την τομή της ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου με την απαίτηση.

Καταρχάς ορίζει τις κατηγορίες των κτιρίων βάσει της κατάταξης που έχει υιοθετήσει η **EMS-98** και φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Typologies		Building types
Unreinforced Masonry	M1	Rubble stone
	M2	Adobe (earth bricks)
	M3	Simple stone
	M4	Massive stone
	M5	U Masonry (old bricks)
	M6	U Masonry – r.c. floors
Reinforced/confined masonry	M7	Reinforced/confined masonry
Reinforced Concrete	RC1	Concrete Moment Frame
	RC2	Concrete Shear Walls
	RC3	Dual System

		Floor Number	
		Masonry	**Reinforce Concrete**
_L	Low-Rise	1÷2	1÷3
_M	Mid-Rise	3÷5	4÷7
_H	High-Rise	≥7	≥8

Πίνακας 8: Κατάταξη Ευρωπαϊκών κτιρίων κατά την EMS-98. [21] Sonia Giovinazzi and Sergio Lagomarsino 2006.

Οι παραπάνω κατηγορίες χωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα του ύψους(**L-R, M-R, H-R**) , τις σεισμικές ζώνες (**I, II, III**) και της κατηγορίας τρωτότητας (**WDC, LDC, MDC, HDC).**

Η καμπύλη ικανότητας ενός κτιρίου κανονικά προκύπτει από μία αναλυτική μέθοδο όπως η ανάλυση pushover.

Για την εκτίμηση όμως της τρωτότητας μιας ολόκληρης περιοχής οι συγγραφείς θεωρούν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοποιημένες διγραμμικές καμπύλες [21],[23],[24].

Η ικανότητα κάθε κατηγορίας κτιρίων αντιπροσωπεύεται από την ικανότητα ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου (**SDOF**) που θεωρείται ότι έχει διγραμμική μορφή ελαστική-τελείως πλαστική, και εξαρτάται από 3 παραμέτρους την επιτάχυνση διαρροής α_y , την θεμελιώδη ελαστική ιδιοπερίοδο **T,** και την πλαστιμότητα **μ** του κτιρίου. Η α_y εκτιμάται ή σε σχέση με τους κανονισμούς όταν υπάρχουν ή υποθέτωντας μηχανισμό αστοχίας όταν το κτίριο δεν σχεδιάστηκε με κανονισμούς. Οι d_y και d_u, που

υπολείπονται για να οριστεί η διγραμμική καμπύλη (σχήμα 1) , καθορίζονται σαν συναρτήσεις των παραπάνω.

Για την παρασκευή αυτών των απλοποιημένων καμπυλών πρότειναν δύο προσεγγίσεις.

Για τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί με αντισεισμικούς κανονισμούς, και είναι εξασφαλισμένο ότι έχουν εφαρμοσθεί πιστά, η εκτίμηση των παραμέτρων (**α_y, d_y, d_u**) της διγραμμικής καμπύλης γίνεται με βάσει τους ισχύοντες κανονισμούς και τα στάνταρ για τις αντοχές των υλικών [23],[24].

Για κτίρια που δεν υπάγονται σε κάποιο κανονισμό (όπως παλαιά κτίρια από οπλ. Σκυρόδεμα και η πλειοψηφία των κτιρίων από τοιχοποιία) η διγραμμική καμπύλη μπορεί να γίνει με χρήση των χαρακτηριστικών αυτών των κτιρίων (γεωμετρία, αντοχές) και υποθέτοντας ένα συγκεκριμένο μηχανισμό κατάρρευσης [23],[24] (παρόμοιος τρόπος υπολογισμού της τέμνουσας βάσης αστοχίας με διάφορους μηχανισμούς όπως η μέθοδος SP-BELA).

Έτσι εφόσον η **α_y** προκύπτει από την τέμνουσα βάσης **F_y** που αντιστοιχεί στην κατάρρευση βάση του συγκεκριμένου μηχανισμού, και εκτιμώντας την θεμελιώδη ελαστική ιδιοπερίοδο **T** και την πλαστιμότητα **μ** του κτιρίου οι **d_y, d_u** προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$d_y = \left[\frac{T}{2\pi}\right]^2 * \alpha_y$$

$$d_u = \mu * d_y$$

κατ αυτόν τον τρόπο από τα 3 χαρακτηριστικά μεγέθη (**α_y, d_y, d_u**) καθορίζεται η απλοποιημένη διγραμμική καμπύλη ικανότητας του μονοβαθμίου (σχήμα 1).

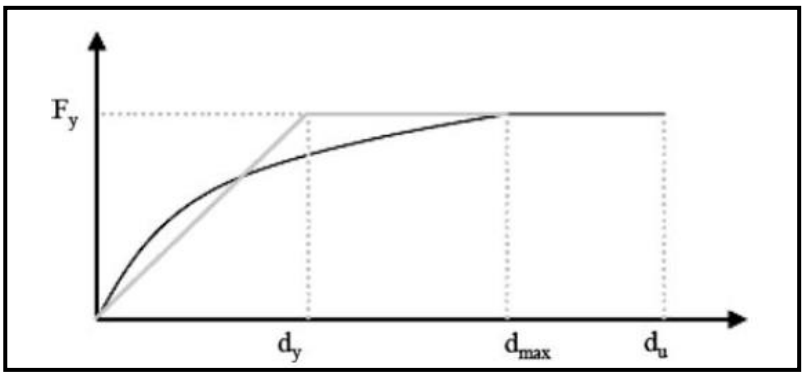
Για να καλύψουν και τους 2 τρόπους αντιμετώπισης της καμπύλης ικανότητας, παρουσίασαν τον υπολογισμό τρωτότητας για κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με αντισεισμικό κανονισμό καθώς και για κτίρια από τοιχοποιία χωρίς κανονισμό, που είναι και οι συνηθέστερες περιπτώσεις κτιρίων στην Ευρώπη και που περιγράφονται διεξοδικότερα παρακάτω .

5.2.5.1.1 Καθορισμός καμπύλης ικανότητας

1) Για τις κατηγορίες κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με αντισεισμικό κανονισμό.

Η ιδιοπερίοδος του κτιρίου εκτιμάται συναρτήσει του ύψους από την σχέση **$T=\alpha H^{\beta}$.**

Οι τιμές των **α, β** δίνονται σαν α=0,065 και β=0,90 για κατασκευές πριν την εφαρμογή του **EC8** και σαν α=0,075 και β=0,75 για κατασκευές με εφαρμογή του **EC8 [22].**



Σχήμα 29: Ιδεατή διγραμμική καμπύλη ικανότητας μονοβαθμίου. [21] Sonia Giovinazzi and Sergio Lagomarsino 2006

Η επιτάχυνση στην διαρροή α_y (που αντιστοιχεί στην $F_y = M*\alpha_y$ της διγραμμικής καμπύλης) βασίζεται στον ορισμό του **EC8** για την επιτάχυνση της τέμνουσας βάσης και δίνεται από

$$\alpha_y = \left[\frac{Sae(T)}{q}\right]*\frac{\gamma m}{a}$$

όπου $S_{ae}(T)$ είναι η τιμή της επιτάχυνσης από το φάσμα του σχεδιασμού για περίοδο **T**, **q** είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς, ο **α** συνδέει την χαρακτηριστική τιμή αντοχής με την μέση τιμή αντοχής και ο γ_m συνδέει την μέση τιμή της αντοχής με την αντοχή σχεδιασμού(η **S. Giovinazzi [23] 2006** εξηγεί ότι σύμφωνα με τον Ιταλικό κανονισμό σκυροδέματος DM96 γ_m=1.60 για σκυρόδεμα και γ_m=1.15 για χάλυβα ενώ ο **α**=0,70).

Οι τιμές των q που υπολογίσθηκαν βάσει του EC8 για τις διάφορες κατηγορίες (RC1,RC2,RC3) , για μέση και υψηλή πλαστιμότητα (DCM,DCH) και κανονικά ή μη κανονικά κτίρια, χωρίς να ληφθεί υπόψη η υπεραντοχή, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

	Regular Structures		Irregular Structures	
	DCH	DCM	DCH	DCM
RC1	4.5	3.15	3.6	2.52
RC2	4	2.8	3.2	2.24
RC3	4	2.8	3.2	2.24

Πίνακας 9: Αντιπροσωπευτικές τιμές q βάσει EC8 χωρίς χρήση υπεραντοχής. [23] Sonia Giovinazzi 2006

Η πλαστιμότητα **μ** προκύπτει από την σχέση του **Fajfar** (2000) που συνδέει τον συντελεστή συμπεριφοράς **q** με την πλαστιμότητα **μ** με την παρακάτω σχέση :

$$\mu = \begin{cases} q, & T > T_C, \\ 1 + (q-1)\frac{T_C}{T}, & T \leq T_C. \end{cases}$$

Έτσι η α_y εξαρτάται από την T που εκτιμάται σαν συνάρτηση του ύψους, τον συντελεστή συμπεριφοράς q, και την σεισμική ζώνη όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

DCH					
Building regular in elevation					
	T	μ	$a_{yZone\ III}$	$a_{yZoneII}$	a_{yZoneI}
RC1	0.64	4.5	0.119	0.198	0.278
RC2	0.64	3.4	0.097	0.145	0.242
RC3	0.64	3.7	0.106	0.158	0.264
Building non regular in elevation					
	T	μ	$a_{yZone\ III}$	$a_{yZone\ II}$	$a_{yZone\ I}$
RC1	0.64	3.6	0.149	0.248	0.347
RC2	0.64	2.7	0.121	0.181	0.301
RC3	0.64	3.0	0.133	0.199	0.332

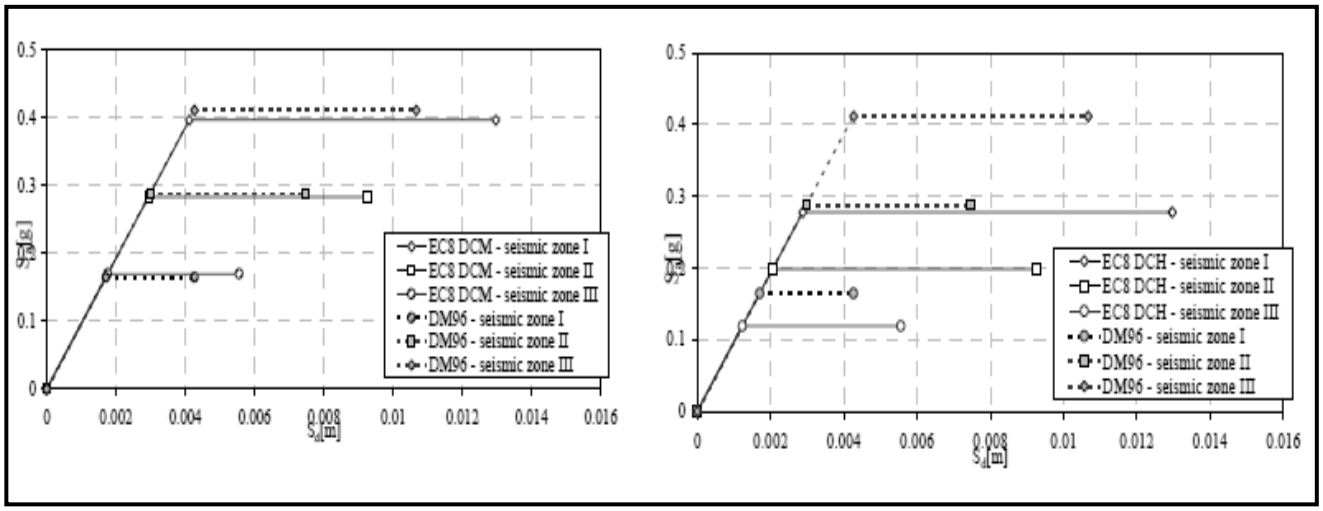
DCM					
Building regular in elevation					
	T	μ	$a_{y\ Zone\ III}$	$a_{y\ Zone\ II}$	$a_{y\ Zone\ I}$
RC1	0.64	3.2	0.170	0.283	0.397
RC2	0.64	2.4	0.137	0.205	0.341
RC3	0.64	2.6	0.150	0.225	0.374
Building non regular in elevation					
	T	μ	$a_{y\ Zone\ III}$	$a_{y\ Zone\ II}$	$a_{y\ Zone\ I}$
RC1	0.64	2.5	0.213	0.354	0.496
RC2	0.64	1.9	0.172	0.258	0.430
RC3	0.64	2.1	0.186	0.279	0.464

Πίνακας 10: Υπολογισμός επιταχύνσεων a_y για διαφορετικές κατηγορίες πλαστιμότητας, σεισμικές ζώνες και δομικά συστήματα. [23] Sonia Giovinazzi 2006

Γνωρίζοντας τις α_y, **T**, **μ** οι τιμές των d_y και d_u της διγραμμικής καμπύλης του μονοβαθμίου δίνονται βάσει των παρακάτω σχέσεων και από τις 3 χαρακτηριστικές τιμές (α_y, d_y, d_u) χαράσσονται οι καμπύλες όπως αυτές του σχήματος 30.

$$d_y = \left[\frac{T}{2\pi}\right]^2 * \alpha_y$$

$$d_u = \mu * d_y$$



Σχήμα 30: Καμπύλες ικανότητας βάσει EC8 για RC1-DCM και RC1-DCH αντίστοιχα [23] S. Giovinazzi 2006

2) Για τις κατηγορίες κτιρίων από τοιχοποιία χωρίς κανονισμό

Για κατασκευές από τοιχοποιία χωρίς κανονισμό, που θεωρείται ότι είναι η πλειοψηφία των κατασκευών αυτού του τύπου στην Ευρώπη, για να υπολογίσουν την τέμνουσα βάσης αστοχίας

υπέθεσαν 2 είδη μηχανισμών κατάρρευσης, τον **ομοιόμορφο μηχανισμό** και τον **μηχανισμός μαλακού ορόφου**.

Ο μηχανισμός για **εκτός επιπέδου** αστοχία **δεν αντιμετωπίζεται** από την μέθοδο.

Για να εκτιμήσουν την επιτάχυνση στη διαρροή α_y θεώρησαν ότι η τέμνουσα βάσης στην αστοχία είναι η αντίσταση που έχει το κτίριο στην διεύθυνση του σεισμού, μειωμένη από τον συντελεστή **ξ** που λαμβάνει υπόψη την ανομοιομορφία της κατανομής των τοίχων, και ορίζεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση (**Cattari 2004**) :

$$a_y = 0.5\frac{\tau\alpha\xi(0.8+0.2N)}{(0.75+0.25N^{-0.75})\sigma_0},$$

Όπου **N,h,α** αντιπροσωπεύουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (αριθμός ορόφων, ύψος ορόφου και λόγος εμβαδού της ενεργού επιφάνειας τοίχων που αντιστέκονται στην διεύθυνση του σεισμού προς το εμβαδόν του πατώματος του ορόφου), **τ** είναι η διατμητική αντοχή που ορίζεται από την χαρακτηριστική αντοχή του υλικού τ_0 και την αντοχή θλίψης σ_0

$$\tau = \tau_0\sqrt{1+\frac{\sigma_0}{\tau_0}},$$

$$\sigma_0 = Np + \gamma\alpha h\left(1+(N-1)^{1.3}\right)$$

Όπου **γ** είναι η πυκνότητα του υλικού και **p** η υπερφόρτωση του ορόφου.

Η πλαστιμότητα **μ** ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις για τον μηχανισμό μαλακού ορόφου και τον ομοιόμορφο μηχανισμό αντίστοιχα

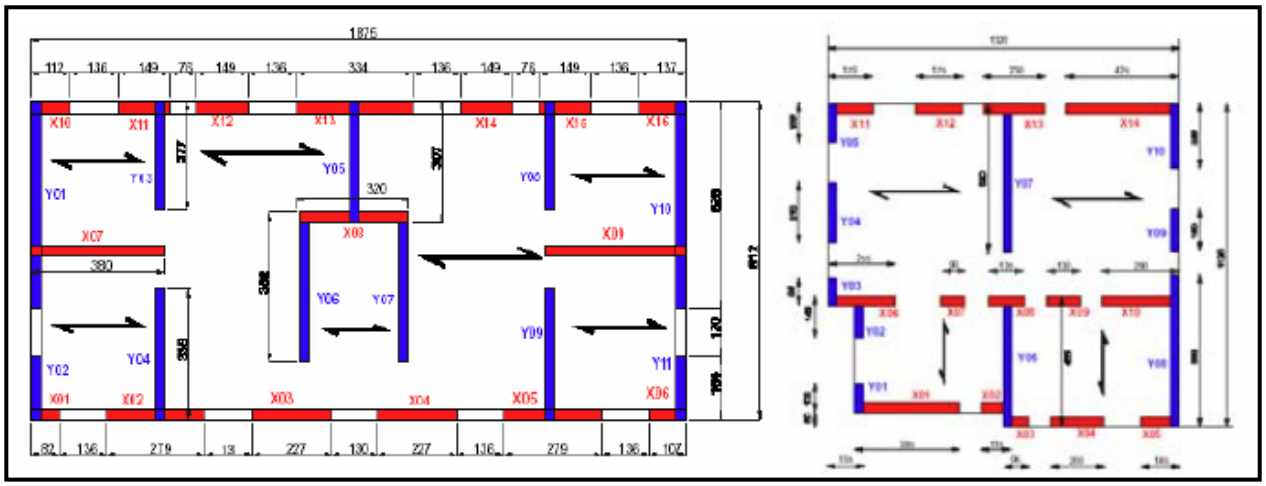
$$d_u = \delta_u\frac{Nh}{\Lambda},$$

$$d_u = \delta_u h + d_y\left(1-\frac{\Lambda}{N}\right)$$

Όπου **N** είναι ο αριθμός ορόφων , **h** το ύψος του ορόφου, δ_u είναι η μέγιστη γωνία στροφής (ultimate drift ratio), και **Λ** είναι η συμμετοχή της θεμελιώδους ιδιομορφής εκφρασμένης σε αριθμό ορόφων

$$\Lambda = \left(\frac{2}{3}+\frac{1}{3N}\right)^{-1}$$

Ο συντελεστής **α** ορίζεται σαν ο λόγος της επιφάνειας των τοίχων που αντιστέκονται στην διεύθυνση του σεισμού α_g , προς την συνολική επιφάνεια A του ορόφου (a = $\frac{ag}{A}$).



Σχήμα 31: Περιοχές αντίστασης a_g στις 2 διευθύνσεις του σεισμού (μπλέ-κόκκινες) [23]. S. Giovinazzi 2006

5.2.5.1.2 Καθορισμός επιπέδων βλάβης

Θεωρούνται 5 επίπεδα βλάβης (ελαφριά **D1**, μέτρια **D2**, βαριά **D3**,πολύ βαριά **D4**, πλήρης **D5**) που οριοθετούνται από 4 όρια βλάβης τα οποία ορίζονται πάνω στη διγραμμική καμπύλη ικανότητας του μονοβαθμίου με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

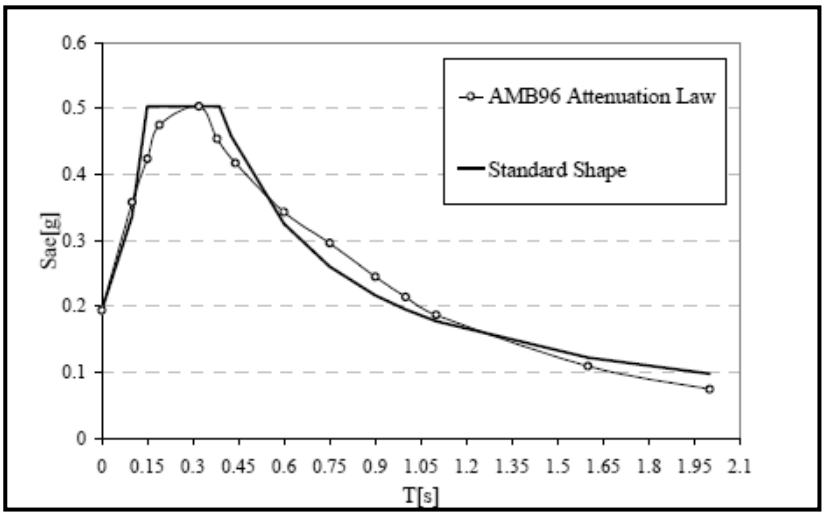
$$
\begin{aligned}
S_{d,1} &= 0.7 d_y, \\
S_{d,2} &= 1.5 d_y, \\
S_{d,3} &= 0.5(d_y + d_u), \\
S_{d,4} &= d_u.
\end{aligned}
$$

Όπου $\mathbf{d_y}$ και $\mathbf{d_u}$ είναι οι μετακινήσεις στη διαρροή και η μέγιστη μετακίνηση του μονοβαθμίου αντίστοιχα.

5.2.5.1.3 Καθορισμός απαίτησης – σημείου επιτελεστικότητας

Για την απαίτηση χρησιμοποιούν το ελαστικό φάσμα $\mathbf{S_{ae}(T)}$ επιτάχυνσης με 5% απόσβεση του EC8 του οποίου οι χαρακτηριστικές περίοδοι $\mathbf{T_B}$, $\mathbf{T_C}$, $\mathbf{T_D}$ καθορίζονται ανάλογα από την κατηγορία του εδάφους.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν σχέσεις απόσβεσης για την πρόβλεψη των επιταχύνσεων τότε πρέπει να ταιριάξουμε το φάσμα απόκρισης που προκύπτει από σχέσεις απόσβεσης με ένα φάσμα με τυπική μορφή σαν του κανονισμού προσδιορίζοντας την τιμή της $\mathbf{T_C}$ έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαφορές.



Σχήμα 32: Προσέγγιση του φάσματος που προέκυψε από σχέσεις απόσβεσης με φάσμα που έχει το τυπικό σχήμα των κανονισμών [23]. S. Giovinazzi 2006

Το σημείο επιτελεστικότητας υπολογίζεται κατευθείαν από τις παρακάτω αναλυτικές σχέσεις χωρίς επαναλήψεις χρησιμοποιώντας σχέσεις αντίστοιχες της μεθόδου N2

$$S_{d*} = \begin{cases} \left[1 + \left(\frac{S_{ae}(T)}{a_y} - 1\right)\frac{T_C}{T}\right] d_y, & T < T_C \text{ and } \frac{S_{ae}(T)}{a_y} > 1, \\ \frac{S_{ae}(T)}{a_y} d_y, & T_C \le T < T_D \text{ or } \frac{S_{ae}(T)}{a_y} \le 1 \\ \frac{S_{ae}(T_D) T_D^2}{4\pi^2}, & T \ge T_D, \end{cases}$$

Όπου οι παράμετροι $\mathbf{S_{ae}(T)}$, $\mathbf{T_C}$, $\mathbf{T_D}$ αντιστοιχούν στην απαίτηση και οι $\boldsymbol{\alpha_y}$, $\mathbf{T}$, $\boldsymbol{\mu}$ την ικανότητα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανελαστική συμπεριφορά του κτιρίου έχει ληφθεί υπόψη κατά την διαδικασία εξαγωγής των σχέσεων μέσω του συντελεστή μείωσης $\mathbf{R_\mu}$ που έχουν προταθεί από τον Fajfar(2000).

5.2.5.1.4 Καμπύλες θραυστότητας

Για να εκφράσουν την πιθανότητα η μετακίνηση στόχος **S_d* ,** του σημείου, να φθάσει ή να ξεπεράσει ένα επίπεδο βλάβης **D_k** που αντιστοιχεί σε μια οριακή μετακίνηση **$S_{d,k}$**, χρησιμοποίησαν την λογαριθμοκανονική αθροιστική κατανομή πιθανότητας την ίδια που χρησιμοποιεί και η μέθοδος HAZUS.

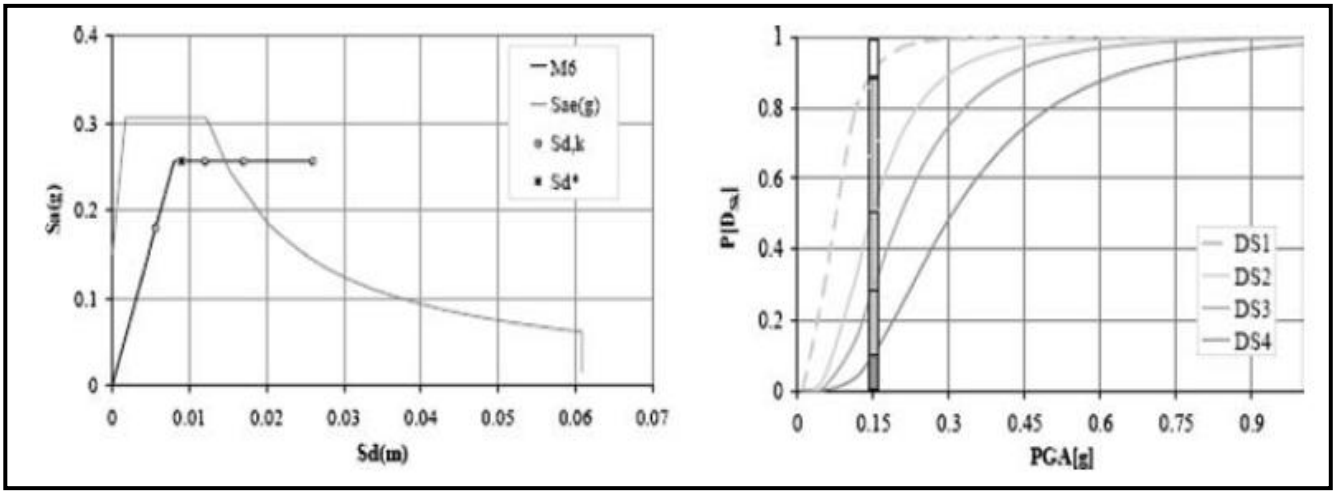
$$P[D_{Sk}\,|S_{d*}] = \Phi\left[\frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{S_{d*}}{S_{d,k}}\right)\right]$$

Όπου **Φ** είναι η λογαριθμοκανονική αθροιστική κατανομή πιθανότητας, **β** η κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου του ορίου **$S_{d,k}$** , και δίνεται από την παρακάτω σχέση σαν συνάρτηση της πλαστιμότητας μ της καμπύλης ικανότητας.

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

Τα ιστογράμματα πιθανότητας των διαφόρων ορίων υπολογίζονται απ' ευθείας από την αθροιστική κατανομή βάσει των παρακάτω σχέσεων

$$\begin{aligned} p_{S4} &= P[D_{S4}\,|S_{d*}] \\ p_{Sk} &= P[D_{Sk}\,|S_{d*}] - P\left[D_{Sk+1}\,|S_{d*}\right], \quad k = 1/3 \\ p_{S0} &= 1 - P[D_{S1}\,|S_{d*}] \end{aligned}$$



Σχήμα 33: α) Καμπύλη ικανότητας-φάσμα απαίτησης- όρια βλάβης – σημείο επιτελεστικότητας
β) Καμπύλες θραυστότητας [21] Sonia Giovinazzi and Sergio Lagomarsino 2006

5.3. Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης καμπύλων ικανότητας των Giovinazzi - Lagomarsino στα λογισμικά υπολογισμού της Τρωτότητας

Οι μέθοδοι που περιγράψαμε στο κεφάλαιο αυτό υπολογίζουν με απλουστευμένο τρόπο τις καμπύλες ικανότητας των κτιρίων.

Για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης με λογισμικά που υπολογίζουν την τρωτότητα με αναλυτικό τρόπο (HAZUS,SELENA κλπ) οι καμπύλες ικανότητας των διαφόρων κατηγοριών κτιρίων πρέπει να εισαχθούν σαν δεδομένα.

Για τα ελληνικά δεδομένα τέτοιες καμπύλες δεν είναι διαθέσιμες υπάρχουν γι αυτό στις προσπάθειες που έγιναν για εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης με ανάλογα λογισμικά επιλέχθηκε να χρησιμοποιήθουν οι καμπύλες του HAZUS που 'ταίριαζαν' περισσότερο στα υπό εκτίμηση κτίρια. (πχ η προσπάθεια για εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης του Δ. Κηφισιάς με το λογισμικό HAZUS στα πλαίσια του **ΕΠΑΝΤΥΚ**).

Με δεδομένο όμως το γεγονός των διαφορετικών κανονισμών αλλά και μεθόδων κατασκευής η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της χρήσης τέτοιων καμπυλών είναι αμφισβητούμενη.

Η χρήση αξιόπιστων καμπυλών που μπορούν να παράγονται εύκολα και οι μέθοδοι που τις παράγουν να είναι παραμετροποιημένες ώστε να προσαρμόζονται τα αποτελέσματα τους στα ελληνικά αλλά και στα Ευρωπαϊκά δεδομένα είναι επιτακτική ανάγκη.

Σαν μια πρώτη προσπάθεια διερεύνησης της δυνατότητας χρήσης καμπυλών ικανότητας που προέρχονται από εναλλακτικές μεθόδους

Έτσι επιλέχθηκε η μηχανική μέθοδος **Giovinazzi-Lagomarsino σ**αν μια πρώτη προσπάθεια διερεύνησης της δυνατότητας χρήσης τέτοιων καμπυλών ικανότητας.

Η μέθοδος **Giovinazzi-Lagomarsino** για κτίρια που σχεδιάστηκαν με EC υπολογίζει τις καμπύλες χρησιμοποιώντας τόσο χαρακτηριστικά των κτιρίων όσο και χαρακτηριστικά των κανονισμών και είναι πολύ γρήγορη σχετικά.

Αφού επιλέχθηκε ο τύπος κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με πλαισιακή λειτουργία , για μεσαία και υψηλά κτίρια, υπολογίστηκαν με την ανωτέρω μέθοδο οι καμπύλες ικανότητας.

Στο τέλος επιχειρήθηκε μια συνοπτική σύγκριση με τις καμπύλες ικανότητας της αντίστοιχης κατηγορίας κτιρίων απο το HAZUS που περιέχονται στην βάση δεδομένων του SELENA.

5.3.1 Καμπύλες με τη μηχανική μέθοδο Giovinazzi - Lagomarsino

Αρχικά επιλέχθηκαν οι ομάδες κτιρίων που θα χρησιμοποιηθούν με βάση την ευρωπαϊκή κατάταξη RISK-UE και αυτές είναι οι **RC1** για κτίρια οπλ. Σκυροδέματος με δομικό σύστημα πλαισίων . Επιλέχθηκαν 2 κατηγορίες υψών, **M** για μεσαία κτίρια από 4 έως 7 ορόφους με αντιπροσωπευτικό κτίριο 5 ορόφων, και **H** για υψηλά κτίρια με πάνω από 7 ορόφους με αντιπροσωπευτικό κτίριο 8 ορόφων.

Επιλέχθηκε να είναι νέα κτίρια με EC διότι η μέθοδος δεν κάνει χρήση μηχανισμών για αυτά και απλουστεύεται η διαδικασία. Έτσι υπολογίστηκαν οι καμπύλες για τις παραπάνω κατηγορίες για 2 κατηγορίες πλαστιμότητας (DCM, DCH) , για κανονικά κτίρια, 3 σεισμικές ζώνες (I, II, III), ύψος 6.00 μ για τα χαμηλά και 15.00 για τα μεσαία και κατηγορία εδάφους A.

Η κατηγορία του εδάφους επιλέχθηκε A (βράχος) διότι και οι καμπύλες του HAZUS είναι σε αυτή την μορφή καθώς η επίδραση του εδάφους προστίθεται αργότερα.

Η μεθοδολογία συνοπτικά είναι η εξής

Από το ύψος του κτιρίου υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος T βάσει της σχέσης που έχουμε περιγράψει.

Έπειτα λαμβάνοντας υπόψη τις αντιπροσωπευτικές τιμές **q** για κανονικά κτίρια RC1,RC2 που χρησιμοποιούν οι εισηγητές της μεθόδου και φαίνονται στο πίνακα 2 υπολογίζονται οι φασματικές τιμές **Sae**(T) για κατηγορία εδάφους A και 3 σεισμικές ζώνες (I, II, III).

Από τις φασματικές τιμές **Sae**(T) προκύπτει η τιμή της επιτάχυνσης διαρροής αy της διγραμμικής καμπύλης του μονοβαθμίου από την σχέση $\boldsymbol{\alpha_y} = \left[\frac{Sae(T)}{q}\right]*\frac{\gamma m}{a}$, με γm=1.60 α=0,70 όπως έχουμε περιγράψει στην μέθοδο.

Οι τιμές $\mathbf{d_y}$ και $\mathbf{d_u}$ της διγραμμικής καμπύλης του μονοβαθμίου δίνονται βάσει των παρακάτω σχέσεων

$$\mathbf{d_y} = \left[\frac{T}{2\pi}\right]^2 * \boldsymbol{\alpha_y}$$

$$\mathbf{d_u} = \boldsymbol{\mu} * \mathbf{d_y}$$

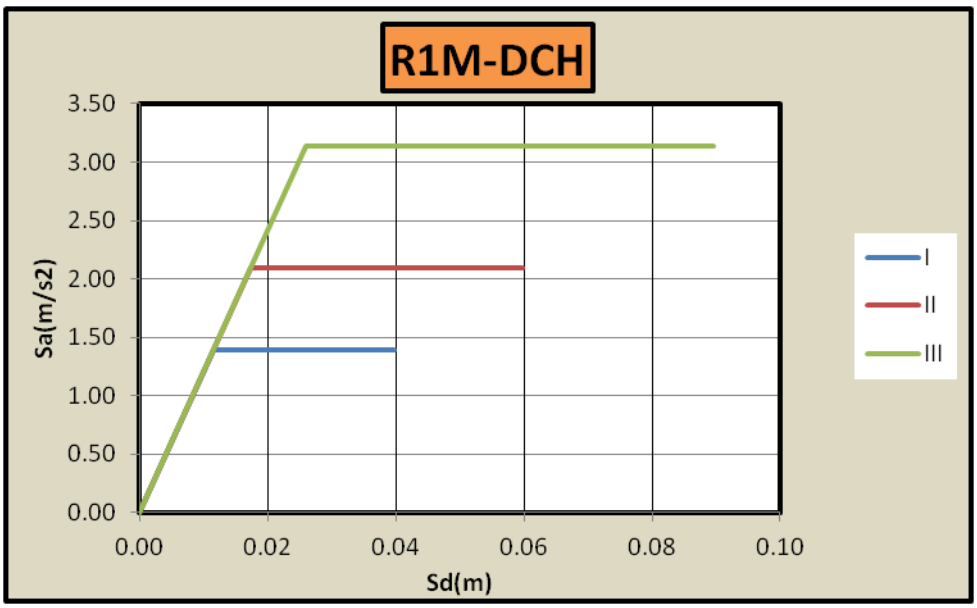
ενώ η πλαστιμότητα μ υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις του **Fajfar** ανά περίπτωση

$$\mu = \begin{cases} q, & T > T_C, \\ 1 + (q-1)\frac{T_C}{T}, & T \leq T_C. \end{cases}$$

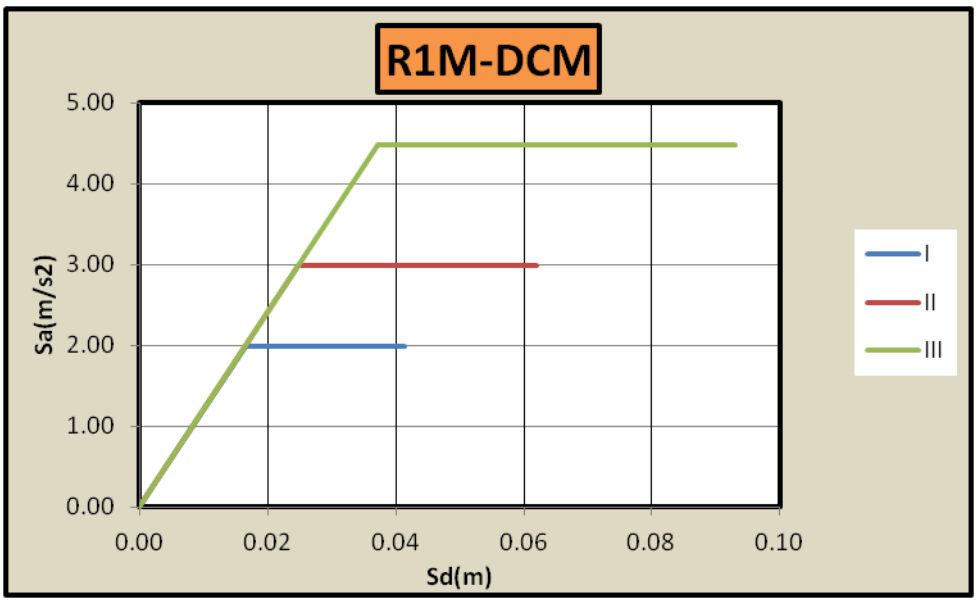
Βάσει των παραπάνω προέκυψαν οι πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν.

R1										
ΟΡΟΦΟΙ 5 - T=0.571649										
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ Α										
ΤΥΠΟΣ	H	T	q	ag	(Tc)	Sae	ay(m/s2)	dy(m)	μ	du(m)
	15	0.571649								
R1-DCH	R1-DCH	0.571649	4.5	0.16	0.4	2.745741	1.394653	0.011556	3.449055	0.039857
		0.571649	4.5	0.24	0.4	4.118611	2.09198	0.017334	3.449055	0.059786
		0.571649	4.5	0.36	0.4	6.177917	3.13797	0.026001	3.449055	0.089679
R1-DCM	R1-DCM	0.571649	3.15	0.16	0.4	2.745741	1.992362	0.016509	2.50442	0.041344
		0.571649	3.15	0.24	0.4	4.118611	2.988543	0.024763	2.50442	0.062016
		0.571649	3.15	0.36	0.4	6.177917	4.482814	0.037144	2.50442	0.093025

Πίνακας 11: Κτίρια R1 μεσαίου ύψους – 5 ορόφων με την μηχανική μέθοδο Giovinazzi-Lagomarsino



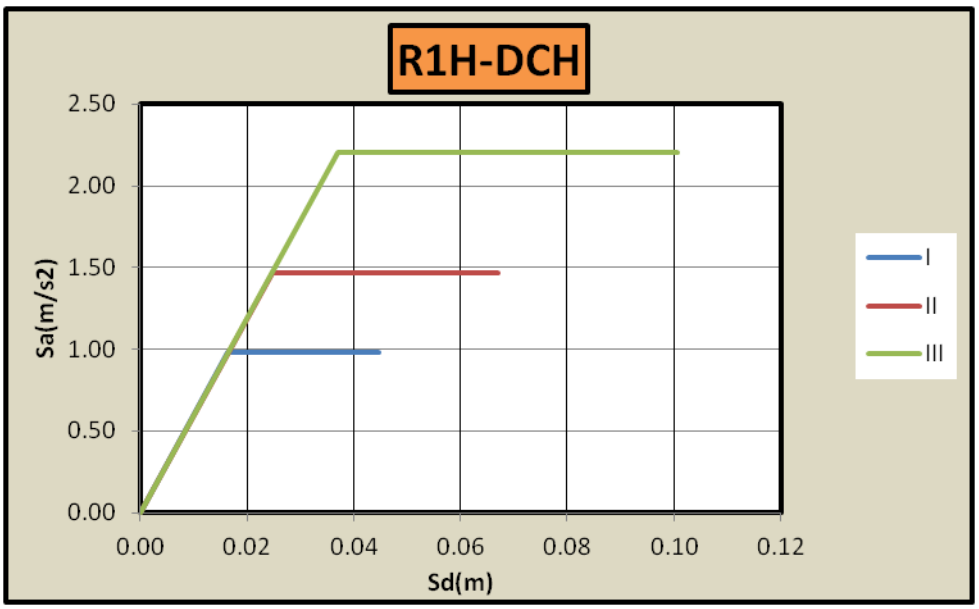
Σχήμα 34: Κτίρια μεσαίου ύψους – 5 ορόφων για επίπεδο πλαστιμότητας DCH για 3 σεισμικές ζώνες



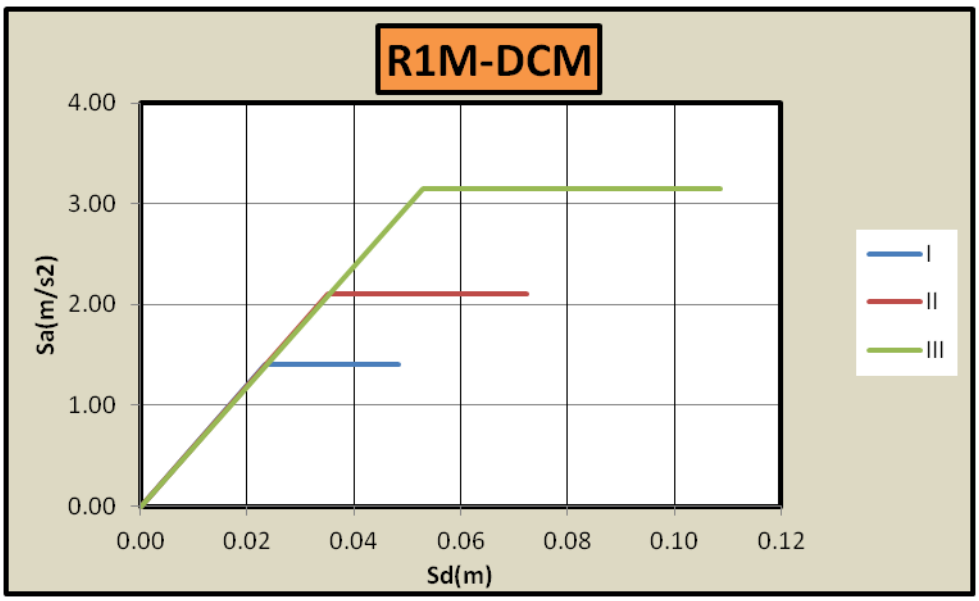
Σχήμα 35: Κτίρια μεσαίου ύψους – 5 ορόφων για επίπεδο πλαστιμότητας DCM για 3 σεισμικές ζώνες

R1										
ΟΡΟΦΟΙ 8 - T=0.813242										
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ Α										
ΤΥΠΟΣ	H	T	q	ag	(Tc)	Sae	ay(m/s2)	dy(m)	μ	du(m)
	24	0.813242								
R1-DCH	R1-DCH	0.813242	4.5	0.16	0.4	1.930053	0.980338	0.01644	2.721505	0.044741
		0.813242	4.5	0.24	0.4	2.89508	1.470508	0.02466	2.721505	0.067111
		0.813242	4.5	0.36	0.4	4.34262	2.205761	0.03699	2.721505	0.100667
R1-DCM	R1-DCM	0.813242	3.15	0.16	0.4	1.930053	1.400483	0.023485	2.057496	0.048321
		0.813242	3.15	0.24	0.4	2.89508	2.100725	0.035228	2.057496	0.072482
		0.813242	3.15	0.36	0.4	4.34262	3.151088	0.052842	2.057496	0.108723

Πίνακας 12: Κτίρια R1 υψηλά – 8 ορόφων με την μηχανική μέθοδο Giovinazzi-Lagomarsino



Σχήμα 36: Υψηλά κτίρια – 8 ορόφων για επίπεδο πλαστιμότητας DCH για 3 σεισμικές ζώνες



Σχήμα 37: Υψηλά κτίρια – 8 ορόφων για επίπεδο πλαστιμότητας DCM για 3 σεισμικές ζώνες

5.3.2 Καμπύλες HAZUS

Οι καμπύλες ικανότητας του HAZUS που είναι σε μορφή **α** (m/s2) προς **d** (m) ελήφθησαν από την βάση δεδομένων του ελεύθερου λογισμικού SELENA όπου υπάρχουν πολλές από τις καμπύλες του HAZUS (όχι όλες).

Οι αντίστοιχες κατηγορίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι **C1H**, **C1M** για υψηλά και μεσαίου ύψους κτίρια από πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος.

Εδώ πρέπει να κάνουμε αναφορά στο αμερικανικό αντισεισμικό κανονισμό **UBC-1997**.

Η ιδιοπερίοδος των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα δίνεται από την σχέση

$$T = 0.073 (h_n)^{3/4}$$

Η **τέμνουσα βάσης** λόγω σεισμικής διέγερσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$V = \frac{C_v \, I \, W}{R \, T}$$

Όπου **I** είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας που εδώ θα ληφθεί ίσος με την μονάδα όπως και στους EC,το **W** το συνολικό μόνιμο φορτίο, **R** είναι ο συντελεστής μείωσης της σεισμικής δύναμης, **T** είναι η ιδιοπερίοδος, και $\mathbf{C_v}$ είναι συντελεστής που εξαρτάται από την ταχύτητα.

Η **ελάχιστη τέμνουσα βάσης** πρέπει να είναι τουλάχιστον

$$V = 0.11 \, C_a \, I \, W$$

Όπου $\mathbf{C_a}$ συντελεστής που εξαρτάται από την επιτάχυνση.

Επιπλέον για την σεισμική ζώνη 4 η **ελάχιστη τέμνουσα βάσης** δίνεται από

$$V = \frac{0.8 \, Z \, N_v \, I \, W}{R}$$

Όπου **Z** είναι ο συντελεστής σεισμικής ζώνης και $\mathbf{N_v}$ συντελεστής για σεισμό κοντινού πεδίου.

Τέλος η μέγιστη **τέμνουσα βάσης** δεν χρειάζεται να ξεπερνά την παρακάτω τιμή

$$V = \frac{2.5 \, C_a \, I \, W}{R}$$

Οι διάφοροι πίνακες φαίνονται παρακάτω

Table (A-2) Seismic Zone Factor Z

Zone	1	2A	2B	3	4
Z	0.075	0.15	0.20	0.30	0.40

Note: The zone shall be determined from the seismic zone map.

Πίνακας 13: Συντελεστής σεισμικής ζώνης κατά UBC-1997 [25]

Table (A-6) Seismic Coefficient C_a

Soil Profile Type	Seismic Zone Factor, Z				
	Z =0.075	Z = 0.15	Z = 0.2	Z = 0.3	Z = 0.4
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32 N_a
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40 N_a
S_C	0.09	0.18	0.24	0.33	0.40 N_a
S_D	0.12	0.22	0.28	0.36	0.44 N_a
S_E	0.19	0.30	0.34	0.36	0.36 N_a
S_F	See Footnote				

Footnote: Site-specific geotechnical investigation and dynamic response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for soil Profile Type S_F.

Πίνακας 14: Συντελεστής C_a κατά UBC-1997 [25]

Table (A-7) Seismic Coefficient C_v

Soil Profile Type	Seismic Zone Factor, Z				
	Z =0.075	Z = 0.15	Z = 0.2	Z = 0.3	Z = 0.4
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32 N_a
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40 N_a
S_C	0.13	0.25	0.33	0.45	0.56 N_a
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	0.64 N_a
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	0.96 N_a
S_F	See Footnote				

Footnote: Site-specific geotechnical investigation and dynamic response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for soil Profile Type S_F.

Πίνακας 15: Συντελεστής C_v κατά UBC-1997 [25]

Table (A-8) Near-Source Factor N_a

Seismic Source Type	Closest Distance to Known Seismic Source		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Table (A-9) Near-Source Factor N_v

Seismic Source Type	Closest Distance to Known Seismic Source			
	≤ 2 km	5 km	10 km	≥ 15 km
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

Πίνακας 16: Συντελεστές N_v και N_a κατά UBC-1997 [25]

Για τα πλαίσια απο οπλισμένο σκυρόδεμα θεωρούνται 3 επίπεδα πλαστιμότητας η υψηλή πλαστιμότητα (**SMRF**) με μειωτικό συντελεστή R=8.5, η μεσαία πλαστιμότητα (**IMRF**) με R=5.5 και η χαμηλή πλαστιμότητα(**OMRF**) με R=3.5.

Βάσει αυτών υπολογίστηκαν οι τέμνουσες βάσης των κτιρίων C1M, C1H με τον **UBC-1997** θεωρώντας τους συντελεστές κοντινού πεδίου ίσους με την μονάδα, δηλαδή αγνοώντας την επίδραση κοντινού πεδίου για λόγους αντιστοιχίας με τους EC8.

C1M											
ΟΡΟΦΟΙ 5 - T=0.556											
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ **A**											
(I=1.00, όχι κοντινος Nα=Nv=1.00)											
ΖΩΝΗ	ΣΥΝΤΕΛ. Z	**R**	**Cv**	**T**	**a(V)**	**Ca**	**a(V)min**	**a(V)max**	**a(V)min Z4**	**Τελικό a(V)**	**a(V)/R**
					g		**g**	**g**	**g**	**m/sec2**	**m/sec2**
Z1	0.075	8.5	0.06	0.556	0.125	0.06	0.059	0.173		1.222	0.144
Z2A	0.15	8.5	0.12	0.556	0.249	0.12	0.118	0.346		2.444	0.287
Z2B	0.2	8.5	0.16	0.556	0.332	0.16	0.157	0.462		3.258	0.383
Z3	0.3	8.5	0.24	0.556	0.498	0.24	0.235	0.692		4.887	0.575
Z4	0.4	8.5	0.32	0.556	0.664	0.32	0.314	0.923	0.369	6.516	0.767
Z1	0.075	5.5	0.06	0.556	0.192	0.06	0.059	0.268		1.888	0.343
Z2A	0.15	5.5	0.12	0.556	0.385	0.12	0.118	0.535		3.776	0.687
Z2B	0.2	5.5	0.16	0.556	0.513	0.16	0.157	0.713		5.035	0.915
Z3	0.3	5.5	0.24	0.556	0.770	0.24	0.235	1.070		7.553	1.373
Z4	0.4	5.5	0.32	0.556	1.027	0.32	0.314	1.427	0.571	10.070	1.831
Z1	0.075	3.5	0.06	0.556	0.302	0.06	0.059	0.420		2.967	0.848
Z2A	0.15	3.5	0.12	0.556	0.605	0.12	0.118	0.841		5.934	1.696
Z2B	0.2	3.5	0.16	0.556	0.807	0.16	0.157	1.121		7.913	2.261
Z3	0.3	3.5	0.24	0.556	1.210	0.24	0.235	1.682		11.869	3.391
Z4	0.4	3.5	0.32	0.556	1.613	0.32	0.314	2.242	0.897	15.825	4.521

Πίνακας 17: Κτίρια C1 μεσαίου ύψους – 5 ορόφων κατά UBC-1997

C1H											
ΟΡΟΦΟΙ 8 - T=0.792											
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ Α											
(I=1.00, όχι κοντινος Nα=Nv=1.00)											
ΖΩΝΗ	ΣΥΝΤΕΛ. Ζ	R	Cv	T	a(V)	Ca	a(V)min	a(V)max	a(V)min Z4	Τελικό a(V)	a(V)/R
					g		g	g	g	m/sec2	m/sec2
Z1	0.075	8.5	0.06	0.792	0.087	0.06	0.059	0.173		0.858	0.101
Z2A	0.15	8.5	0.12	0.792	0.175	0.12	0.118	0.346		1.715	0.202
Z2B	0.2	8.5	0.16	0.792	0.233	0.16	0.157	0.462		2.287	0.269
Z3	0.3	8.5	0.24	0.792	0.350	0.24	0.235	0.692		3.431	0.404
Z4	0.4	8.5	0.32	0.792	0.466	0.32	0.314	0.923	0.369	4.575	0.538
Z1	0.075	5.5	0.06	0.792	0.135	0.06	0.059	0.268		1.326	0.241
Z2A	0.15	5.5	0.12	0.792	0.270	0.12	0.118	0.535		2.651	0.482
Z2B	0.2	5.5	0.16	0.792	0.360	0.16	0.157	0.713		3.535	0.643
Z3	0.3	5.5	0.24	0.792	0.540	0.24	0.235	1.070		5.302	0.964
Z4	0.4	5.5	0.32	0.792	0.721	0.32	0.314	1.427	0.571	7.070	1.285
Z1	0.075	3.5	0.06	0.792	0.212	0.06	0.059	0.420		2.083	0.595
Z2A	0.15	3.5	0.12	0.792	0.425	0.12	0.118	0.841		4.166	1.190
Z2B	0.2	3.5	0.16	0.792	0.566	0.16	0.157	1.121		5.555	1.587
Z3	0.3	3.5	0.24	0.792	0.849	0.24	0.235	1.682		8.332	2.381
Z4	0.4	3.5	0.32	0.792	1.132	0.32	0.314	2.242	0.897	11.110	3.174

Πίνακας 18: Κτίρια C1 υψηλά – 8 ορόφων κατά UBC-1997

Σύμφωνα με το HAZUS η προτεινόμενη αντιστοιχία των υπαρχόντων κτιρίων με επίπεδο κανονισμού φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα

Table 2.2. Recommended Seismic Design Level for Existing Buildings (w/o Retrofit)

UBC Seismic Zone (*NEHRP* Map Area)	Design Vintage		
	Post-1975	1941 - 1975	Pre-1941
Zone 4 (MA 7)	High-Code	Moderate-Code	Pre-Code[1]
Zone 3 (MA 6)	Moderate-Code	Moderate-Code	Pre-Code[1]
Zone 2B (MA 5)	Moderate-Code	Low-Code	Pre-Code[2]
Zone 2A (MA 4)	Low-Code	Low-Code	Pre-Code[2]
Zone 1 (MA 2/3)	Low-Code	Pre-Code[2]	Pre-Code[2]
Zone 0 (MA 1)	Pre-Code[2]	Pre-Code[2]	Pre-Code[2]

1. Assume Moderate-Code design for residential wood-frame buildings (W1).
2. Assume Low-Code design for residential wood-frame buildings (W1).

Πίνακας 19: Προτεινόμενο επίπεδο σεισμικού κανονισμού κατά το HAZUS

Ενώ κατά **Giovinazzi** η αντιστοιχία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

	Floor Number
Low-Rise	1÷3*
Mid-Rise	4-7
High-Rise	8+

Low rise=1-2 for URM and W1

Table 2.3 HAZUS (1999) classes of height.

EMS 98	HAZUS
Without ERD	Pre-Code
	Low-Code
Moderate ERD	Medium-Code
High ERD	High-Code

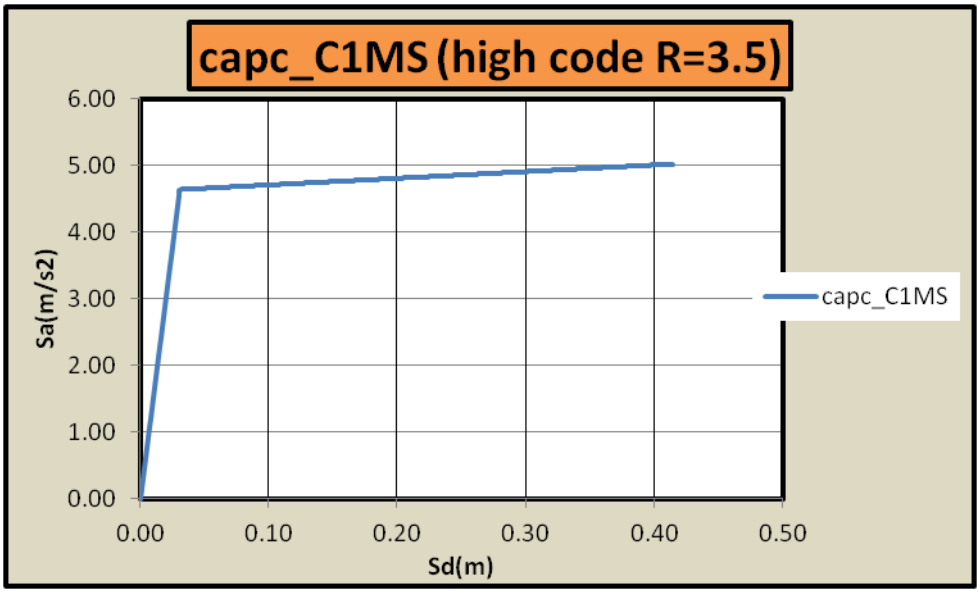
Table 2.4 EMS-98 ERD levels and HAZUS (1999) code levels.

Πίνακας 20: Ύψη ορόφων κατά HAZUS – Αντιστοιχία κανονισμών [23]. S. Giovinazzi 2006

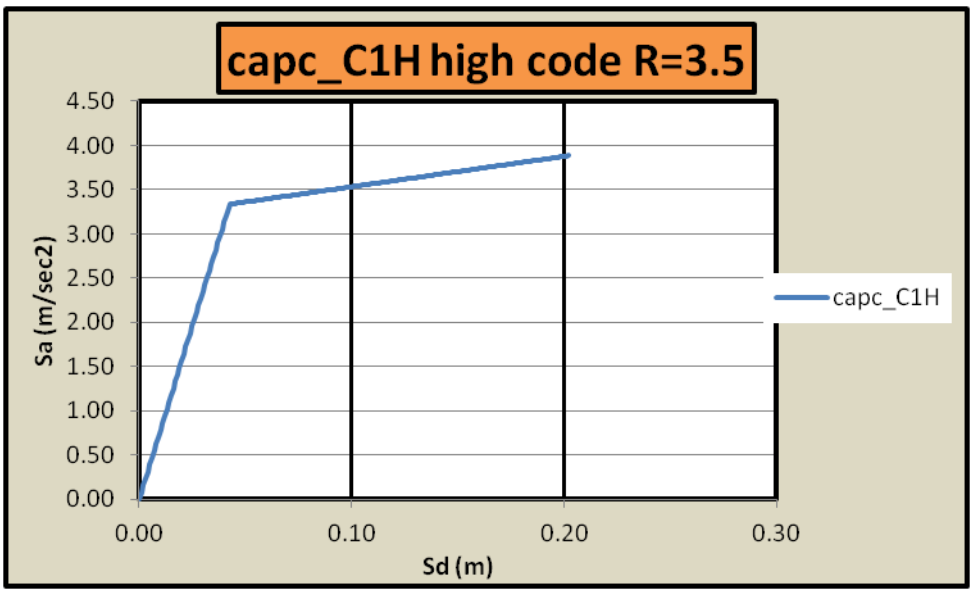
Τελικά επιλέχτηκε να ακολουθηθεί η αντιστοιχία του HAZUS και οι καμπύλες ικανότητας C1MS, C1H που παρέχει το SELENA κατατάχθηκαν σε κατηγορία **moderate** με υψηλή πλαστιμότητα **R=8.5.**

Η κατάταξη έγινε βρίσκοντας από τους πίνακες που έχουμε υπολογίσει για C1M,C1H ποια τιμή τέμνουσας βάσης πλησιάζει την μέγιστη τιμή τέμνουσας των καμπυλών. Βρέθηκε ότι και οι 2 αντιστοιχούν σε ζώνη 3 άρα με βάση τον πίνακα 19 του HAZUS αντιστοιχούν σε επίπεδο σεισμού high code με μικρή πλαστιμότητα **R=3.5.**

Οι καμπύλες που προέρχονται απο τη βάση δεδομένων του SELENA υπό μορφή αρχείων *.txt και έχουν σχεδιαστεί με το EXCEL φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 38: Υπάρχουσα καμπύλη ικανότητας C1MS



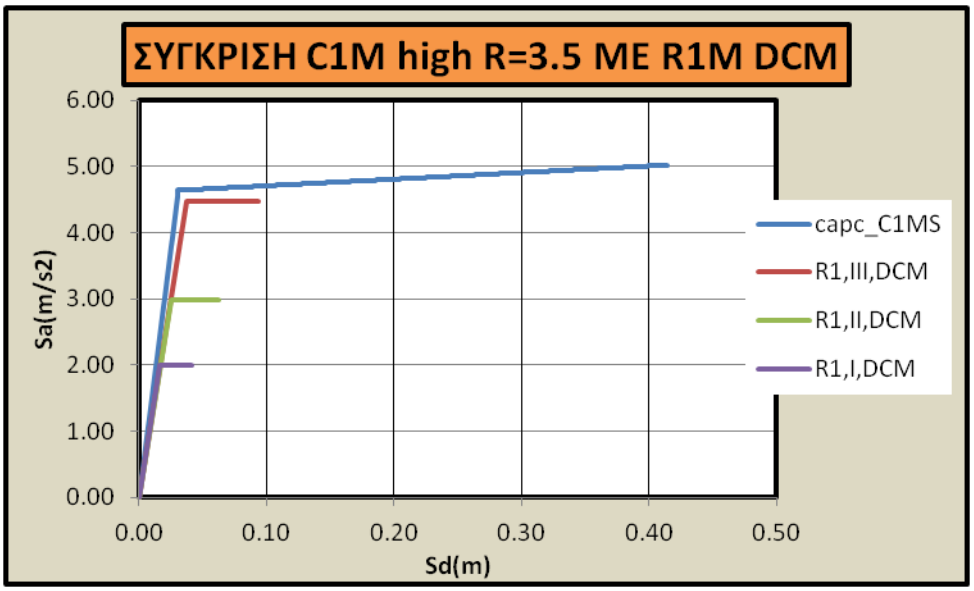
Σχήμα 39: Υπάρχουσα καμπύλη ικανότητας C1H

5.3.3 Σύγκριση καμπυλών από τις 2 μεθόδους

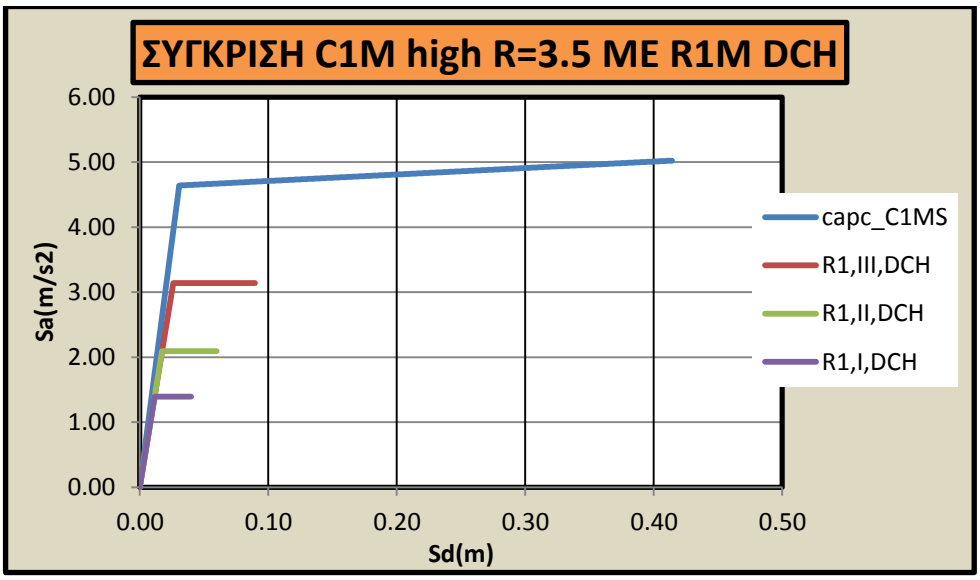
Από τους πίνακες 1 & 2 δημιουργούνται οι διγραμμικές καμπύλες ικανότητας που προκύπτουν από την μηχανική μέθοδο χρησιμοποιώντας τα τρία δεδομένα $\boldsymbol{\alpha_y}$, $\mathbf{d_y}$, $\mathbf{d_u}$.Οι καμπύλες ικανότητας της μεθόδου HAZUS παρέχονται από την βάση δεδομένων του SELENA σε αρχεία μορφής *.txt.

Και των δύο μεθόδων οι καμπύλες είναι σε μορφή **α** (m/s2) προς **d** (m) και σχεδιάζονται σε κοινό διάγραμμα για σύγκριση.

Καταρχάς γίνεται η σύγκριση για τα **μεσαίου ύψους** κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος με δομικό σύστημα πλαισίου .



Σχήμα 40: Σύγκριση μεσαίου ύψους κτιρίων (C1M high code R=3.5 με R1M DCM)

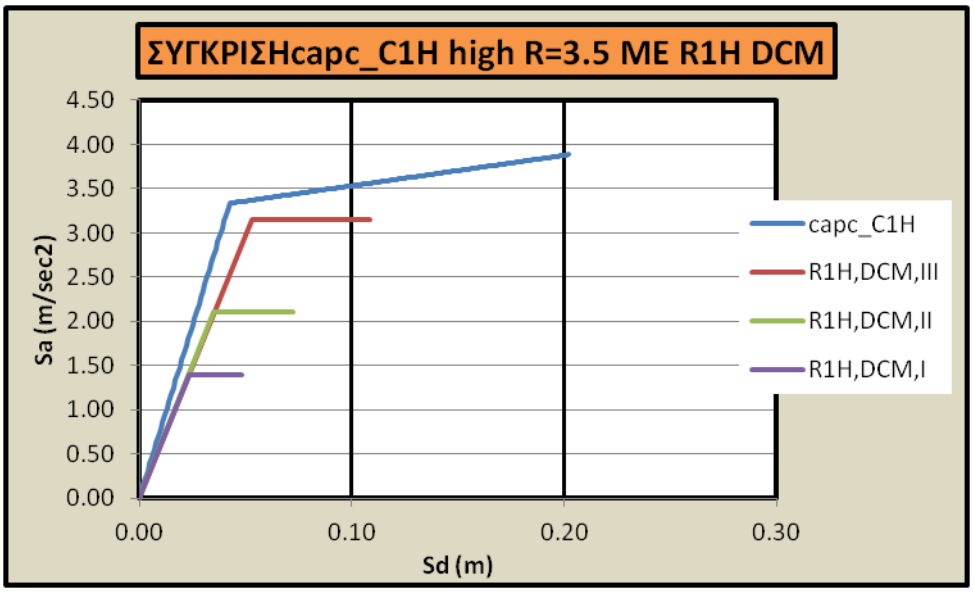


Σχήμα 41: Σύγκριση μεσαίου ύψους κτιρίων (C1M high code R=3.5 με R1M DCH)

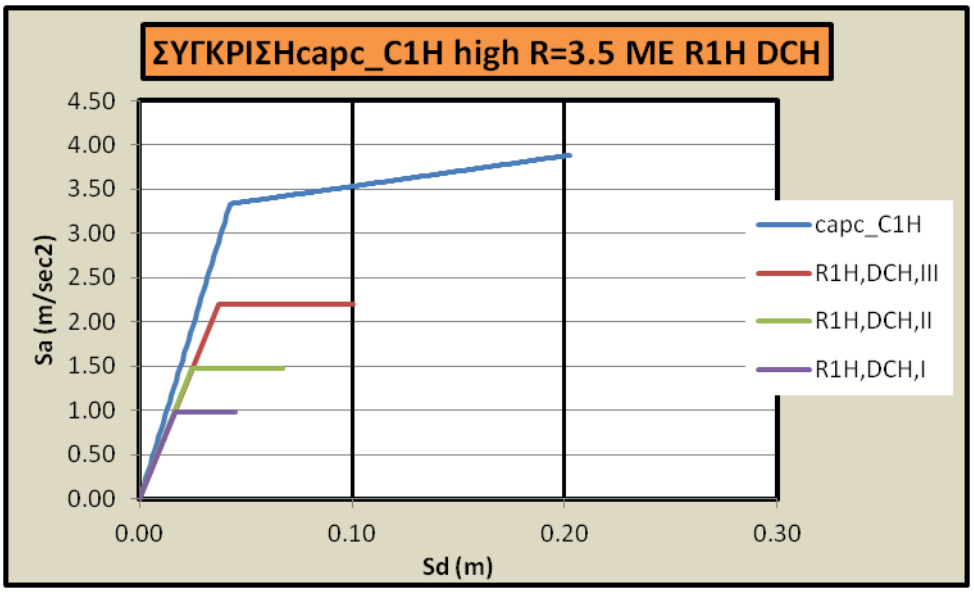
Στην σύγκριση για τα μεσαίου ύψους κτίρια είναι εμφανής η μεγάλη διαφορά πλαστιμότητας υπέρ των κτιρίων με βάση τον **UBC-1997**.

Όσον αφορά την αντοχή μόνο τα κτίρια του **EC8** με μέσο επίπεδο πλαστιμότητας **DCM** και υψηλής σεισμικής ζώνης III πλησιάζουν την αντοχή του αντίστοιχου με **UBC-1997** υψηλής ζώνης Z4 και χαμηλής πλαστιμότητας (R=3.5) γεγονός που ταιριάζει με την αντιστοίχιση της Giovinazzi.

Ακολουθεί η σύγκριση για **υψηλά** κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος με δομικό σύστημα πλαισίου .



Σχήμα 42: Σύγκριση υψηλών κτιρίων (C1H high code R=3.5 με R1M DCM)



Σχήμα 43: Σύγκριση υψηλών κτιρίων (C1H high code R=3.5 με R1M DCH)

Και σε αυτή την κατηγορία παρατηρούμε αντίστοιχα αποτελέσματα όσον αφορά την αντοχή και την πλαστιμότητα. Και εδώ μόνο τα κτίρια του **EC8** με μέσο επίπεδο πλαστιμότητας **DCM** και υψηλής σεισμικής ζώνης III πλησιάζουν την αντοχή του αντίστοιχου με **UBC-1997** υψηλής ζώνης Z4 και χαμηλής πλαστιμότητας (R=3.5) γεγονός που ταιριάζει με την αντιστοίχιση της Giovinazzi.

Βλέπουμε αρχικά σημαντικές διαφορές στις περισσότερες κατηγορίες μεταξύ της μηχανικής μεθόδου και των καμπυλών από το HAZUS, γεγονός που αποτυπώνει τις διαφορές των κανονισμών και των κατασκευαστικών μεθόδων και αναδεικνύει την ανάγκη για Ευρωπαϊκές καμπύλες ικανότητας.

Είναι πολύ πιθανόν ότι οι διαφορές στην πλαστιμότητα και στην ικανότητα θα οδηγήσουν σε διαφορές και στην μετέπειτα εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας και στην τελική εκτίμηση των βλαβών.

Το πόσο μεγάλες θα είναι οι διαφορές στην τελική εκτίμηση μένει να διερευνηθεί.

5.4 Γενικά συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια γνωρίσαμε μεθόδους υπολογισμού σεισμικής διακινδύνευσης που στο τμήμα της τρωτότητας ακολουθούν το τρίπτυχο, εκτίμηση της ικανότητας με αναλυτική μέθοδο (συνήθως ανάλυση pushover), εύρεση του σημείου επιτελεστικότητας με κάποια ανελαστική στατική διαδικασία (Nonlinear Static Procedure όπως οι CSM,DCM,N2) που συγκρίνουν την απαίτηση με την ικανότητα, και τέλος εκτίμηση του επιπέδου βλάβης με τις καμπύλες τρωτότητας.

Στο παρόν κεφάλαιο εξερευνήσαμε εναλλακτικές μεθόδους για τον υπολογισμό της τρωτότητας.

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε άλλη λογική και σκοπό έχουν την απλούστευση της διαδικασίας, διατηρώντας όμως την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων καθώς και την παραμετρικότητα τους ώστε να έχουν γενικότερη εφαρμογή.

Η **DBELA** απλουστεύει την διαδικασία της παραγωγής καμπύλης ικανότητας όπου αντί για αναλυτική μέθοδο pushover χρησιμοποιεί μια απλοποιημένη διγραμμική καμπύλη 3 σημειών που την υπολογίζει με χρήση μεθόδων μηχανισμών κατάρρευσης.

Σημαντικό της μειονέκτημα στο κομμάτι αυτό είναι η χρήση ενός ντετερμινιστικά καθορισμένου αντιπροσωπευτικού κτιρίου μιάς ομάδας κτιρίων, με συνέπεια τα αποτελέσματα να είναι ευαίσθητα στις μεταβολές των παραμέτρων γεωμετρίας και αντοχής του.

Στο τμήμα της εκτίμησης των βλαβών είναι γρήγορη και εποπτική καθώς με απευθείας σύγκριση της ικανότητας με την απαίτηση, με όρους μετακίνησης προς ενεργή περίοδο, μας καθορίζει ποια κτίρια με δεδομένη ενεργή περίοδο ξεπερνούν το κάθε όριο βλάβης που εξετάζουμε.

Η **SPBELA** αντιμετωπίζει το πρόβλημα της διασποράς των χαρακτηριστικών του αντιπροσωπευτικού κτιρίου με την στοχαστική διαδικασία Monte-Carlo. Από τις καμπύλες δηλαδή των τυχαίων κτιρίων παράγει μία μέση καμπύλη που αντιπροσωπεύει όλη την κατηγορία κτιρίων . καταγράφοντας δε τα ποσοστά των τυχαίων κτιρίων που ξεπερνούν τα προκαθορισμένα όρια βλάβης παράγει καμπύλες τρωτότητας.

Παραμένει βέβαια το θέμα της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της καμπύλης ικανότητας της μεθόδου σε σχέση με τις ακριβέστερες αναλυτικές μεθόδους.

Η **μέθοδος με διασπορά σημείων** ,για τον υπολογισμό της ικανότητας, θεωρεί σαν αντιπροσωπευτικό κτίριο ένα δισδιάστατο πλαίσιο του οποίου οι παράμετροι (γεωμετρίας και αντοχής) θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές και υπολογίζει την καμπύλη ικανότητας του σαν την μέση καμπύλη από ένα σύνολο καμπυλών 'τυχαίων' πλαισίων με την στοχαστική διαδικασία **Monte-Carlo**. Ο υπολογισμός κάθε καμπύλης ικανότητας γίνεται αναλυτικά χρησιμοποιώντας συμβατική ανάλυση pushover ή την ακριβέστερη adaptive pushover.

Έτσι αφενός λαμβάνει υπόψη την διασπορά χαρακτηριστικών της κατηγορίας κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την ακρίβεια υπολογισμού ικανότητας των αναλυτικών μεθόδων σε απλοποιημένη μορφή εφόσον χρησιμοποιεί δισδιάστατο πλαίσιο.

Παραμένει το θέμα των πολλών επαναλήψεων που απαιτούνται για να συγκλίνει η μέθοδος **Monte-Carlo** που συνήθως είναι μεγαλύτερος από 100. Η μέθοδος όμως έχει κωδικοποιηθεί στο λογισμικό **OpenQuake[3]** και μάλιστα σε πιο παραμετροποιημένη μορφή και επομένως είναι εύκολα προσβάσιμη.

Στο τμήμα του υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας ακολουθεί την δημοφιλή αναλυτική μέθοδο χρησιμοποιώντας Nonlinear Static Procedures (όπως **DCM, CSM, N2**) που θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστες.

Εδώ προκύπτει και μια άλλη χρησιμότητα του πρώτου σκέλους της μεθόδου δηλαδή η παραγωγή 'συνθετικών' αντιπροσωπευτικών καμπυλών ικανότητας για μια οποιαδήποτε κατηγορία κτιρίων και η χρήση τους σε ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί αναλυτική μεθοδολογία για τα επόμενα στάδια, όπως HAZUS, SELENA, ELER, OPENQUAKE, κλπ.

Με αυτόν τον τρόπο παρακάμπτεται το χρονοβόρο και δαπανηρό τμήμα του υπολογισμού καμπυλών ικανότητας με πολύπλοκες αναλυτικές μεθόδους ή με πειράματα, την στιγμή μάλιστα που η μέθοδος δίνει ακριβέστατα αποτελέσματα όπως προέκυψε από τις συγκρίσεις που έκαναν οι συγγραφείς με μεθόδους δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης με χρονοιστορίες.

Και στο τμήμα του υπολογισμού των καμπυλών τρωτότητας χρησιμοποιεί αντίστοιχη στοχαστική διαδικασία, με αποτέλεσμα και αυτές να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν 'συνθετικές' σε συνδυασμό με άλλες αναλυτικές μεθόδους.

Η μέθοδος των **Rossetto-Elnashai** για τον υπολογισμό της τρωτότητας χρησιμοποιεί μια αντιπροσωπευτική καμπύλη ικανότητας προερχόμενη με τρόπο ανάλογο των μεθόδων SPBELA και της διασποράς σημείων.

Δηλαδή επιλέγει ένα αντιπροσωπευτικό κτίριο του οποίου οι παράμετροι είναι τυχαίες μεταβλητές, με την στοχαστική μέθοδο Monte-Carlo κάνει τυχαία δειγματοληψία των παραμέτρων και αφού επιλύσει αναλυτικά όλα τα 'τυχαία' κτίρια που προκύπτουν, στο τέλος εξάγει μια αντιπροσωπευτική μέση καμπύλη ικανότητας.

Η διαφορά στο στάδιο αυτό από τις 2 προηγούμενες μεθόδους είναι η χρήση της μεθόδου adaptive pushover που θεωρείται ακριβέστερη μέθοδος από την 'συμβατική' pushover.

Στην εξεύρεση του σημείου επιτελεστικότητας η μέθοδος είναι ταχύτερη από τις άλλες 2 καθώς χρησιμοποιεί την μέθοδο capacity demand checking points (CDCP) και κάνει τον υπολογισμό χωρίς επαναληπτική διαδικασία.

Τέλος παράγει τις καμπύλες τρωτότητας με χρήση στοχαστικών μεθόδων.

Τα βασικά της πλεονεκτήματα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους είναι η ακριβέστερη μέθοδος (adaptive pushover) που χρησιμοποιεί για την αντιπροσωπευτική καμπύλη ικανότητας και ο ταχύτερος υπολογισμός του σημείου επιτελεστικότητας, η μέθοδος όμως για την εύρεση των καμπυλών τρωτότητας απαιτεί μια μάλλον σύνθετη στοχαστική διαδικασία.

Η μηχανική μέθοδος των **Giovinazzi-Lagomarsino** αφορά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και άοπλη τοιχοποιία.

Έχει δύο τρόπους αντιμετώπισης του υπολογισμού της καμπύλης ικανότητας του αντιπροσωπευτικού κτιρίου.

Στα κτίρια που έχουν σχεδιαστεί με κανονισμό , που εφαρμόστηκε αυστηρά, υπολογίζει μια απλουστευμένη διγραμμική καμπύλη βάσει των παραμέτρων του κτιρίου και του κανονισμού.

Σε περίπτωση ανυπαρξίας κανονισμού για την εύρεση της καμπύλης χρησιμοποιεί μηχανισμούς αστοχίας του αντιπροσωπευτικού κτιρίου.

Το σημείο επιτελεστικότητας υπολογίζεται γρήγορα χωρίς επαναλήψεις με χρήση της μεθόδου N2, ενώ για τις καμπύλες τρωτότητας χρησιμοποιεί αντίστοιχη μέθοδο με αυτήν του HAZUS.

Είναι η ταχύτερη υπολογιστικά μέθοδος από τις προαναφερόμενες και προσφέρεται για γρήγορο υπολογισμό καμπυλών ικανότητας και αξιολόγηση της τρωτότητας.

Η τελευταία μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στην προσπάθεια σύγκρισης των καμπυλών ικανότητας που έχουν προκύψει με βάση τα Αμερικανικά δεδομένα κανονισμών και τρόπων κατασκευής (HAZUS) με καμπύλες προσαρμοσμένες στα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά δεδομένα.

Η σύγκριση δείχνει σημαντικές διαφορές στις καμπύλες ικανότητας γεγονός που μας αναδεικνύει την ανάγκη υπολογισμού Ευρωπαϊκών καμπυλών ώστε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα υπολογισμού της τρωτότητας των Ευρωπαϊκών κτιρίων.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[1] G.M.Calvi (1999) "A displacement based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings", journal of Earthquake Engineering Vol3 No3, pp 411-438.

[2] S. Glaister & R. Pinho "Development of a simplified deformation based method for seismic vulnerability assessment" , journal of Earthquake Engineering 7:S1, pp 107-140.

[3] OpenQuake Risk Modeler's Toolkit – User Guide. GEM (Global Earthquake Model) (2015) Silva V., Casotto C., Rao A., Villar M., Crowley H., Vamvatsikos D.

[4] Abo El Ezz (2008) "Deformation and strength based assessment of Seismic failure mechanisms for existing RC frame buildings". Master's Thesis. ROSE School, Pavia, Italy pages 40,41.

[5] Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings (2008). Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley. Engineering Structures 30.

[6] McKay, M.D.; Beckman, R.J.; Conover, W.J. (May 1979). "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code".

[7] Simplified pushover-based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry buildings (2008). Barbara Borzi, Rui Pinho, Helen Crowley. International Journal of Architectural Heritage.

[8] Simplified procedure for the seismic risk assessment of unreinforced masonry buildings. L. Restrepo-Velez, G. Magenes. 13th world conference on earthquake engineering. (2004)

[9] Evaluation of Analytical Methodologies to Derive Vulnerability Functions. V. Silva, R. Pinho, H. Varum, H. Crowley, R. Sousa. 15 WCEE - Lisboa 2012.

[10] A Probabilistic Displacement-based Vulnerability Assessment Procedure for Earthquake Loss Estimation. Helen Crowley, Rui Phino, Julian j. Bommer. Bulletin of Earthquake Engineering 2 : 173-219 (2004).

[11] Comparison of Two Mechanics-Based Methods for Simplified Structural Analysis in Vulnerability Assessment (2008). H. Crowley, B. Borzi, R. Phino, M. Colombi, M. Onida. Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering Volume 2008.

[12] Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. G.M. Calvi, R. Phino, G. Magenes, J.J. Bommer, L.F. Restrepo-Velez, H. Crowley. ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No 472, Vol. 43 (2006)

[13] An extensive validation exercise on simplified methods for the seismic performance evaluation of RC frame building. B. Borzi, D. Pola, M. Vona, R. Phino, A. Masi. (2008). 14th world conference on earthquake engineering- Beijing China.

[14] Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. D. D' Ayala, E. Speranza. Earthquake Spectra 2003.

[15] Simplified pushover-based Vulnerability Analysis of Traditional Italian RC precast Structures. Davide Bolognini, Barbara Borzi, Rui Pinho. 14th world conference on earthquake engineering- Beijing China.

[16] Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. K. Doherty, M.C. Griffith, N. Lam, J. Wilson. (2002) Earthquake Engineering & Structural Dynamics - April 2002.

[17] Derivation of vulnerability functions for European-type RC structure based on observational data. T. Rossetto, A. Elnashai. Engineering Structures 25 (2003).

[18] A new analytical procedure for the derivation of displacement-based Vulnerability curves for populations of RC structures. Tiziana Rossetto, Amr Elnashai. Engineering Structures 27 (2005).

[19] A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. Sonia Giovinazzi and Sergio Lagomarsino. 13th world conference on earthquake engineering Vancouver – Canada (2004) paper N_0 896.

[20] Development of ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) Methodology: Vulnerability Relationships.

[21] Macroseismic and mechanical models for the Vulnerability assessment of current buildings. Sonia Giovinazzi and Sergio Lagomarsino (2006). Bulletin of Earthquake Engineering.

[22] Geotechnical Hazard representation for damage scenario and seismic risk analysis. Sonia Giovinazzi.

[23] The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis.(2005) Sonia Giovinazzi PhD Thesis University of Florence.

[24] A mechanical model calibrated on a macroseismic vulnerability model. Sonia Giovinazzi and Sergio Lagomarsino. Interdisciplinary workshop on managing of earthquake risks. (2006) ETH - Switzerland.

[25] UNIFORM BUILDING CODE 1997