**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

# Διερεύνηση της επιρροής των τιμών των κριτηρίων τρωτότητας στο σχεδιασμό κατασκευών

Διπλωματική εργασία

του Θεόδωρου Παναγόπουλου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΒΗΣΣΑΡΙΩΝ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

**Περιεχόμενα**

Περιεχόμενα ..... 2
Κεφάλαιο 1 ..... 5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 5
Κεφάλαιο 2 ..... 6
ΕΝΤΟΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ OPENSEES: ..... 6
2.1 Βασικές Εντολές για ορισμό των κόμβων του προσομοιώματος: ..... 6
2.1.1 Εντολή Basic Model Builder ..... 6
2.1.2 Εντολή node ..... 7
2.1.3 Εντολή mass ..... 7
2.1.4 Εντολή fix ..... 8
2.2 Εντολές για τη δημιουργία των διατομών του φορέα: ..... 9
2.2.1 Εντολές για την δημιουργία των υλικών του προσομοιώματος ..... 9
2.2.1.1 Σκυρόδεμα ..... 9
2.2.1.2 Χάλυβας : ..... 10
2.2.1.3Ελαστικό υλικό : ..... 11
2.2.1 Εντολές προσδιορισμού της διατομής: ..... 11
2.2.2.1 Εντολή δημιουργίας της διατομής : ..... 11
2.2.2.2 Εντολή σύνθεσης διατομών και εντατικών μεγεθών ..... 15
2.3 Εντολές δημιουργίας στοιχείων, συνδεσιμότητας των κόμβων και γεωμετρικός μετασχηματισμός ..... 15
2.3.1Εντολή Linear Transformation : ..... 16
2.3.2 Εντολές δημιουργίας στοιχείων ..... 18
2.3.2.1 Εντολή δημιουργίας στοιχείου δικτυώματος ..... 18
2.3.2.2 Εντολή δημιουργίας ελαστικού στοιχείου δοκού-υποστυλώματος ..... 18
2.3.2.3 Εντολή δημιουργίας μη γραμμικού στοιχείου δοκού-υποστυλώματος ..... 20
2.4 Τοποθέτηση των φορτίων του προσομοιώματος ..... 21
2.4.1 Εντολές δημιουργίας μιας χρονοϊστορίας ..... 21
2.4.1.1 Linear TimeSeries ..... 21
2.4.1.2 Path TimeSeries ..... 22

2.4.2 Εντολή pattern Plain ..... 22
2.4.3 Pattern UniformExcitation..... 24
2.5 Τοποθέτηση των καταγραφέων απόκρισης του προσομοιώματος ..... 25
2.5.1 Εντολή Node Recorder ..... 26
2.5.2 Εντολή Element Recorder..... 26
2.5.3 Εντολή Drift Recorder ..... 28
2.6 Εντολές για τον προσδιορισμό της Ανάλυσης του προσομοιώματος ..... 29
2.6.1 Συνιστώσες προσδιορισμού της Ανάλυσης ..... 29
2.6.2. Εντολή analysis Command ..... 32
2.6.3 Εντολή Analyse Command..... 32
2.6.4 Εντολή eigen ..... 32
2.6.5 Εντολή Απόσβεσης Rayleigh..... 33
2.6.6 Εντολή wipe ..... 33
Κεφάλαιο 3 ..... 34
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... 34
3.1 Εισαγωγή..... 34
3.2 Βασικές έννοιες της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης..... 35
3.3 Επιλογή επιταχυνσιογραφημάτων..... 38
3.4 Κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων..... 41
3.4.1 Κλιμάκωση ως προς την Φασματική Επιτάχυνση για την Πρώτη Ιδιοπερίοδο της κατασκευής για απόσβεση ξ = 5%..... 41
3.4.2 Κλιμάκωση ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) ..... 43
3.5 Κατασκευή καμπύλων Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης..... 44
Κεφάλαιο 4 ..... 46
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ:..... 46
4 .1 Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας ..... 46
4.1.1 Στόχοι επιθυμητής επιτελεστικότητας με βάση ντετερμινιστικά κριτήρια ..... 46
4.1.2 Στόχοι επιθυμητής επιτελεστικότητας με βάση κριτήρια τρωτότητας . 47
Κεφάλαιο 5 ..... 50
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ..... 50

5.1 Κατασκευή καμπύλων τρωτότητας για το Μονώροφο με τη χρήση των καμπύλων IDA. ..... 50

5.1.1 Ως προς Φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5 % (Sa($T_1$ ,5%)) ..... 51

5.1.2 Ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση ..... 53

5.2 Κατασκευή των καμπύλων τρωτότητας με τη χρήση του Φάσματος του Ευρωκώδικα και τη μέθοδο των συντελεστών ..... 54

5.2.1 Φάσμα σχεδιασμού Ευρωκώδικα 8 για ανελαστική συμπεριφορά .... 55

5.2.2 Μέθοδος των συντελεστών ..... 57

5.2.3 Καμπύλες τρωτότητας για το Μονώροφο ..... 62

5.2.3.1 Ως προς Φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5 % (Sa($T_1$ ,5%)) ..... 65

5.2.3.2 Ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) ..... 66

5.2.4 Καμπύλες τρωτότητας για το Διώροφο ..... 68

5.2.5 Καμπύλες τρωτότητας για το Τριώροφο ..... 71

5.3 Σύγκριση καμπύλων τρωτότητας από Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση και Μέθοδο Συντελεστών ..... 74

Κεφάλαιο 6 ..... 76

ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ..... 76

6.1 Επιλεγμένα όρια και παρουσίαση σεναρίων ..... 76

6.2 Μονώροφο ..... 78

6.2.1 Αριθμητικό προσομοίωμα ..... 78

6.2.2 Αποτελέσματα αναλύσεων ..... 81

6.3 Διώροφο ..... 85

6.3.1 Αριθμητικό προσομοίωμα ..... 85

6.3.2 Αποτελέσματα αναλύσεων ..... 88

6.4 Τριώροφο ..... 92

6.4.1 Αριθμητικό προσομοίωμα ..... 92

6.4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων ..... 95

6.5 Σύγκριση ευμενέστερου σεναρίου για κάθε κατασκευή ..... 99

Κεφάλαιο 7 ..... 100

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... 100

Βιβλιογραφία ..... 102

# Κεφάλαιο 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί η επιρροή των κριτηρίων τρωτότητας στον σχεδιασμό μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για τον λόγο αυτό προσομοιώθηκαν με το πρόγραμμα Opensees τρεις φορείς από ωπλισμένο σκυρόδεμα , ένα μονώροφο , ένα διώροφο και ένα τριώροφο και εξετάστηκε η επιρροή που είχε η επιλογή των κριτηρίων στην τελική μορφή της καθεμίας κατασκευής. Στο δεύτερο κεφάλαιο αυτής της διπλωματικής εργασίας αναφέρονται κάποιες βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των φορέων. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η θεωρία της μεθόδου της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης (Incremental Dynamic Analysis) ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύχθηκε τρόπος με τον οποίο γίνεται ο αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας με χρήση κριτηρίων τρωτότητας. Στο πέμπτο κεφάλαιο και με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στα κεφάλαια Β και Γ προχωρήσαμε σε αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας κατασκευής των καμπύλων τρωτότητας τόσο με χρήση των καμπύλων που προέκυψαν από την μέθοδο της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης , όσο και της μεθόδου των συντελεστών με την χρήση του φάσματος σχεδιασμού του Ευρωκώδικα. Στο έκτο κεφάλαιο έγινε εκτεταμένη παρουσίαση του αριθμητικού προσομοιώματος κάθε κατασκευής καθώς και παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων για κάθε μια από τις κατασκευές με την χρήση των καμπύλων τρωτότητας. Εκτός αυτού δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην επιρροή που είχαν τα επιλεγμένα κριτήρια στην τελική μορφή της εκάστοτε κατασκευής αλλά και στο πως μπορούμε με την χρήση τους να βελτιστοποιήσουμε την διαδικασία της διαστασιολόγησης και να οδηγηθούμε σε μία λύση οικονομική αλλά και λειτουργικά αποδεκτή. Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια συνοπτικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή.

# Κεφάλαιο 2

# ΕΝΤΟΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ OPENSEES:

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Opensees. Το Opensees είναι ένα πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται τόσο σε δομικά όσο και σε γεωτεχνικά έργα καθώς το πλήθος των δομικών υλικών και στοιχείων που περιλαμβάνει αλλά και το εύρος των στατικών και δυναμικών αναλύσεων που μπορεί να πραγματοποιήσει το καθιστούν ένα εξαιρετικό εργαλείο στην αριθμητική προσομοίωση μη γραμμικών συστημάτων . Παρακάτω θα αναλυθούν οι κυριότερες εντολές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία.

## 2.1 Βασικές Εντολές για ορισμό των κόμβων του προσομοιώματος:

Όπως και σε κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων έτσι και με το Opensees το πρώτο βήμα του μελετητή είναι να υποδιαιρέσει την υπό μελέτη κατασκευή σε στοιχεία και κόμβους , να ορίσει τα φορτία που ασκούνται σε αυτούς καθώς και να επιβάλλει τις απαραίτητες μετακινησιακές δεσμεύσεις στους κόμβους. Κατά την επίλυση με το Opensees είναι απαραίτητο επομένως να ορίσουμε τους κόμβους ,τη μάζα ,τα στοιχεία ,τις διατομές ,τις δεσμεύσεις ,τις φορτίσεις ,τα υλικά και τους μετασχηματισμούς που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα κατά την επίλυση του φορέα,με την χρήση των αντίστοιχων εντολών[9] .

### 2.1.1 Εντολή Basic Model Builder

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί το προσομοίωμά (BasicBuilder object) μας καθώς και για να προσδιοριστούν ο αριθμός των διαστάσεων και των βαθμών ελευθερίας του .

- **model BasicBuilder -ndm $ndm <-ndf $ndf>**

**$ndm** Αριθμός των διαστάσεων του προβλήματός μας (1,2 ή 3).
**$ndf** Αριθμός των Βαθμών Ελευθερίας σε κάθε κόμβου (προαιρετικό)
(Η προεπιλεγμένη τιμή εξαρτάται από την τιμή που έχει οριστεί στο ndm:
ndm=1 -> ndf=1
ndm=2 -> ndf=3
ndm=3 -> ndf=6)

**Παράδειγμα:**

Με την εντολή **model basic -ndm 2 -ndf 3**; κατασκευάζεται ένα προσομοίωμα 2 διαστάσεων με 2 μεταφορικούς Βαθμούς Ελευθερίας και 1 στροφικό, συνολικά δηλαδή κάθε κόμβος έχει 3 Βαθμούς Ελευθερίας .

Με την εντολή **model basic -ndm 3 -ndf 6**; κατασκευάζεται ένα προσομοίωμα 3 διαστάσεων με 3 μεταφορικούς Βαθμούς Ελευθερίας και 3 στροφικούς, συνολικά δηλαδή κάθε κόμβος έχει 6 Βαθμούς Ελευθερίας .

### 2.1.2 Εντολή node

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός κόμβου του φορέα μας και τον ορισμό των εκάστοτε συντεταγμένων του.

- **node $nodeTag (ndm $coords)**

**$nodeTag :** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει το κόμβο.
**$coords :** Συντεταγμένες του κόμβου σε σχέση πάντα με τον αριθμό των διαστάσεων που έχει το υπό εξέταση προσομοίωμα.

**Παράδειγμα :**

<u>Προσομοίωμα 3 διαστάσεων</u>

node 3 15.5 11.5 0

Με την εντολή αυτή ορίζουμε ένα κόμβο με συντεταγμένες ( 15.5 , 11.5 , 0 ).

<u>Προσομοίωμα 2 διαστάσεων</u>

node 2 3.5 0

Με την εντολή αυτή ορίζουμε ένα κόμβο με συντεταγμένες ( 3.5 , 0 ).

### 2.1.3 Εντολή mass

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για να οριστεί η μάζα που αντιστοιχεί σε ένα κόμβο του προσομοιώματος.

- **mass $nodeTag (ndf $MassValues)**

**$nodeTag** Ακέραιος αριθμός που αντιστοιχεί στο κόμβο στον οποίο ορίζεται η αντίστοιχη μάζα.

**$MassValues** Τιμές μάζας που αντιστοιχούν στον αντίστοιχο Βαθμό Ελευθερίας (εξαρτάται από τους Βαθμούς Ελευθερίας που έχει κάθε κόμβος στον υπό εξέταση φορέα).

**Παράδειγμα:**

Προσομοίωμα 3 διαστάσεων
mass 11 50 40 30 0 0 0

Με αυτή την εντολή ορίζουμε στον κόμβο 11 μάζα με τιμές 50 40 και 30 στους μετακινησιακούς Βαθμούς ελευθερίας και μηδενικές τιμές στους στροφικούς Βαθμούς Ελευθερίας.

Προσομοίωμα 2 διαστάσεων
mass 12 50 40 0

Με αυτή την εντολή ορίζουμε στον κόμβο 12 μάζα με τιμές 50 και 40 στους μετακινησιακούς Βαθμούς Ελευθερίας και μηδενική τιμή στο στροφικό Βαθμό Ελευθερίας.

### 2.1.4 Εντολή fix

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για να οριστούν ομογενείς συνοριακές δεσμεύσεις για τον εκάστοτε κόμβο του προσομοιώματος και τους Βαθμούς Ελευθερίας που μας ενδιαφέρουν.

- **fix $nodeTag (ndf $ConstrValues)**

**$nodeTag** Ακέραιος αριθμός που καθορίζει τον αριθμό του κόμβου στον οποίο επιβάλλεται η δέσμευση.
**$ConstrValues** Είδος δέσμευσης (0 ή 1). Οι τιμές ndf εξαρτώνται από τον αριθμό των Βαθμών Ελευθερίας σε κάθε κόμβο

Τα 2 είδη δεσμέυσεων είναι :
**0** αδέσμευτος
**1** δεσμευμένος

**Παράδειγμα:**

Προσομοίωμα 3 διαστάσεων

**fix 8 1 1 1 1 1 1**

Με αυτή την εντολή δεσμεύουμε όλους τους Βαθμούς Ελευθερίας στον κόμβο 8 του προσομοιώματός μας.

Προσομοίωμα 2 διαστάσεων

**fix 5 1 1 1 0 0 0**

Με αυτή την εντολή δεσμεύουμε όλους τους μετακινησιακούς Βαθμούς Ελευθερίας στον κόμβο 5 του προσομοιώματός μας αλλά αφήνουμε αδέσμευτους όλους τους στροφικούς.

## 2.2 Εντολές για τη δημιουργία των διατομών του φορέα:

Για την δημιουργία των διατομών του φορέα θα πρέπει αρχικά να ορίσουμε το ίδιο το υλικό ,αν αυτό είναι ελαστικό ή ανελαστικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε διατομής. Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση του φορέα μας χάλυβας S500 και σκυρόδεμα C 20/25 καθώς και ένα ελαστικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραλαβή της στρέψης στο προσομοίωμά μας.

### 2.2.1 Εντολές για την δημιουργία των υλικών του προσομοιώματος

#### 2.2.1.1 Σκυρόδεμα

Χρησιμοποιήθηκε η εντολή :

- **uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU**

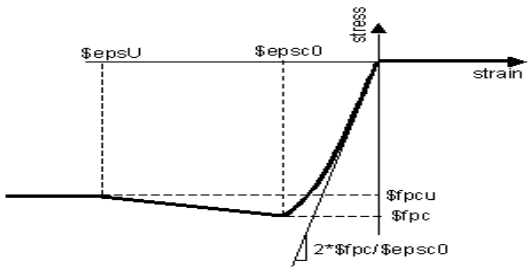
| | |
|---|---|
| **$matTag** | Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει το υλικό |
| **$fpc** | Η αντοχή του σκυροδέματος μετά από 28 ημέρες (θλιπτική δύναμη πρέπει να επισημαίνεται με αρνητικό πρόσημο) |
| **$epsc0** | Παραμόρφωση διαρροής του σκυροδέματος |
| **$fpcu** | Μέγιστη τάση σκυροδέματος |
| **$epsU** | Παραμόρφωση σκυροδέματος στη μέγιστη τάση |

Σημείωση :

Α) Κάθε θλιπτική δύναμη πρέπει να επισημαίνεται με αρνητικό πρόσημο

Β) Η αρχική κλίση του διαγράμματος είναι (2*$fpc/$epsc0)

Γ) Το opensees χρησιμοποιώντας τη παραπάνω εντολή ορίζει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος με βάση το παρακάτω διάγραμμα




Σχήμα 2.1 διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεν σκυροδέματος

(πηγή Opensees manual [9])

**Παράδειγμα:**

**uniaxialMaterial Concrete01 1 -20000 -0.002 -20000 -0.0035**

Με την παραπάνω εντολή ορίζω ένα διγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος κατά το οποίο τόσο η τάση διαρροής όσο και η μέγιστη τάση είναι 20 MPα ενώ η παραμόρφωση διαρροής και η μέγιστη παραμόρφωση είναι 0,002 και 0,0035 αντίστοιχα.

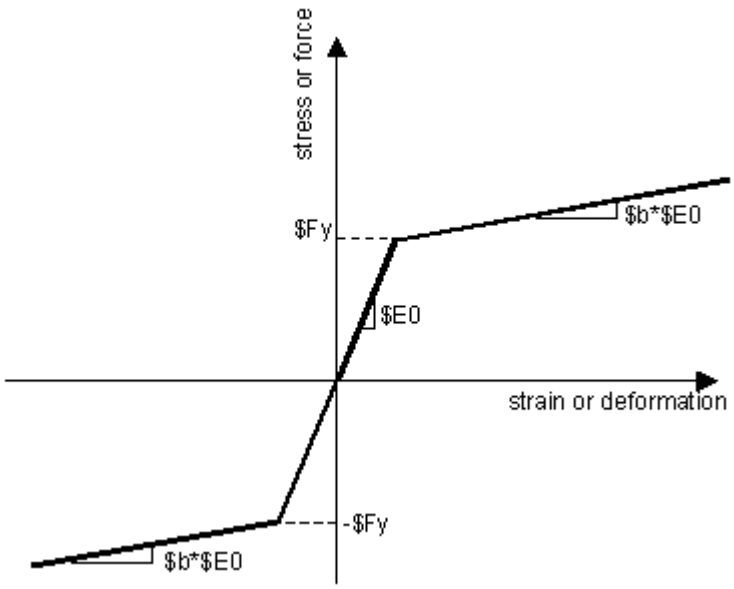
### 2.2.1.2 Χάλυβας :

Χρησιμοποιήθηκε η εντολή :

- **uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b**

| | |
|---|---|
| **$matTag** | Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει το υλικό . |
| **$Fy** | Τάση διαρροής. |
| **$E0** | Αρχική ελαστική εφαπτομένη (και μέτρο ελαστικότητας του υλικού). |
| **$b** | Λόγος του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων μετά τη τάση διαρροής . |

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός υλικού χάλυβα η συμπεριφορά του οποίου ακολουθεί το παρακάτω διάγραμμα




Σχήμα 2.2 Steel01 Material – Υστεριτική συμπεριφορά του μοντέλου το χάλυβα (πηγή Opensees manual [9])

**Παράδειγμα**

**uniaxialMaterial Steel01 3 500000 200000000 0.01**

Με τη παραπάνω εντολή ορίζω ένα υλικό χάλυβα με τάση διαρροής 500 MPα και 200000 GPα και μετελαστικό κλάδο με λόγο το 1 % του αρχικού.

**2.2.1.3Ελαστικό υλικό :**

Χρησιμοποιήθηκε η εντολή :

**uniaxialMaterial Elastic $matTag $E**

**$matTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει το υλικό.

**$E** Εφαπτομένη του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων (και μέτρο ελαστικότητας του υλικού).

Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός ελαστικού υλικού με τις εκάστοτε απαιτούμενες ιδιότητες.

**Παράδειγμα**

**uniaxialMaterial Elastic 4 25000000;**

Με την εντολή αυτή δημιουργούμε ένα υλικό με μέτρο ελαστικότητας 25 GPa και το οποίο προσδιορίζεται από τον αριθμό 4.

**2.2.1 Εντολές προσδιορισμού της διατομής:**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η εντολή του Opensees που ακολουθεί την θεωρία της κατανεμημένης πλαστικότητας με πολυστρωματική θεώρηση. Το Opensees διαθέτει μια ποικιλία διαθέσιμων διατομών των οποίων η ανάλυση δεν είναι αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

**2.2.2.1 Εντολή δημιουργίας της διατομής :**

- **section Fiber $secTag { fiber...**

  **patch...**

  **layer... ... }**

**$sectTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο τη διατομή που δημιουργούμε.

**fiber...** Εντολή που δημιουργεί μια και μοναδική ίνα υλικού.

**patch...** Εντολή που δημιουργεί έναν αριθμό από ίνες μέσα σε ένα γεωμετρικό χώρο.

**layer...** Εντολή που δημιουργεί έναν αριθμό από ίνες κατά μήκος ενός γεωμετρικού τόξου.

**Αναλυτικότερα** :

Για τη δημιουργία μιας και μόνο ίνας υλικού μέσα στη διατομή που κατασκευάζουμε χρησιμοποιούμε την εντολή fiber. Για να το πετύχουμε αυτό δίνουμε τις συντεταγμένες του σημείου στο οποίο θέλουμε να τοποθετήσουμε την ίνα (πχ ράβδος χάλυβα) ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της διατομής μας. Απαραίτητα στοιχεία είναι το εμβαδό της ίνας ,ο ακέραιος αριθμός που θα προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το υλικό της εκάστοτε ίνας καθώς και οι συντεταγμένες της ίνας στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων .

- **fiber $yLoc $zLoc $A $matTag**

**$yLoc** Συντεταγμένη y της διατομής μας (στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων)

**$zLoc** Συντεταγμένη z της διατομής μας (στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων)

**$A** Εμβαδό της διατομής της ίνας.

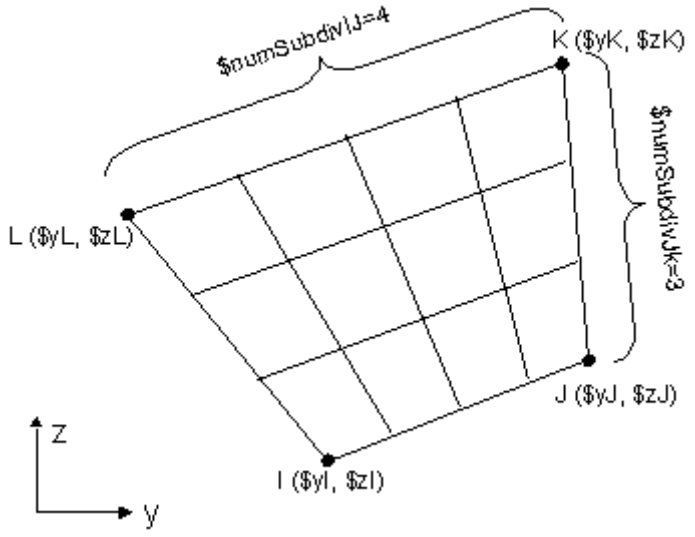
**$matTag** Ακέραιος αριθμός προηγούμενα ορισμένου υλικού

Για την δημιουργία με μία εντολή ενός αριθμού ινών εντός ενός γεωμετρικού χώρου υπάρχουν οι εντολές **patch quad , patch rect , patch circ ,** οι οποίες δημιουργούν ένα τετραπλευρικό , ένα τετραγωνικό και ένα κυκλικό γεωμετρικό χώρο αντίστοιχα. Στη παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί εκτεταμένα μόνο η πρώτη εντολή μιας και αυτή είναι που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του προσομοιώματος.

Με την εντολή **patch quad** ορίζουμε μια τετραπλευρική διατομή (κατ' επέκταση και ορθογωνική ) με βάση τη στρωσιγενή θεώρηση. Για να ορίσουμε αυτή τη διατομή απαραίτητο είναι να ορισθεί το υλικό από το οποίο θα αποτελείται η διατομή (με τη χρήση του μοναδικού ακεραίου αριθμού που το προσδιορίζει) , ο αριθμός των στρώσεων από τις οποίες θα αποτελείται η διατομή (και στις 2 διευθύνσεις ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων), καθώς και οι συντεταγμένες (ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων) των 4 σημείων I ,J ,K ,L που απαιτούνται για να οριστεί το τετράπλευρο.(βλ. Σχήμα 2.3)

- **patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL**

| | |
|---|---|
| **$matTag** | Ακέραιος αριθμός προηγούμενα ορισμένου υλικού. |
| **$numSubdivIJ** | Αριθμός υποδιαιρέσεων (ινών) στην IJ κατεύθυνση. |
| **$numSubdivJK** | Αριθμός υποδιαιρέσεων (ινών) στην JK κατεύθυνση. |
| **$yI $zI** | Συντεταγμένες y και z του I σημείου (τοπικό σύστημα συντεταγμένων). |
| **$yJ $zJ** | Συντεταγμένες y και z του J σημείου (τοπικό σύστημα συντεταγμένων). |
| **$yK $zK** | Συντεταγμένες y και z του K σημείου (τοπικό σύστημα συντεταγμένων). |
| **$yL $zL** | Συντεταγμένες y και z του L σημείου (τοπικό σύστημα συντεταγμένων). |



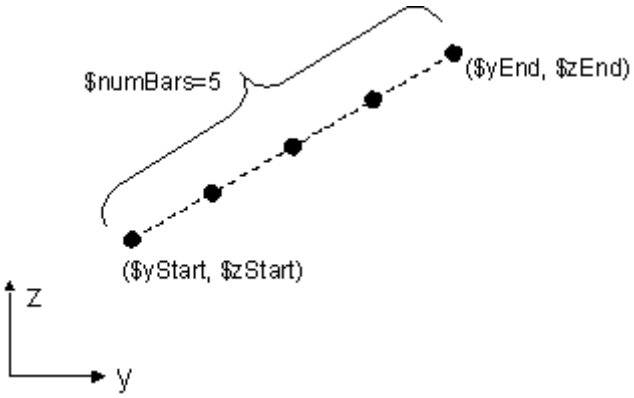

Σχήμα 2.3 Τετραπλευρική διατομή patch quad (πηγή Opensees manual [9])

Για τη δημιουργία με μία εντολή ενός αριθμού ινών (πχ ράβδους οπλισμού) σε ευθεία ή σε κυκλική γραμμή το Opensees διαθέτει τις εντολές **layer straight** και **layer circ** .Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε μόνο η πρώτη και για αυτό το λόγο θα αναλυθεί εκτεταμένα.

Με την εντολή **layer straight** μπορούν να τοποθετηθούν ράβδοι σε ευθεία γραμμή στη διατομή που κατασκευάζεται. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να οριστεί το υλικό από το οποίο θα αποτελείται η διατομή (με τη χρήση του μοναδικού ακεραίου αριθμού που το προσδιορίζει) , ο αριθμός των ινών (πχ ράβδων οπλισμού ) που επιθυμούμε να τοποθετηθούν σε σειρά, το εμβαδό της κάθε ράβδου και τέλος οι συντεταγμένες (ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της διατομής) των 2 ακραίων σημείων της σειράς.

- **layer straight $matTag $numFiber $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd**

| | |
|---|---|
| **$matTag** | Ακέραιος αριθμός προηγούμενα ορισμένου υλικού. |
| **$numFibers** | Αριθμός ινών κατά μήκος της γραμμής. |
| **$areaFiber** | Εμβαδό της κάθε ίνας. |
| **$yStart $zEnd** | Συντεταγμένες y και z της πρώτης ίνας της σειράς (τοπικό σύστημα συντεταγμένων). |
| **$yEnd $zEnd** | Συντεταγμένες y και z της τελευταίας ίνας της σειράς (τοπικό σύστημα συντεταγμένων). |




Σχήμα 2.4 Layer straight (πηγή Opensees manual [9])

**Παράδειγμα :**

```
section Fiber 8 {
   patch quad 1 50 50 -0.15  -0.15    0.15     -0.15    +0.15    +0.15    -0.15 +0.15
   patch quad 1 20 20  -0.20   0.15     0.20     0.15     0.20     0.225   -0.20    0.225
   patch quad 1 20 20  -0.20   -0.15    -0.15    -0.15    -0.15    0.15     -0.20    0.15
   patch quad 1 20 20  -0.20   -0.225  0.20     -0.225  0.20     -0.15    -0.20    -0.15
   patch quad 1 20 20  0.15    -0.15    0.20     -0.15    0.20     0.15     0.15     0.15
   fiber  +0.165 +0.165 0.0002 3
   fiber  +0.165 -0.165 0.0002 3
   layer straight 3 2 0.0002 -0.165 -0.165 -0.165 +0.165
}
```

Με τη παραπάνω εντολή ορίζεται μια διατομή (με αριθμό ''ταυτότητας'' 8) που αποτελείται από ένα κεντρικό τετραγωνικό κομμάτι από το υλικό 1 (πχ σκυρόδεμα όπως ορίστηκε παραπάνω) διαστάσεων 30x30cm ,4 τετραγωνικά κομμάτια επικάλυψης του ίδιου υλικού (ορίζοντας μια διατομή συνολικά 40x45cm) και από 4 ράβδους από το υλικό 3 (πχ χάλυβας όπως ορίστηκε παραπάνω) και εμβαδού 0,0002 $m^2$ στις 4 γωνίες της διατομής εκ των οποίων ράβδων οι 2 ορίστηκαν με την εντολή **fiber** και οι άλλες 2 με την εντολή **layer straight** .

#### 2.2.2.2 Εντολή σύνθεσης διατομών και εντατικών μεγεθών

Με την εντολή αυτή επιτυγχάνω την παραλαβή από τη διατομή που κατασκευάζεται ενός συγκεκριμένου είδους έντασης (πχ στρέψη) μέσω ενός υλικού της επιλογής μου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία της διατομής είναι ο ορισμός ενός υλικού ,η επιλογή ενός μοναδικού νέου αριθμού για την νέα υπό δημιουργία διατομή, η επιλογή του εντατικού μεγέθους που επιθυμώ να προστεθεί στη νέα διατομή καθώς και η ύπαρξη μιας ήδη ορισμένης διατομής.

- **section Aggregator $secTag $matTag1 $dof1 $matTag2 $dof2 ..... <-section $sectionTag>**

| | |
|---|---|
| **$secTag** | Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει τη διατομή με μοναδικό τρόπο |
| **$matTag1 $matTag2 ...** | Αριθμός που προσδιορίζει ένα (ή περισσότερα ) υλικά |
| **$dof1 $dof2 ...** | Το είδος του εντατικού μεγέθους που θα προστεθεί στη διατομή |

Πιθανά εντατικά μεγέθη (και οι συμβολισμοί τους) είναι τα εξής:

P Αξονική δύναμη - παραμόρφωση
Mz Ροπή-καμπυλότητα περί τον τοπικό άξονα z της διατομής
Vy Τέμνουσα δύναμη κατά μήκος του τοπικού άξονα y
My Ροπή-καμπυλότητα περί τον τοπικό άξονα y της διατομής
Vz Τέμνουσα δύναμη κατά μήκος του τοπικού άξονα z
T Στρεπτική δύναμη – παραμόρφωση

**Παράδειγμα**

section Aggregator 104 4 T -section 1

Με την εντολή αυτή δημιουργείται μια νέα διατομή (την 104) με τις ιδιότητες της διατομής 1 και επιπλέον παραλαμβάνει στρέψη με το υλικό 4 (πχ το ελαστικό υλικό που ορίστηκε προηγουμένως).

## 2.3 Εντολές δημιουργίας στοιχείων, συνδεσιμότητας των κόμβων και γεωμετρικός μετασχηματισμός

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των εντολών δημιουργίας των στοιχείων που υποστηρίζει το Opensees πρέπει πρώτα να οριστεί ένα σύστημα μεταφοράς από το τοπικό στο καθολικό σύστημα αξόνων. Το Opensees υποστηρίζει 3 είδη γεωμετρικών μετασχηματισμών (Linear Transformation, P-Delta Transformation,

Corotational Transformation). Στη παρούσα διπλωματική θα αναφερθούμε αναλυτικά σε μία εξ αυτών την **Linear Transformation** .

### 2.3.1Εντολή Linear Transformation :

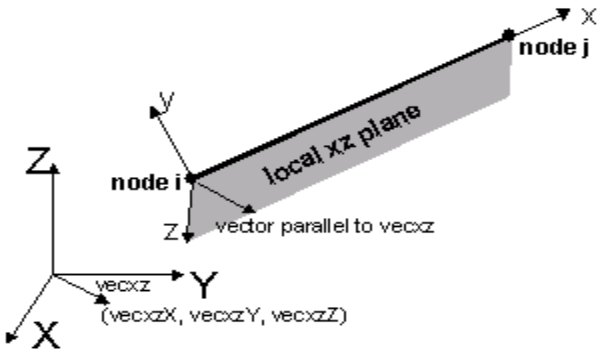
Για ένα προσομοίωμα 3 διαστάσεων η εντολή έχει ως εξής:

- **geomTransf Linear $transfTag $vecxzX $vecxzY $vecxzZ**

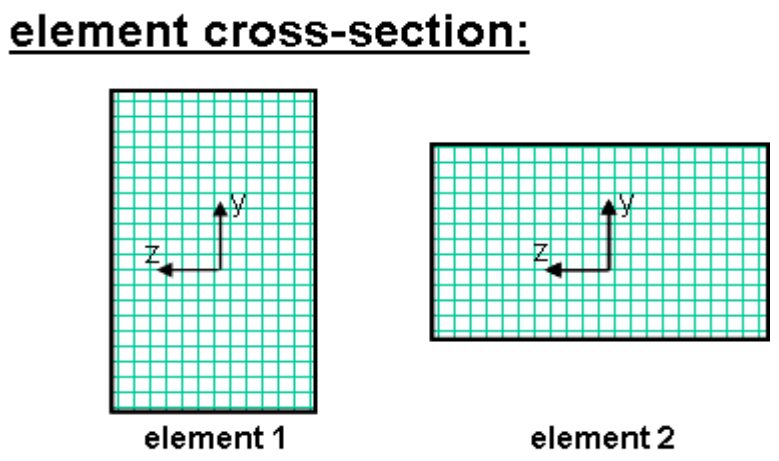
| | |
|---|---|
| **$transfTag** | Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει το μετασχηματισμό από το τοπικό στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. |
| **$vecxzX $vecxzY $vecxzZ** | Οι συνιστώσες X,Y και Z του διανύσματος vecxz. Το διάνυσμα αυτό χρησιμοποιείται για να ορίσει το τοπικό επίπεδο x-z του τοπικού συστήματος συντεταγμένων. Ο τοπικός y άξονας ορίζεται παίρνοντας το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος vecxz και του άξονα x . Αυτές οι συνιστώσες προσδιορίζονται στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων X ,Y ,Z και ορίζουν ένα διάνυσμα το οποίο είναι παράλληλο στο επίπεδο x-z του τοπικού συστήματος συντεταγμένων. |

Το σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου ορίζεται ως εξής:

Ο άξονας x είναι ο άξονας που συνδέει τους 2 κόμβους του στοιχείου. Οι άξονες y και z στη συνέχεια ορίζονται χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα (το vecxz) που βρίσκεται επί ενός επιπέδου που είναι παράλληλο στο τοπικό επίπεδο x-z . Ο τοπικός y άξονας ορίζεται παίρνοντας το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος vecxz και του άξονα x . Η διατομή πρόσκειται στο στοιχείο με τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα συντεταγμένων y-z της διατομής να ταυτίζεται με τους άξονες y-z του στοιχείου .

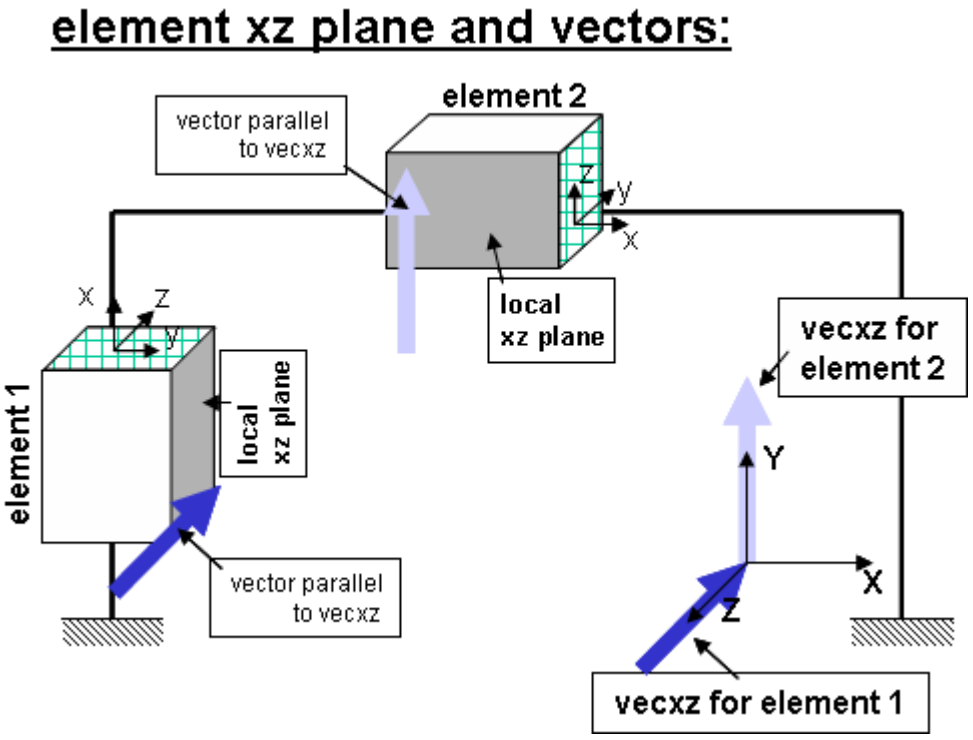



Σχήμα 2.5 (Opensees manual [9])




Σχήμα 2.6 (πηγή Opensees manual)

**Παράδειγμα**




Σχήμα 2.7 (πηγή Opensees manual)

Στοιχείο 1 : tag 1 : vecxZ = zaxis

geomTransf Linear $transfTag 0 0 -1

Στοιχείο 2 : tag 2 : vecxZ = y axis

geomTransf Linear $transfTag 0 1 0

Στο παραπάνω παράδειγμα έχουμε για το στοιχείο 1 τιμές $vecxzX $vecxzY $vecxzZ 0 0 -1 αντίστοιχα γιατί ο άξονας z του τοπικού συστήματος συντεταγμένων έχει ίδια διεύθυνση και αντίθετη φορά με τον άξονα Z του επιλεγμένου καθολικού συστήματος συντεταγμένων. Με ανάλογο τρόπο στο στοιχείο 2 έχουμε τιμές $vecxzX $vecxzY $vecxzZ 0 1 0 αντίστοιχα γιατί ο τοπικός άξονας z της διατομής έχει ίδια διεύθυνση και ίδια φορά με τον άξονα Y του επιλεγμένου καθολικού συστήματος συντεταγμένων.

Στη παρούσα διπλωματική έχει επιλεγεί καθολικό σύστημα συντεταγμένων διαφορετικό από του παραπάνω παραδείγματος ( ο X ταυτίζεται με αυτόν του παραδείγματος , ο Z ταυτίζεται με τον Y του παραδείγματος , και ο Y έχει φορά αντίθετη από τον Z του παραδείγματος).

### 2.3.2 Εντολές δημιουργίας στοιχείων

#### 2.3.2.1 Εντολή δημιουργίας στοιχείου δικτυώματος

Με την εντολή αυτή δημιουργείται ένα στοιχείο δικτυώματος που ενώνει 2 κόμβους. Απαραίτητα στοιχεία για να οριστεί αυτό το στοιχείο είναι ο ορισμός του εμβαδού της διατομής καθώς και το υλικό από το οποίο αποτελείται το στοιχείο.

- **element truss $eleTag $iNode $jNode $A $matTag**

| | |
|---|---|
| **$eleTag** | Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το στοιχείο δικτυώματος . |
| **$iNode $jNode** | Ακραίοι κόμβοι του στοιχείου . |
| **$A** | Εμβαδό διατομής του στοιχείου. |
| **$matTag** | Ακέραιος αριθμός που αντιστοιχεί στο υλικό του υπό κατασκευή στοιχείου. |

**Παράδειγμα**

element truss 2 1 3 0.16 3

Με τη παραπάνω εντολή κατασκευάζουμε ένα στοιχείο δικτυώματος με αριθμό ‘’ταυτότητας’’ 2 που ενώνει τους κόμβους 1 και 3 ,έχει εμβαδό 0.16 $cm^2$ και είναι κατασκευασμένο από το υλικό 3.

#### 2.3.2.2 Εντολή δημιουργίας ελαστικού στοιχείου δοκού-υποστυλώματος

Με την εντολή αυτή δημιουργούμε ένα ελαστικό στοιχείο δοκού. Η εντολή διαφέρει ανάλογα με τις διαστάσεις του φορέα. Για την δημιουργία ενός τέτοιου στοιχείου δεν είναι απαραίτητο νωρίτερα να έχουμε ορίσει κάποιο υλικό ή κάποια

διατομή. Αντίθετα επιβάλλεται να ορίσουμε το εμβαδόν της διατομής ,τα μέτρα διάτμησης και ελαστικότητας καθώς και τις ροπές αδράνειας περί τους 2 τοπικούς άξονες της διατομής (η μερικά εξ αυτών ανάλογα με τον αριθμό διαστάσεων του προσομοιώματός μας).

Για προσομοίωμα 2 διαστάσεων:

- **element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $Iz $transfTag**

**$eleTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το στοιχείο.

**$iNode $jNode** Ακραίοι κόμβοι του στοιχείου .

**$A** Εμβαδόν διατομής του στοιχείου .

**$E** Μέτρο Ελαστικότητας του στοιχείου .

**$Iz** Ροπή αδράνειας περί τον τοπικό άξονα z.

**$transfTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο τον γεωμετρικό μετασχηματισμό που θέλουμε να ακολουθεί το στοιχείο .

**Παράδειγμα**

element elasticBeamColumn 15 5 6 0,16 200000000 0,00213 1

Με τη παραπάνω εντολή δημιουργείται ένα ελαστικό στοιχείο 2 διαστάσεων με ‘’ταυτότητα’’ 15, που ενώνει τους κόμβους 5 και 6, με εμβαδό διατομής 0,16 $m^2$,μέτρο ελαστικότητας 200 GPa ροπή αδράνειας 0,00213 $m^4$ και γεωμετρικό μετασχηματισμό 1.

Ομοίως για προσομοίωμα 3 διαστάσεων :

- **element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $G $J $Iy $Iz $transfTag**

**$eleTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το στοιχείο.

**$iNode $jNode** Ακραίοι κόμβοι του στοιχείου .

**$A** Εμβαδόν διατομής του στοιχείου .

**$E** Μέτρο Ελαστικότητας του στοιχείου .

**$G** Μέτρο Διάτμησης του στοιχείου .

**$J** Στρεπτική Ροπή Αδράνειας του στοιχείου.

**$Iz** Ροπή αδράνειας περί τον τοπικό άξονα z.

**$Iy** Ροπή αδράνειας περί τον τοπικό άξονα y.

**$transfTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο τον γεωμετρικό μετασχηματισμό που θέλουμε να ακολουθεί το στοιχείο .

**Παράδειγμα**

element elasticBeamColumn 19 8 9 0.16 200000000 125000000 0.00426 0,00213 0.00213 3

Με τη παραπάνω εντολή δημιουργείται ένα ελαστικό στοιχείο 2 διαστάσεων με ‘’ταυτότητα’’ 19, που ενώνει τους κόμβους 8 και 9, με εμβαδό διατομής 0.16 $cm^2$,μέτρο ελαστικότητας 200 GPa, σταθερά διάτμησης 125000000, ροπές αδράνειας 0.00213 $m^4$ ως προς τους 2 άξονες και γεωμετρικό μετασχηματισμό 3.

### 2.3.2.3 Εντολή δημιουργίας μη γραμμικού στοιχείου δοκού-υποστυλώματος

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός μη γραμμικού στοιχείου δοκού-υποστυλώματος με κατανεμημένη πλαστιμότητα. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη προηγουμένως ορισμένων υλικών και διατομών.

- **element nonlinearBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts $secTag$transfTag**

**$eleTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το στοιχείο.

**$iNode $jNode** Ακραίοι κόμβοι στοιχείου.

**$numIntgrPts** Αριθμός σημείων ολοκλήρωσης κατά μήκος του στοιχείου.

**$secTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει μια προηγουμένως ορισμένη διατομή.

**$transfTag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει έναν προηγουμένως ορισμένο γεωμετρικό μετασχηματισμό.

**Παράδειγμα**

element nonlinearBeamColumn 1 1 101 10 104 5

Με τη παραπάνω εντολή κατασκευάζεται ένα μη γραμμικό στοιχείο κατανεμημένης πλαστιμότητας με ''ταυτότητα'' 1 , που ενώνει τους κόμβους 1 και 101 ,κατά μήκος του οποίου γίνονται 10 ολοκληρώσεις , η διατομή του είναι η 104 και ο γεωμετρικός μετασχηματισμός του είναι ο 5.

## 2.4 Τοποθέτηση των φορτίων του προσομοιώματος

### 2.4.1 Εντολές δημιουργίας μιας χρονοϊστορίας

Οι εντολές αυτές δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα ''αντικείμενο'' χρονοϊστορίας το οποίο προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου t και του φορτικού συντελεστή **λ** που εφαρμόζεται στα φορτία.Το Opensees έχει μια μεγάλη ποικιλία χρονοϊστοριών και οι οποίες είναι οι εξής :

a) Constant TimeSeries
b) Linear TimeSeries
c) Trigonometric TimeSeries
d) Triangular TimeSeries
e) Rectangular TimeSeries
f) Pulse TimeSeries
g) Path TimeSeries
h) PeerMotion
i) PeerNGAMotion

Από τα παραπάνω είδη χρονοϊστοριών στη παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθούν οι Linear TimeSeries και οι Path TimeSeries μιας και αυτές χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του αριθμητικού προσομοιώματος.

#### 2.4.1.1 Linear TimeSeries

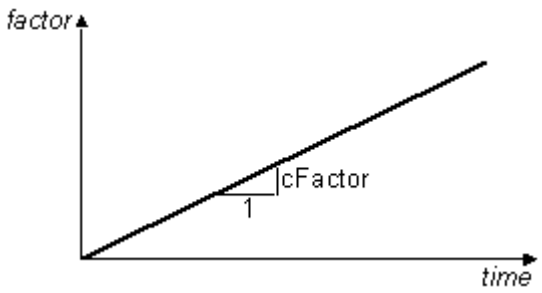
Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ''αντικειμένου'' χρονοϊστορίας όπου ο φορτικός συντελεστής εφαρμόζεται με γραμμική αναλογία ως προς τον χρόνο

$$\lambda = f(t) = cFactor * t$$

- **timeSeries Linear $tag? <-factor $cFactor>**

**$tag** Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το ''αντικείμενο'' της χρονοϊστορίας

**$cFactor** Ο γραμμικός συντελεστής (προαιρετικός, προεπιλογή c=1.0)




Σχήμα 2.8 (πηγή Opensees manual [9])

### 2.4.1.2 Path TimeSeries

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ''αντικειμένου'' χρονοϊστορίας όπου η σχέση μεταξύ του φορτικού συντελεστή και του χρόνου προσδιορίζεται από το χρήστη σαν μια σειρά από διακριτά σημεία στο δισδιάστατο χώρο (φορτικός συντελεστής , χρόνος) .Τα διακριτά αυτά σημεία μπορεί να προέρχονται από ένα αρχείο. Εάν οι χρόνοι από το αρχείο δεν ταιριάζουν με τους φορτικούς συντελεστές τότε χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα σημεία .Υπάρχουν πολλοί τρόποι να προσδιοριστεί μια Path TimeSeries , παρακάτω θα αναφερθεί αυτός που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία.

- **timeSeries Path $tag -dt $dT -filePath $filePath <-factor $cFactor>**

| | |
|---|---|
| **$tag** | Μοναδικός ακέραιος αριθμό που προσδιορίζει τη χρονοϊστορία . |
| **$filePath** | Αρχείο που περιέχει τους φορτικούς συντελεστές **.** |
| **$dT** | Χρόνος παρεμβολής μεταξύ των σημείων. |
| **$cFactor** | προαιρετικό , ένας συντελεστής (παράγοντας) για να πολλαπλασιάζονται οι φορτικοί συντελεστές (προεπιλογή = 1.0). |

### 2.4.2 Εντολή pattern Plain

Η εντολή αυτή δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα συνδυασμό φορτίσεων και να τον επιβάλλει στο προσομοίωμα είτε σαν φορτίο είτε σαν συνοριακή δέσμευση ενός σημείου.

- **pattern Plain $patternTag $tsTag { load...**

  **eleLoad...**

**sp...**

**... }**

| | |
|---|---|
| **$patternTag** | Ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο το φορτικό συνδυασμό. |
| **$tsTag** | Το είδος της χρονοϊστορίας που θα χρησιμοποιηθεί (στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο η γραμμική –Linear TimeSeries- και η Path TimeSeries). |
| **load...** | Εντολή για φόρτιση κόμβου. |
| **eleLoad ...** | Εντολή που δημιουργεί φόρτιση σε ένα ή περισσότερα στοιχεία. |
| **sp ...** | Εντολή που δημιουργεί συνοριακή δέσμευση . |

Πιο αναλυτικά :

Για την εισαγωγή σημειακού επικόμβιου φορτιού χρησιμοποιούμε την εντολή

- **load $nodeTag (ndf $LoadValues)**

| | |
|---|---|
| **$nodeTag** | Αριθμός κόμβου στον οποίο θα επιβληθεί το φορτίο |
| **$loadvalues** | Αριθμός Βαθμών Ελευθερίας που έχει το προσομοίωμα |

**Παράδειγμα**

pattern Plain 2 Linear { load 101 100 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0}

Με την παραπάνω εντολή φορτίζουμε τον κόμβο 101 του τρισδιάστατου φορέα μας με δύναμη 100 KN κατά τον Βαθμό Ελευθερίας x και 0 κατά τους άλλους 5.

Για την εισαγωγή κατανεμημένου φορτιού πάνω σε ένα στοιχείο της κατασκευής (3 διαστάσεων ) χρησιμοποιείται η εντολή

- **eleLoad -ele $eleTag1 <$eleTag2 ....> -type -beamUniform $Wy $Wz <$Wx>**

| | |
|---|---|
| **$eleTag1 $eleTag2 ...** | Μοναδικός ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει ένα ήδη υπάρχον στοιχείο του προσομοιώματος . |

| | |
|---|---|
| **$Wx** | Τιμή κατανεμημένου φορτίο που ασκείται κατά μήκος του στοιχείου. |
| **$Wy** | Τιμή του κατανεμημένου φορτίου που ασκείται κατά μήκος του τοπικού άξονα y . |
| **$Wz** | Τιμή του κατανεμημένου φορτίου που ασκείται κατά μήκος του τοπικού άξονα z. |

**Παράδειγμα**

pattern Plain 1 Linear {eleLoad -ele 1 -type -beamUniform 0 0 -6.25 }

Με τη παραπάνω εντολή εισάγεται στο στοιχείο 1 ένα κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του άξονα x με τιμή 6,25

**Σημείωση** : Υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής κατανεμημένου φορτίου και σε προσομοίωμα 2 διαστάσεων αλλά δεν θα αναλυθεί στη παρούσα διπλωματική.

Τέλος για την εισαγωγή συνοριακής δέσμευσης χρησιμοποιείται η εντολή

- **sp $nodeTag $dofTag $dofValue**

| | |
|---|---|
| **$nodeTag** | Ο αριθμός του κόμβου στον οποίο ασκείται η συνοριακή δέσμευση . |
| **$dofTag** | Ο Βαθμός Ελευθερίας στον οποίον επιβάλλεται η συνοριακή δέσμευση (από 1 έως ndf , ανάλογα με το προσομοίωμά μας). |
| **$dofValue** | Τιμή αναφοράς , είναι η χρονοϊστορία που παρέχει το φορτικό συντελεστή.( ο φορτικός συντελεστής επί την τιμή αναφοράς είναι η δέσμευση που τελικά ασκείται στον κόμβο.) |

**Σημείωση :** Η εισαγωγή συνοριακής δέσμευσης δεν χρησιμοποιήθηκε για αυτό δεν θα αναλυθεί περεταίρω.

### 2.4.3 Pattern UniformExcitation

Η εντολή αυτή επιτρέπει στο χρήστη να επιβάλλει μια χρονοϊστορία επιτάχυνσης σε ένα προσομοίωμα, η οποία θα ασκείται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι φορτικοί συντελεστές ασκούνται στα φορτία και στις συνοριακές δεσμεύσεις. Με αυτή την εντολή επομένως μπορούμε να επιβάλουμε στο προσομοίωμά μας χρονοϊστορίες επιταχύνσεων από σεισμούς που έχουν συμβεί

και από τους οποίους έχουμε καταγεγραμμένες τις αποκρίσεις τους σε βάσεις δεδομένων.

- **pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag <-vel0 $ver0>**

**$patternTag** Μοναδικός αριθμός που προσδιορίζει τη φόρτιση (σε σχέση με άλλες φορτίσεις ).

**$dir** Κατεύθυνση προς την οποία ασκείται η εδαφική κίνηση (1 - αντιστοιχεί στο καθολικό άξονα X , 2 - αντιστοιχεί στον καθολικό άξονα Y και 3 – αντιστοιχεί στον καθολικό άξονα Z).

**$tsTag** ‘’ταυτότητα του αντικειμένου TimeSeries που ορίζει την χρονοϊστορία των επιταχύνσεων (έχει χρησιμοποιηθεί αρχείο επιταχύνσεων από βάση δεδομένων κατά τη δημιουργία του αντικειμένου TimeSeries).

**vel0** Προαιρετική αρχική ταχύτητα, προεπιλογή=0.0 .

**Παράδειγμα**

```
set IDloadTag 400;                    # load tag

set dt 0.01;                  # time step for input ground motion

set GMfact 0.51

set AccelSeries "Series -dt $dt -filePath $GMfile -factor  $GMfact";

pattern UniformExcitation  $IDloadTag  1 -accel  $AccelSeries  ;
```

Οι παραπάνω εντολές έχουν προσδιορίσει την φόρτιση κατά μοναδικό τρόπο με τον αριθμό 400 έχουν ορίσει βήμα του Path TimeSeries το dt 0.01 sec ,έχουν ορίσει πολλαπλασιαστή στην εδαφική κίνηση 0.51 , φορά εδαφικής κίνησης αυτή του καθολικού άξονα X και χρονοϊστορία αυτή που περιγράφεται στο αρχείο GMfile.

## 2.5 Τοποθέτηση των καταγραφέων απόκρισης του προσομοιώματος

Το Opensees διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία καταγραφέων των αποκρίσεων του προσομοιώματος. Στη παρούσα διπλωματική θα αναφερθούμε στους καταγραφείς κόμβων , στοιχείων και διαφορικής μετατόπισης 2 κόμβων ως προς την μεταξύ τους απόσταση (drift) .

### 2.5.1 Εντολή Node Recorder

Με την εντολή αυτή δημιουργείται ένας καταγραφέας που καταγράφει την απόκριση ενός αριθμού κόμβων σε κάθε βήμα της ανάλυσης .

- **recorder Node <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-time> <-node $node1 $node2 ...> <-nodeRange $startNode $endNode> -dof ($dof1 $dof2 ...) $respType'**

| | |
|---|---|
| **$fileName** | Όνομα του αρχείου προορισμού στο οποίο καταγράφεται η απόκριση. Το αρχείο προορισμού έχει μορφοποίηση είτε xml (-xml επιλογή), κειμένου (-file επιλογή) ή δυαδική (-binary επιλογή) . |
| **-time** | Χρησιμοποιώντας αυτήν την επιλογή γίνεται καταγραφή και του χρόνου σε κάθε βήμα της απόκρισης , (προαιρετικό , η προεπιλεγμένη διαδικασία το παραλείπει) . |
| **$node1 $node2 ..** | Αριθμοί των κόμβων των οποίων η απόκριση καταγράφεται . |
| **$startNode $endNode ..** | Αριθμοί του πρώτου και του τελευταίου κόμβου των οποίων οι αποκρίσεις θα καταγράφονται (προαιρετικό , προεπιλογή : να παραλείπεται). |
| **$dof1 dof2 ...** | Οι καθορισμένοι Βαθμοί Ελευθερίας των οποίων οι αποκρίσεις καταγράφονται. |
| **$respType** | Το είδος της απόκρισης που θα καταγράφεται. Τα είδη της απόκρισης είναι τα εξής : |

| | |
|---|---|
| **disp** | μετατόπιση |
| **vel** | ταχύτητα |
| **accel** | επιτάχυνση |
| **incrDisp** | Προσαυξητική μετατόπιση |
| **"eigen i"** | Ιδιοδιάνυσμα για την ιδιομορφή i |
| **reaction** | Επικόμβια αντίδραση |

### 2.5.2 Εντολή Element Recorder

Με την εντολή αυτή δημιουργείται ένας καταγραφέας που καταγράφει την απόκριση ενός αριθμού στοιχείων σε κάθε βήμα της ανάλυσης.

- **recorder Element <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-time> <-ele ($ele1 $ele2 ...)> <-eleRange $startEle $endEle> $arg1 $arg2 ...**

**$fileName** Όνομα του αρχείου προορισμού στο οποίο καταγράφεται η απόκριση. Το αρχείο προορισμού έχει μορφοποίηση είτε xml (-xml επιλογή), κειμένου (-file επιλογή) ή δυαδική (-binary επιλογή) .

**time** Χρησιμοποιώντας αυτήν την επιλογή γίνεται καταγραφή και του χρόνου σε κάθε βήμα της απόκρισης , (προαιρετικό , η προεπιλεγμένη διαδικασία το παραλείπει) .

**$ele1 $ele2 ..** Αριθμοί των στοιχείων των οποίων η απόκριση καταγράφεται .

**$startEle $endEle ..** Αριθμοί του πρώτου και του τελευταίου στοιχείου των οποίων οι αποκρίσεις θα καταγράφονται (προαιρετικό , προεπιλογή : να παραλείπεται).

**$arg1 $arg2 ...** Το είδος της απόκρισης που επιθυμούμε και εάν αυτό θα γίνει σε επίπεδο στοιχείου ή σε επίπεδο διατομής. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι οι παρακάτω:

Στο επίπεδο του στοιχείου οι διαθέσιμες από το Opensees επιλογές είναι

α) **globalForce** : Καταγράφονται τα εντατικά μεγέθη του στοιχείου στο καθολικό σύστημα

β) **localForce** : Καταγράφονται τα εντατικά μεγέθη του στοιχείου στο τοπικό σύστημα

Εάν επιθυμούμε η απόκριση να γίνει στο επίπεδο της διατομής τότε χρησιμοποιούμε την έκφραση

- **section $secNum $secResponse**

  **$secNum** Αριθμός του σημείου ολοκλήρωσης στο οποίο επιθυμούμε να γίνει η καταγραφή.
  **$secResponse** Το είδος της απόκρισης που θα καταγράφεται.

  Τα πιθανά είδη απόκρισης είναι τα εξής :

  **force** Δυνάμεις που αναπτύσσονται στη διατομή
  **deformation** Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη διατομή
  **stiffness** Δυσκαμψία της διατομής
  **strainStress** Τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη διατομή

**Σημείωση :** Κατά τον ορισμό των στοιχείων και των κόμβων των οποίων θα γίνεται η καταγραφή (στις εντολές Node Recorder και Element Recorder ) θα πρέπει να επιλέγεται είτε μεμονωμένος ορισμός είτε ομαδικός (**range)** κατά τον οποίον ζητείται αρχικός και τελικός κόμβος – στοιχείο, όχι και τα 2 ταυτόχρονα.

### 2.5.3 Εντολή Drift Recorder

Με την εντολή αυτή δημιουργείται ένας καταγραφέας που καταγράφει τον λόγο της διαφορικής μετατόπισης 2 κόμβων ως προς την μεταξύ τους απόσταση (drift) σε κάθε βήμα της ανάλυσης.

- **Recorder Drift <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-time> -iNode $inode1 $inode2 ... -jNode $jnode1 $jnode2 ... -dof $dof1 $dof2 ... -perpDirn $perpDirn1 $perpDirn2 ...**

| | |
|---|---|
| **$fileName** | Όνομα του αρχείου προορισμού στο οποίο καταγράφεται η απόκριση. Το αρχείο προορισμού έχει μορφοποίηση είτε xml (-xml επιλογή), κειμένου (-file επιλογή) ή δυαδική (-binary επιλογή) . |
| **-time** | Χρησιμοποιώντας αυτήν την επιλογή γίνεται καταγραφή και του χρόνου σε κάθε βήμα της απόκρισης , (προαιρετικό , η προεπιλεγμένη διαδικασία το παραλείπει) . |
| **$inode1 $inode2 ...** | Αριθμοί των i – κόμβων των οποίων το drift καταγράφεται. |
| **$jnode1 $jnode2 ...** | Αριθμοί των j – κόμβων των οποίων το drift καταγράφεται. |
| **$dof1 dof2 ...** | Εύρος των Βαθμών Ελευθερίας των οποίων το drift καταγράφεται. Σωστό εύρος είναι από 1 έως ndf (Αριθμός Βαθμών Ελευθερίας). |
| **$perpDirn1 $perpDirn2** | Εφαπτόμενες διευθύνσεις στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων (1=X, 2=Y, 3=Z). Απαιτείται για να υπολογίζεται το μήκος μεταξύ των κόμβων των οποίων το drift καταγράφεται. |

**Παράδειγμα :**

recorder Element -xml DataTriorofo/FBeam90.out -time –ele 90 globalForce;

```
recorder Element -xml DataTriorofo/ForceColSec10.out -time -ele 1 section 10 force;

recorder Drift -xml DataTriorofo/2Drift.out -time -iNode 101 -jNode 201 -dof 1   -
perpDirn 3 ;

recorder Node -xml DataTriorofo/2D1Free.out -time -node 201  -dof 1 disp;
```

Παραπάνω παρατίθενται παραδείγματα για όλα τα ήδη των καταγραφέων που αναλύθηκαν . Σε όλα τα παραδείγματα οι καταγραφείς θα αποθηκεύονται στο φάκελο DataTriorofo. Στο πρώτο παράδειγμα έχουμε έναν καταγραφέα για τη δοκό με αριθμό 90 , οι αποκρίσεις της οποία θα καταγράφονται στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Στο δεύτερο παράδειγμα έχουμε έναν καταγραφέα που αναφέρεται στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στη $10^{η}$ τομή του στοιχείου 1. Στο τρίτο παράδειγμα καταγράφεται το drift μεταξύ των κόμβων 101 και 201 και η εφαπτόμενη διεύθυνση είναι η Z του καθολικού συστήματος των συντεταγμένων. Τέλος στο τέταρτο παράδειγμα καταγράφεται η απόκριση της μετατόπισης του κόμβου 201 κατά τον Βαθμό Ελευθερίας 1 (καθολική διεύθυνση X )

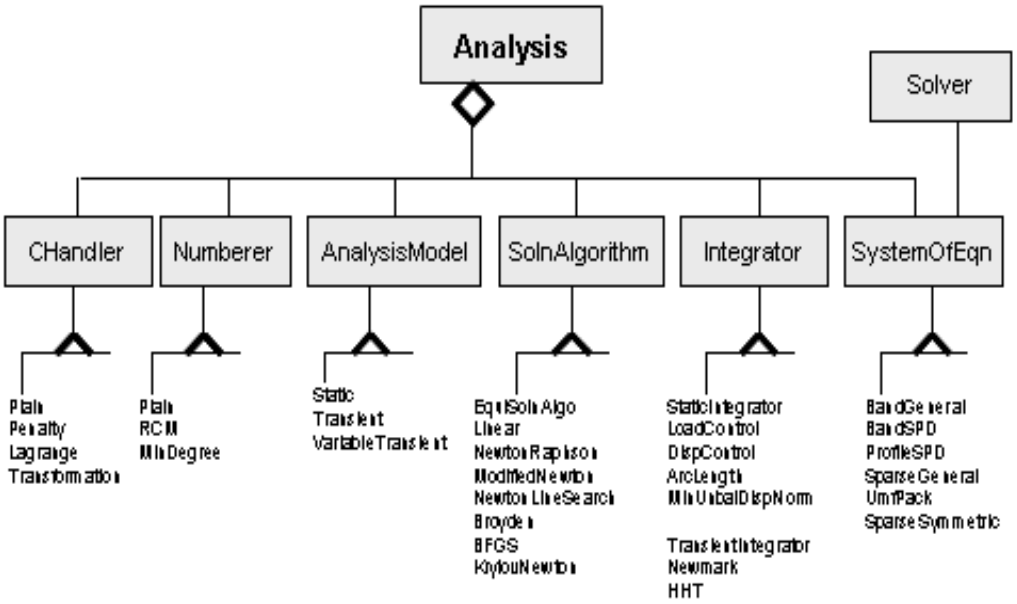
## 2.6 Εντολές για τον προσδιορισμό της Ανάλυσης του προσομοιώματος

Αφού έχει οριστεί το προσομοίωμα και οι καταγραφείς του, το επόμενο (και τελευταίο) βήμα του χρήστη είναι να ορίσει στο Opensees το είδος της ανάλυσης που επιθυμεί να πραγματοποιήσει και όλες τις επιμέρους λεπτομέρειες που απαιτούνται .

### 2.6.1 Συνιστώσες προσδιορισμού της Ανάλυσης

Η ανάλυση για να προσδιοριστεί και να πραγματοποιηθεί πρέπει να οριστούν από το χρήστη 6 συνιστώσες της. Αυτές , μαζί με το τελικό είδος της ανάλυσης ,είναι που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο αυτή θα επιβληθεί στο προσομοίωμά μας. Οι συνιστώσες αυτές είναι οι παρακάτω :

1. **ConstraintHandler –** Καθορίζει πώς το πρόγραμμα χειρίζεται τις συνοριακές συνθήκες και τις επιβαλλόμενες μετατοπίσεις
2. **DOF_Numberer –** Προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ των αριθμών των εξισώσεων ισορροπίας και των βαθμών ελευθερίας.
3. **Integrator –** καθορίζει το βήμα για χρόνο t+dt
4. **SolutionAlgorithm** – Καθορίζει την ακολουθία βημάτων που απαιτούνται για να λυθεί η μη γραμμική εξίσωση στο εκάστοτε χρονικό βήμα.
5. **SystemOfEqn/Solver –** Μέσα στον αλγόριθμο επίλυσης, καθορίζει πώς να αποθηκεύει και να επιλύει τα συστήματα των εξισώσεων στην ανάλυση
6. **Convergence Test –** Καθορίζει πότε έχει επιτευχθεί σύγκλιση




Σχήμα 1.9 (πηγή Opensees manual)

Παρακάτω θα αναφερθούν επιγραμματικά όλες οι πιθανές επιλογές για καθεμία από τις παραπάνω 6 συνιστώσες της ανάλυσης

1 ) **ConstraintHandler**

Οι 4 πιθανές επιλογές είναι :

a) Plain Constraints
b) Lagrange Multipliers
c) Penalty Method
d) Transformation Method

2 ) **DOF_Numberer**

Οι 2 πιθανές επιλογές είναι :

a) Plain Numberer
b) Reverse Cuthill-McKee Numberer
c) Alternative_Minimum_Degree Numberer

3 ) **Integrator**

Σε αυτή τη περίπτωση οι επιλογές διαφέρουν ανάλογα με το είδος της ανάλυσης.

Για **στατική ανάλυση** έχουμε 4 επιλογές

a) Load Control
b) Displacement Control
c) Minimum Unbalanced Displacement Norm
d) Arc-Length Control

Για **δυναμική ανάλυση** έχουμε 5 επιλογές

a) Central Difference
b) Newmark Method
c) Hilber-Hughes-Taylor Method
d) Generalized Alpha Method
e) TRBDF2

4 ) **SolutionAlgorithm**

Οι 7 πιθανές επιλογές είναι οι εξής :

a) Linear Algorithm
b) Newton Algorithm
c) Newton with Line Search Algorithm
d) Modified Newton Algorithm
e) Krylov-Newton Algorithm
f) BFGS Algorithm
g) Broyden Algorithm

2 ) **SystemOfEqn/Solver**

Οι 7 πιθανές επιλογές είναι οι εξής :

a) BandGeneral SOE
b) BandSPD SOE
c) ProfileSPD SOE
d) SuperLU SOE
e) UmfPack SOE
f) SparseSYM SOE
g) Mumps

6 ) **Convergence Test**

Οι 6 πιθανές επιλογές είναι οι εξής :

a) Norm Unbalance Test
b) Norm Displacement Increment Test
c) Energy Increment Test
d) Relative Norm Unbalance Test
e) Relative Norm Displacement Increment Test
f) Relative Energy Increment Test

### 2.6.2. Εντολή analysis Command

Αφού έχουν οριστεί και προσδιοριστεί πλήρως οι 6 αυτές συνιστώσες στο Opensees, απομένει να οριστεί , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω , και το είδος της ανάλυσης με την εντολή **analysis Command.**

- **analysis analysisType?**

**$analysisType** Αναφέρεται στο είδος της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί Το Opensees δίνει την δυνατότητα 3 ειδών αναλύσεων:

1. **Static** – Για στατική ανάλυση
2. **Transient** – Για δυναμική ανάλυση με σταθερό χρονικό βήμα
3. **Variable Transient** – Για δυναμική ανάλυση με μεταβλητό χρονικό βήμα

### 2.6.3 Εντολή Analyse Command

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση (αφού πρώτα έχουν διευκρινιστεί το είδος της ανάλυσης και οι συνιστώσες που καθορίζουν τις λεπτομέρειές της.)

- **analyze $numIncr <$dt> <$dtMin $dtMax $Jd>**

**$numIncr** Αριθμός των βημάτων στα οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση.

**$dt** t Τιμή αύξησης του χρονικού βήματος. Απαιτείται στην δυναμική ανάλυση με μεταβλητό χρονικό βήμα.

**$dtMin $dtMax** Ελάχιστο και μέγιστο χρονικό βήμα. Απαιτείται στην δυναμική ανάλυση με μεταβλητό χρονικό βήμα.

**$Jd** Αριθμός ολοκληρώσεων που επιθυμεί ο χρήστης και σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Η δυναμική ανάλυση θα αλλάξει το εν χρήσει χρονικό βήμα εάν η τελευταία ανάλυση απαιτήσει λιγότερες ή περισσότερες ολοκληρώσεις για να επιτευχθεί η σύγκλιση.

### 2.6.4 Εντολή eigen

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί ιδιομορφική ανάλυση του προσομοιώματός μας.

- **eigen $numEigenvalues**

**$numEigenvalues** Αριθμός ιδιομορφών που απαιτούνται.

### 2.6.5 Εντολή Απόσβεσης Rayleigh

Η εντολή αυτή χρησιμοποείται για να ορίσει απόσβεση στους ήδη προϋπάρχοντες και ορισμένους κόμβους και στοιχεία. Στο Opensees to μητρώο απόσβεσης C ορίζεται σαν ένας συνδυασμός αναλογικός των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας σύμφωνα με την παρακάτω σχέση **.** C = $alphaM * M + $betaK * Kcurrent +$betaKinit * Kinit + $betaKcomm * KlastCommit .

- **rayleigh $alphaM $betaK $betaKinit $betaKcomm**

| | |
|---|---|
| **$alphaM** | Συντελεστής του μητρώου μάζας |
| **$betaK** | Συντελεστής του παρόντος μητρώου δυσκαμψίας. |
| **betaKinit** | Συντελεστής του αρχικού μητρώου δυσκαμψίας. |
| **$betaKcomm** | Συντελεστής του Μητρώου δυσκαμψίας του τελευταίου πραγματοποιημένου βήματος της ανάλυσης . |

### 2.6.6 Εντολή wipe

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για να καθαρίζει την μνήμη του προγράμματος από όλα τα έως τότε δημιουργημένα στοιχεία , προσομοιώματα ή αναλύσεις .

# Κεφάλαιο 3

## ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΥΞΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση (IDA – Incremental Dynamic Analysis ) είναι μία μέθοδος η οποία αναδείχθηκε σε διάφορες μορφές με στόχο την διαρκώς καλύτερη αποτίμηση της συμπεριφοράς δομικών έργων υπό την επίδραση σεισμικών φορτίων και εντάσεων. Η διαδικασία της μεθόδου περιλαμβάνει αρχικά την κατασκευή ενός δομικού προσομοιώματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και εν συνεχεία την υποβολή αυτού του προσομοιώματος σε χρονοϊστορίες (κατά κύριο λόγο) επιταχύνσεων σεισμών που έχουν ήδη συμβεί και των οποίων οι καταγραφές υπάρχουν .Οι χρονοϊστορίες αυτές κλιμακώνονται σε διάφορα επίπεδα έντασης και από τις αποκρίσεις του προσομοιώματος κατασκευάζονται καμπύλες με παραμέτρους τις εκάστοτε αποκρίσεις συγκριτικά με τα αντίστοιχα επίπεδα έντασης .

### 3.1 Εισαγωγή

Η ολοένα και αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν καταστήσει δυνατή την χρήση πιο αποτελεσματικών ,από άποψη ακρίβειας, αλλά και ταυτόχρονα πιο δαπανηρών σε υπολογιστικούς πόρους μεθόδων ανάλυσης των δομικών κατασκευών. Έτσι από την ελαστική στατική ανάλυση περάσαμε στην δυναμική ελαστική ανάλυση , την μη γραμμική στατική ανάλυση και φτάσαμε στην μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Αναπτύχθηκαν λοιπόν διάφορες μέθοδοι όπως η non linear static Pushover (SPO) ή αυτή του φάσματος ικανότητας της κατασκευής. Αυτές μέσα από τη κατάλληλη κλιμάκωση της στατικής εντατικής εικόνας την κατασκευής δημιουργούσαν μια ‘’συνεχή’’ εικόνα μέσα στην οποία μελετάται ολόκληρο το εύρος της δομικής συμπεριφοράς της υπό εξέτασης κατασκευής , από την διαρροή μέχρι την τελική κατάρρευση , επηρεάζοντας σημαντικά την κατανόησή μας για την συμπεριφορά της.

Γίνεται ,επομένως , εύκολα κατανοητό, ότι από μία και μοναδική ανάλυση μια χρονοϊστορίας και της επίδρασης της επάνω σε μια κατασκευή μπορούμε αναλογικά να οδηγηθούμε σε μια προσαυξητική ανάλυση όπου το σεισμικό φορτίο κλιμακώνεται . Η αρχική ιδέα διατυπώθηκε στις αρχές του 1977 από τον Bertero [20] και έκτοτε έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για πολλούς μελετητές [20] . Με την πάροδο των χρόνων η Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση καθιερώθηκε ως μία τελευταίας τεχνολογίας μέθοδος για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας μιας κατασκευής και η χρήση της είναι ευρεία σε παγκόσμιο επίπεδο. Σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης είναι μεταξύ

άλλων η καλύτερη κατανόηση α) του εύρους της απόκρισης και των απαιτήσεων μια κατασκευής σε κάθε πιθανό εύρος εδαφικής σεισμικής καταπόνησης, β) των δομικών επιπλοκών σε σπανιότερα επίπεδα σεισμικής έντασης αλλά και γ) των αλλαγών στη φύση της απόκρισης της κατασκευής καθώς η ένταση της σεισμικής καταπόνησης αυξάνεται [20,21] . Τέλος η μέθοδος σε περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός χρονοϊστοριών μπορεί να μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για το πόσο σταθερή είναι η υπό εξέταση κατασκευή αναφορικά με διαφορετικά είδη σεισμικής καταπόνησης.

## 3.2 Βασικές έννοιες της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης

Για να προχωρήσουμε στην εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει αρχικά να ορίσουμε ορισμένες από τις βασικές έννοιες της μεθόδου [20].

**Ορισμός 1 .** Ο Συντελεστής Κλιμάκωσης (Scale Factor – **SF**) ενός κλιμακούμενου επιταχυνσιογραφήματος $\boldsymbol{\alpha_\lambda}$ , είναι ένας μη αρνητικός βαθμωτός συντελεστής **λ** [0,+ ) το γινόμενο του οποίου με μία ακλιμάκωτη χρονοϊστορία επιταχύνσεων είναι $\boldsymbol{\alpha_\lambda}$ **.**

Αξίζει να σημειωθεί πώς ένας Συντελεστής Κλιμάκωσης (SF) συνιστά στη δημιουργία μιας μονοσήμαντης απεικόνισης από το αρχικό επιταχυνσιογράφημα σε όλες τις κλιμακωμένες του εικόνες. Για τιμή **SF** λ = 1 έχουμε το αρχικό ,ουδέτερο , επιταχυνσιογράφημα , για τιμές **SF** λ < 1 έχουμε ένα κλιμακωμένο προς τα κάτω επιταχυνσιογράφημα ενώ , για τιμές λ > 1 έχουμε ένα μεγεθυμένο επιταχυνσιογράφημα [20] .

Παρά το γεγονός ότι ο Συντελεστής Κλιμάκωσης είναι ο πιο σαφής τρόπος να χαρακτηριστούν οι κλιμακούμενες εικόνες ενός επιταχυνσιογραφήματος , σε καμία περίπτωση δεν προσφέρει πληροφορίες για την πραγματική ένταση της κλιμακωμένης χρονοϊστορίας και των επιδράσεών της στην εκάστοτε κατασκευή.

**Ορισμός 2.** Το Μέτρο της Έντασης (Intensity Measure – **IM**) ενός κλιμακούμενου επιταχυνσιογραφήματος $\boldsymbol{\alpha_\lambda}$ , είναι ένας μη αρνητικός βαθμωτός συντελεστής **IM** [0,+ ) που αποτελεί μια συνάρτηση $IM=f_{\alpha 1}(\lambda)$ , που εξαρτάται από το ακλιμάκωτο επιταχυνσιογράφημα $\boldsymbol{\alpha_1}$ , και αυξάνεται μονοτονικά με τον Συντελεστή Κλιμάκωσης **λ**.

Παρά το γεγονός ότι πολλά μεγέθη θεωρείται ότι υποδεικνύουν την ένταση μιας χρονοϊστορίας εδαφικής σεισμικής κίνησης , δεν είναι πάντα προφανές πώς αυτά θα κλιμακωθούν. Κοινά παραδείγματα αποδεκτών μεγεθών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν **IM** είναι η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration – PGA ) , η Μέγιστη Εδαφική Ταχύτητα (Peak Ground Velocity – PGV ) ,

η Φασματική Επιτάχυνση για την Πρώτη Ιδιοπερίοδο της κατασκευής για απόσβεση ξ = 5% (ξ=5 % damped Spectral Acceleration at the structures first mode –(Sa($T_1$ ,5%)) ). Τα παραπάνω μέτρα έντασης έχουν συν τοις άλλοις την ιδιότητα του να είναι αναλογικά ως προς τον Συντελεστή κλιμάκωσης μιας και ικανοποιούν την ιδιότητα $IM_{prop} = \lambda * f_{\alpha 1}$ . Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί και μερικά μη μονοτονικά IM ,όπως η ανελαστική μετατόπιση ενός μη γραμμικού ταλαντωτή (από Luco and Cornell) , αλλά δεν θα μας απασχολήσουν στη παρούσα διπλωματική εργασία. Καταλήγοντας λοιπόν όταν αναφερόμαστε σε ένα IM θα εννοούμε ότι είναι μονοτονικό και κλιμακούμενο εκτός κι αν οριστεί διαφορετικά [20].

Στη συνέχεια , αφού πλέον έχουμε ορίσει τα πιθανά μεγέθη με τα οποία θα εξετάζουμε την κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων επί της κατασκευής πρέπει να ορίσουμε ένα μέγεθος για να επιβλέπουμε την απόκρισή της υπό τη σεισμική καταπόνηση.

**Ορισμός 3.** Το Μέτρο Βλάβης (Damage Measure -**DM**) ή αλλιώς η Παράμετρος Μηχανικής Απαίτησης (Engineering Demand Parameter –EDM, κατά την ορολογία του Pacific Earthquake Engineering Research Center), είναι ένας μη αρνητικός βαθμωτός συντελεστής **DM** [0,+ ] που χαρακτηρίζει την επιπλέον απόκριση του δομικού προσομοιώματος εξαιτίας της εφαρμοζόμενης σεισμικής καταπόνησης [20].

Με άλλα λόγια ένα Μέτρο Βλάβης είναι ένα εύκολα προσδιορίσιμο μέγεθος που είναι άμεσο αποτέλεσμα της απόκρισης της κατασκευής σε μία μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Πιθανές επιλογές που μπορούν να αποτελέσουν μέτρα βλάβης είναι η Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης ,η περιστροφή των κόμβων , η μέγιστη ολκιμότητα ορόφου , το μέγιστο drift μεταξύ των ορόφων και πολλά άλλα. Η επιλογή του κατάλληλου Μέτρου Βλάβης (DM) εξαρτάται και από την χρήση της ίδιας της κατασκευής. Επομένως μπορεί να κριθεί απαραίτητη η χρήση 2 ή περισσότερων Μέτρων Βλάβης (DMs) (που προέρχονται από τις ίδιες μη γραμμικές αναλύσεις) για την αξιολόγηση διαφορετικών χαρακτηριστικών απόκρισης , οριακών καταστάσεων αστοχίας ή ακόμη και ιδιομορφών που οδηγούν σε αστοχία της κατασκευής. Στη παρούσα διπλωματική ως Μέτρο Βλάβης χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο drift μεταξύ των ορόφων της εκάστοτε κατασκευής

Η απόκριση της κατασκευής κατά την χρήση της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης συχνά λαμβάνεται υπόψη ως βαθμωτό μέγεθος οπότε χρησιμοποιούμε είτε τις απόλυτες τιμές των αποκρίσεων είτε εξετάζουμε ξεχωριστά τις θετικές από τις αρνητικές αποκρίσεις.

Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω ορισμών μπορούμε να προχωρήσουμε στην διατύπωση του ορισμού της μελέτης μιας Δυναμική

Προσαυξητικής Ανάλυσης για την οποία χρησιμοποιήθηκε μια και μόνο χρονοϊστορία εδαφικών επιταχύνσεων.

**Ορισμός 4.** Μελέτη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μονής χρονοϊστορίας εδαφικής επιτάχυνσης είναι μια μελέτη δυναμικής ανάλυσης ενός δεδομένου προσομοιώματος μιας κατασκευής που παραμετροποιείται από τον Συντελεστή Κλιμάκωσης της δεδομένης χρονοϊστορίας εδαφικής επιτάχυνσης [20].

Γνωστή πιο απλά ως Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση περιλαμβάνει μια σειρά από δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται με κλιμακούμενες εικόνες ενός επιταχυνσιογραφήματος του οποίου τα Μέτρα Έντασης (IMs) έχουν ,στην ιδανική περίπτωση , επιλεγεί έτσι ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας της κατασκευής από την ελαστική συμπεριφορά ,στην μη γραμμική συμπεριφορά και τέλος στην κατάρρευση. Σκοπός είναι να καταγραφούν τα Μέτρα Βλάβης (DM) του προσομοιώματος της κατασκευής σε κάθε επίπεδο Μέτρου Έντασης (IM) της κλιμακωμένης εδαφικής σεισμικής κίνησης. Οι τιμές απόκρισης που θα προκύψουν συνήθως αποτυπώνονται σε διάγραμμα μαζί με το επίπεδο της έντασης και προκύπτουν συνεχείς καμπύλες. Αυτές οι καμπύλες ονομάζονται καμπύλες Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης (IDA curves).

Μπορούμε επομένως τώρα να ορίσουμε τι είναι μια καμπύλη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης.

**Ορισμός 5.** Μία καμπύλη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης είναι μια απεικόνιση της μεταβλητής που χαρακτηρίζει την κατάσταση της κατασκευής (Μέτρο Βλάβης – DM) μετά από μια δυναμική προσαυξητική ανάλυση σε σχέση με τις τιμές ενός η περισσότερων Μέτρων Έντασης που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε κλιμακωμένο επιταχυνσιογράφημα.

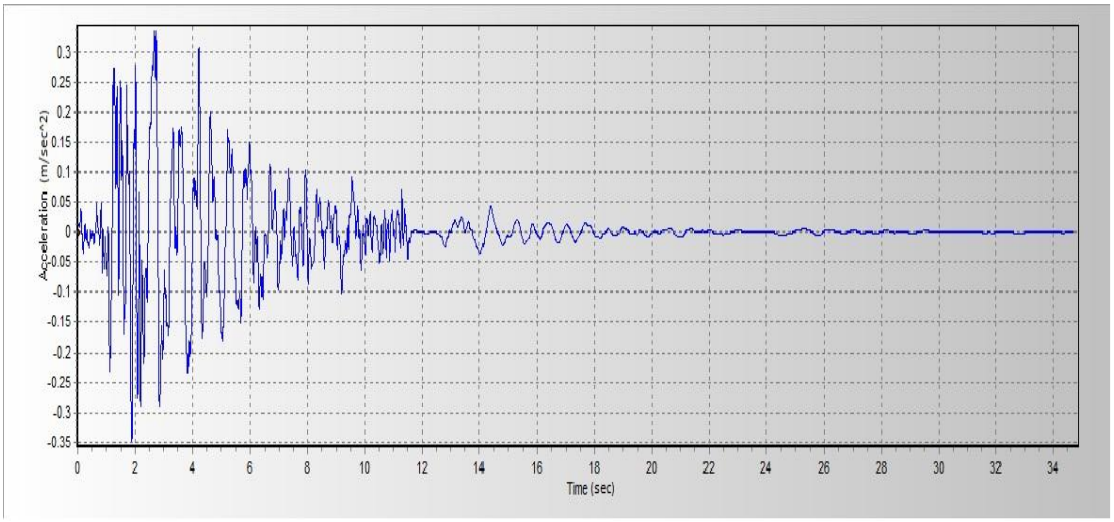
Μια καμπύλη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μπορεί να δημιουργηθεί σε 2 ή περισσότερες διαστάσεις ανάλογα με τον αριθμό των Μέτρων Έντασης (IM) . Προφανώς η μια εξ αυτών θα πρέπει να κλιμακώνεται. Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε σε καμπύλη IDA 2 διαστάσεων (2D). Συνηθίζεται αυτές οι αυτές οι καμπύλες να φαίνονται ‘’αναποδογυρισμένες’’ μιας και ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιείται το Μέτρο Έντασης (IM) , το οποίο θεωρείται κατ’ αναλογία ως ‘’δύναμη’’ , και αποτυπώνεται στον κατακόρυφο άξονα κατ΄ αντιστοιχία της δύναμης στο διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων. Καθίσταται σαφές ότι τα αποτελέσματα μια Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μπορούν να παρουσιαστούν σε καμπύλες Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης διαφόρων μορφών ανάλογα με την επιλογή των Μέτρων Βλάβης (DMs) και των Μέτρων Έντασης (IMs).

Είναι σαφές ότι η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε Μονοβάθμια όσο και σε Πολυβάθμια συστήματα . Να σημειωθεί ότι κατ' αναλογία με την Μελέτη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μονής χρονοϊστορίας εδαφικής επιτάχυνσης , μπορούμε , και επιβάλλεται , να χρησιμοποιήσουμε περισσότερες χρονοίστορίες εδαφικών επιταχύνσεων. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι πιο πολλές χρονοϊστορίες εδαφικών επιταχύνσεων χρησιμοποιούμε τόσο σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για την συμπεριφορά της κατασκευής μας καταλήγουμε.

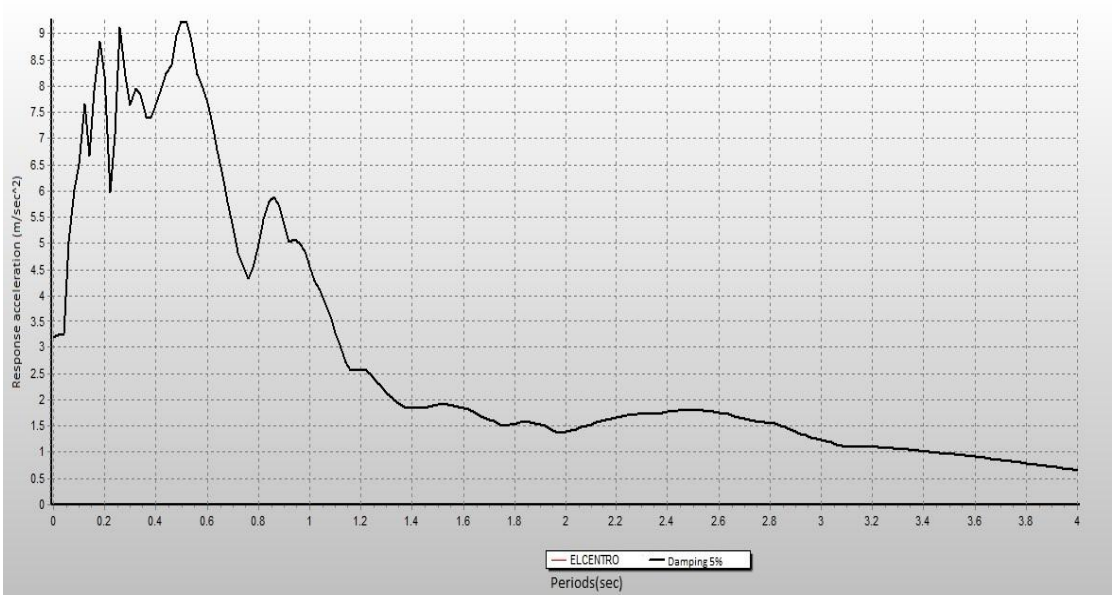
## 3.3 Επιλογή επιταχυνσιογραφημάτων

**El centro**

Επιταχυνσιογράφημα

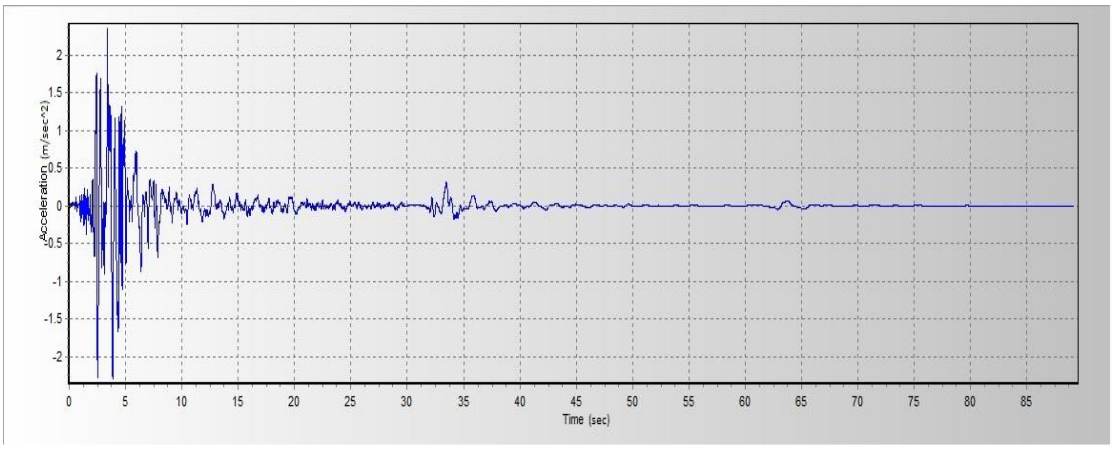



Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης για απόσβεση ξ = 5%

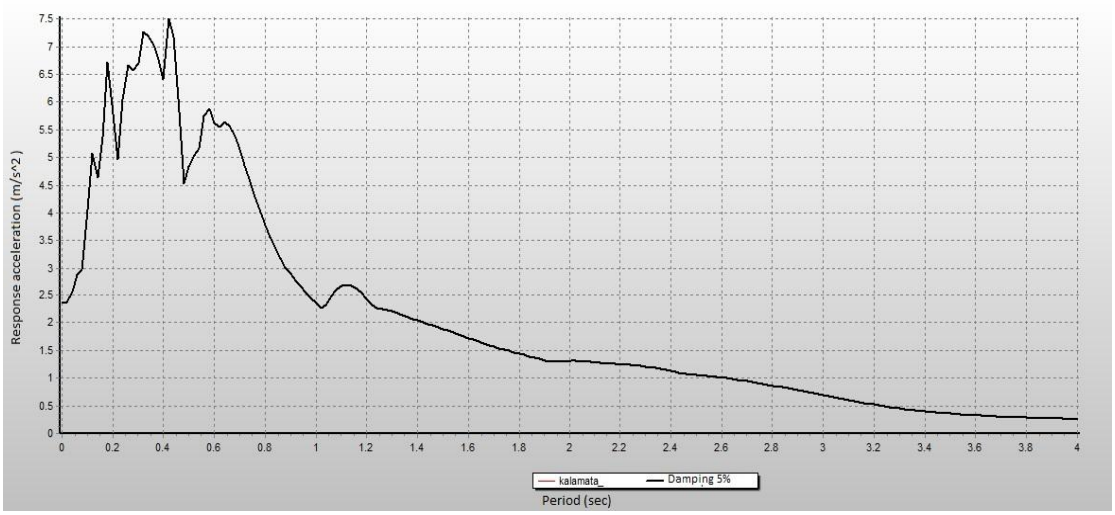


**Καλαμάτα**

Επιταχυνσιογράφημα

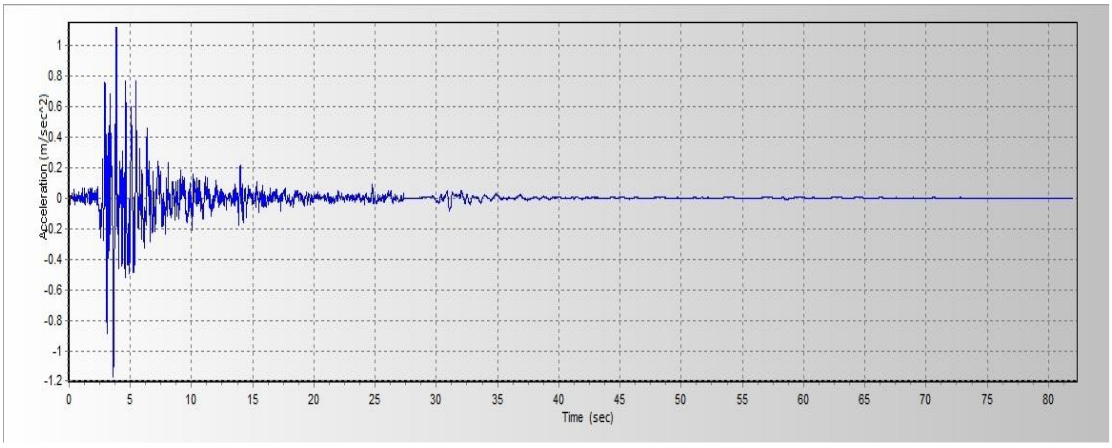



Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης για απόσβεση ξ = 5%

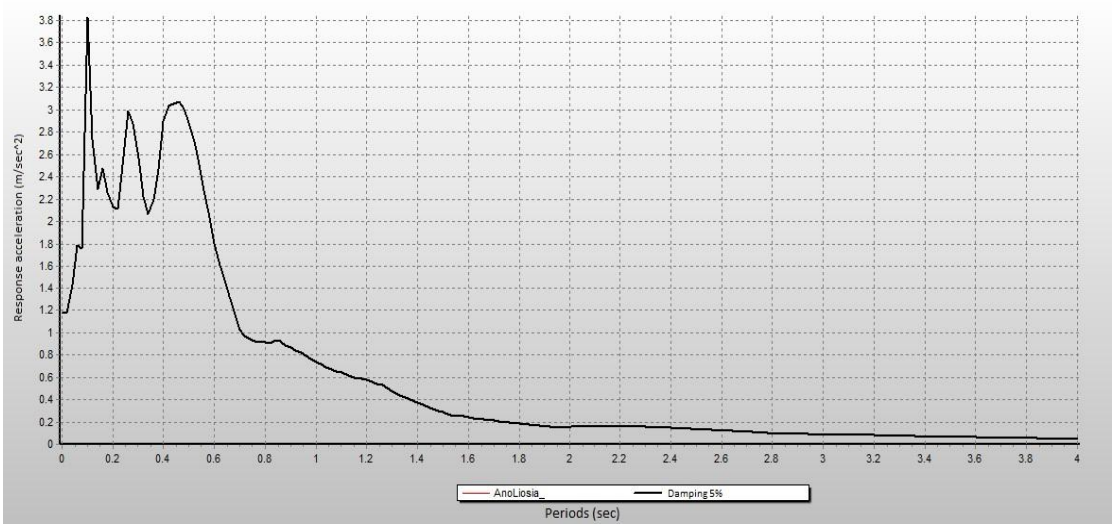



**Άνω λιόσια**

Επιταχυνσιογράφημα

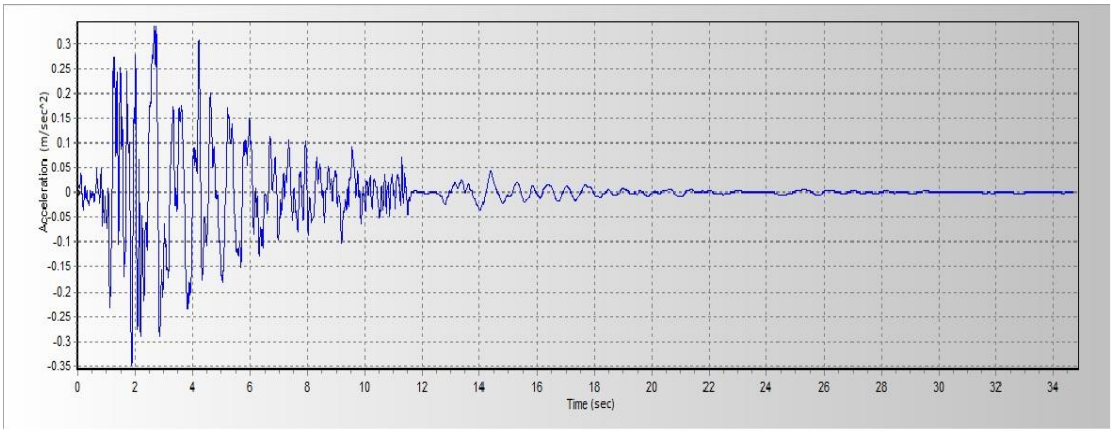


Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης για απόσβεση ξ = 5%

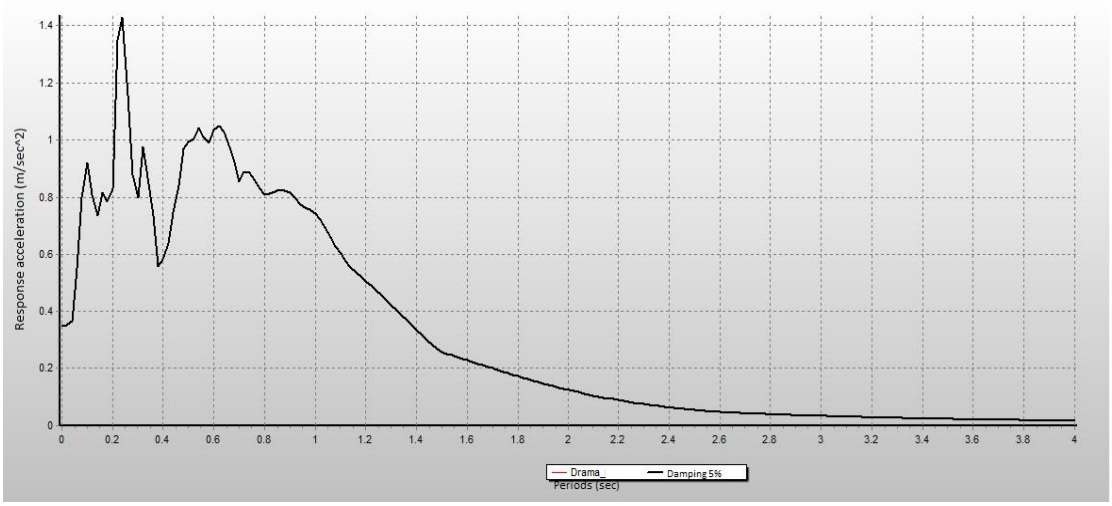



**Δράμα**

Επιταχυνσιογράφημα




Ελαστικό Φάσμα Απόκρισης για απόσβεση ξ = 5%



Η επιλογή των παραπάνω επιταχυνσιογραφημάτων ([22], PEER Strong Motion Database) έγινε με στόχο την επιλογή σεισμών διαφορετικής έντασης και διάρκειας ώστε να εξεταστεί η απόκριση της κατασκευής σε ένα μεγάλο εύρος καταπονήσεων. Επιδιώχθηκε εντός του δείγματος να περιλαμβάνονται και σεισμοί που συνέβησαν εντός ελλαδικού χώρου χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι αυτό επηρεάζει εξολοκλήρου και από μόνο του σαν γεγονός την απόκριση της κατασκευής. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη παρούσα διπλωματική δεν επιλέχθηκε μεγάλο δείγμα επιταχυνσιογραφημάτων μιας και το αντικείμενο που εξετάζουμε είναι η επιρροή των κριτηρίων τρωτότητας στον σχεδιασμό κατασκευών.

## 3.4 Κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων

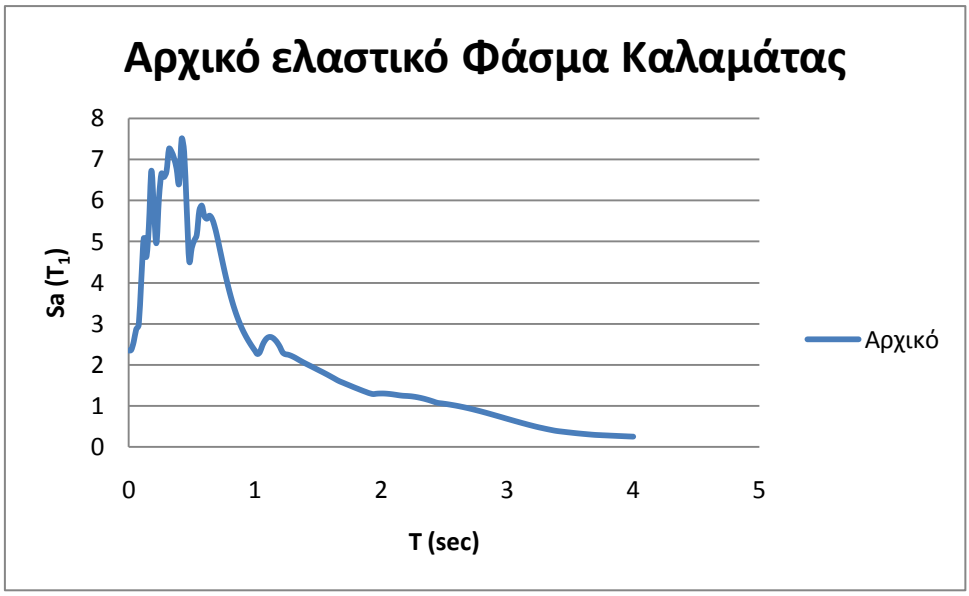
Η κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γίνεται με την βοήθεια του Συντελεστή Κλιμάκωσης **λ** (Ορισμός 1). Στη παρούσα διπλωματική θα γίνει κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων με βάση δύο διαφορετικών Μέτρων Έντασης (IM), την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration – PGA ) και την Φασματική Επιτάχυνση για την Πρώτη Ιδιοπερίοδο της κατασκευής για απόσβεση ξ = 5% (Sa($T_1$ ,5%)). Στην κάθε περίπτωση η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση είναι η ίδια. Ο Συντελεστής Κλιμάκωσης είναι το πηλίκο της εκάστοτε τιμής της έντασης του Μέτρου Έντασης που εξετάζεται (IM) προς την τιμή του Μέτρου Έντασης της κατασκευής για το αρχικό φάσμα.

Στη συνέχεια το αρχικό φάσμα πολλαπλασιάζεται με όλους του συντελεστές κλιμάκωσης ,που αντιστοιχούν σε όλες τις στάθμες κλιμάκωσης οπότε προκύπτουν τα κλιμακωμένα φάσματα (κατ' επέκταση της κλιμάκωσης των επιταχυνσιογραφημάτων). Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η κλιμάκωση 2 εκ των επιταχυνσιογραφημάτων με το κάθε ένα από τα Μέτρα Έντασης αντίστοιχα.

### 3.4.1 Κλιμάκωση ως προς την Φασματική Επιτάχυνση για την Πρώτη Ιδιοπερίοδο της κατασκευής για απόσβεση ξ = 5%

Για την κλιμάκωση του επιταχυνσιογραφήματος με αυτή τη μέθοδο απαραίτητη προϋπόθεση είναι ,αρχικά, η εύρεση της πρώτης ιδιοπεριόδου του φορέα. Εν συνεχεία από το αρχικό ελαστικό φάσμα της σεισμικής δόνησης βρίσκουμε την επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής.

Το μονώροφο κτήριο που θα εξεταστεί σαν παράδειγμα στη παρούσα φάση της διπλωματικής εργασίας έχει πρώτη ιδιοπερίοδο $T_1$ = 0,187 sec επομένως για την




χρονοϊστορία του σεισμού της Καλαμάτας έχουμε απόκριση του ελαστικού Φάσματος ίση με 0,6076 g .Η κλιμάκωση της συγκεκριμένης χρονοϊστορίας έγινε από 0,2g έως 3,5g με βήμα 0.2g. Επομένως όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο συντελεστής κλιμάκωσης **λ** για κάθε βήμα είναι ο λόγος (Τιμή Έντασης Κλιμάκωσης)/ (0,6076 g ).

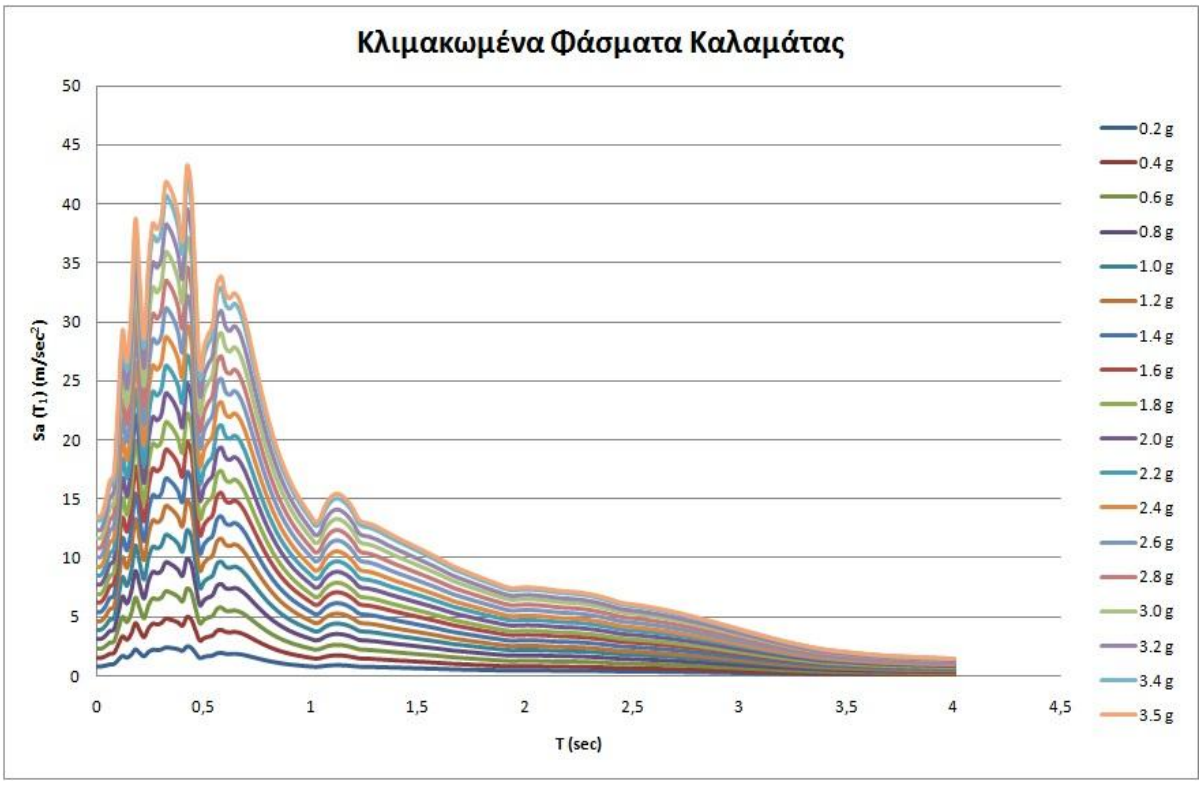
Διάγραμμα 3.1

**πχ**

Για ένταση 0,2 g είναι $\boldsymbol{\lambda_{0,2}}$ = 0,2 g / 0,6076 g = 0,329

Για ένταση 1,6 g είναι $\boldsymbol{\lambda}_{1,6}$ = 1,6 g / 0,6076 g = 2.633

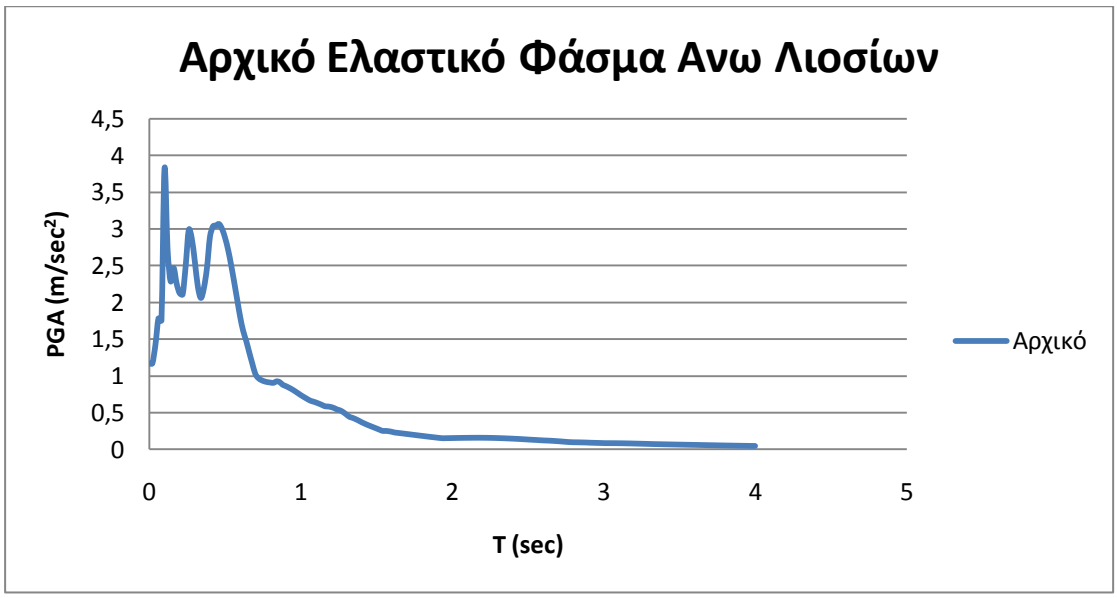
Με τη παραπάνω διαδικασία προκύπτει το εξής κλιμακωμένο ως προς την Φασματική Επιτάχυνση για την Πρώτη Ιδιοπερίοδο της κατασκευής για απόσβεση ξ = 5% φάσμα για το σεισμό της Καλαμάτας .




Διάγραμμα 3.2

### 3.4.2 Κλιμάκωση ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA)

Είναι προφανές ότι για την κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων με αυτή τη μέθοδο είναι απαραίτητη η εύρεση της Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης .Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είναι αυτή που αντιστοιχεί στην τιμή για T = 0 sec του ελαστικού φάσματος της σεισμικής δόνησης.




Διάγραμμα 3.3

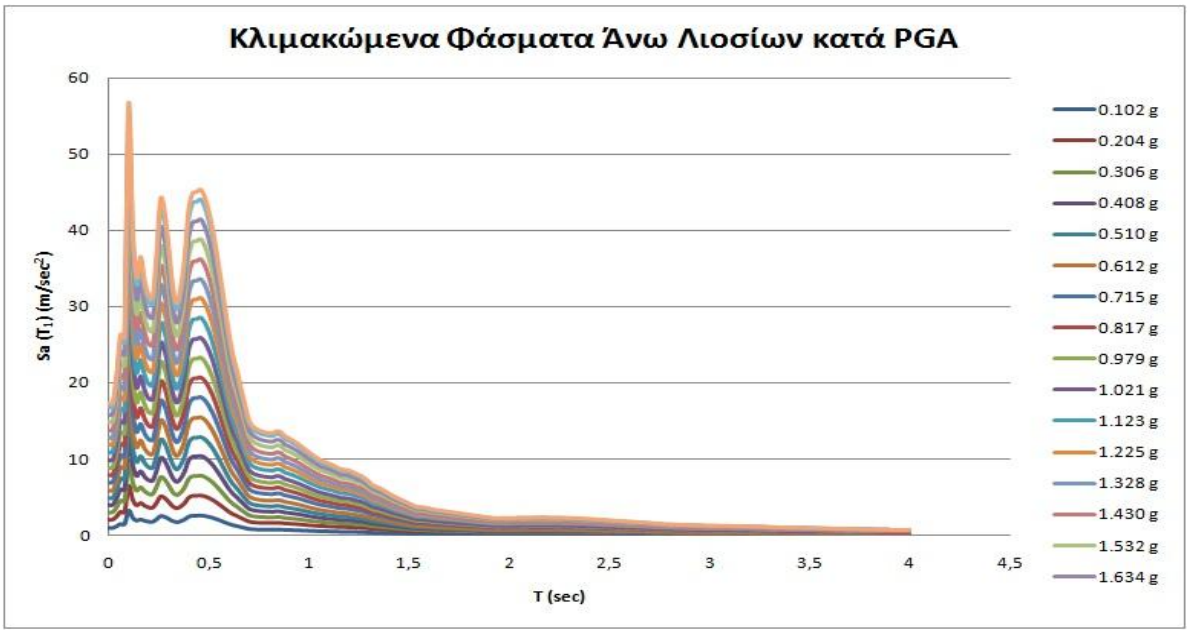
Η πρώτη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης για τον σεισμό των Άνω Λιοσίων , δηλαδή αυτή για ιδιοπεριόδο T = 0 sec είναι 0,121 g .Επομένως όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο συντελεστής κλιμάκωσης **λ** για κάθε βήμα είναι ο λόγος (Τιμή Έντασης Κλιμάκωσης)/ (0,121 g).

**πχ**

Για ένταση 0,102 g είναι $\boldsymbol{\lambda_{0,102}}$ = 0,102 g / 0.121 g = 0.843

Για ένταση 1,124 g είναι $\boldsymbol{\lambda_{1,124}}$ = 1.124 g /0.121 g = 9.289

Με τη παραπάνω διαδικασία προκύπτει το εξής κλιμακωμένο ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) φάσμα για το σεισμό της Καλαμάτας .



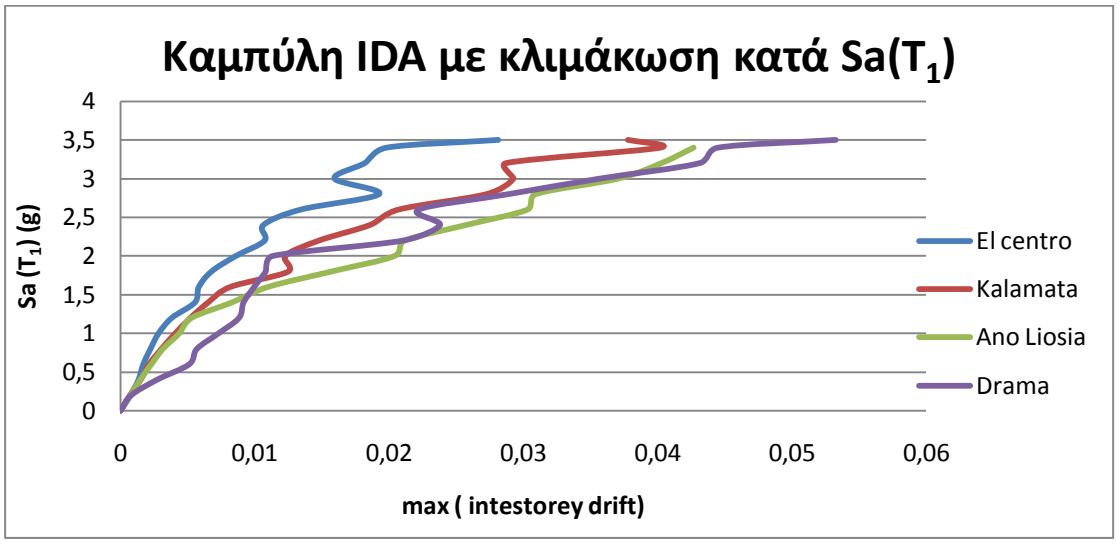

Διάγραμμα 3.4

## 3.5 Κατασκευή καμπύλων Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης

Στη παρούσα διπλωματική εργασία ως Μέτρο Βλάβης (DM) χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή του λόγου της διαφορικής μετατόπισης των δύο άκρων των υποστυλωμάτων σε κάθε όροφο προς το ύψος των υποστυλωμάτων αυτών (max interstorey drift).

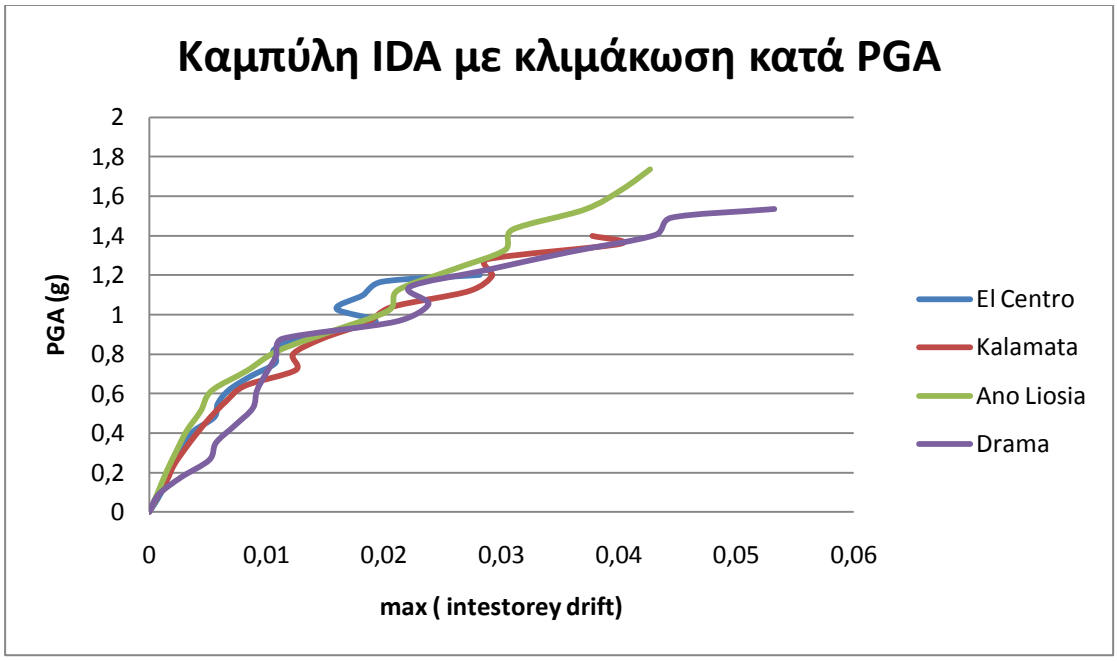
Μπορούμε επομένως να ορίσουμε καμπύλη για κάθε ένα από τα Μέτρα Έντασης είτε αυτό είναι η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση είτε η Φασματική Επιτάχυνση για την Πρώτη Ιδιοπερίοδο της κατασκευής για απόσβεση ξ = 5% σε σχέση με το μέγιστο drift των ορόφων. Παρακάτω παρατίθενται τα δύο γραφήματα με τις καμπύλες IDA για κάθε ένα από τα παραπάνω επιταχυνσιογραφήματα.

### 3.5.1 Με κλιμάκωση κατά Sa($T_1$ ,5%)




Διάγραμμα 3.4

### 3.5.2 Με κλιμάκωση κατά Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA)




Διάγραμμα 3.4

Από τις παραπάνω καμπύλες Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης θα εξάγουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα αποκρίσεων με βάση τα επίπεδα Βλάβης που θα ορίσουμε παρακάτω. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με στόχο την δημιουργία καμπύλων τρωτότητας και με βάση αυτές θα γίνει εξέταση των κριτηρίων τρωτότητας.

# Κεφάλαιο 4

# ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ:

## 4 .1 Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας (Performance – Based Design ) βασίζεται στην αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου ζημιών (στάθμες επιτελεστικότητας) ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού. Το κυριότερο στοιχείο του σχεδιασμού με στάθμες επιτελεστικότητας είναι ο ακριβής προσδιορισμός των σταθμών αυτών . Σε αυτή την διπλωματική εργασία έχουν θεωρηθεί οι εξής στάθμες επιτελεστικότητας : i) **Περιορισμός Βλαβών** όπου η συνολική ζημιά χαρακτηρίζεται ως πολύ μικρή ii) **Σημαντικές Βλάβες** όπου η συνολική ζημιά επί της κατασκευής χαρακτηρίζεται μέτρια έως σοβαρή iii) **Οιονεί κατάρρευση** όπου η συνολική ζημιά επί της κατασκευής χαρακτηρίζεται πάρα πολύ σοβαρή.

Μετά τον ορισμό των σταθμών επιτελεστικότητας πρέπει να ορίσουμε και τα αντίστοιχα επίπεδα σεισμικού κινδύνου. Ο σεισμικός κίνδυνος εκφράζεται σε μορφή καμπύλης που περιλαμβάνει την πιθανότητα να ξεπεραστεί ένα καθορισμένο επίπεδο Σεισμικής Έντασης (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και στις καμπύλες IDA αυτό το μέγεθος μπορεί να είναι είτε η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση PGA είτε η Φασματική Επιτάχυνση της Πρώτης Ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5%) για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Τα τρία επίπεδα σεισμικού κινδύνου ορίζονται ως εξής: i) **Συχνός Σεισμός** (Occasional Earthquake ) με περίοδο επαναφοράς 72 χρόνια και πιθανότητα υπέρβασης 50% στα 50 χρόνια, ii) **Σπάνιος Σεισμός** (Rare Earthquake) με περίοδο επαναφοράς 475 χρόνια και πιθανότητα υπέρβασης 10 % στα 50 χρόνια και τέλος iii) **Πολύ Σπάνιος Σεισμός** (Maximum Considered event) με περίοδο επαναφοράς 2475 χρόνια και πιθανότητα υπέρβασης 2% στα 50 χρόνια (Papazachos et all (2005), [6]).

### 4.1.1 Στόχοι επιθυμητής επιτελεστικότητας με βάση ντετερμινιστικά κριτήρια

Ο καθορισμός του στόχου για τον οποίο πρέπει να γίνει ο σχεδιασμός εξαρτάται από τον επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους. Μπορούμε επομένως να καθορίσουμε τρία επίπεδα στόχων επιθυμητής επιτελεστικότητας : i) Περιορισμός Βλαβών – Συχνός σεισμός , ii) Σημαντικές Βλάβες – Σπάνιος Σεισμός , iii) Οιονεί κατάρρευση – Πολύ Σπάνιος Σεισμός. Η δομική απόδοση της κατασκευής

καθορίζεται από το μέγιστο λόγο της διαφορικής μετατόπισης των υποστυλωμάτων κάθε ορόφου προς το ύψος τους (max interstorey drift) $\boldsymbol{\theta_{max}}$ για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα επίπεδα σεισμικού κινδύνου . Πρέπει επομένως για να επιτευχθεί ο στόχος της επιθυμητής επιτελεστικότητας να ισχύει η σχέση :

όπου $\theta^{ΕΣΚ}$max είναι το max interstorey drift για το εκάστοτε Επίπεδο Σεισμικού Κινδύνου ενώ $\theta^{ΕΣΕ}$ είναι το interstorey drift που αντιστοιχεί στην Επιθυμητή Στάθμη Επιτελεστικότητας . Αυτού του είδους ο σχεδιασμός δεν θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα σε αυτή την διπλωματική εργασία.

### 4.1.2 Στόχοι επιθυμητής επιτελεστικότητας με βάση κριτήρια τρωτότητας

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε στον αντισεισμικό σχεδιασμό με στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τα κριτήρια τρωτότητας. Αρχικά θα πρέπει να ορίσουμε αυτά τα κριτήρια τρωτότητας. Πρώτα όμως πρέπει να δοθούν κάποιοι μαθηματικοί ορισμοί για την κατανόηση των εννοιών που θα επακολουθήσουν.

Μαθηματικό Παράρτημα:

**Ορισμός 1** : **Μέση τιμή** μ ενός δείγματος n τιμών ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των τιμών αυτών προς το πλήθος των τιμών αυτών.

$$\mu = \qquad = (x_1 + x_2 + \ldots + x_n) / n \qquad (4.1)$$

**Ορισμός 2** : **Τυπική απόκλιση** σ ενός δείγματος n τιμών και μέσης τιμής μ ορίζεται η σχέση:

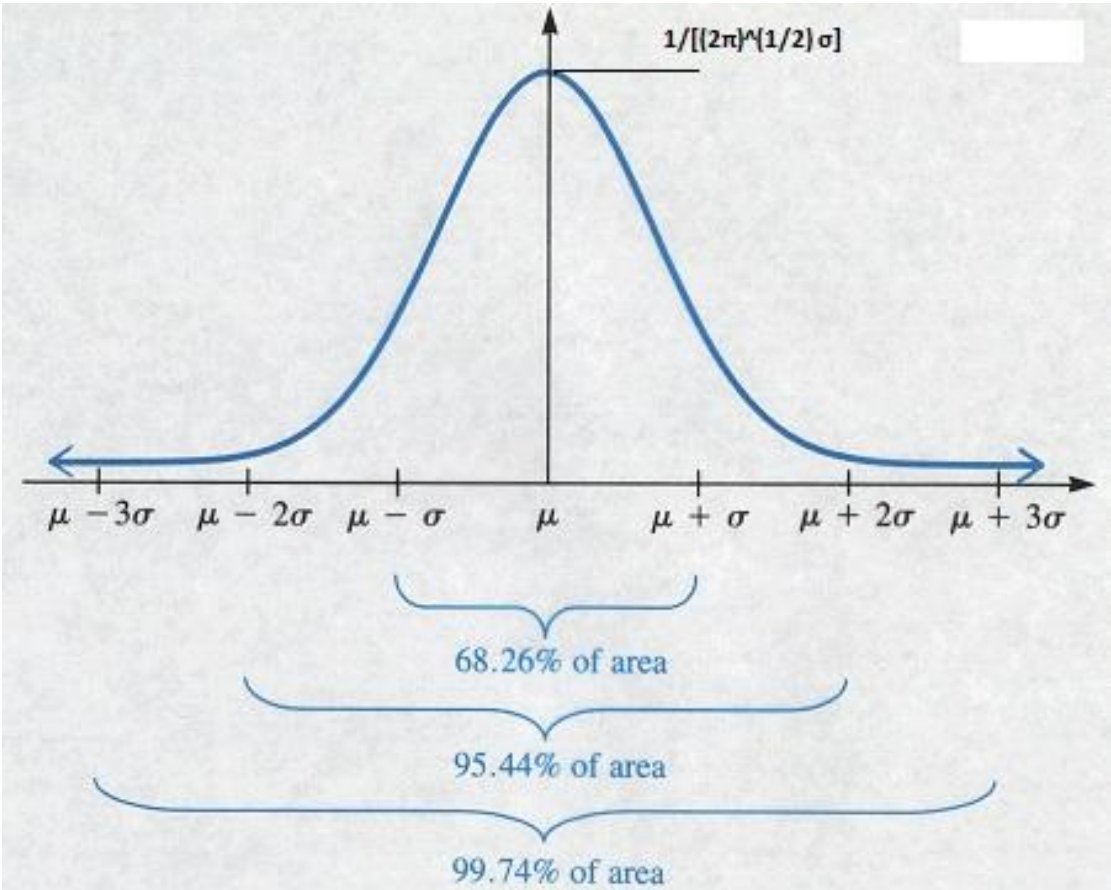
$$\sigma = \qquad (4.2)$$

**Ορισμός 3** : Λέμε ότι η συνεχής τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί την Κανονική Κατανομή με παραμέτρους μ, σ ( $-\infty < \mu < +\infty$, $\sigma > 0$ ) , όταν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας την :

$$f(x) = P(X=x) = \qquad (4.3)$$

**Ορισμός 4 :** Η Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για την κανονική κατανομή δίνεται από τον τύπο :

$P(x \leq x_0) =$ (4.4)




Σχήμα 4.1 Η Κανονική Κατανομή

Σημείωση : το Εμβαδό κάτω από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας από - ∞ έως $x_0$ δίνει το άθροισμα των τιμών των πιθανοτήτων από το - ∞ έως το $x_0$ .

Αφού πλέον ορίσαμε τις απαραίτητες μαθηματικές έννοιες μπορούμε πλέον να ορίσουμε τα κριτήρια τρωτότητας . Αυτά ορίζονται ως η στοχευόμενη οριακή πιθανότητα πως δεν θα ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο βλάβης της κατασκευής για δεδομένο επίπεδο σεισμικού κινδύνου. Έτσι αντίθετα με τα ντετερμινιστικά κριτήρια επιτελεστικότητας τα κριτήρια τρωτότητας προσδιορίζονται με την χρήση πιθανοτήτων ως εξής :

(4.5)

όπου είναι η πιθανότητα το max interstorey drift που αντιστοιχεί στο επιθυμητό επίπεδο σεισμικού κινδύνου ( ) να υπερβαίνει ένα στοχευόμενο interstorey drift ( ) που αντιστοιχεί στην επιθυμητή στάθμη

επιτελεστικότητας. Και σε αυτή την περίπτωση τα επίπεδα σεισμικού κινδύνου και οι στάθμες επιτελεστικότητας είναι οι ίδιες με την ντετερμινιστική εκδοχή.

Από τα προηγούμενα γίνεται σαφές ότι μπορούμε να ορίσουμε την ως Πιθανότητας Οριακής Κατάστασης όταν αυτή καθορίζεται από μέτρο Σεισμικής Έντασης (IM) ,όπως αυτό έχει οριστεί προηγουμένως , που μπορεί να είναι είτε η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση PGA είτε η Φασματική Επιτάχυνση της Πρώτης Ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5%. Η πιθανότητα αυτή συμβολίζεται με $F_R$ και αναφέρεται στην σεισμική τρωτότητα [6]. Επομένως η σεισμική τρωτότητα ορίζεται ως

(4.6)

Με την προϋπόθεση ότι η απόκριση της κατασκευής μας ακολουθεί την κανονική κατανομή και με Μέτρο έντασης είτε τη Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση PGA είτε τη Φασματική Επιτάχυνση της Πρώτης Ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5% η τρωτότητα μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με την παρακάτω σχέση [6] :

(4.7)

Όπου στη περίπτωση του μονώροφου είναι ο λόγος σ/μ του δείγματος των επιταχυνσιογραφημάτων για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

Με την χρήση των παραπάνω γίνεται σαφές ότι μπορούμε πλέον να κατασκευάσουμε τις καμπύλες τρωτότητας για την κατασκευή μας. Αυτές μας παρέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να συγκρίνουμε την απόκριση της κατασκευής μας με τα κριτήρια τρωτότητας που έχουμε ορίσει σαν επιθυμητό στόχο. Στη συνέχεια, αρχικά θα αναλυθούν οι τρόποι κατασκευής των καμπύλων τρωτότητας και σε επόμενο στάδιο θα αναλυθεί πως επηρεάζει ο τρόπος επιλογής των κριτηρίων τρωτότητας στο τελικό σχεδιασμό.

# Κεφάλαιο 5

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

### 5.1 Κατασκευή καμπύλων τρωτότητας για το Μονώροφο με τη χρήση των καμπύλων IDA.

Αρχικά , για να κατασκευάσουμε τις καμπύλες τρωτότητας θα πρέπει να ορίσουμε τα όρια των τιμών του max interstorey drift θ που αντιστοιχούν στην κάθε στάθμη επιτελεστικότητας. Στην συνέχεια θα επιλέξουμε μια αντιπροσωπευτική τιμή εντός των ορίων (Πίνακας 5.1) και χρησιμοποιώντας αυτή καθώς και τις αποκρίσεις από τις καμπύλες IDA θα κατασκευάσουμε τις καμπύλες τρωτότητας.

| **Στάθμη επιτελεστικότητας** | **Interstorey drift θ** |
|---|---|
| Περιορισμός Βλαβών (Light Damage) | $0.002 < \theta < 0.004$ |
| Σοβαρές Βλάβες (Heavy Damage) | $0.010 < \theta < 0.018$ |
| Οιονεί Κατάρρευση (Collapse) | $\theta > 0.03$ |

Πίνακας 5.1 (Πηγή [6] & Ghobarah 2004)

Από τα παραπάνω όρια για τη μονώροφη κατασκευή μας και κατά την κατασκευή καμπύλων τρωτότητας με την χρήση των καμπύλων IDA ,επιλέξαμε τις μικρότερες τιμές κάθε διαστήματος δηλαδή τις 0.002 , 0.010 , 0.03 για τις στάθμες Περιορισμός Βλαβών , Σοβαρές Βλάβες , και Οιονεί Κατάρρευση αντίστοιχα.

Επομένως , από τις καμπύλες που προέκυψαν από τη Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση μπορούμε να βρούμε για κάθε επιταχυνσιογράφημα μια τιμή Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης και Φασματικής επιτάχυνσης της πρώτης ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5 % που να αντιστοιχεί στο max interstorey drift κάθε στάθμης επιτελεστικότητας .

Προκύπτουν οι τιμές των παρακάτω πινάκων :

| **Sa (m/sec$^2$)** | Light Damage | Heavy Damage | Collapse |
|---|---|---|---|
| El centro | 7,0959 | 20,931 | 35 |
| Kalamata | 5,5063 | 16,525206 | 31,61379 |
| Ano Liosia | 5,200481928 | 14,969333 | 25,37804 |
| Drama | 3,1973333 | 15,811412 | 27,78538 |

Πίνακας 5.2

| **PGA (m /sec$^2$)** | Light Damage | Heavy Damage | Collapse |
|---|---|---|---|
| El centro | 2,407054 | 7,184809 | 11,78583 |
| Kalamata | 2,201237 | 6,606272 | 12,63824 |
| Ano Liosia | 2,656218 | 7,645796 | 13,05297 |
| Drama | 1,401455 | 6,930438 | 12,17886 |

Πίνακας 5.3

Στη συνέχεια παίρνουμε την μέση τιμή, την τυπική απόκλιση καθώς και τον λόγο τους για κάθε επίπεδο ζημιών.

| **Sa (m/sec$^2$)** | Light Damage | Heavy Damage | Collapse |
|---|---|---|---|
| μ | 5,250003807 | 17,059238 | 29,9443 |
| σ | 1,600929847 | 2,6583518 | 4,237095 |
| σ/μ | 0,304938797 | 0,1558306 | 0,141499 |

Πίνακας 5.4

| **PGA (m/sec$^2$)** | Light Damage | Heavy Damage | Collapse |
|---|---|---|---|
| μ | 2,166491 | 7,091829 | 12,41397 |
| σ | 0,54289 | 0,438686 | 0,550289 |
| σ/μ | 0,250585 | 0,061858 | 0,044328 |

Πίνακας 5.5

Από τους παραπάνω πίνακες αξίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος των τυπικών αποκλίσεων της Φασματικής Επιτάχυνσης της πρώτης ιδιομορφής προς αυτών της Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης είναι 2.947361 , 6,059805 και 7,6997 που σημαίνει ότι οι τιμές της φασματικής επιτάχυνσης για κάθε τιμή του **θ** έχουν πού μεγαλύτερο εύρος από αυτό των τιμών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Να σημειωθεί εδώ ότι ο λόγος σ/μ για την φασματική επιτάχυνση κυμαίνεται στο 0,20 ενώ για την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στο 0,12 . Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μικρού δείγματος επιταχυνσιογραφημάτων όμως στη παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί εκτεταμένα η κατασκευή καμπύλων τρωτότητας με το φάσμα του Ευρωκώδικα επομένως δεν κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή μεγαλύτερου δείγματος.

Μπορούμε επομένως με τα παραπάνω δεδομένα αλλά και με την χρήση τύπων και των μεθόδων που αναπτύχθηκαν στην θεωρία να προχωρήσουμε στην κατασκευή των καμπύλων τρωτότητας τόσο ως προς την Φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5 % (Sa($T_1$ ,5%)) όσο και ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) . Επομένως από την σχέση

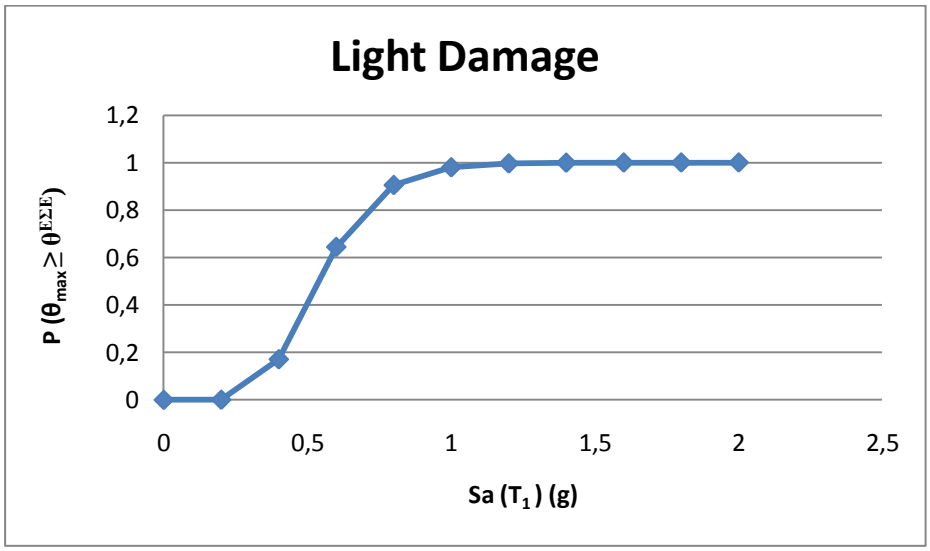
)] (4.7)

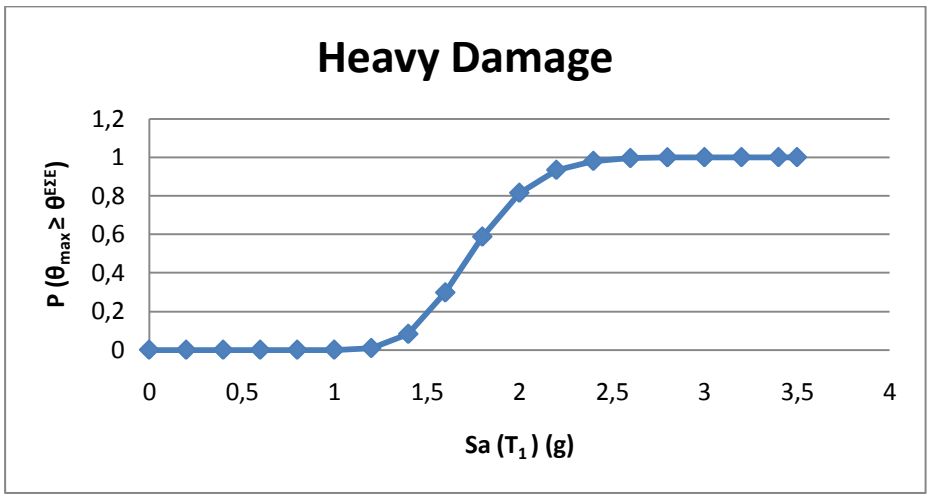
Έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα :

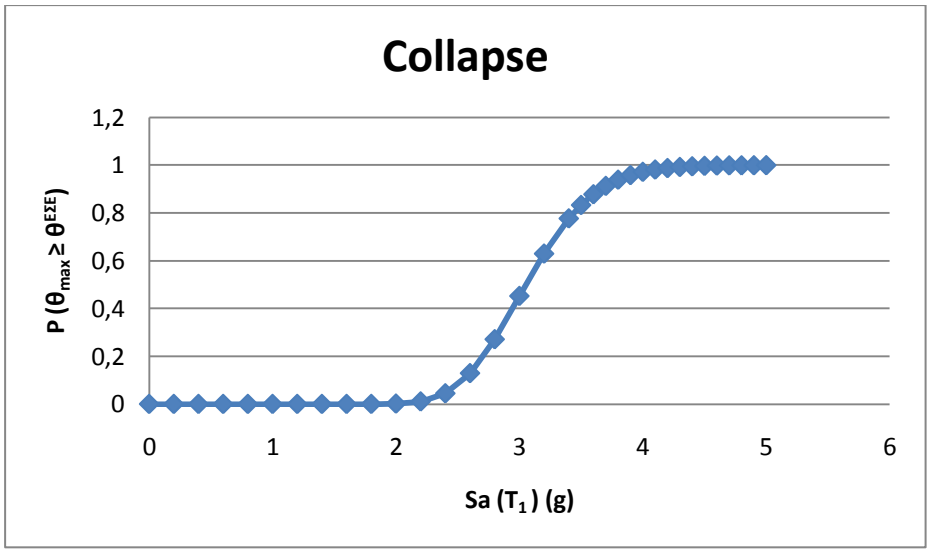
### 5.1.1 Ως προς Φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5 % (Sa($T_1$ ,5%))

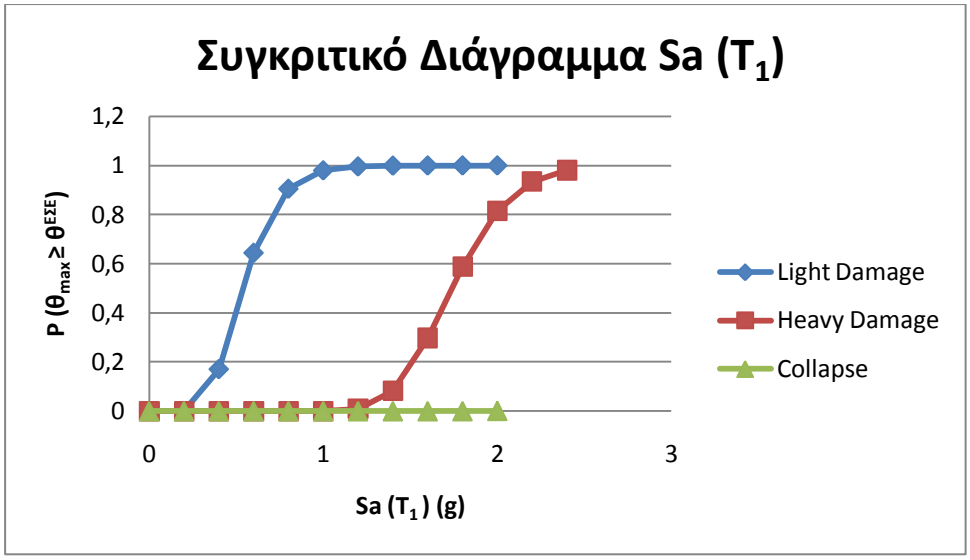
Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε στις παρακάτω καμπύλες όσο μεγαλώνει η στάθμη επιτελεστικότητας τόσο πιο δύσκολο γίνεται να ξεπεραστεί η εκάστοτε αντιπροσωπευτική τιμή max interstorey drift θmax. Γίνεται δηλαδή σαφές ότι ,όπως είναι και αναμενόμενο, όσο μικρότερη είναι η στάθμη επιτελεστικότητας

τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα να ξεπεραστεί η χαρακτηριστική τιμή του max interstorey drift.

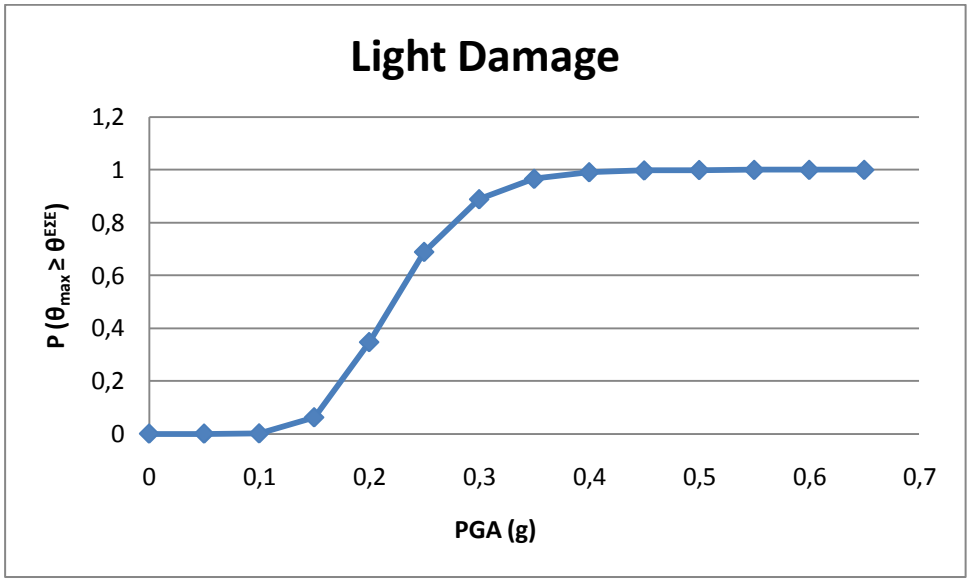


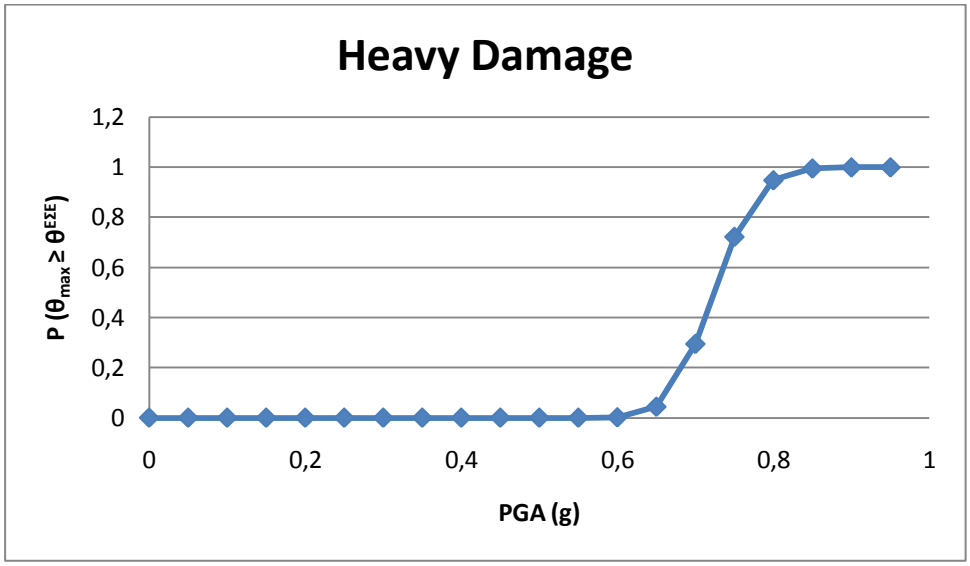



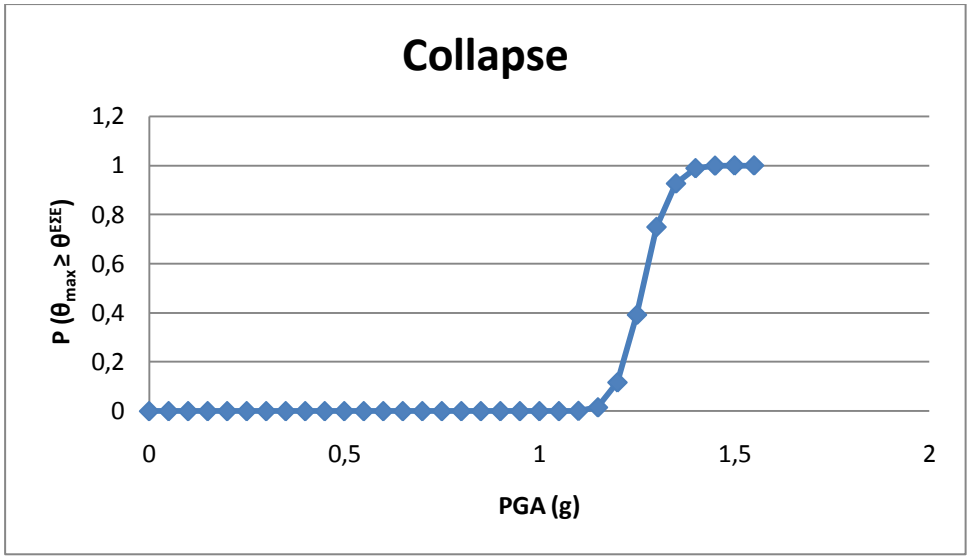



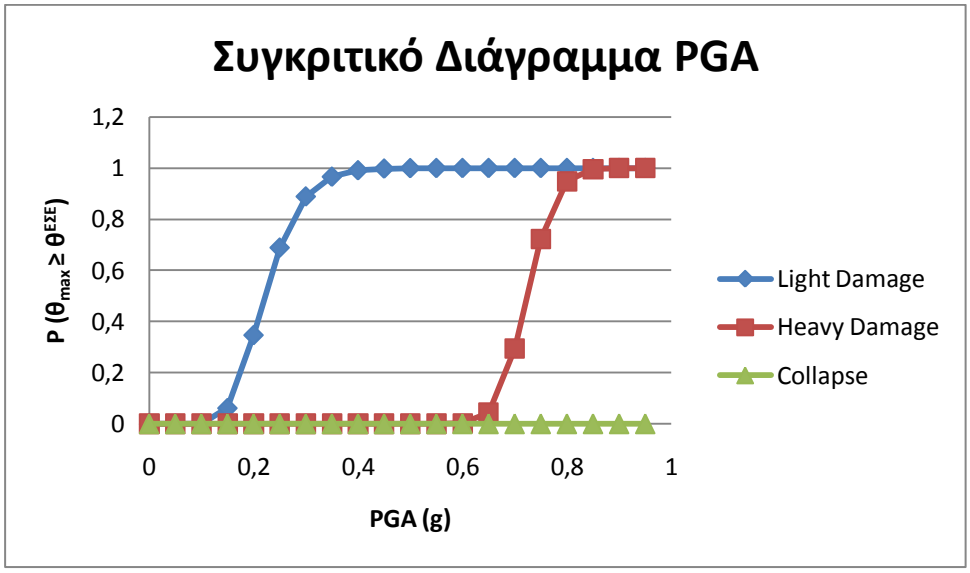



### 5.1.2 Ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση






Τα συμπεράσματα της σύγκρισης των διαγραμμάτων ποιοτικά είναι ίδια με αυτά της φασματικής επιτάχυνσης.

## 5.2 Κατασκευή των καμπύλων τρωτότητας με τη χρήση του Φάσματος του Ευρωκώδικα και τη μέθοδο των συντελεστών

Η κατασκευή των καμπύλων τρωτότητας μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς την χρήση μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Σε αυτή τη περίπτωση η στοχευόμενη μετακίνηση που αντιστοιχεί σε μια σεισμική διέγερση που προέρχεται από κάποιο κανονιστικό φάσμα σχεδιασμού (στη περίπτωση αυτής της διπλωματικής το Φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8) προσδιορίζεται με την εφαρμογή προσεγγιστικών μεθόδων όπως η μέθοδος των συντελεστών. Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε τόσο το Φάσμα του Ευρωκώδικα 8 όσο και τη μέθοδο των συντελεστών.

### 5.2.1 Φάσμα σχεδιασμού Ευρωκώδικα 8 για ανελαστική συμπεριφορά

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 [12], αρμόδιο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, το Φάσμα σχεδιασμού για ανελαστική συμπεριφορά εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων όπως η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας της κατασκευής, η κατηγορία σπουδαιότητας της κατασκευής καθώς και η κατηγορία εδάφους στο οποίο εδράζεται η κατασκευή.

Παρακάτω παρατίθενται οι σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες προκύπτει η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού $\mathbf{S_d}$.

– — — – για $0 \leq T \leq T_B$

— για $T_B \leq T \leq T_C$

— — για $T_C \leq T \leq T_D$

— ——— για $T_D \leq T \leq 4$ sec

Σύμφωνα με το εθνικό προσάρτημα , η τιμή β ορίζεται σε β = 0.2

Στις παραπάνω σχέσεις έχουμε

$\alpha_g = \gamma_1 * \alpha_{gR}$ ,όπου είναι

$\alpha_{gR}$ : Τιμή αναφοράς της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε έδαφος κατηγορίας Α , η οποία αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς της περιόδου επαναφοράς $T_{NCR}$=475 έτη .
Τιμές του $\alpha_{gR}$ είναι για κάθε ζώνη :

| **Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας** | **$\alpha_{gR}$ (g)** |
|---|---|
| Ζ1 | 0.16 |
| Ζ2 | 0.24 |
| Ζ3 | 0.36 |

Πίνακας 5.6 [12]

$\gamma_1$ : Συντελεστής σπουδαιότητας για τον οποίον ορίζονται 4 κατηγορίες : I, II, III και IV ,και οι τιμές του δίνονται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.7).

| **Κατηγορία σπουδαιότητας** | **$\gamma_1$** |
|---|---|
| I<br>(κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια κοινού) | 0.80 |
| II<br>(Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων , βιομηχανικά κτίρια, κλπ) | 1.00 |
| III<br>(κτίρια δημοσίων συναθροίσεων , εκπαιδευτικά κτίρια, κτίρια που στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας) | 1.20 |
| IV<br>(Κτίρια των οποίων η λειτουργία τόσο κατά τη διάρκεια του σεισμού όσο και μετά τον σεισμό , είναι ζωτικής σημασίας , όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας , παραγωγής ενέργειας , νοσοκομεία , πυροσβεστικοί σταθμοί και κτίρια που στεγάζουν έργα μεγάλης καλλιτεχνικής αξίας πχ μουσεία κλπ) | 1.40 |

Πίνακας 5.7 [12]

q : Συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής

S : Συντελεστής εδάφους της κατασκευής που εξαρτάται από την κατηγορία εδάφους στην οποία εδράζεται η κατασκευή.

$T_B$ : Περίοδος που αντιστοιχεί στο σημείο αρχής του κλάδου σταθερής επιτάχυνσης του φάσματος.

$T_C$ : Περίοδος που αντιστοιχεί στο σημείο τομής του κλάδου σταθερής επιτάχυνσης με τον κλάδο σταθερής ταχύτητας του φάσματος.

$T_D$ : Περίοδος που αντιστοιχεί στο σημείο αρχής του κλάδου σταθερής μετατόπισης του φάσματος (σημείο τομής του κλάδου σταθερής ταχύτητας με τον κλάδο σταθερής μετατόπισης).

Αναλυτικά οι τιμές τους στον παρακάτω πίνακα

| Κατηγορία Εδάφους | $T_B$ (sec) | $T_C$ (sec) | $T_D$ (sec) | S |
|---|---|---|---|---|
| A | 0.15 | 0.40 | 2.50 | 1.00 |
| B | 0.15 | 0.50 | 2.50 | 1.20 |
| C | 0.20 | 0.60 | 2.50 | 1.15 |
| D | 0.20 | 0.80 | 2.50 | 1.35 |
| E | 0.15 | 0.50 | 2.50 | 1.40 |

Πίνακας 5.8 [12]

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έχουν επιλεγεί ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1 ($\alpha_{gR}$ = 0,16 g) , κατηγορία σπουδαιότητας II ($\gamma_1$ = 1), κατηγορία εδάφους A ($T_B$ = 0.15 sec , $T_C$ = 0.40 sec , $T_D$ = 2.50 sec, S = 1.00 ),και συντελεστής συμπεριφοράς q = 1.

Διάγραμμα 5.1

### 5.2.2 Μέθοδος των συντελεστών

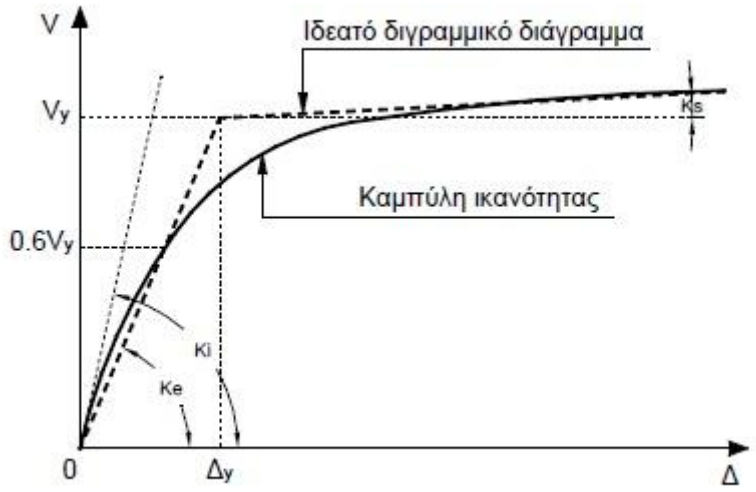
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στοχευόμενης μετακίνησης και περιγράφεται τόσο στη FEMA 356 όσο και στον ATC -40. Η μέθοδος βασίζεται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα χωρίς ωστόσο να αναφέρεται ρητά [10].

Αρχικά , θα πρέπει να κατασκευαστεί το ιδεατό διγραμμικό διάγραμμα της καμπύλης ικανότητας. Αυτό προϋποθέτει την μετατροπή της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής μας (την οποία ,στη παρούσα διπλωματική εργασία ,έχουμε εξάγει από τις αναλύσεις του Opensees ) σε διγραμμικό διάγραμμα. Κατά τον ATC -40 έχουμε τα εξής βήματα:

α ) Επιλέγεται κατά την κρίση του μηχανικού η κλίση του μετελαστικού κλάδου θεωρώντας ότι η αντίστοιχη ευθεία διέρχεται από το σημείο που η καμπύλη ικανότητας έχει γίνει σχεδόν οριζόντια. Η μετελαστική δυσκαμψία $K_s$ ορίζεται από την κλίση του μετελαστικού κλάδου σε σχέση με την οριζόντια ευθεία.

β ) Προσδιορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία $K_e$ (σχήμα 5.1). Αυτή είναι η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο της καμπύλης ικανότητας που αντιστοιχεί με το 60 % της τέμνουσας διαρροής, $V_y$ . Κατά την εφαρμογή της μεθόδου το σημείο αυτό δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα για αυτό κάποιες δοκιμές είναι απαραίτητες (βλέπε βήμα γ' ).

γ ) Η τέμνουσα διαρροής $V_y$ ορίζεται από το σημείο τομής των 2 κλάδων που αντιστοιχούν στην ελαστική και στην μετελαστική συμπεριφορά της κατασκευής με κλίση $K_e$ και $K_s$ αντίστοιχα.




Σχήμα 5.1 [10]

Στη συνέχεια και αφού έχει οριστεί το διγραμμικό διάγραμμα ακολουθεί ο υπολογισμός της θεμελιώδους ιδοπεριόδου $T_e$ που αντιστοιχεί στο διγραμμικό διάγραμμα της καμπύλης ικανότητας και στη δυσκαμψία $K_e$. Από τη δυναμική ανάλυση υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος $T_i$ της κατασκευής στην υπό εξέτασης διεύθυνση λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική δυσκαμψία $K_i$ ,όπως αυτή παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα. Για τον υπολογισμό της $T_e$ χρησιμοποιούμε τη σχέση :

— (5.1)

Τέλος, ακολουθεί ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης $Δ_t$ που αντιστοιχεί στο δεδομένο φάσμα σχεδιασμού και που υπολογίζεται από την σχέση:

— (5.2)

Οι τιμές των παραμέτρων ορίζονται παρακάτω σύμφωνα με τη FEMA 356 :

$C_0$ : Είναι ο συντελεστής που συνδέει την μετακίνηση της κορυφής , Δ με την φασματική μετακίνηση . Έχουμε όπου Γ είναι ο συντελεστής συμμετοχής ( ——— ). Επομένως εάν τότε $C_0$ = Γ . Για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής μπορούν να χρησιμοποιούνται οι τιμές φi που αντιστοιχούν στην πρώτη ιδιομορφή ή οι τιμές που αντιστοιχούν στην παραμόρφωση του κτηρίου όταν συμβαίνει η στοχευόμενη μετακίνηση. Εναλλακτικά μπορεί να ο συντελεστής $C_0$ να λαμβάνεται από τον παρακάτω πίνακα (πίνακας 5.9).

**Τιμές του συντελεστή $C_0$**

| Αριθμός ορόφων | Διατμητικά κτήρια | | Λοιπά κτήρια |
|---|---|---|---|
| | Τριγωνική κατανομή φορτίων | Ομοιόμορφη κατανομή φορτίων | Οποιαδήποτε κατανομή φορτίων |
| 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 |

Πίνακας 5.9 [10]

$C_1$ : Ο συντελεστής αυτός συνδέει την μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού , σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις :

για

για (5.3)

Επίσης ισχύει για sec και

Στις παραπάνω σχέσεις έχουμε :

$T_S$ : Η περίοδος που αντιστοιχεί στο σημείο τομής του τμήματος της σταθερής επιτάχυνσης του φάσματος (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος) , δηλαδή για τον ΕΚ8 είναι $T_S = T_C$.

R : Ο συντελεστής συμπεριφοράς που εκφράζει το λόγο της ελαστικής απαίτησης προς την δύναμη διαρροής , ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση

(5.4)

Όπου :

$S_a$ : Φασματική επιτάχυνση από το φάσμα σχεδιασμού για την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο , $T_e$.

$V_y$ : Τέμνουσα διαρροής σύμφωνα με τη διγραμμική απεικόνιση της καμπύλης ικανότητας

W : Βάρος της κατασκευής

$C_m$ : Συντελεστής που δηλώνει την ενεργό μάζα σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα. Εναλλακτικά ο συντελεστής αυτός μπορεί να λαμβάνεται ίσος με το λόγο της 1ης ιδιομορφικής μάζας προς τη συνολική μάζα.

**Τιμές του συντελεστή $C_m$ (*)**

| Αριθμός ορόφων | Πλαισιακά κτήρια από Ω.Σ. | Τοιχωματικά κτήρια από Ω.Σ. | Κτήρια από Ω.Σ. τύπου ανεστρ. εκκρεμούς | Πλαίσια παραλαβής ροπών από χάλυβα | Πλαίσια από χάλυβα με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα | Πλαίσια από χάλυβα με έκκεντρους συνδέσμους | Άλλος τύπος |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 - 2 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 3+ | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.0 |

(*) $C_m = 1.0$ για $T_e > 1.0$ sec.

Πίνακας 5.10 [10]

$C_2$ : Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μορφή των βρόγχων υστέρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς. Οι τιμές του $C_2$ για διάφορους τύπους συστημάτων και διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 5.6. Τιμές του συντελεστή $C_2$**

| Στάθμη επιτελεστικότητας | $T_e \leq 0.1$ sec | | $T_e \geq T_S$ | |
|---|---|---|---|---|
| | Τύπος κτηρίου 1 | Τύπος κτηρίου 2 | Τύπος κτηρίου 1 | Τύπος κτηρίου 2 |
| Άμεση χρήση | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Προστασία ζωής | 1.3 | 1.0 | 1.1 | 1.0 |
| Οιονεί κατάρρευση | 1.5 | 1.0 | 1.2 | 1.0 |

Πίνακας 5.11 [10]

<u>Επεξήγηση :</u>

Τύπος 1 : Κατασκευές στις οποίες περισσότερο από το 30 % της τέμνουσας σε κάθε όροφο αναλαμβάνεται από οποιονδήποτε συνδυασμό των εξής στοιχείων : Τυπικά πλαίσια παραλαβής ροπών ,πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους ,πλαίσια με ημιάκαμπτες συνδέσεις , πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους που παραλαμβάνουν μόνο εφελκυστικές δυνάμεις , άοπλη τοιχοποιία.

Τύπος 2 : Οι κατασκευές που δεν ανήκουν στη κατηγορία 1.

<u>Παρατήρηση</u> : Για ενδιάμεσες τιμές ιδιοπεριόδων γίνεται γραμμικής παρεμβολή.

$C_3$ : Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την αύξηση των μετακινήσεων λόγω επιρροής P-Δ, που ορίζεται ως εξής :

$C_3 = 1.0$ για θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου ($K_s > 0$)

$C_3 = 1.0 +$ ———— για αρνητική κλίση του μετελαστικού κλάδου ($K_s < 0$) (5.5)

Όπου $\alpha = K_s / K_e$

Η τιμή του συντελεστή $C_3$ δεν χρειάζεται να υπερβαίνει την τιμή

—— (5.6)

Όπου θ είναι ο συντελεστής σχετικής μεταθετότητας ,που ισούται μια την μέγιστη τιμή των αντίστοιχων συντελεστών των ορόφων θi , οι οποίοι ορίζονται από την σχέση

— (5.7)

Όπου :

Pi : το κατακόρυφο φορτίο του i ορόφου.

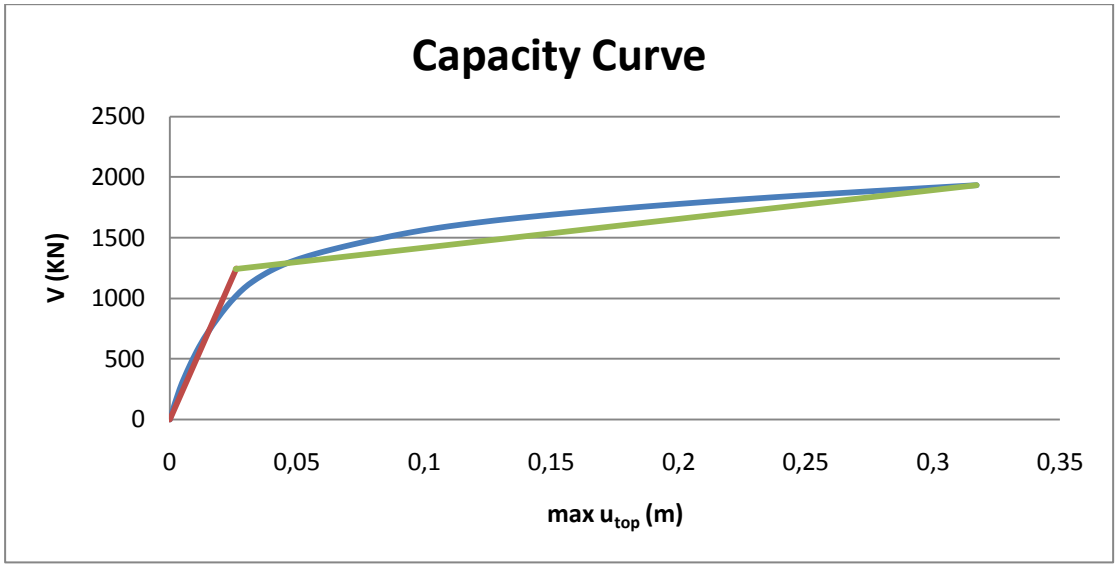
Vi : η συνολική τέμνουσα δύναμη του i ορόφου στην εξεταζόμενη διεύθυνση για το σεισμικό συνδυασμό , σύμφωνα με την κλασική ανάλυση.

hi : ύψος του i ορόφου

δi : σχετική μετακίνηση των πλακών του ορόφου στην εξεταζόμενη διεύθυνση, μετρούμενη στο κέντρο δυσκαμψίας (center of rigidity)

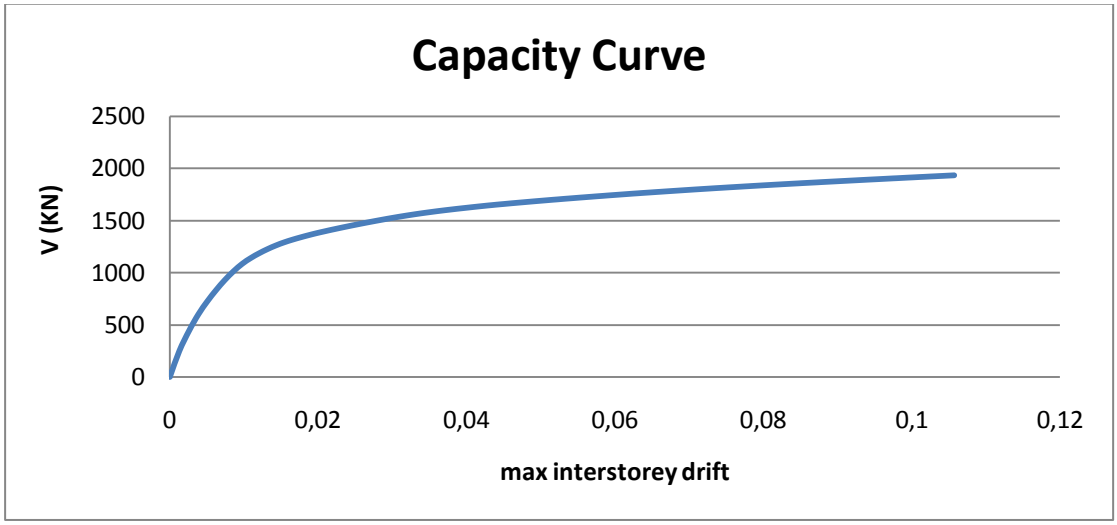
### 5.2.3 Καμπύλες τρωτότητας για το Μονώροφο

Σύμφωνα με τα παραπάνω , αρχικά κατασκευάζουμε την διγραμμική καμπύλη ικανότητας της κατασκευής.( στη συγκεκριμένη περίπτωση προέκυψε $V_y$=1244 KN και μετελαστική κλίση 5% της αρχικής)




Με βάση αυτή επιλέχθηκαν οι συντελεστές $C_0$ =1.0, $C_1$ =1.0, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Από αυτούς προέκυψε $T_e$ = 0.219352 sec και αντίστοιχη φασματική επιτάχυνση $S_a$ = 3.924 m/sec$^2$.

Στη συνέχεια για να κατασκευάσουμε τις καμπύλες τρωτότητας αντιστοιχούμε αρχικά κάθε τιμή του max interstorey drift θ στην αντίστοιχη τιμή μετακίνησης με βάση την καμπύλη αντίστασης της κατασκευής. Μπορούμε επομένως να αντιστοιχήσουμε για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας ,άρα και επίπεδο βλάβης της κατασκευής που προσδιορίζεται μέσω του max interstorey drift θ, μια αντιπροσωπευτική μετακίνηση.



Η αντιστοιχία αυτή στην περίπτωση του μονώροφου φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.( Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα όρια χρησιμοποιήθηκαν ίδια με προηγουμένως ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των καμπύλων τρωτότητας που προέκυψαν με την χρήση της μεθόδου των συντελεστών σε σχέση με αυτή της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης).

| | Max interstorey drift θ | u (m) |
|---|---|---|
| Light Damage | 0.002 | 0.006 |
| Heavy Damage | 0.01 | 0.03 |
| Collapse | 0.03 | 0.06 |

Πίνακας 5.12

Επόμενο βήμα για την κατασκευή των καμπύλων τρωτότητας είναι η επίλυση της σχέσης της μεθόδου των συντελεστών ως προς την φασματική επιτάχυνση. Έχουμε έτσι την παρακάτω σχέση :

(5.8)

Με την χρήση της παραπάνω σχέσης και έχοντας ως δεδομένη την αντιπροσωπευτική μετακίνηση της κατασκευής για κάθε επίπεδο βλάβης της μπορούμε να πάρουμε την φασματική επιτάχυνση του φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στην ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής μου.

Κατ' αντιστοιχία λοιπόν με την δυναμική προσαυξητική ανάλυση ,η τιμή που προκύπτει από την παραπάνω σχέση είναι αντίστοιχη με την μέση τιμή της επιτάχυνσης που προκύπτει από τα επιταχυνσιογραφήματα κατά την εφαρμογή της μεθόδου της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης. Ανάλογα ,το φάσμα σχεδιασμού είναι αντίστοιχο με το μέσο φάσμα του δείγματος των επιταχυνσιογραφημάτων προτού αυτά κλιμακωθούν. Για να προκύψει το φάσμα που είναι αντίστοιχο του μέσου φάσματος των κλιμακωμένων επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει να κλιμακώσουμε το φάσμα σχεδιασμού πολλαπλασιάζοντάς το με έναν κατάλληλο συντελεστή $\boldsymbol{\lambda_{\kappa}}$ .

Ο συντελεστής αυτός, $\boldsymbol{\lambda_{\kappa}}$ ,είναι ο λόγος της φασματικής επιτάχυνσης που προέκυψε από την μέθοδο των συντελεστών ως προς την τιμή της φασματικής επιτάχυνσης που αντιστοιχεί στη ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Στον επόμενο πίνακα παραθέτονται οι τιμές του συντελεστή $\boldsymbol{\lambda_{\kappa}}$ στην περίπτωση του μονώροφου.

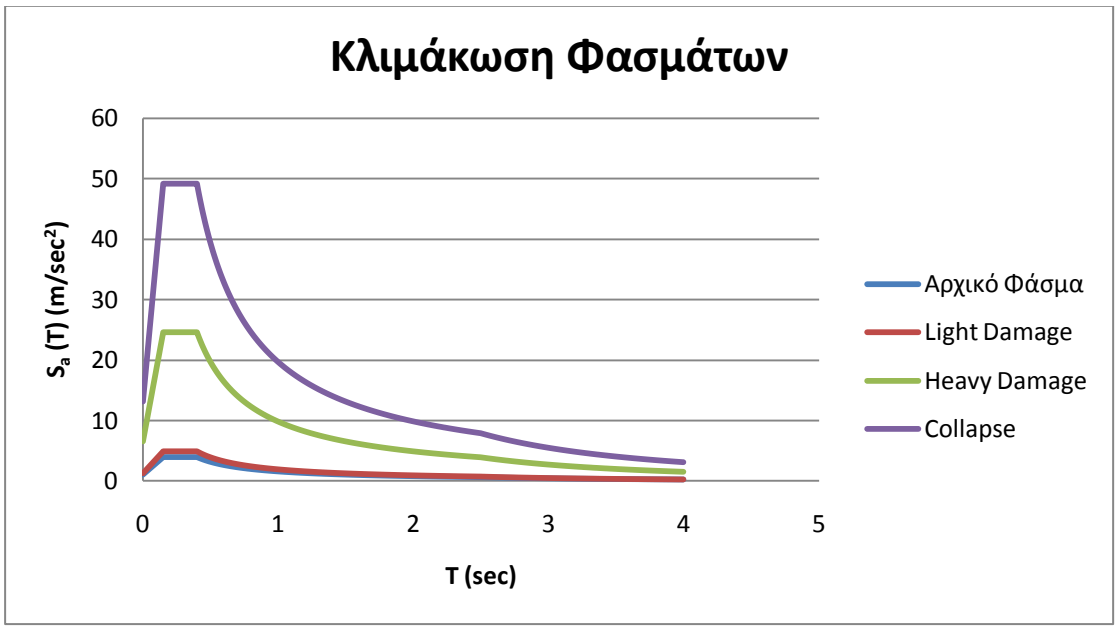
| | Sa από τύπο (5.2) | $\boldsymbol{\lambda_{\kappa}}$ |
|---|---|---|
| Light Damage | 4.922979 | 1.254582 |
| Heavy Damage | 24.61489 | 6.272909 |
| Collapse | 49.2297 | 12.54582 |

Πίνακας 5.13

πχ

Για το επίπεδο βλάβης Light Damage έχουμε $S_a$ ($T_e$) = 3.924 m/sec$^2$ και από την σχέση της μεθόδου των συντελεστών Sa = 4.922979 άρα $\boldsymbol{\lambda_\kappa}$ = 1.254582

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει η εξής κλιμάκωση του φάσματος:



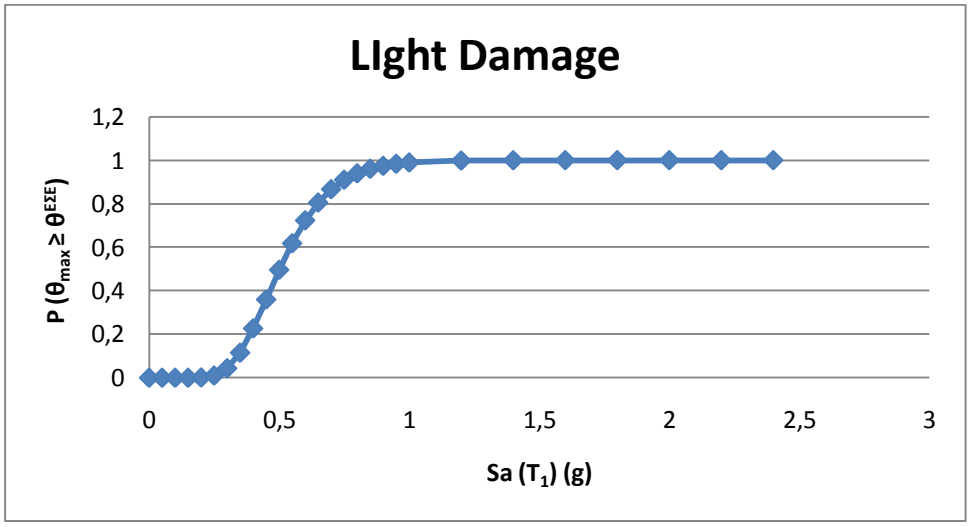

Μπορούμε πλέον να κατασκευάσουμε τις καμπύλες τρωτότητας είτε ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση είτε ως προς την Φασματική επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής χρησιμοποιώντας εκ νέου την σχέση :

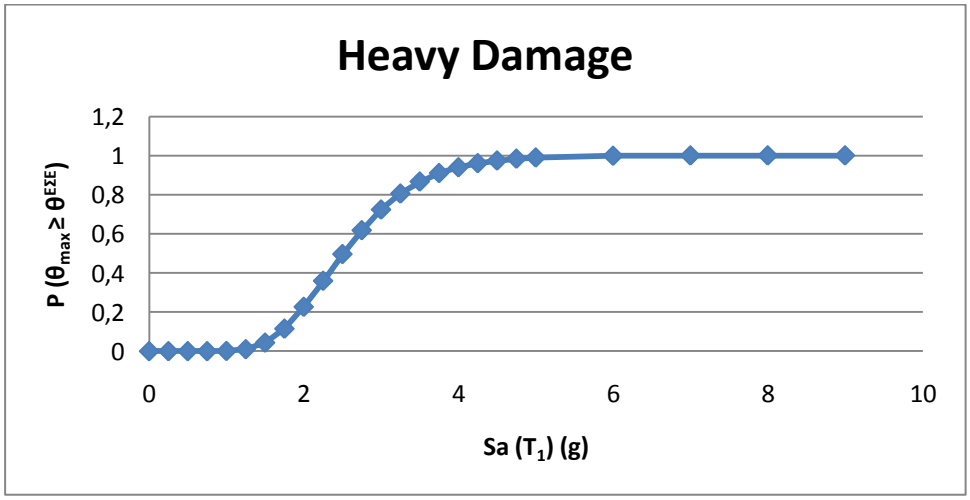
(4.7)

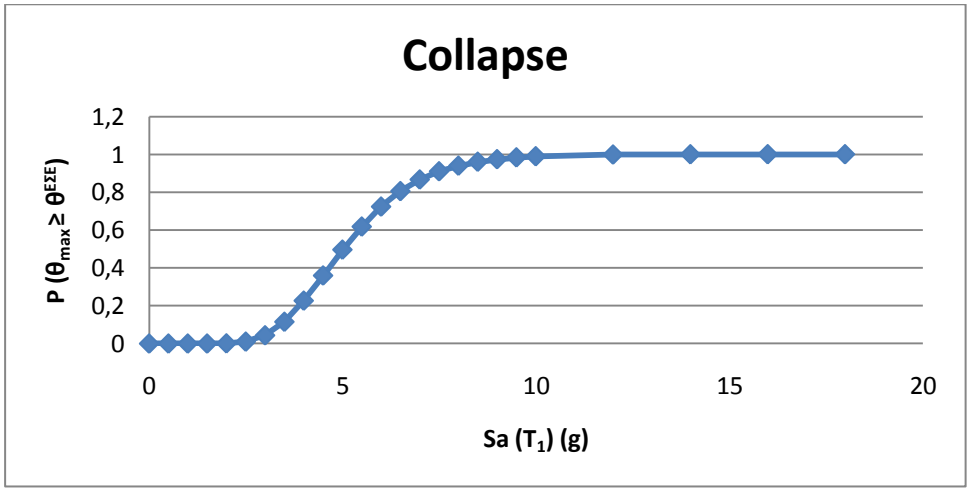
Να σημειωθεί ότι για τον συντελεστή ,σε αυτή τη μέθοδο κατασκευής καμπύλων τρωτότητας ,χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός 0.6 (κατά HAZUS 2003 ,[6] ), για την κατασκευή καμπύλων τρωτότητας με την χρήση της Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης (PGA) ,ενώ για τη Φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός 0.3 [6] . Για την κατασκευή καμπύλων τρωτότητας με χρήση της Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης η τιμή που λαμβάνεται ως μέση τιμή του δείγματος είναι η πρώτη τιμή του αντίστοιχου κλιμακούμενου φάσματος. Με βάση τα παραπάνω καταλήξαμε στις εξής καμπύλες τρωτότητας.

### 5.2.3.1 Ως προς Φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής για απόσβεση ξ = 5 % (Sa($T_1$ ,5%))

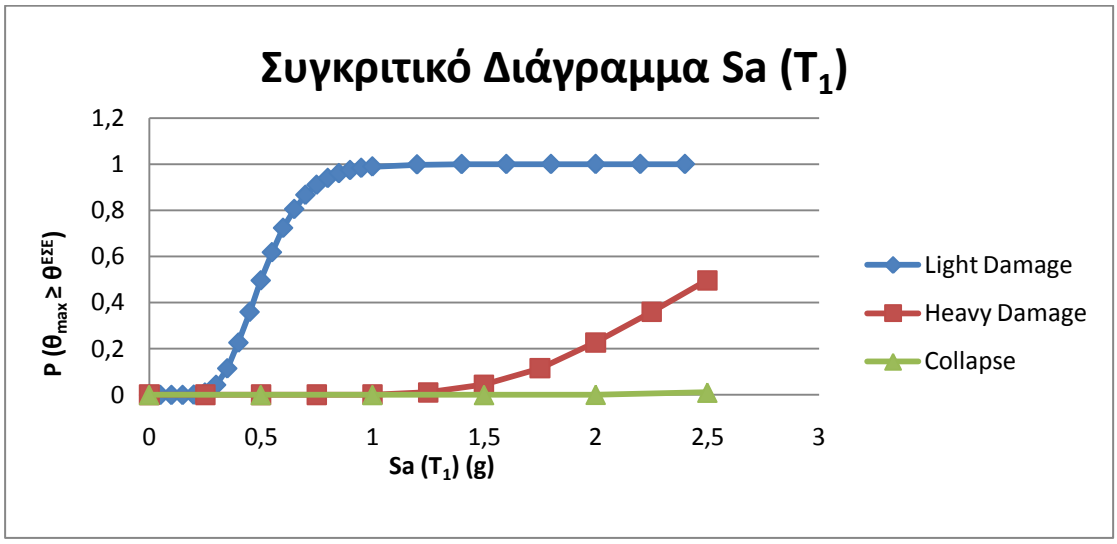
Όπως αναπτύξαμε και παραπάνω ως μέση τιμή για την εφαρμογή της σχέσης χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 4.922979 , 24.6149 και 49.2297 για τις στάθμες Light Damage , Heavy Damage και Collapse αντίστοιχα. Έτσι έχουμε:



Συγκριτικά τα διαγράμματα και για τις 3 στάθμες:



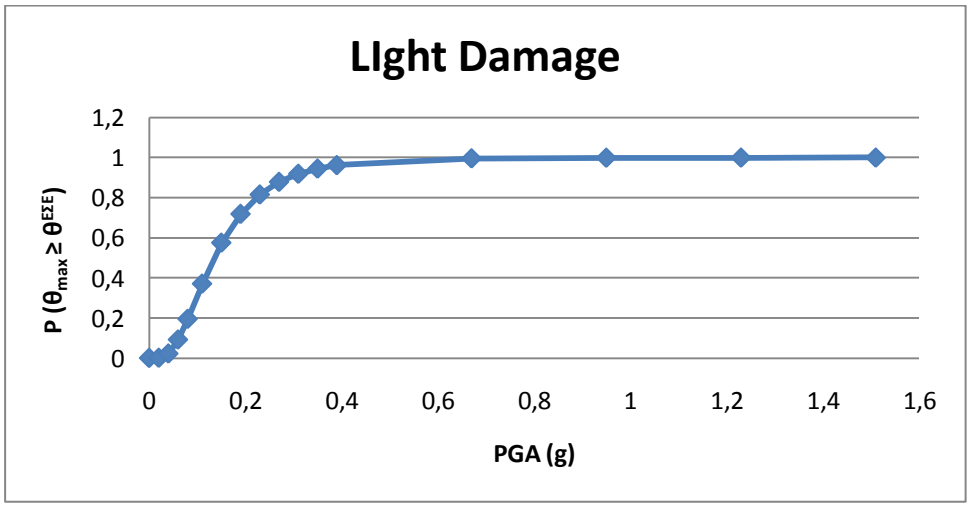

### 5.2.3.2 Ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA)

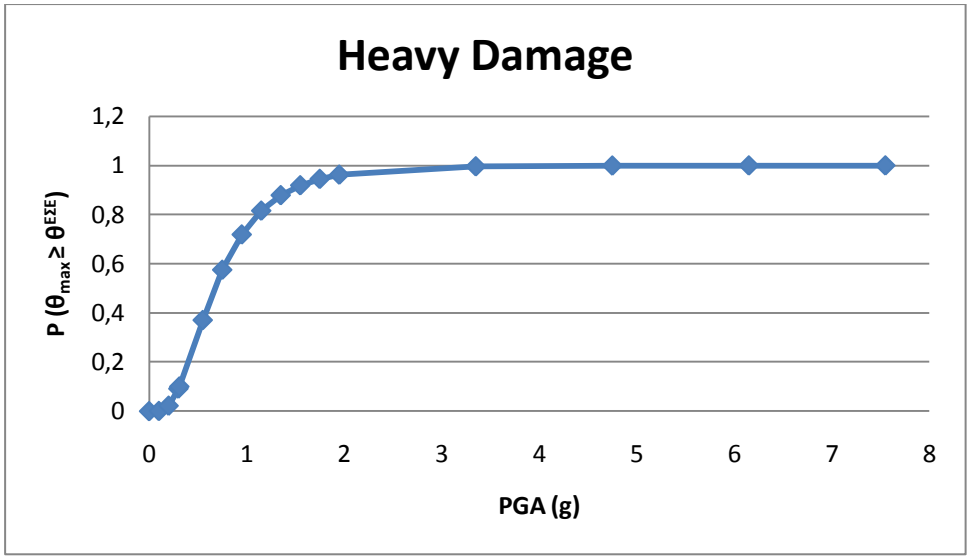
Οι μέσες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στον τύπο ,δηλαδή οι τιμές που αντιστοιχούν στις τιμές Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης για κάθε κλιμακούμενο φάσμα είναι αυτές του παρακάτω πίνακα.

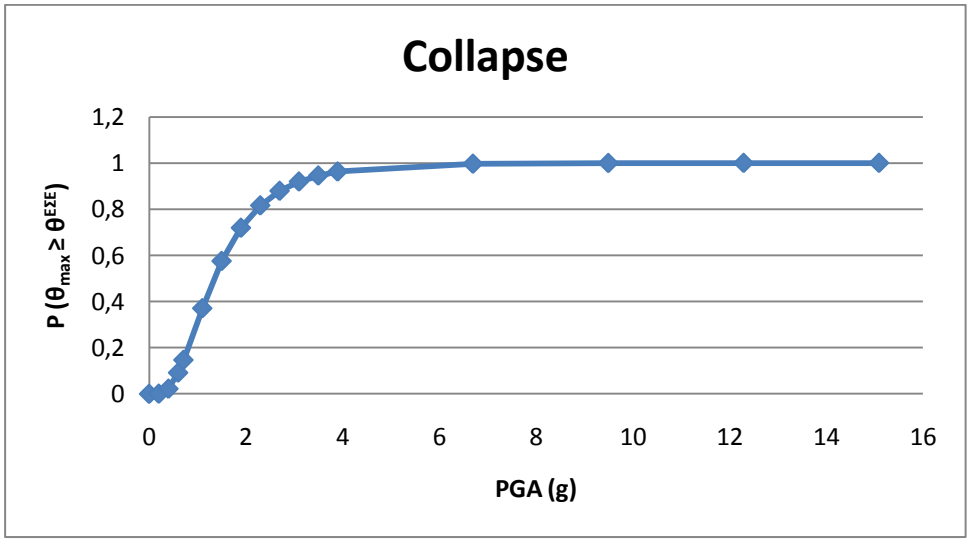
| | PGA (m/sec$^2$) |
|---|---|
| Light Damage | 1.312794 |
| Heavy Damage | 6.563972 |
| Collapse | 13.12794 |

Πίνακας 5.14

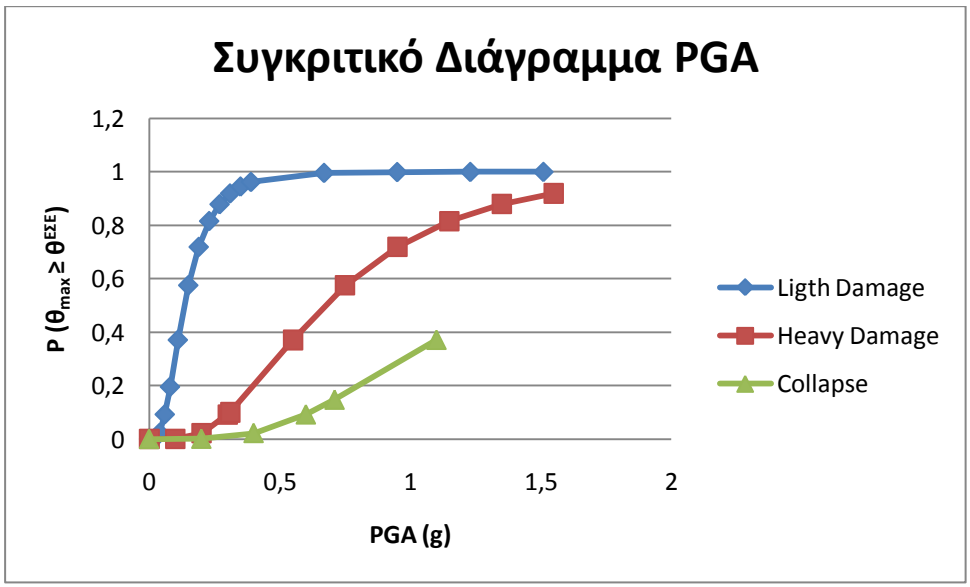
Έτσι έχουμε :





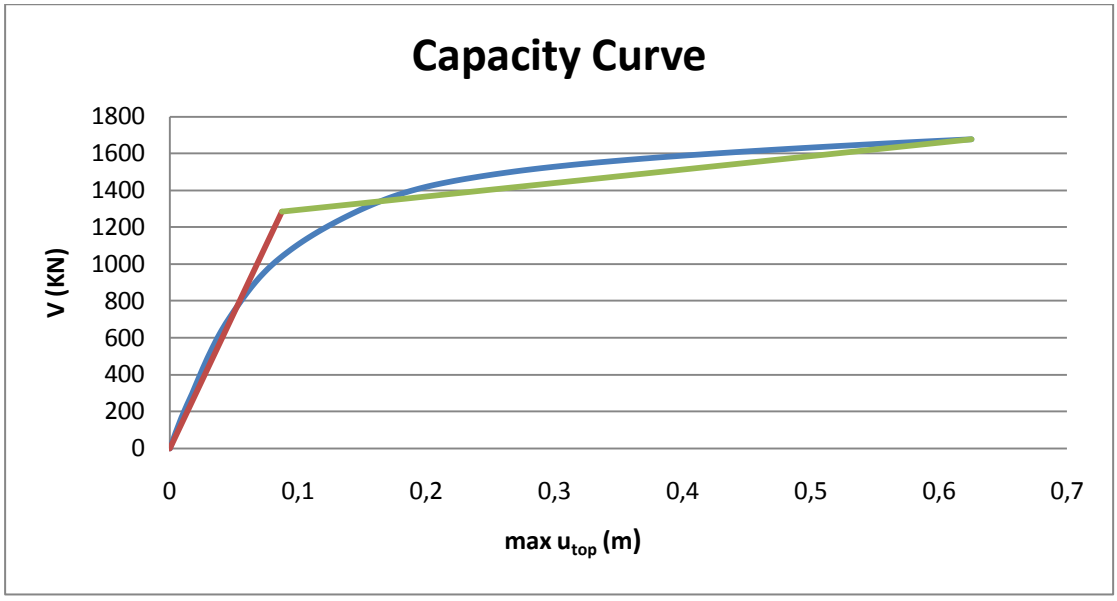




Και συγκριτικά και οι 3 καμπύλες



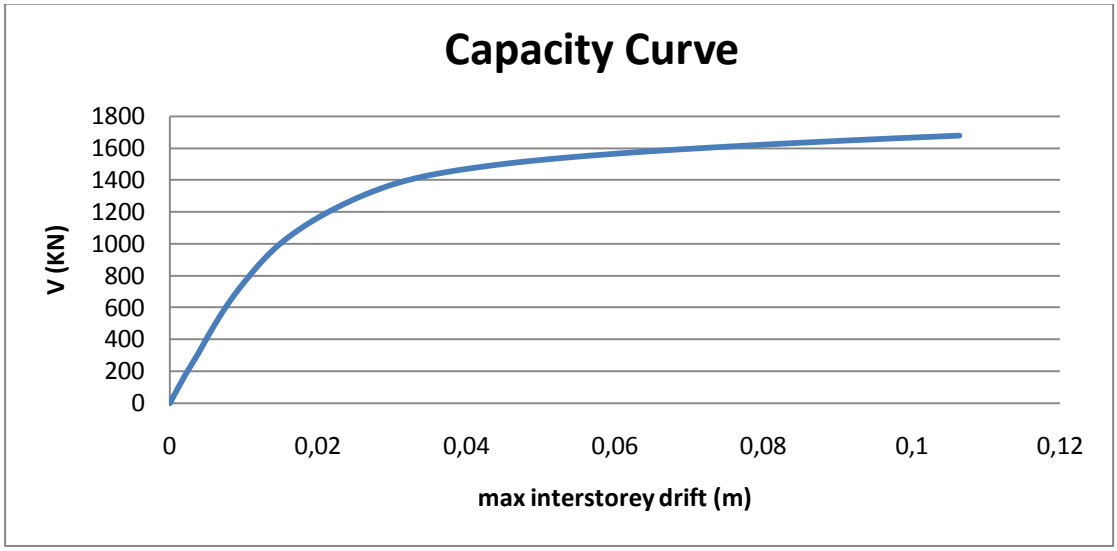
### 5.2.4 Καμπύλες τρωτότητας για το Διώροφο

Για τη διώροφη κατασκευή μας η διγραμμική καμπύλη ικανότητας είναι η παρακάτω και έχει Vy =1284 KN και κλίση μετελαστικού κλάδου 5 % της αρχικής.




Με βάση αυτή επιλέχθηκαν οι συντελεστές $C_0$ =1.2, $C_1$ =1.0, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Από αυτούς προέκυψε $T_e$ = 0.385711 sec και αντίστοιχη φασματική επιτάχυνση $S_a$ = 3.924 m/sec$^2$.

Η αντιστοιχία max interstorey drift και μετατόπισης κορυφής δίνεται από τον παρακάτω πίνακα και προέκυψε από τη καμπύλη αντίστασης της κατασκευής μας. Στον πίνακα αυτό παρατηρούμε ,επίσης, ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά όρια εντός του διαστήματος της κάθε στάθμης επιτελεστικότητας. Αυτό έγινε γιατί κρίθηκαν υπερβολικά συντηρητικά τα όρια που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



| | Max interstorey drift θ | u (m) |
|---|---|---|
| Light Damage | 0.004 | 0.019134 |
| Heavy Damage | 0.012 | 0.062783 |
| Collapse | 0.03 | 0.175599 |

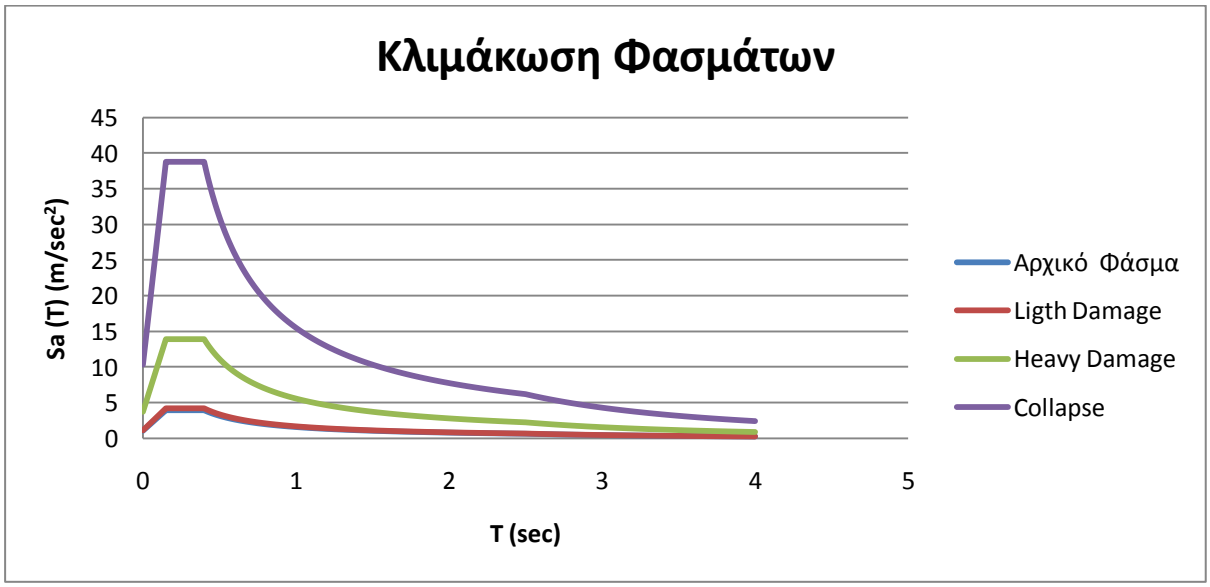
Πίνακας 5.15

Στη συνέχεια γίνεται η κλιμάκωση των φασμάτων με την εύρεση του συντελεστή $\boldsymbol{\lambda_{\kappa}}$ από τους λόγους των φασματικών επιταχύνσεων.

| | Sa | $\boldsymbol{\lambda_{\kappa}}$ |
|---|---|---|
| Light Damage | 4.231086 | 1.078258 |
| Heavy Damage | 13.88339 | 3.538071 |
| Collapse | 38.8308 | 9.895718 |

Πίνακας 5.16

Προέκυψε έτσι μια κλιμάκωση της μορφής:



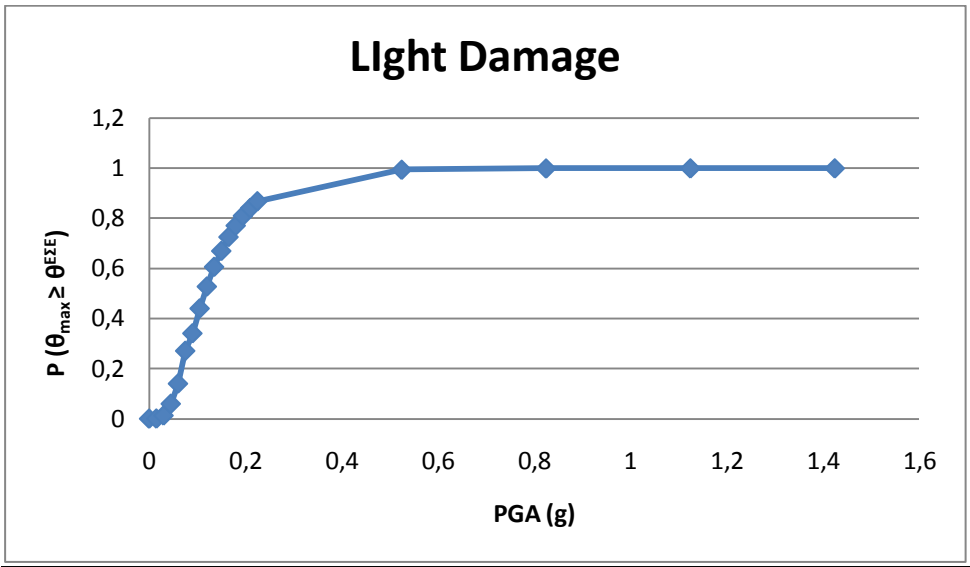

Τέλος οι μέσες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στον τύπο ,δηλαδή οι τιμές που αντιστοιχούν στις τιμές Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης για κάθε κλιμακούμενο φάσμα είναι αυτές του παρακάτω πίνακα.

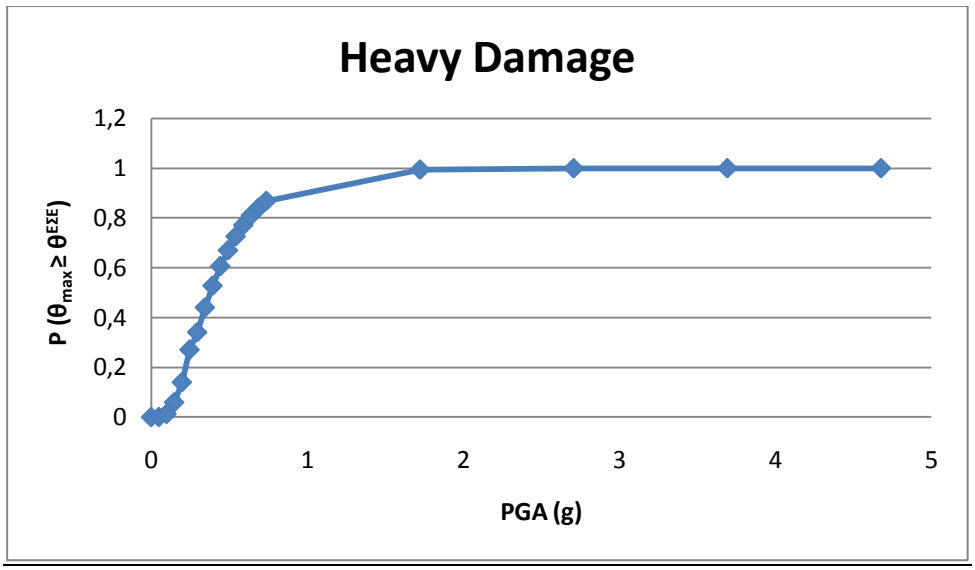
| | PGA (m/sec$^2$) |
|---|---|
| Light Damage | 1.12829 |
| Heavy Damage | 3.702238 |
| Collapse | 10.35488 |

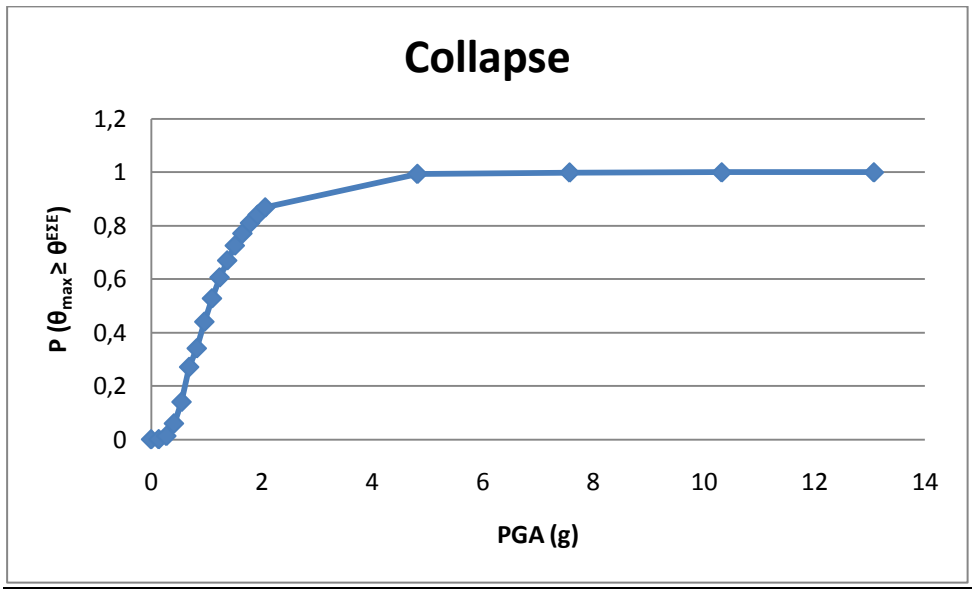
Πίνακας 5.17

Έτσι έχουμε :

Καμπύλες τρωτότητας ως προς Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA)

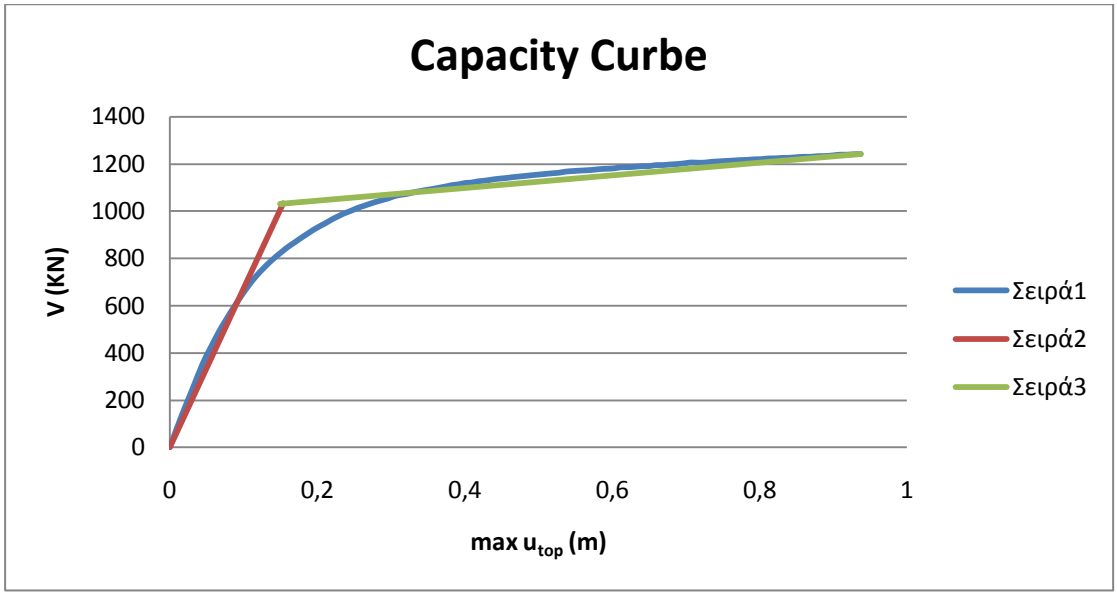


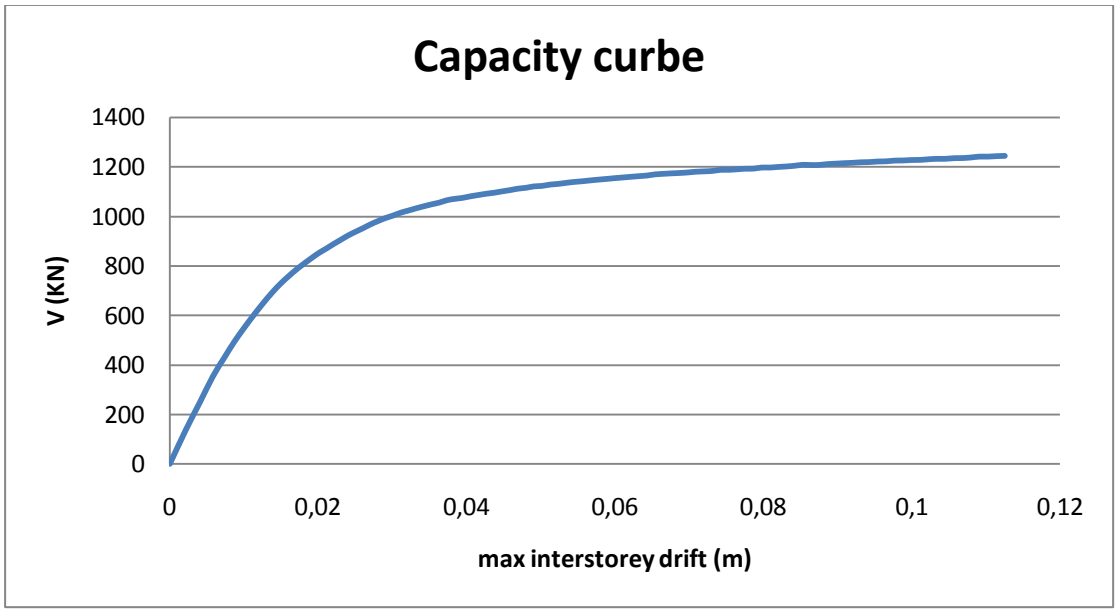
### 5.2.5 Καμπύλες τρωτότητας για το Τριώροφο

Για τη τριώροφη κατασκευή μας η διγραμμική καμπύλη ικανότητας είναι η παρακάτω και έχει Vy =1033 KN και κλίση μετελαστικού κλάδου 4 % της αρχικής.




Με βάση αυτή επιλέχθηκαν οι συντελεστές $C_0$ =1.3, $C_1$ =1.13, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Από αυτούς προέκυψε $T_e$ = 0.538111 sec και αντίστοιχη φασματική επιτάχυνση $S_a$ = 2.91687 m/sec$^2$.

Η αντιστοιχία max interstorey drift και μετατόπισης κορυφής δίνεται από τον παρακάτω πίνακα και προέκυψε από τη καμπύλη αντίστασης της κατασκευής μας. Στον πίνακα αυτό παρατηρούμε ,επίσης, ότι χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια όρια εντός του διαστήματος της κάθε στάθμης επιτελεστικότητας με αυτά του τριώροφου.



| | Max interstorey drift θ | u (m) |
|---|---|---|
| Light Damage | 0.004 | 0.030553 |
| Heavy Damage | 0.012 | 0.093854 |
| Collapse | 0.03 | 0.245148 |

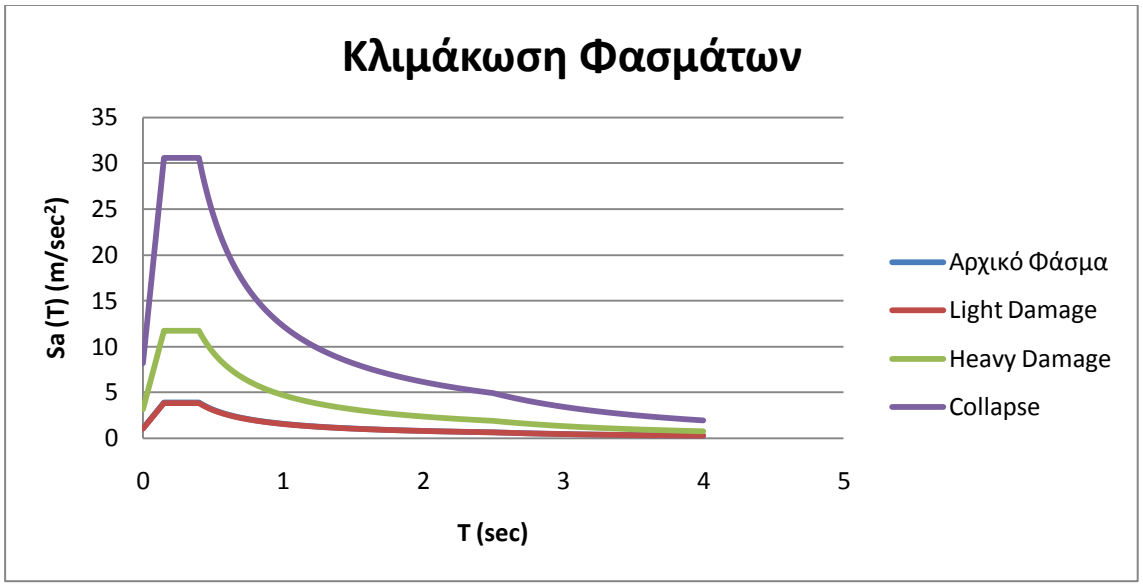
Πίνακας 5.18

Στη συνέχεια γίνεται η κλιμάκωση των φασμάτων με την εύρεση του συντελεστή $\lambda_\kappa$ από τους λόγους των φασματικών επιταχύνσεων.

| | Sa | $\lambda_\kappa$ |
|---|---|---|
| Light Damage | 2.834285 | 0.971687 |
| Heavy Damage | 8.706366 | 2.984831 |
| Collapse | 22.74104 | 7.796384 |

Πίνακας 5.19

Προέκυψε έτσι μια κλιμάκωση της μορφής:



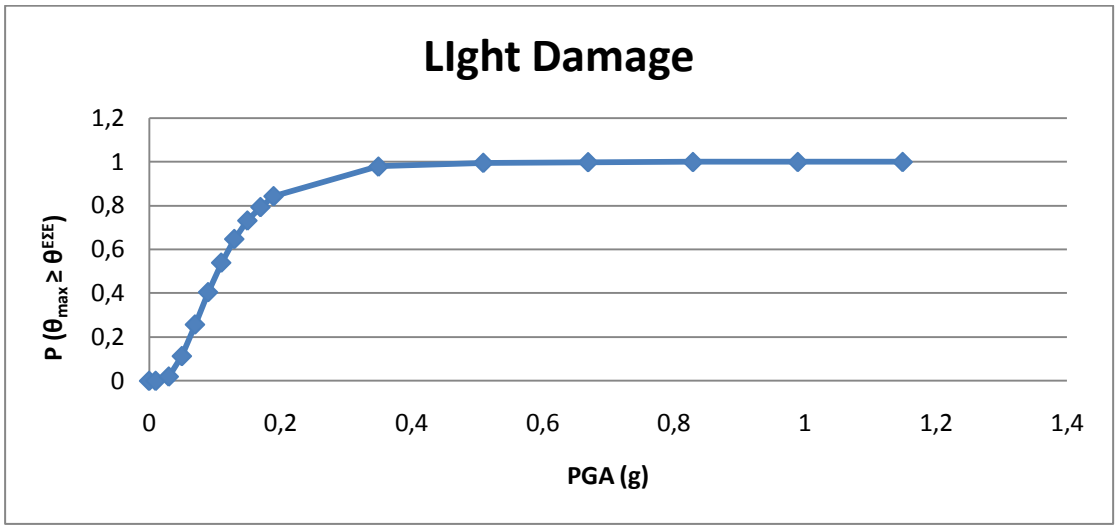

Τέλος οι μέσες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στον τύπο ,δηλαδή οι τιμές που αντιστοιχούν στις τιμές Μέγιστης Εδαφικής Επιτάχυνσης για κάθε κλιμακούμενο φάσμα είναι αυτές του παρακάτω πίνακα.

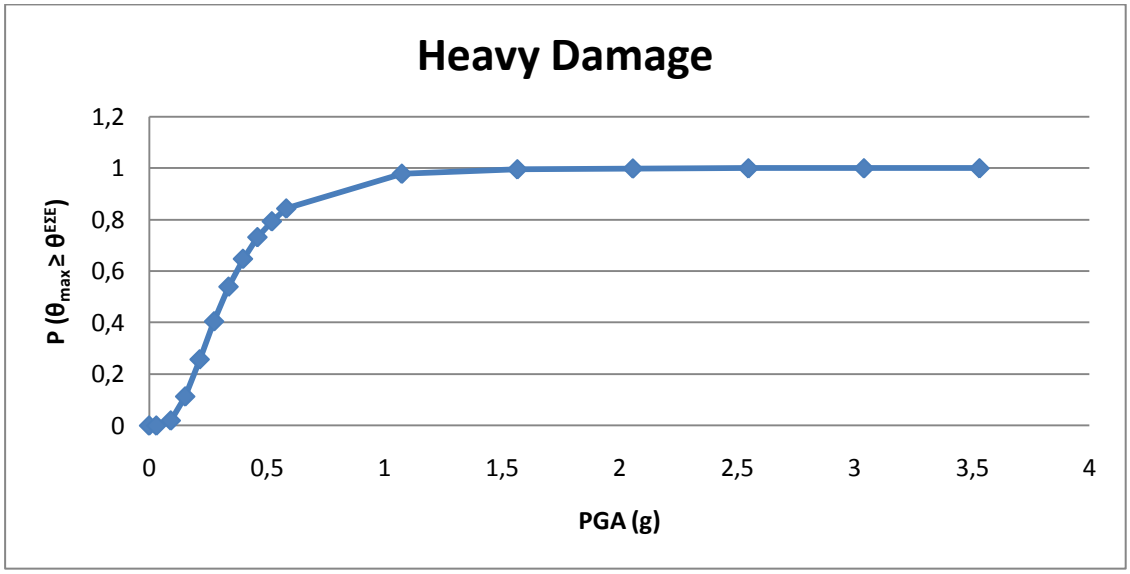
| | PGA (m/sec$^2$) |
|---|---|
| Light Damage | 1.016773 |
| Heavy Damage | 3.123327 |
| Collapse | 8.158137 |

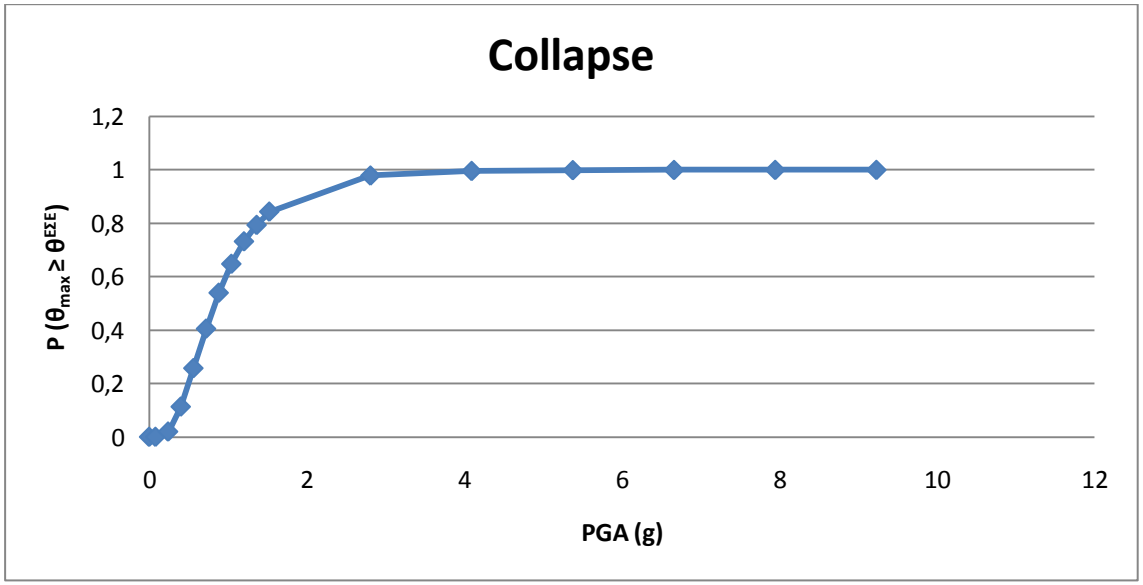
Πίνακας 5.20

Έτσι έχουμε :

Καμπύλες τρωτότητας ως προς Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA)



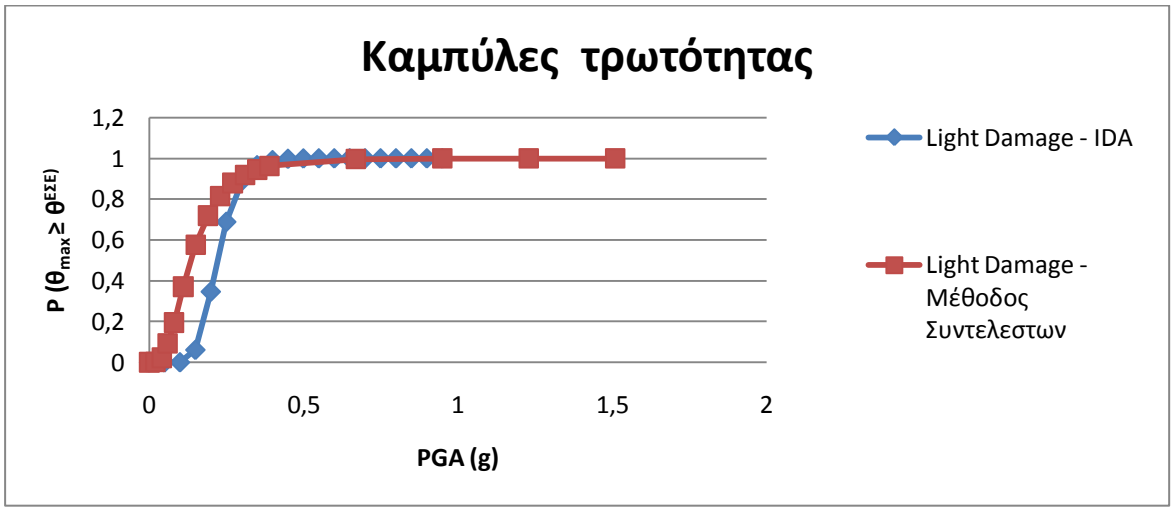



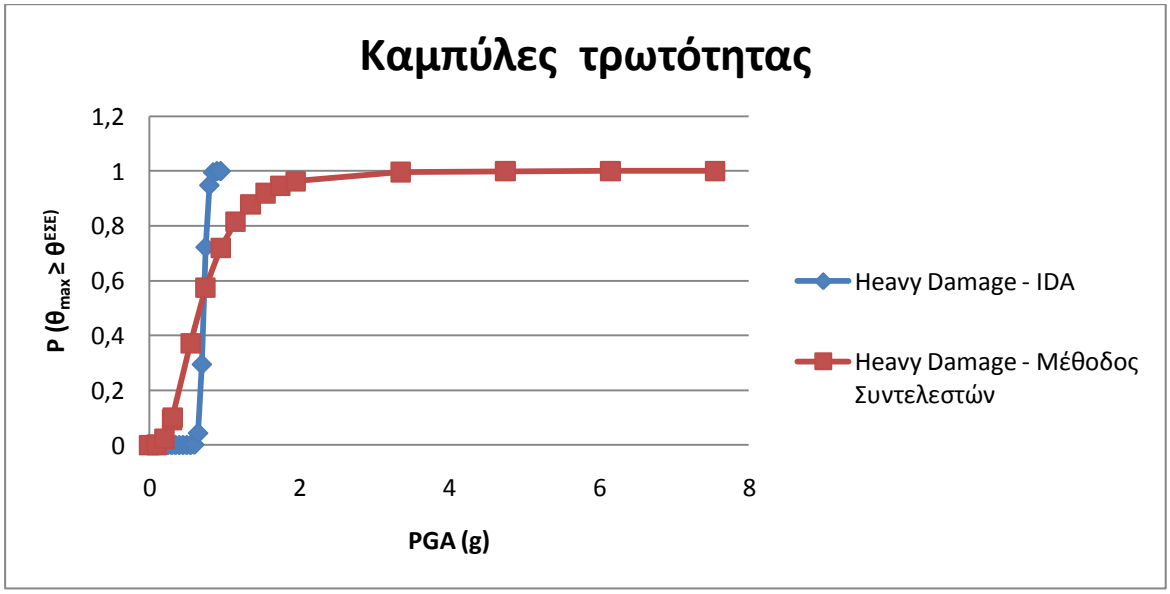



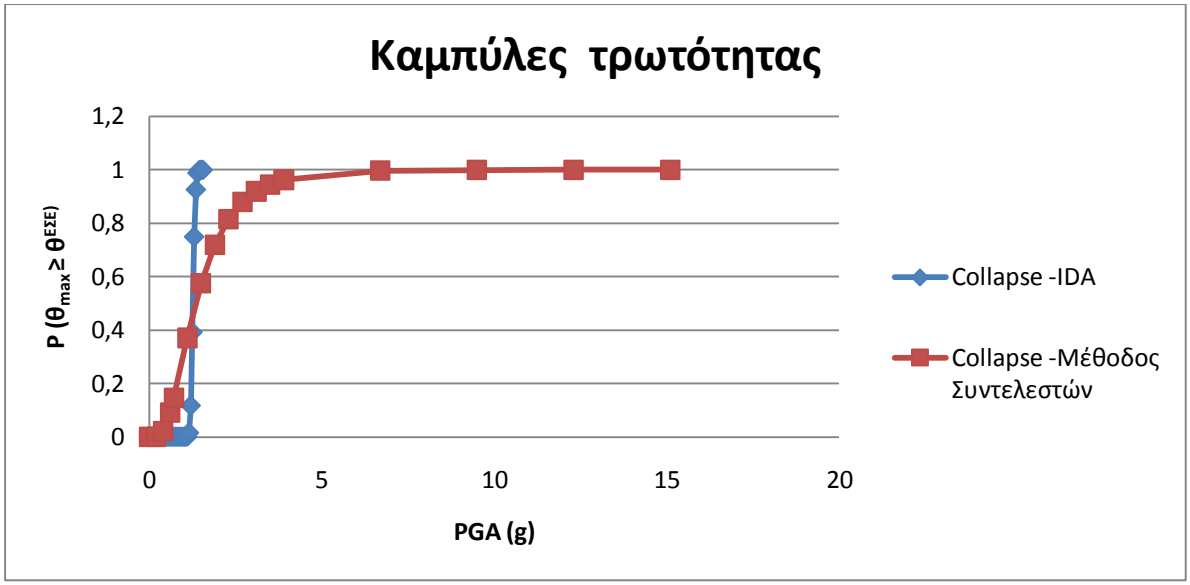
## 5.3 Σύγκριση καμπύλων τρωτότητας από Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση και Μέθοδο Συντελεστών

Όπως είδαμε και παραπάνω μπορούμε να κατασκευάσουμε καμπύλες τρωτότητας τόσο με τη χρήση της μεθόδου της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης όσο και με της χρήση της Μεθόδου των Συντελεστών. Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε μια σύγκριση των καμπυλών που προέκυψαν για την μονώροφη κατασκευή μας με τις δύο αυτές μεθόδους .

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν θα πρέπει να αναφέρουμε κάποιες ιδιότητες που έχουν οι καμπύλες τρωτότητας. Αρχικά πολύ σημαντικό για τα συμπεράσματά μας είναι η θέση που έχει το κέντρο της κάθε καμπύλης τρωτότητας. Η θέση που έχει το κέντρο της εκάστοτε καμπύλης τρωτότητας εξαρτάται από την μέση τιμή που έχει επιλεχθεί. Αντίστοιχα για δεδομένη μέση τιμή η τυπική απόκλιση που επιλέγεται καθορίζει την κλίση της καμπύλης τρωτότητας.






Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση καμπύλων τρωτότητας με διαφορετικό λόγο σ/μ και διαφορετική μέση τιμή. Φυσικά ακόμη και να ήταν ίδιες , οι καμπύλες που προήλθαν από την μέθοδο της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης αναφέρονται στο συγκεκριμένο δείγμα επιταχυνσιογραφημάτων και στις αποκρίσεις τους. Έτσι τα αποτελέσματα της κάθε σύγκρισης δεν είναι μονοσήμαντα αλλά ισχύουν μόνο για το συγκεκριμένο δείγμα που εξετάζουμε , δηλαδή με μία διαφορετική επιλογή επιταχυνσιογραφημάτων θα μπορούσαμε να οδηγηθούμε σε διαφορετικά αποτελέσματα κατά την σύγκριση των δύο μεθόδων.

# Κεφάλαιο 6

# ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

## 6.1 Επιλεγμένα όρια και παρουσίαση σεναρίων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έχουμε ορίσει τρία επίπεδα στόχων επιθυμητής επιτελεστικότητας : i) Περιορισμός Βλαβών – Συχνός σεισμός, ii) Σημαντικές Βλάβες – Σπάνιος Σεισμός, iii) Οιονεί κατάρρευση – Πολύ Σπάνιος Σεισμός. Κατά τον σχεδιασμό με στάθμες επιτελεστικότητας με χρήση ντετερμινιστικών κριτηρίων και με βάση τα τρία παραπάνω επίπεδα ,ορίζουμε τις αντίστοιχες τιμές του max intertstorey drift που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από αυτά, ως εξης:

(Σημείωση : αυτά τα όρια χρησιμοποιήθηκαν και για τις 3 κατασκευές που παρουσιάζονται σε αυτή τη διπλωματική με μόνη εξαίρεση την τιμή για το μονώροφό όπου και κρίθηκε κατάλληλη η χρήση της τιμής 3.2 %.)

Στις παραπάνω τιμές οι όροι 50/50 , 10/50 και 2/50 αντιστοιχούν στις αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασης . Πιο συγκεκριμένα είναι 50 % , 10% και 2% αντίστοιχα για κάθε 50 χρόνια. Αυτές οι πιθανότητες αντιστοιχούν κατά σειρά στον Συχνό Σεισμό , στον Σπάνιο Σεισμό και στον Πολύ Σπάνιο Σεισμό (Ocassional Earthquake , Rare Earthquake και Maximum Considered event αντίστοιχα). Οι αριθμητικές τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε μια από τις παραπάνω στάθμες είναι 0.11 g για Συχνό Σεισμό , 0.31 g για Σπάνιο σεισμό και 0.78 g για Πολύ Σπάνιο Σεισμό.

Στη συνέχεια θα πρέπει να αντιστοιχήσουμε το κάθε ένα από τα παραπάνω όρια με πιθανοτικούς περιορισμούς ώστε να εξετάσουμε κατά πόσο επηρεάζει η επιλογή των περιορισμών αυτών στην τελική μορφή της κατασκευής μας. Στα σενάρια που ακολουθούν κάθε στόχος τρωτότητας ορίζεται από μια οριακή πιθανότητα που αντιστοιχεί στο γεγονός ότι η κατασκευή δεν θα ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο απόδοσης για μια δεδομένη πιθανότητα σεισμικού κινδύνου (όπως αυτά ορίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο).

Έπειτα, θα ορίσουμε τα διάφορα σενάρια τα οποία θα είναι περισσότερα από ένα και θα επιδιώξουμε η λογική καθορισμού των διαφόρων σεναρίων να είναι για το κάθε ένα διαφορετική. Έτσι θα μπορούμε να έχουμε καλύτερη εποπτεία για την επίδραση του εκάστοτε σεναρίου στη διαστασιολόγηση της κατασκευής.

Σενάριο Α

Σενάριο Β

Σενάριο Γ

Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε κατασκευή θα εξετάσουμε και ένα τέταρτο σενάριο το οποίο θα επιδιώξουμε να είναι η ‘’χρυσή τομή ‘’ των σεναρίων Α, Β ,Γ έτσι ώστε να γίνει ακόμη πιο αισθητή η επιρροή των κριτηρίων τρωτότητας στην τελική διαστασιολόγηση της κατασκευής.

Αφού ορίσαμε τα σενάρια στη συνέχεια θα προχωρήσουμε για κάθε κατασκευή μας (Μονώροφο ,Διώροφο, Τριώροφο) στην σταδιακή επαύξηση των διαστάσεων των τοιχίων και μέσα από διαδοχικές αναλύσεις από το Opensees θα βρίσκουμε την καμπύλη αντίστασης για κάθε σχεδιασμό. Έχοντας τις καμπύλες αντίστασης για κάθε σχεδιασμό μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο των συντελεστών και κατ’ επέκταση να κατασκευάσουμε τις καμπύλες τρωτότητας ως προς την Μέγιστη Εδαφική επιτάχυνση (PGA) για τους σχεδιασμούς αυτούς. Από τις καμπύλες αυτές θα προσδιορίζουμε κάθε φορά αν έχουν ικανοποιηθεί τα οριακά κριτήρια του εκάστοτε σεναρίου.

## 6.2 Μονώροφο

### 6.2.1 Αριθμητικό προσομοίωμα

Η μονώροφη κατασκευή που εξετάζουμε έχει διαστάσεις κάτοψης 12.00 x 16.00 μέτρα και το ύψος της είναι 3 μέτρα. Η πλάκα της είναι δοκιδοτή πάχους 0.45 μέτρων. Τα υποστυλώματά της $K_1$ , $K_3$ ,$K_6$ ,$K_8$ ,έχουν διαστάσεις 0.50 x 0.50 m . Εκτός των υποστυλωμάτων της υπάρχουν και τέσσερα τοιχία ( $K_2$ , $K_4$, $K_5$, $K_7$). Εξ' αυτών τα τοιχία $K_2$ , $K_4$, $K_5$ είναι πανομοιότυπα (το $K_2$ έχει διαφορετικό προσανατολισμό) ενώ αντίθετα για αρχιτεκτονικούς λόγους το τοιχίο $K_7$ είναι μικρότερο. Οι διαστάσεις των τριών πανομοιότυπων τοιχίων είναι 1.50 x 0.25 m ενώ οι διαστάσεις του $K_7$ είναι 1.00 x 0.25 m.

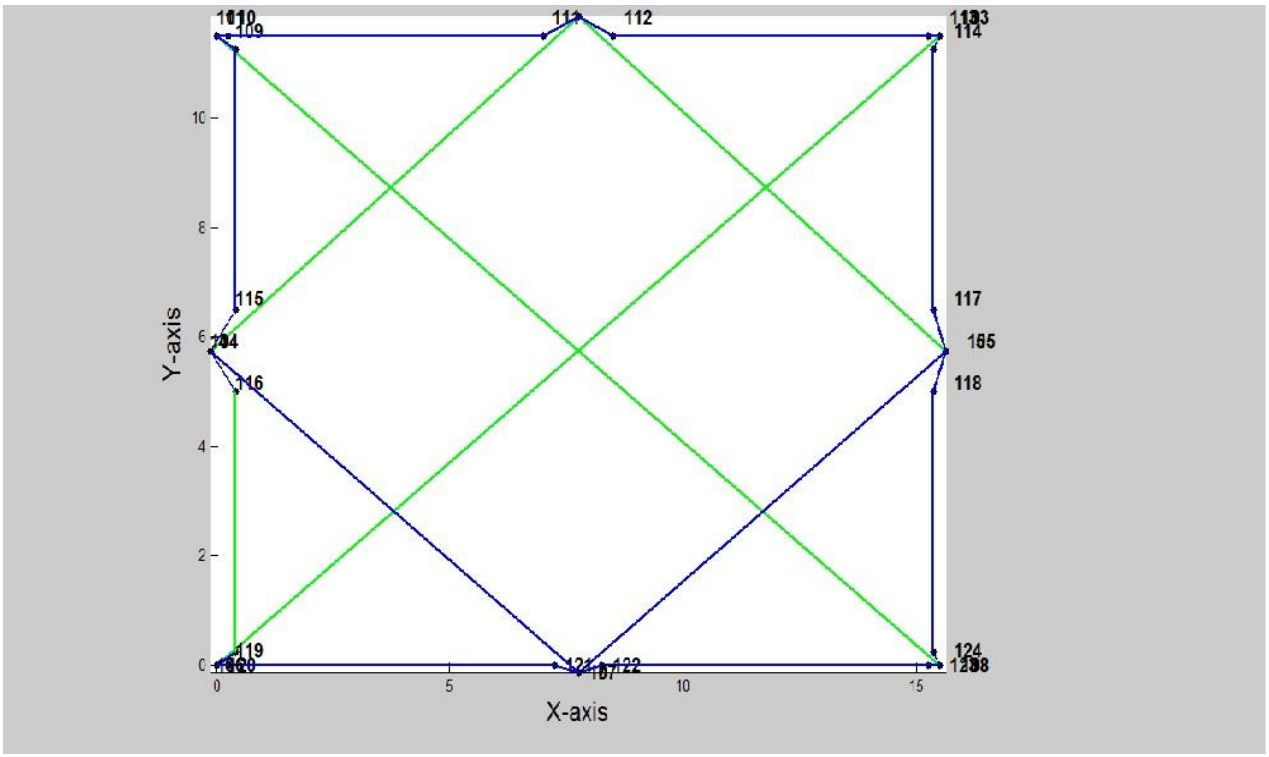
Κατά την προσομοίωση του μονώροφου με το πρόγραμμα Opensees , χρησιμοποιήθηκαν ραβδωτά μη γραμμικά στοιχεία τα οποία λειτουργούν με βάση την θεωρία της κατανεμημένης πλαστικότητας με πολυστρωματική θεώρηση. Η κατασκευή μας είναι μια τυπική κατασκευή από ωπλισμένο σκυρόδεμα και επομένως τα κύρια υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι σκυρόδεμα C 20/25 και χάλυβας S500 όπως αυτά ορίζονται από τον Ευρωκώδικα και τον ΕΚΩΣ 2000. Λόγω της αδυναμίας του προγράμματος να εισάγει οπλισμό διάτμησης , κατασκευάσαμε ένα υλικό με τις ιδιότητες του περισφιγμένου σκυροδέματος κατά τον Ευρωκώδικα 2. Μπορέσαμε έτσι να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος.

Για την επίτευξη της διατμητικής λειτουργίας της πλάκας χρησιμοποιήσαμε χιαστί συνδέσμους με ''άπειρο''(πολύ μεγάλο) εμβαδό. Σε αυτό το σημείο , ειδικά για την προσομοίωση της δοκιδοτής πλάκας αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε για ίδιο βάρος αυτό μιας αντίστοιχης κοινής πλάκας πάχους 0.33 m. Επιπλέον ,για την καλύτερη προσομοίωση της λειτουργίας της δοκιδοτής πλάκας στις δοκούς θεωρήθηκε διατομή διαστάσεων 1.20 x 0.45 m για τις δοκούς κατά την διεύθυνση x και 80 x 0.45 m για τις δοκούς στην διεύθυνση y.

Σε όλα τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να οριστεί το αριθμητικό προσομοίωμα η διατομή ορίστηκε κεντροβαρικά ως προς τον άξονα του στοιχείου. Για αυτό το λόγο επειδή οι κεντροβαρικοί άξονες των διαφόρων στοιχείων δεν ήταν πάντα σε ευθυγραμμία χρησιμοποιήθηκαν κάποια άκαμπτα μέλη για την σύνδεση μεταξύ των στοιχείων.

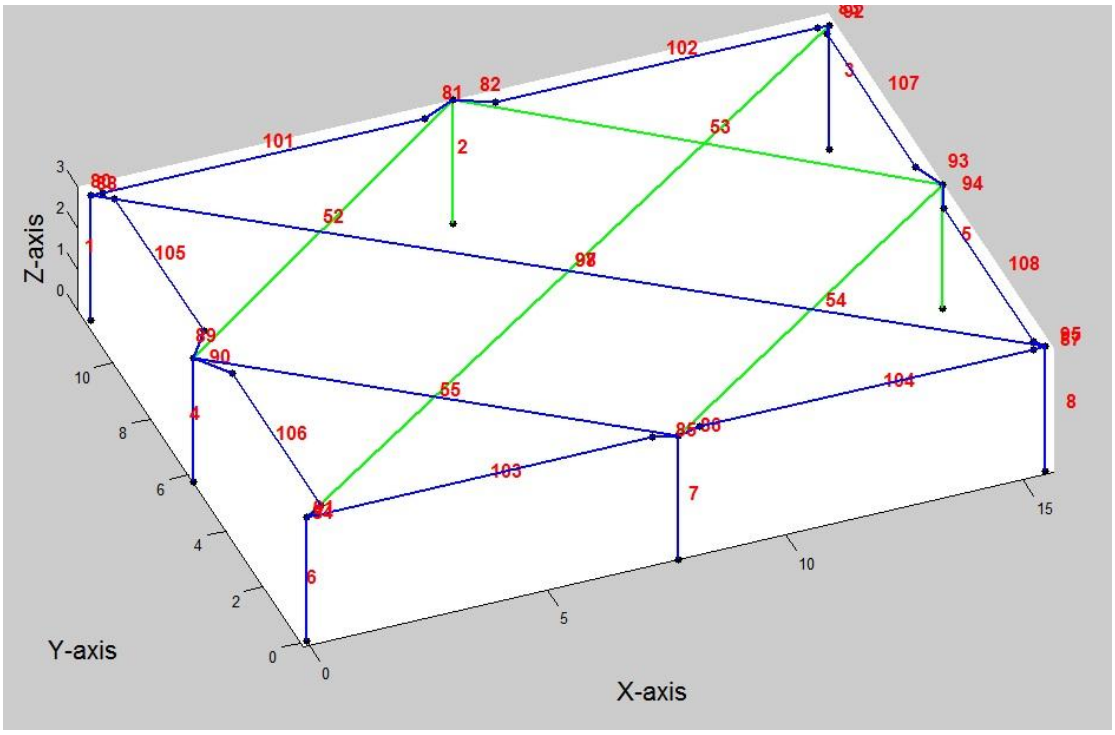
Παρακάτω φαίνεται η απεικόνιση του φορέα μας με την χρήση ενός μαθηματικού προγράμματος . ( Το Opensees δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον ) με όλους τους κόμβους και τα στοιχεία της .

Κάτοψη του προσομοιώματος:



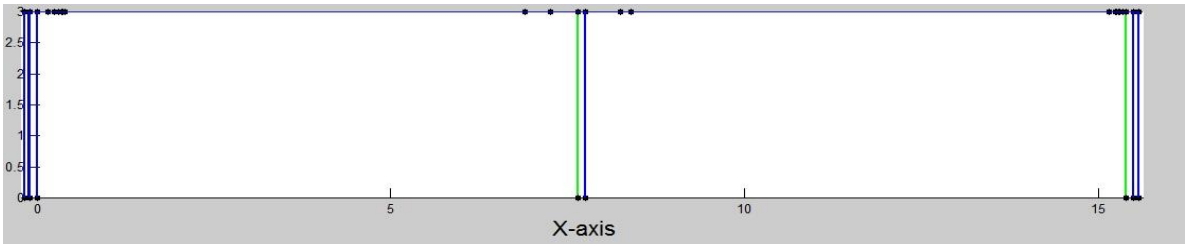

Σχήμα 6.1 Κάτοψη Μονώροφου

Προοπτική εικόνα του προσομοιώματος




Σχήμα 6.2

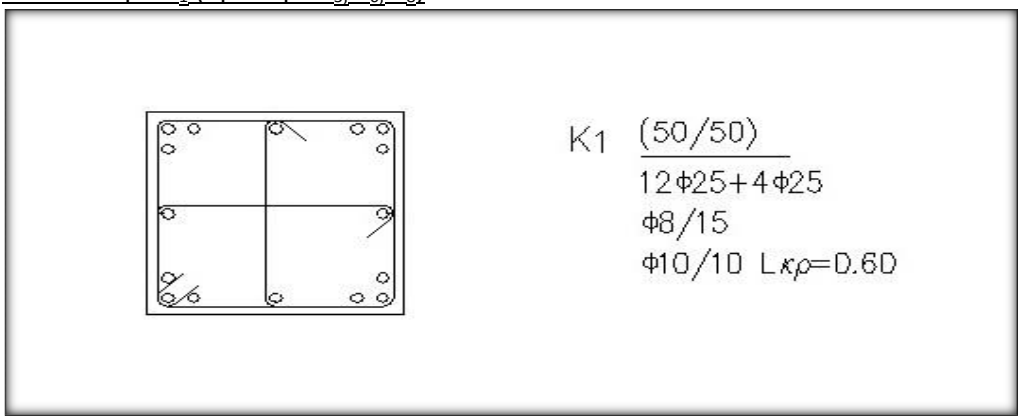
Πλάγια όψη του προσομοιώματος




Σχήμα 6.3 Πλάγια Όψη Μονώροφου

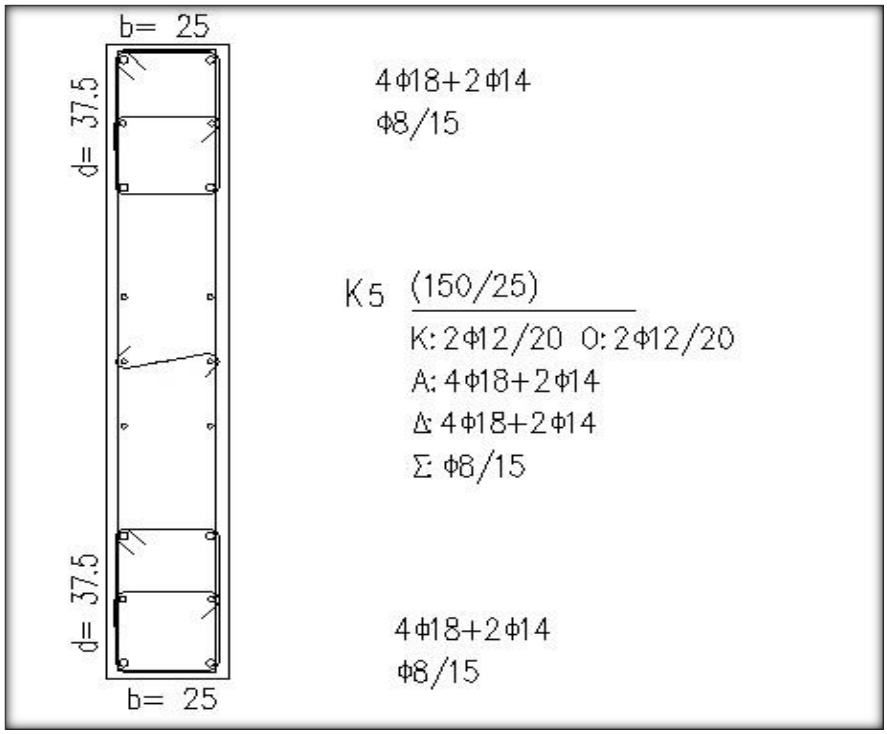
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τομές των στοιχείων του φορέα:

Υποστύλωμα $K_1$ (όμοια με $K_3$, $K_6$, $K_8$)



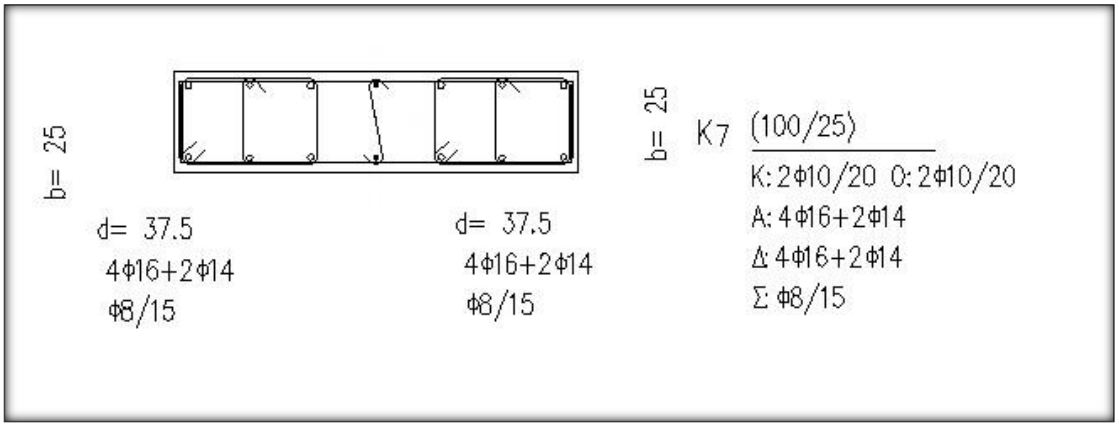

Σχήμα 6.4

Τοιχίο $K_5$ ( όμοιο με $K_2$ ,$K_4$)




Σχήμα 6.5

Τοιχίο $K_7$




Σχήμα 6.6

### 6.2.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

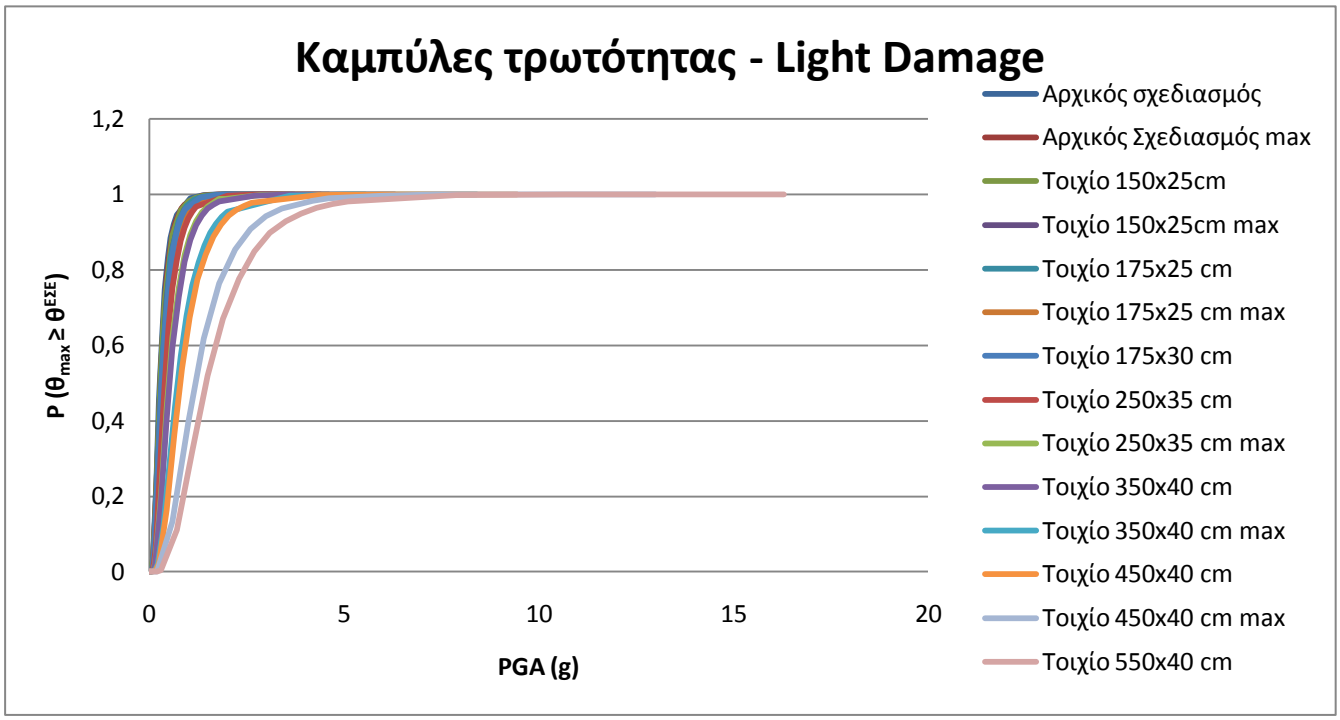
Όπως αναφέραμε και παραπάνω για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επιρροή των διαφόρων κριτηρίων τρωτότητας θα προχωρήσουμε σε διάφορους σχεδιασμούς , ξεκινώντας από τον αρχικό και επαυξάνοντας τα τοιχία $K_2$ ,$K_4$ , $K_5$ της κατασκευής μας. Εν συνεχεία για κάθε σχεδιασμό αφού κατασκευάσουμε την αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) με την χρήση της μεθόδου των συντελεστών (και του φάσματος του Ευρωκώδικα), μπορούμε να εξετάσουμε εάν πληρούνται τα κριτήρια για κάθε σενάριο (όπως αυτά αναπτύχθηκαν παραπάνω).

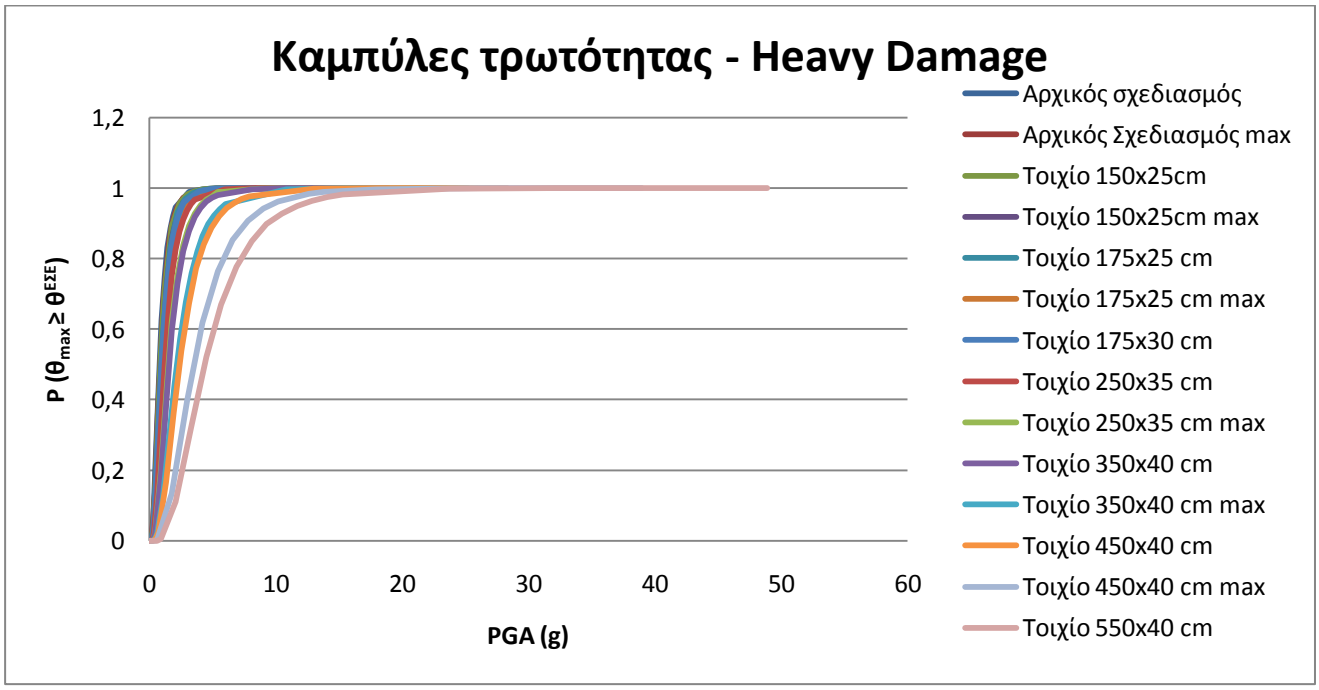
Η διαδικασία με την οποία κατασκευάστηκαν οι καμπύλες γενικά αλλά και για το μονώροφο πιο συγκεκριμένα ,αναπτύχθηκε αναλυτικότατα στα προηγούμενα κεφάλαια (πχ τιμή συντελεστή β = 0.6 κτλ). Τέλος , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω πρέπει να σημειωθεί ότι τα όρια που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές τιμές του max interstorey drift για το μονώροφο (μεταξύ των ορίων του πίνακα 5.1) είναι τα

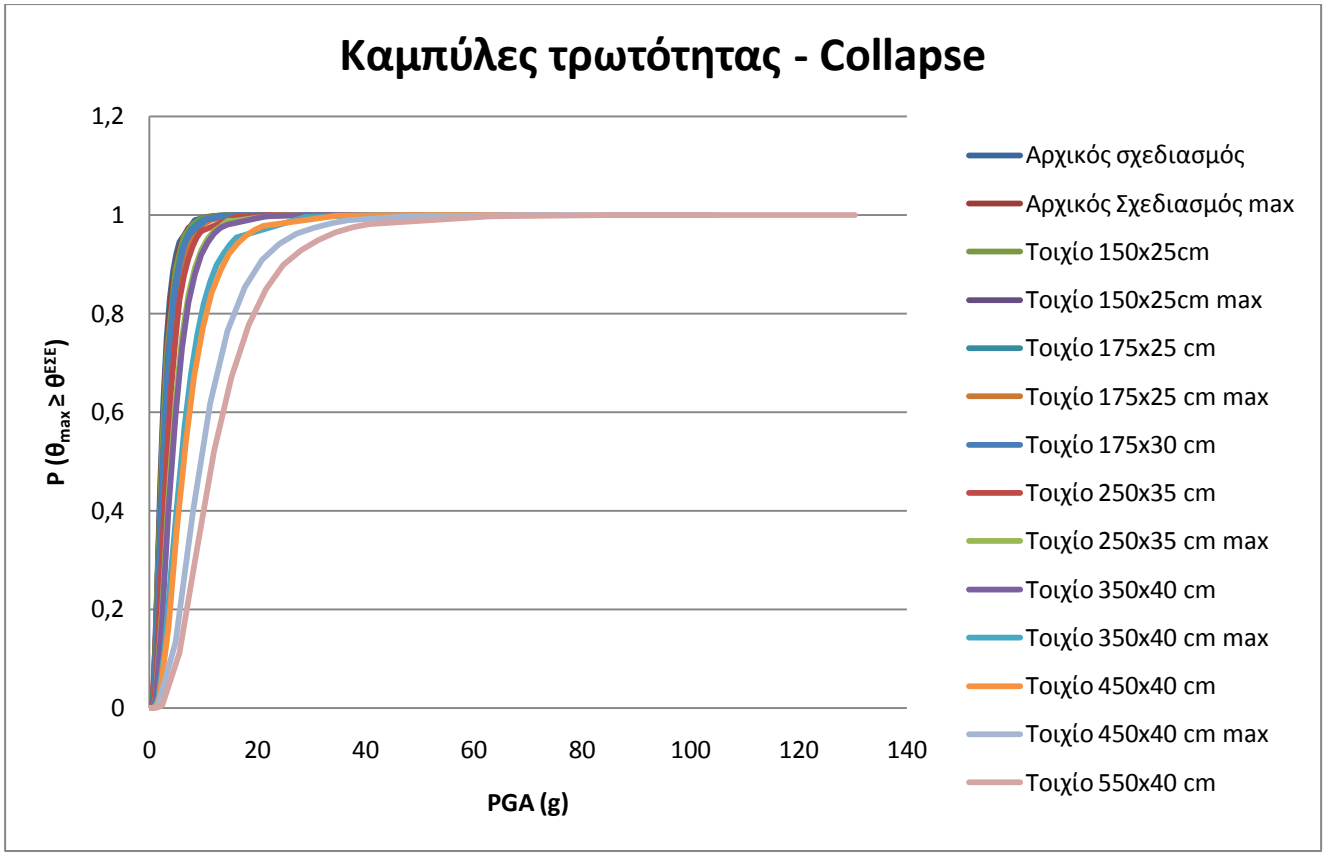
.

Για κάθε σχεδιασμό έγινε εξέταση της συμπεριφοράς της κατασκευής με 2 διαφορετικούς τρόπους όπλισης των τοιχίων. Στην πρώτη περίπτωση τοποθετούνταν ο ελάχιστος δυνατός οπλισμός που προβλέπεται σύμφωνα με τις κατασκευαστικές διατάξεις και στην δεύτερη περίπτωση τοποθετούνταν ο μέγιστος δυνατός οπλισμός (για να διακρίνονται οι δύο περιπτώσεις , στην περίπτωση του μέγιστου οπλισμού χρησιμοποιείται η λέξη **max**). Οι αριθμοί σε κάθε σχεδιασμό αναφέρονται στο μέγεθος των τοιχίων $K_2$ ,$K_4$ , $K_5$ . Οι σχεδιασμοί που εξετάστηκαν στο μονώροφο είναι 1) ο αρχικός , 2) ο αρχικός max , 3)1.50 x 0.30 , 4)1.50 x 0.30 max , 5) 1.75 x 0.25 , 6) 1.75 x 0.25 max , 7)1.75 x 0.30 , 8) 2.50 x 0.35, 9)2.50 x 0.35 max , 10)3.50 x 0.40 , 11) 3.50 x 0.40 max , 12)4.50 x 0.40 , 13)4.50 x 0.40 max ,14)5.50 x 0.40.

Στο μονώροφο οι συντελεστές είναι ίδιοι για όλους τους σχεδιασμούς και είναι όπως αναφέραμε και παραπάνω $C_0$ =1.0, $C_1$ =1.0, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Είναι προφανές ότι για κάθε σχεδιασμό αλλάζουν οι εκάστοτε τιμές της $T_e$ και της $S_a$ . Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες τρωτότητας για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας .






Από τις παραπάνω καμπύλες τρωτότητας προέκυψε ο παρακάτω πίνακας που δείχνει τις τιμές που παίρνει η πιθανότητα υπέρβασης της οριακής τιμής του max interstorey drift που έχουμε ορίσει για κάθε συνδυασμό στάθμης επιτελεστικότητας με το αντίστοιχο επίπεδο σεισμικού κινδύνου.

| **Μέγεθος τοχώματος** | **Occasional Event (0.11 g)** | **Rare Event (0.31 g)** | **Maximum Considered Event (0.78 g)** |
|---|---|---|---|
| αρχικός | 0,06944 | 0.05592 | 0.04648 |
| αρχικός max | 0.05757 | 0.04648 | 0.03836 |
| 1.50 x 0.30 | 0.05592 | 0.04531 | 0.03288 |
| 1.50 x 0.30 max | 0.03948 | 0.03144 | 0.02275 |
| 1.75 x 0.25 | 0.04272 | 0.03438 | 0.02743 |
| 1.75 x 0.25 max | 0.02500 | 0.0197 | 0.01539 |
| 1.75 x 0.30 | 0.03673 | 0.02908 | 0.02319 |
| **2.50 x 0.35** | **0.01578** | **0.01222** | **0.00939** |
| 2.50 x 0.35 max | 0.00587 | 0.00440 | 0.00326 |
| 3.50 x 0.40 | 0.00487 | 0.00357 | 0.00264 |
| **3.50 x 0.40 max** | **0.00083** | **0.00058** | **0.0004** |
| 4.50 x 0.40 | 0.00050 | 0.00035 | 0.00024 |
| **4.50 x 0.40 max** | **0.00004** | **0** | **0** |
| 5.50 x 0.40. | 0 | 0 | 0 |

Πίνακας Πιθανοτήτων Μονώροφου 6.1

Τώρα μπορούμε να εξετάσουμε σε ποιον σχεδιασμό καταλήγουμε ανάλογα με το σενάριο που έχουμε επιλέξει. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το σενάριο Α ικανοποιείται κατά τον σχεδιασμό 3.50 x 0.40 max . Αντίθετα οι συνθήκες του σεναρίου Β ικανοποιούνται από τον σχεδιασμό 2.50 x 0.35 (αν λάβουμε υπόψη ένα ανεκτό περιθώριο 0.005% στις τιμές της πιθανότητας) . Τέλος το σενάριο Γ ικανοποιείται μόνο στην περίπτωση 4.50 x 0.40 max .

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι ανάμεσα στα σενάρια υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις ως προς το ποιος σχεδιασμός της κατασκευής κρίνεται ικανοποιητικός. Αν λάβουμε ως μέτρο σύγκρισης τις διαστάσεις των τοιχίων κάθε σχεδιασμού η απόκλιση του σεναρίου Α από το σενάριο Β είναι της τάξης του ενός μέτρου , με το σενάριο Β να είναι σαφώς οικονομικότερο του Α κι από άποψη οπλισμού και από άποψη διαστάσεων τοιχίου. Παρομοίως η απόκλιση του σεναρίου Γ από το σενάριο Α είναι της τάξης των 2 μέτρων με το Γ να είναι δυσμενέστερο. Είναι προφανές , λοιπόν , ότι η επιλογή των κριτηρίων μπορεί να επηρεάσει τόσο το κόστος σε χάλυβα όσο και σε σκυρόδεμα . Με την ανάλυση που ακολουθήσαμε μπορέσαμε να προσδιορίσουμε το ευνοϊκότερο σενάριο , για την περίπτωση του Μονωρόφου το σενάριο Α.

Από τα αποτελέσματα γίνεται σαφές ότι μπορεί να προκύψει ένα ακόμη πιο ευνοϊκό σενάριο. Έτσι για ένα σενάριο Δ όπου αυτό ορίζεται ως εξής

<u>Σενάριο Δ</u>

θα μας αρκούσε ο σχεδιασμός 1.75 x 030 ο οποίος είναι ακόμη ευνοϊκότερος από τον βέλτιστο κατά τα προηγούμενα σενάρια 2.50 x 0.35 . Εδώ όμως θα πρέπει να αναλογιστούμε και το γεγονός ότι το σενάριο Δ είναι σαφώς λιγότερο συντηρητικό από το Β. Έτσι είναι στην ευθύνη του μηχανικού ποια κριτήρια θεωρεί ικανοποιητικά όρια για την ασφαλή λειτουργία της κατασκευής συγκριτικά με το κόστος ανέγερσης .

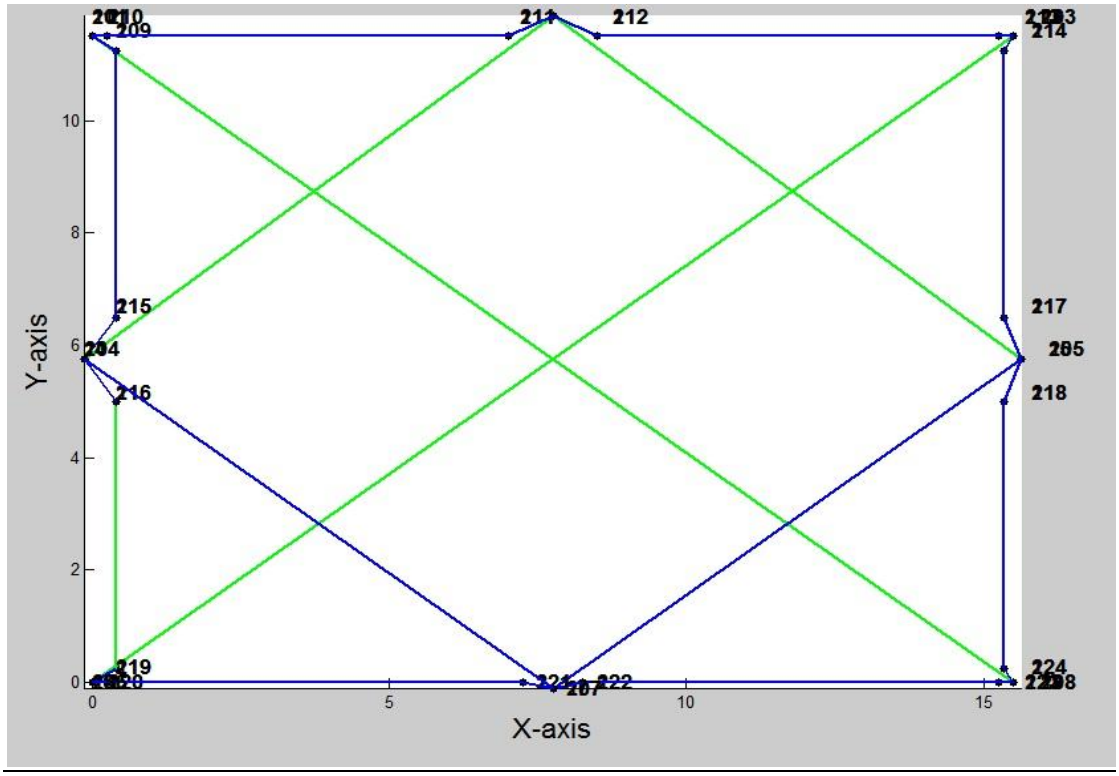
## 6.3 Διώροφο

### 6.3.1 Αριθμητικό προσομοίωμα

Η διώροφη κατασκευή που εξετάζουμε έχει διαστάσεις κάτοψης 12.00 x 16.00 μέτρα και το ύψος της είναι 3 μέτρα. Η πλάκα της είναι δοκιδοτή πάχους 0.45 μέτρων. Τα υποστυλώματά της $K_1$ , $K_3$ ,$K_6$ ,$K_8$ ,έχουν διαστάσεις 0.50 x 0.50 m . Εκτός των υποστυλωμάτων της υπάρχουν και τέσσερα τοιχία ( $K_2$ , $K_4$, $K_5$, $K_7$). Εξ' αυτών τα τοιχία $K_2$ , $K_4$, $K_5$ είναι πανομοιότυπα (το $K_2$ έχει διαφορετικό προσανατολισμό) ενώ αντίθετα για αρχιτεκτονικούς λόγους το τοιχίο $K_7$ είναι μικρότερο. Οι διαστάσεις των τριών πανομοιότυπων τοιχίων είναι 1.50 x 0.25 m ενώ οι διαστάσεις του $K_7$ είναι 1.00 x 0.30 m. Ουσιαστικά προστέθηκε άλλος ένας όροφος στην κατασκευή που εξετάσαμε προηγουμένως (μονώροφο).

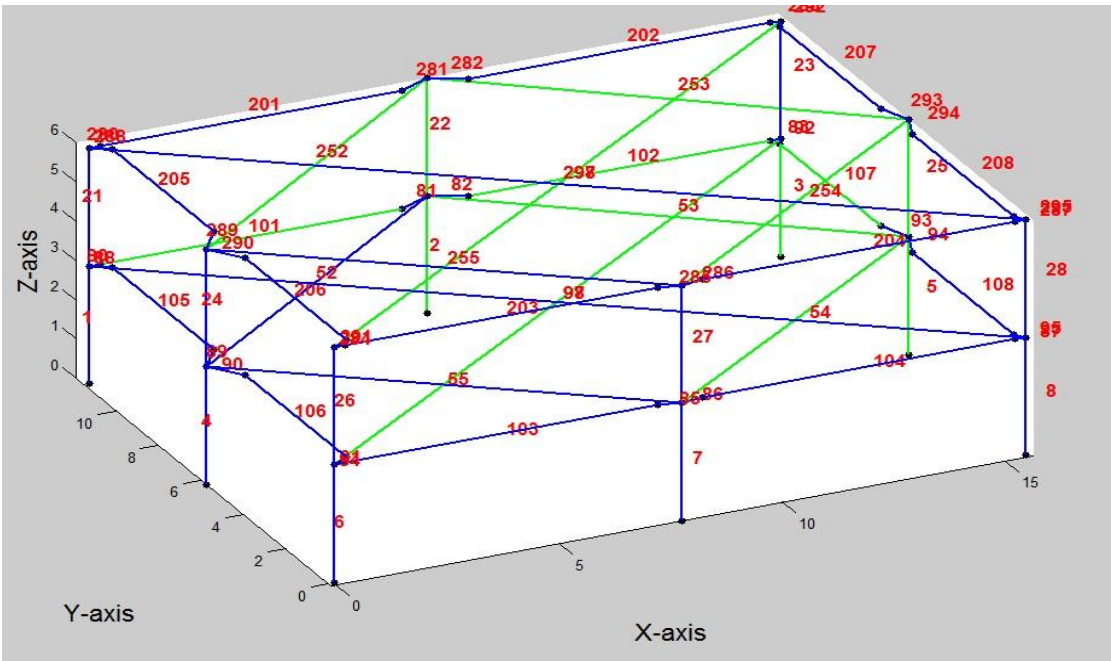
Κατά την προσομοίωση του διώροφου με το πρόγραμμα Opensees , χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς τα ίδια υλικά αλλά και οι μέθοδοι προσομοίωσης που αναφέρθηκαν αναλυτικά για το μονώροφο. Επίσης οι δοκοί είναι ίδιοι με αυτές του μονώροφου. Παρακάτω φαίνεται η απεικόνιση του φορέα μας με την χρήση μαθηματικού προγράμματος. ( Το Opensees δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον ) με όλους τους κόμβους και τα στοιχεία της .

Κάτοψη του προσομοιώματος



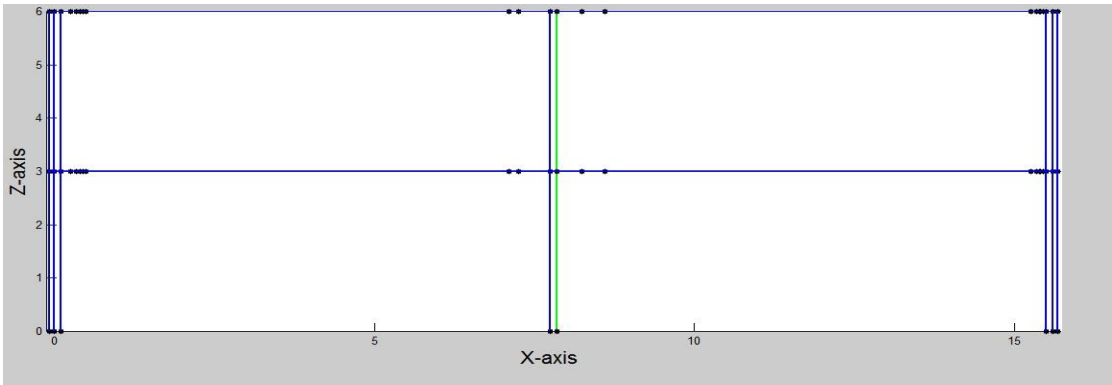

Σχήμα 6.7 Κάτοψη Διώροφου

Προοπτική εικόνα του προσομοιώματος




Σχήμα 6.8

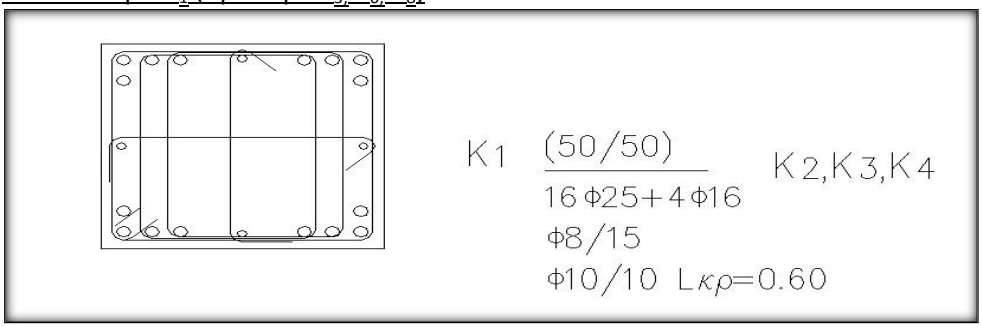
<u>Πλάγια όψη του προσομοιώματος</u>




Σχήμα 6.9 Πλάγια Όψη Διώροφου

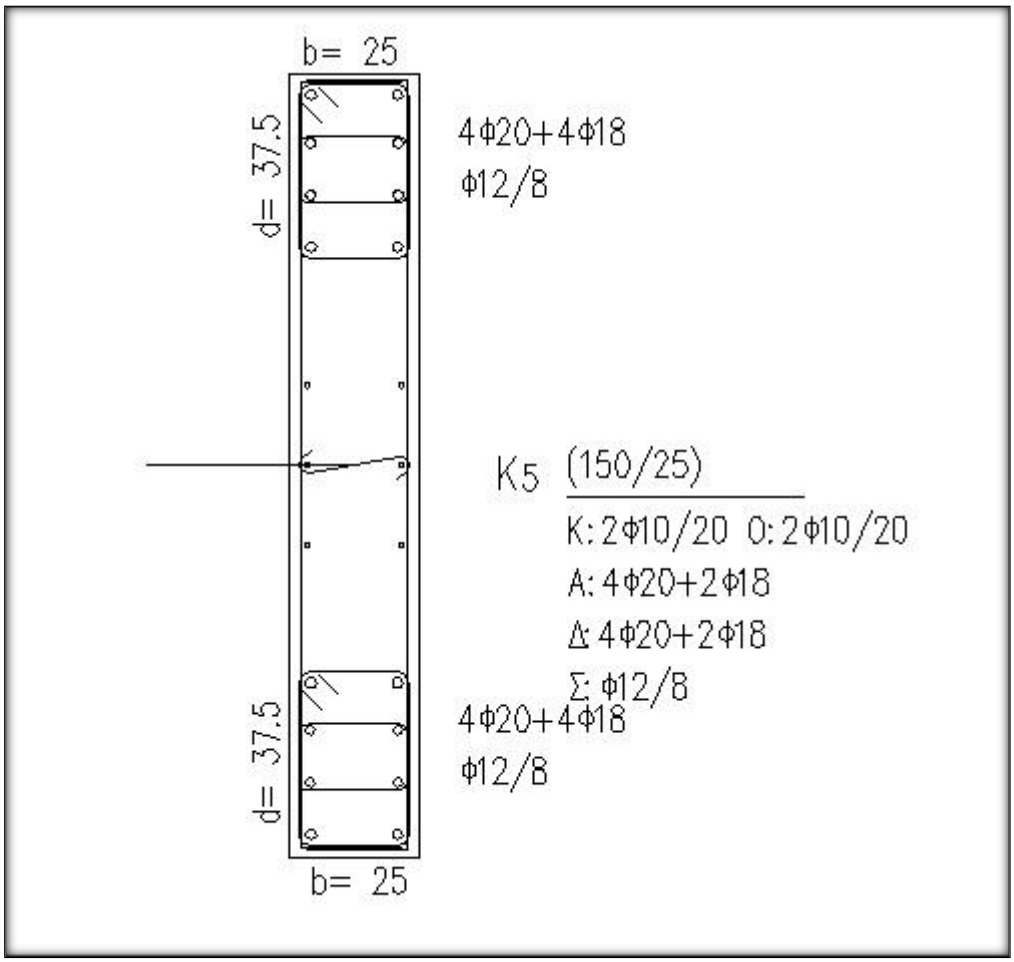
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τομές των στοιχείων του φορέα:

<u>Υποστύλωμα $K_1$ (όμοια με $K_3$, $K_6$, $K_8$)</u>



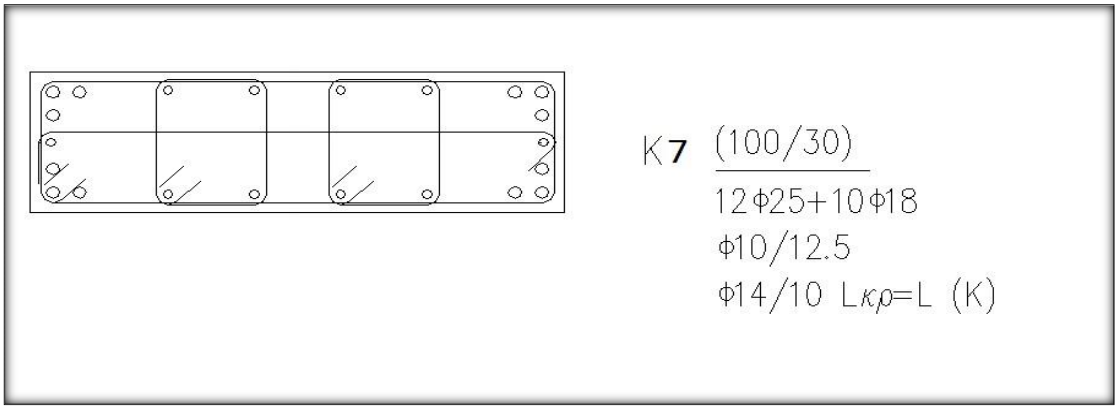

Σχήμα 6.10

Τοιχίο $K_5$ ( όμοιο με $K_2$ ,$K_4$)




Σχήμα 6.11

Τοιχίο $K_7$




Σχήμα 6.12

### 6.3.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

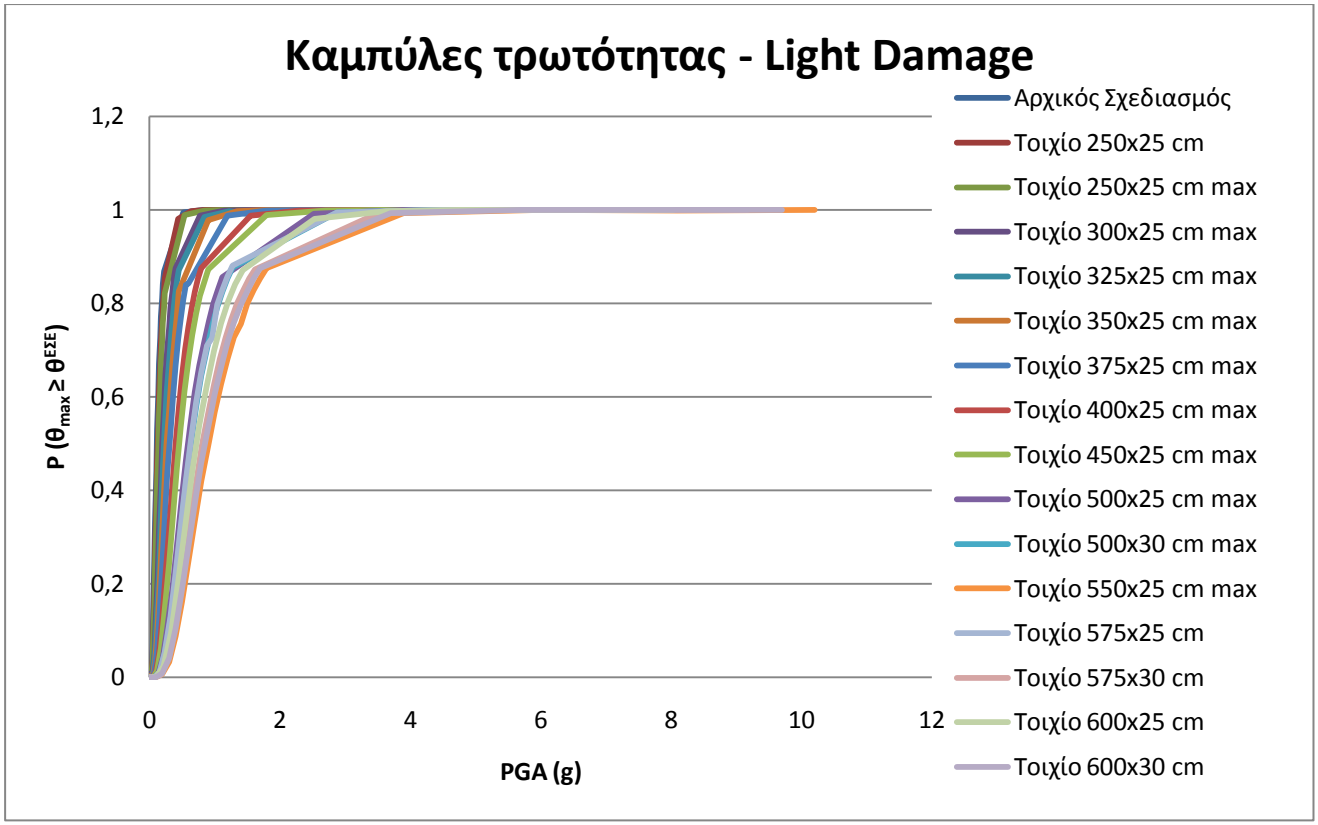
Όπως και με το μονώροφο έτσι και για το διώροφο για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επιρροή των διαφόρων κριτηρίων τρωτότητας θα προχωρήσουμε σε διάφορους σχεδιασμούς , ξεκινώντας από τον αρχικό και επαυξάνοντας τα τοιχία $K_2$ ,$K_4$ ,$K_5$ της κατασκευής μας. Εν συνεχεία για κάθε σχεδιασμό αφού κατασκευάσουμε την αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) με την χρήση της μεθόδου των συντελεστών (και του φάσματος του Ευρωκώδικα), μπορούμε να εξετάσουμε εάν πληρούνται τα κριτήρια για κάθε σενάριο (όπως αυτά αναπτύχθηκαν παραπάνω).

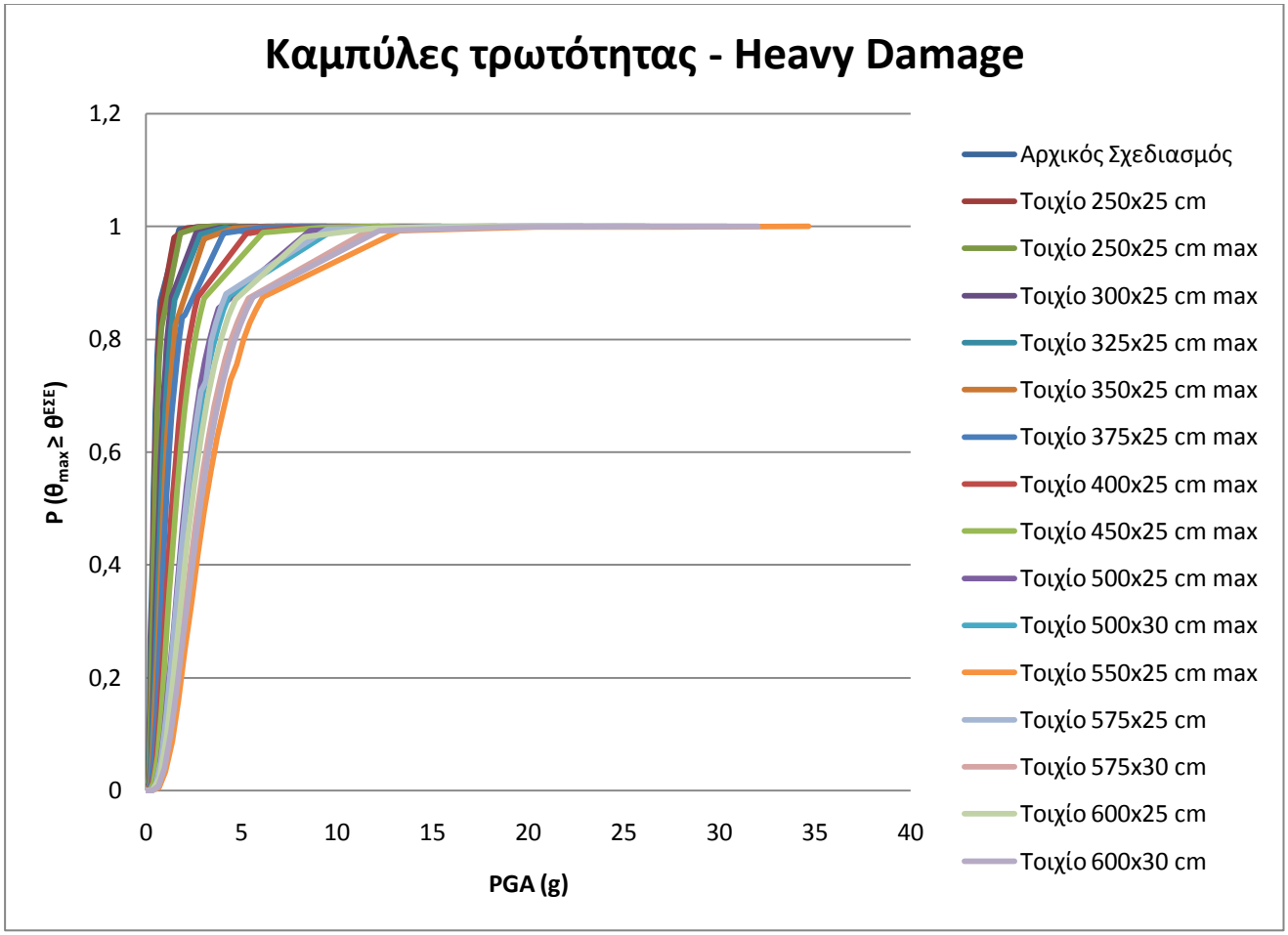
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τους υπολογισμούς είναι ίδια με αυτή του μονώροφου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές τιμές του max interstorey drift για το διώροφο (μεταξύ των ορίων του Πίνακα 5.1 ) είναι διαφορετικές σε σχέση με αυτές του μονώροφου (στις οποίες είχαμε αλλάξει την τελευταία τιμή για να έχουμε πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα).Έτσι τα όρια για το διώροφο είναι τα

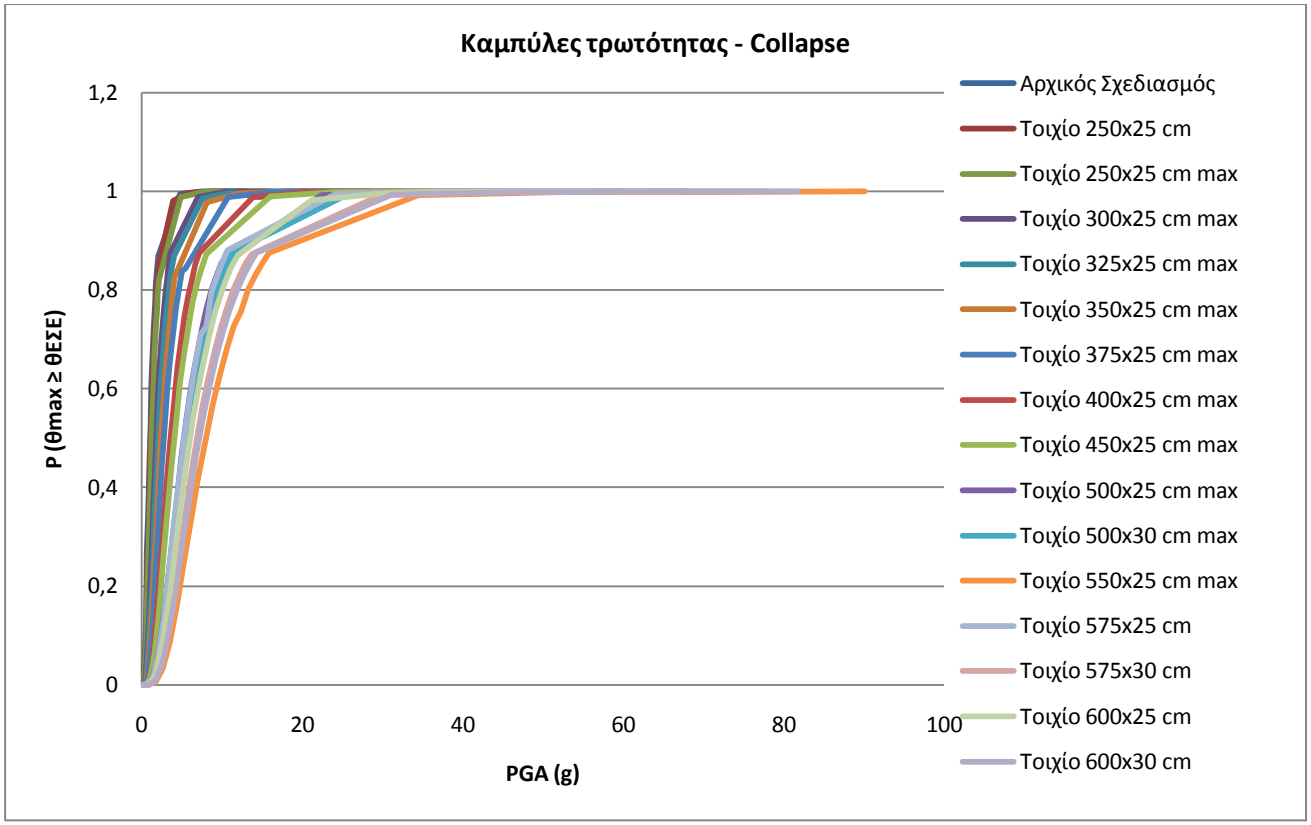
.

Για κάθε σχεδιασμό έγινε εξέταση της συμπεριφοράς της κατασκευής με 2 διαφορετικούς τρόπους όπλισης των τοιχίων ακριβώς όπως και στο μονώροφο. Οι αριθμοί σε κάθε σχεδιασμό αναφέρονται στο μέγεθος των τοιχίων $K_2$ ,$K_4$ , $K_5$ . Οι σχεδιασμοί που εξετάστηκαν στο μονώροφο είναι 1) ο αρχικός , 2)2.50 x 0.25 , 3)2.50 x 0.25 max , 4)3.00 x 0.25 max , 5) 3.25 x 0.25 max, 6)3.50 x 0.25 max , 7)3.75 x 0.25 max , 8) 4.00 x 0.25 max, 9)4.50 x 0.25 max , 10)5.00 x 0.25 max , 11) 5.00 x 0.30 max , 12)5.50 x 0.25 max , 13)5.75 x 0.25 ,14)5.75 x 0.30 , 15)6.00 x 0.25 , 16)6.00 x 0.30.

Στο διώροφο οι συντελεστές είναι ίδιοι για όλους τους σχεδιασμούς και είναι όπως αναφέραμε και παραπάνω $C_0$ =1.2, $C_1$ =1.0, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Είναι προφανές ότι για κάθε σχεδιασμό αλλάζουν οι εκάστοτε τιμές της $T_e$ και της $S_a$ . Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες τρωτότητας για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας .


Καμπύλες τρωτότητας - Light Damage
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
P (θmax ≥ θΕΣΕ)
0
2
4
6
8
10
12
PGA (g)
Αρχικός Σχεδιασμός
Τοιχίο 250x25 cm
Τοιχίο 250x25 cm max
Τοιχίο 300x25 cm max
Τοιχίο 325x25 cm max
Τοιχίο 350x25 cm max
Τοιχίο 375x25 cm max
Τοιχίο 400x25 cm max
Τοιχίο 450x25 cm max
Τοιχίο 500x25 cm max
Τοιχίο 500x30 cm max
Τοιχίο 550x25 cm max
Τοιχίο 575x25 cm
Τοιχίο 575x30 cm
Τοιχίο 600x25 cm
Τοιχίο 600x30 cm


Καμπύλες τρωτότητας - Heavy Damage
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
P (θmax ≥ θΕΣΕ)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
PGA (g)
Αρχικός Σχεδιασμός
Τοιχίο 250x25 cm
Τοιχίο 250x25 cm max
Τοιχίο 300x25 cm max
Τοιχίο 325x25 cm max
Τοιχίο 350x25 cm max
Τοιχίο 375x25 cm max
Τοιχίο 400x25 cm max
Τοιχίο 450x25 cm max
Τοιχίο 500x25 cm max
Τοιχίο 500x30 cm max
Τοιχίο 550x25 cm max
Τοιχίο 575x25 cm
Τοιχίο 575x30 cm
Τοιχίο 600x25 cm
Τοιχίο 600x30 cm




Από τις παραπάνω καμπύλες τρωτότητας προέκυψε ο παρακάτω πίνακας που δείχνει τις τιμές που παίρνει η πιθανότητα υπέρβασης της οριακής τιμής του max interstorey drift που έχουμε ορίσει για κάθε συνδυασμό στάθμης επιτελεστικότητας με το αντίστοιχο επίπεδο σεισμικού κινδύνου.

| **Μέγεθος τοχώματος** | **Occasional Event (0.11 g)** | **Rare Event (0.31 g)** | **Maximum Considered Event (0.78 g)** |
|---|---|---|---|
| αρχικός | 0.47110 | 0.3707 | 0.30754 |
| 2.50 x 0.25 | 0.40129 | 0.30053 | 0.26435 |
| 2.50 x 0.25 max | 0.35197 | 0.25463 | 0.21476 |
| 3.00 x 0.25 max | 0.15866 | 0.09680 | 0.08026 |
| 3.25 x 0.25 max | 0.11314 | 0.06488 | 0.05262 |
| 3.50 x 0.25 max | 0.06811 | 0.03673 | 0.02938 |
| 3.75 x 0.25 max | 0.04272 | 0.02118 | 0.0170 |
| **4.00 x 0.25 max** | **0.01558** | **0.00690** | **0.00539** |
| 4.50 x 0.25 max | 0.00890 | 0.00368 | 0.00298 |
| **5.00 x 0.25 max** | **0.00248** | **0.0009** | **0.00071** |
| 5.00 x 0.30 max | 0.00169 | 0.0006 | 0.00047 |
| **5.50 x 0.25 max** | **0.00022** | **0.00007** | **0.00005** |
| 5.75 x 0.25 | 0.00181 | 0.00076 | 0.00071 |
| 5.75 x 0.30 | 0.00042 | 0.00015 | 0.00014 |
| 6.00 x 0.25 | 0.00084 | 0.00035 | 0.00032 |
| 6.00 x 0.30 | 0.00032 | 0.00012 | 0.00011 |

Πίνακας Πιθανοτήτων Διώροφου 6.2

Με τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε πλέον να εξετάσουμε πως επηρεάζουν τα σενάρια Α, Β και Γ την τελικό σχεδιασμό της κατασκευής μας. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το σενάριο Α ικανοποιείται από τον σχεδιασμό με τοιχία 5.00 x 0.25 max .Αντίστοιχα το σενάριο Β ικανοποιείται οριακά για τον σχεδιασμό 4.00 x 0.25 max . Τέλος το σενάριο Γ ικανοποιείται για τον σχεδιασμό με τοιχία 5.50 x 0.25 max (οριακά αποδεκτό) και τους αμέσως μεγαλύτερους.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό εκ νέου και στην περίπτωση του διώροφου έχουμε το σενάριο Β να μας δίνει με διαφορά τον οικονομικότερο σχεδιασμό. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι έχει κατά 1 μέτρο μικρότερα τοιχία από το σενάριο Α και κατά τουλάχιστον 1.5 μέτρα μικρότερα τοιχία από το σενάριο Γ. Παρατηρούμε επίσης ότι και πάλι το σενάριο Γ, όντας και το πιο συντηρητικό εκ των τριών, μας δίνει τον σχεδιασμό με τα μεγαλύτερα τοιχία μιας και έχει μεγαλύτερα κατά 0.5 μέτρα τοιχία (με μια πολύ συντηρητική προσέγγιση ) από αυτά που προκύπτουν από το σενάριο Α.

Με την παραπάνω ανάλυση έχουμε και στο διώροφο την δυνατότητα για την εύρεση ενός βέλτιστου σχεδιασμού. Έστω λοιπόν ένα σενάριο Δ με τα παρακάτω κριτήρια τρωτότητας

Σενάριο Δ

Παρατηρούμε ότι με την χρήση του σεναρίου Δ καταλήγουμε σε έναν σχεδιασμό με μικρότερο δυνατό μέγεθος τοιχίων. Όπως ,λοιπόν και στο μονώροφο έτσι και στο διώροφο με κατάλληλη επιλογή των κριτηρίων τρωτότητας μπορούμε να φτάσουμε σε σχεδιασμούς που καλύπτουν τις προδιαγραφές που έχουμε επιλέξει με μικρότερο μέγεθος τοιχίων από ότι αρχικά μπορεί να έχουμε υπολογίσει, χωρίς μεγάλη αύξηση της πιθανότητας υπέρβασης άρα και του σεισμικού κινδύνου.

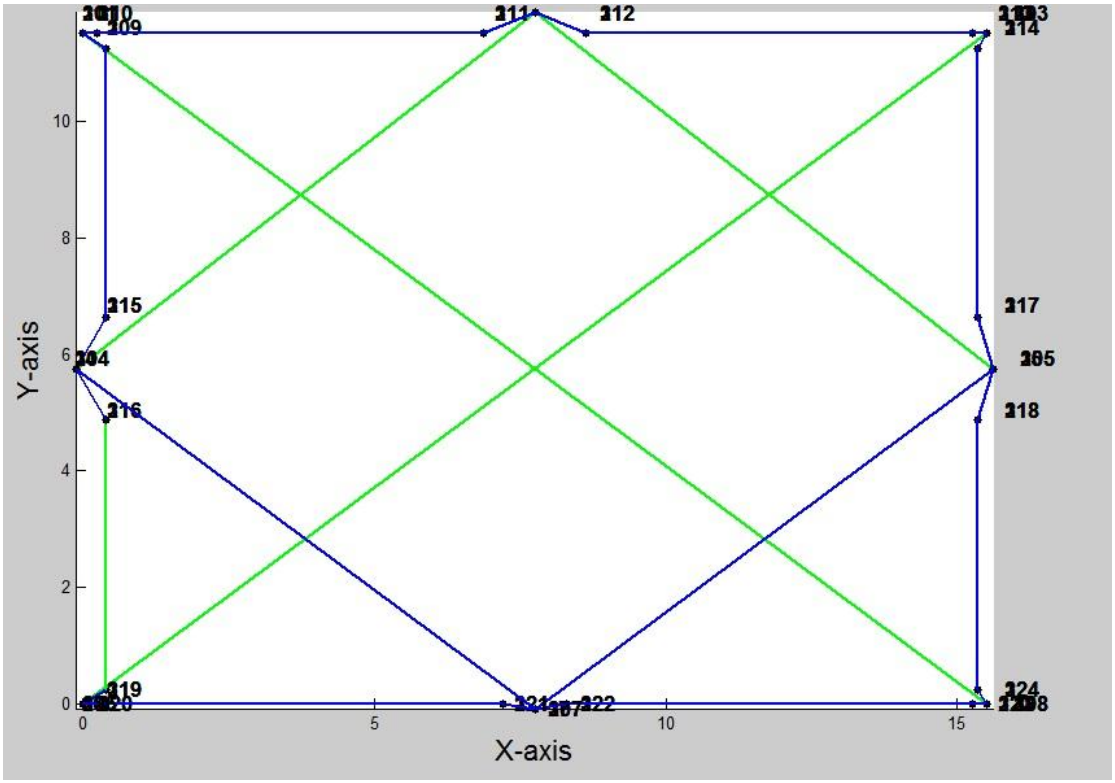
## 6.4 Τριώροφο

### 6.4.1 Αριθμητικό προσομοίωμα

Στη συνέχεια η τριώροφη κατασκευή που εξετάζουμε έχει διαστάσεις κάτοψης 12.00 x 16.00 μέτρα και το ύψος της είναι 3 μέτρα. Η πλάκα της είναι δοκιδοτή πάχους 0,45 μέτρων. Τα υποστυλώματά της $K_1$, $K_3$ ,$K_6$ ,$K_8$ ,έχουν διαστάσεις 0.50 x 0.50 m . Εκτός των υποστυλωμάτων της υπάρχουν και τέσσερα τοιχία ( $K_2$ , $K_4$, $K_5$, $K_7$). Εξ' αυτών τα τοιχία $K_2$ , $K_4$, $K_5$ είναι πανομοιότυπα (το $K_2$ έχει διαφορετικό προσανατολισμό) ενώ αντίθετα για αρχιτεκτονικούς λόγους το τοιχίο $K_7$ είναι μικρότερο. Οι διαστάσεις των τριών πανομοιότυπων τοιχίων είναι 1.75 x 0.25 m ενώ οι διαστάσεις του $K_7$ είναι 1.10 x 0.35 m. Ουσιαστικά προστέθηκε άλλος ένας όροφος στην κατασκευή που εξετάσαμε προηγουμένως (διώροφο).

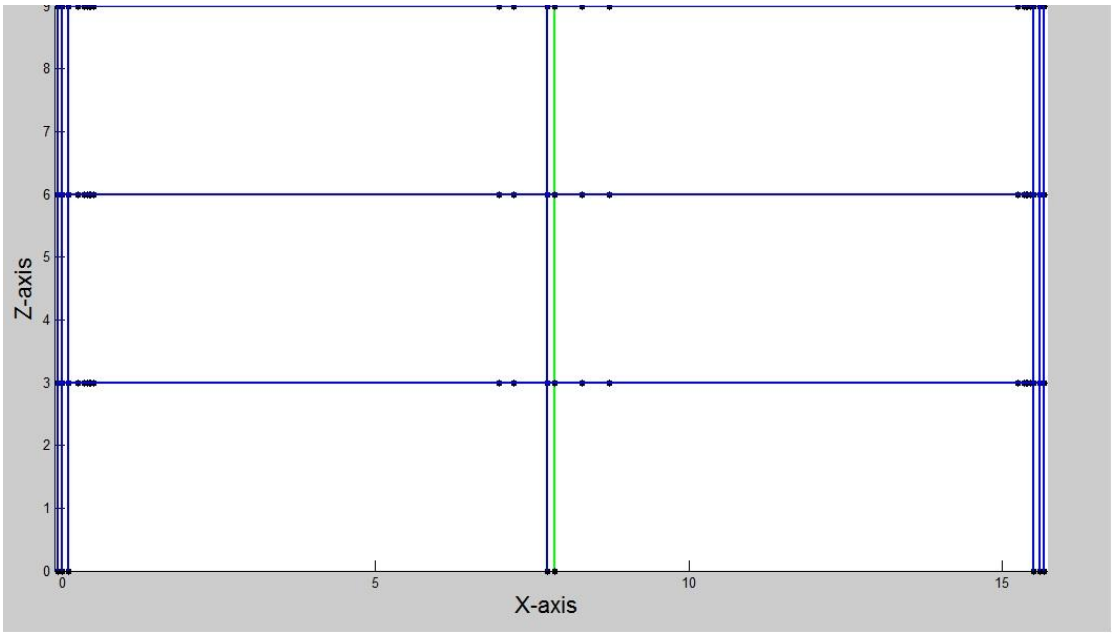
Κατά την προσομοίωση του διώροφου με το πρόγραμμα Opensees , χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς τα ίδια υλικά αλλά και οι μέθοδοι προσομοίωσης που αναφέρθηκαν αναλυτικά για το μονώροφο. Επίσης οι δοκοί είναι ίδιοι με αυτές του μονώροφου. Παρακάτω φαίνεται η απεικόνιση του φορέα μας με την χρήση της matlab . ( Το Opensees δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον ) με όλους τους κόμβους και τα στοιχεία της.

<u>Κάτοψη του προσομοιώματος</u>



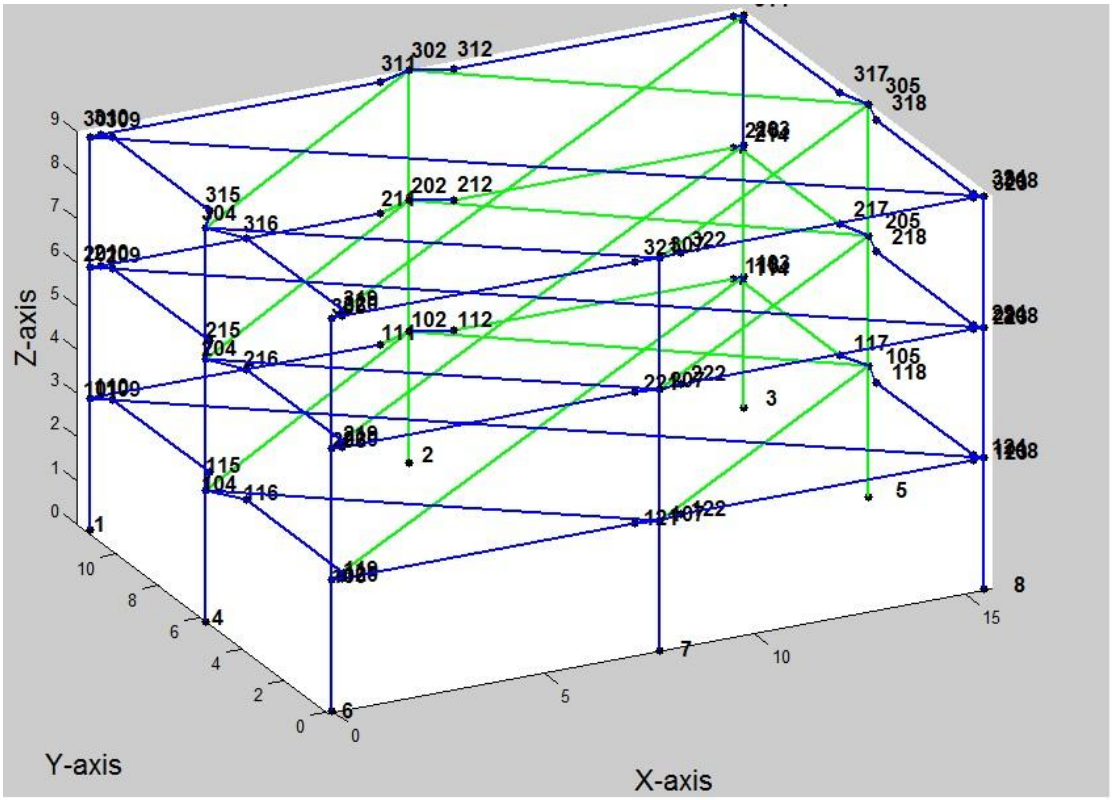

Σχήμα 6.13 Κάτοψη Τριώροφου

Πλάγια όψη του προσομοιώματος




Σχήμα 6.14 Πλάγια Όψη Τριώροφου

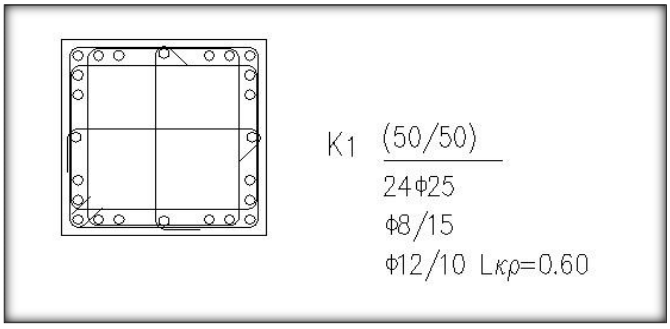
Προοπτική εικόνα του προσομοιώματος




Σχήμα 6.15

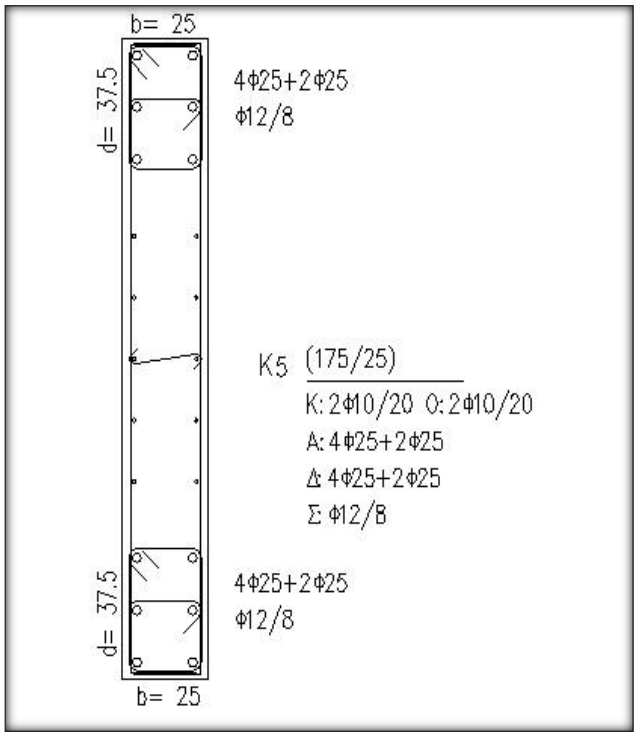
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τομές των στοιχείων του φορέα:

Υποστύλωμα $K_1$ (όμοια με $K_3$, $K_6$, $K_8$)



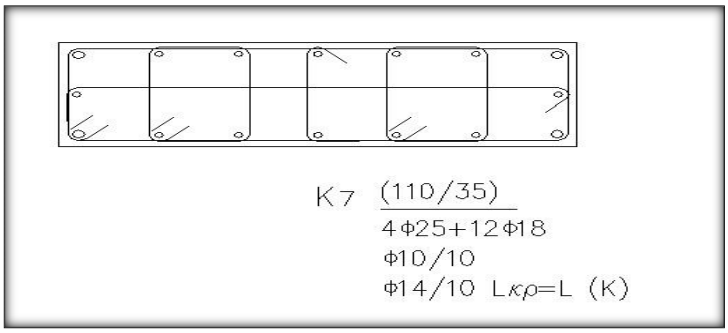

Σχήμα 6.16

Τοιχίο $K_5$ ( όμοιο με $K_2$ ,$K_4$)




Σχήμα 6.17

Τοιχίο $K_7$




Σχήμα 6.18

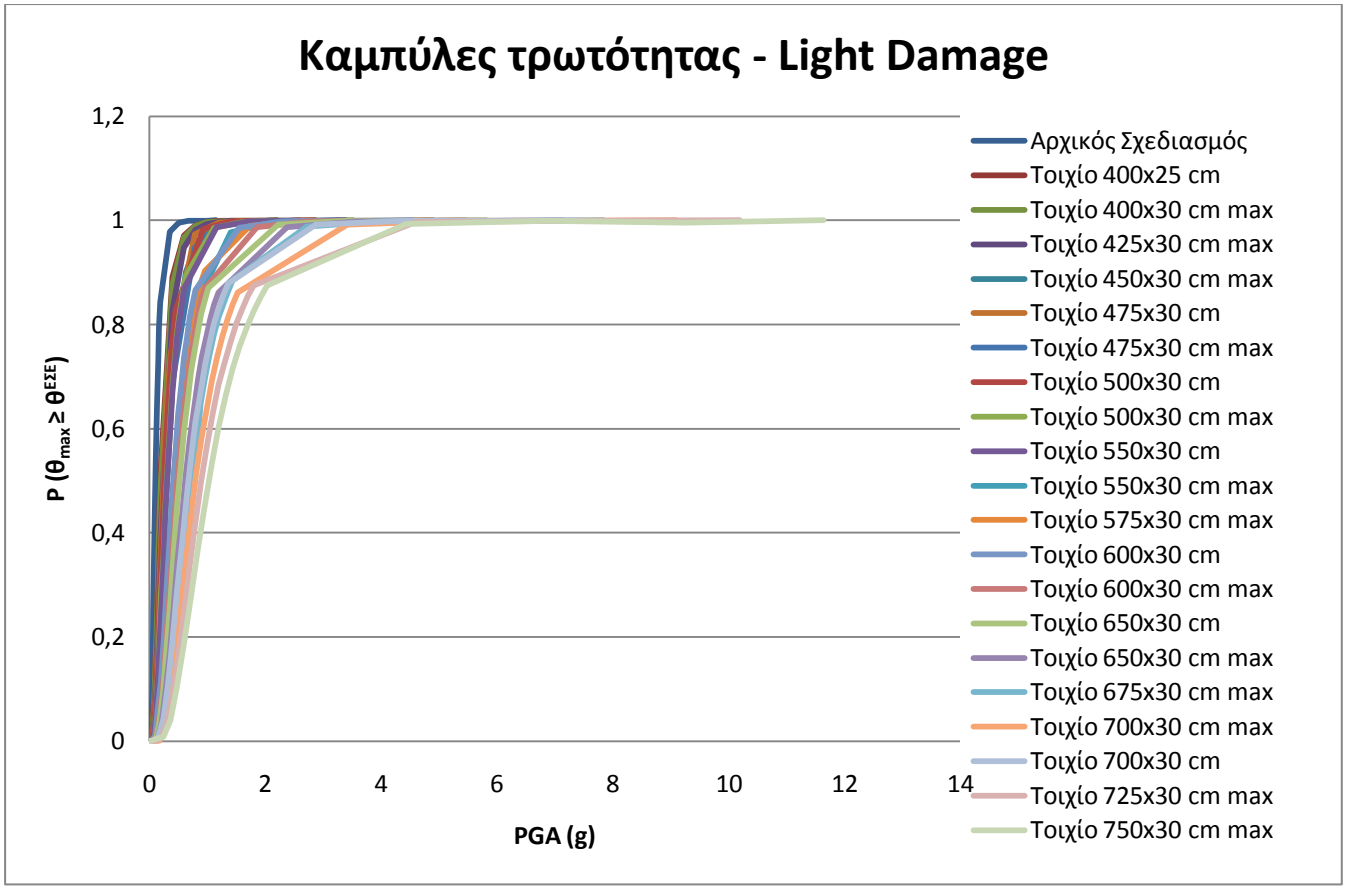
### 6.4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

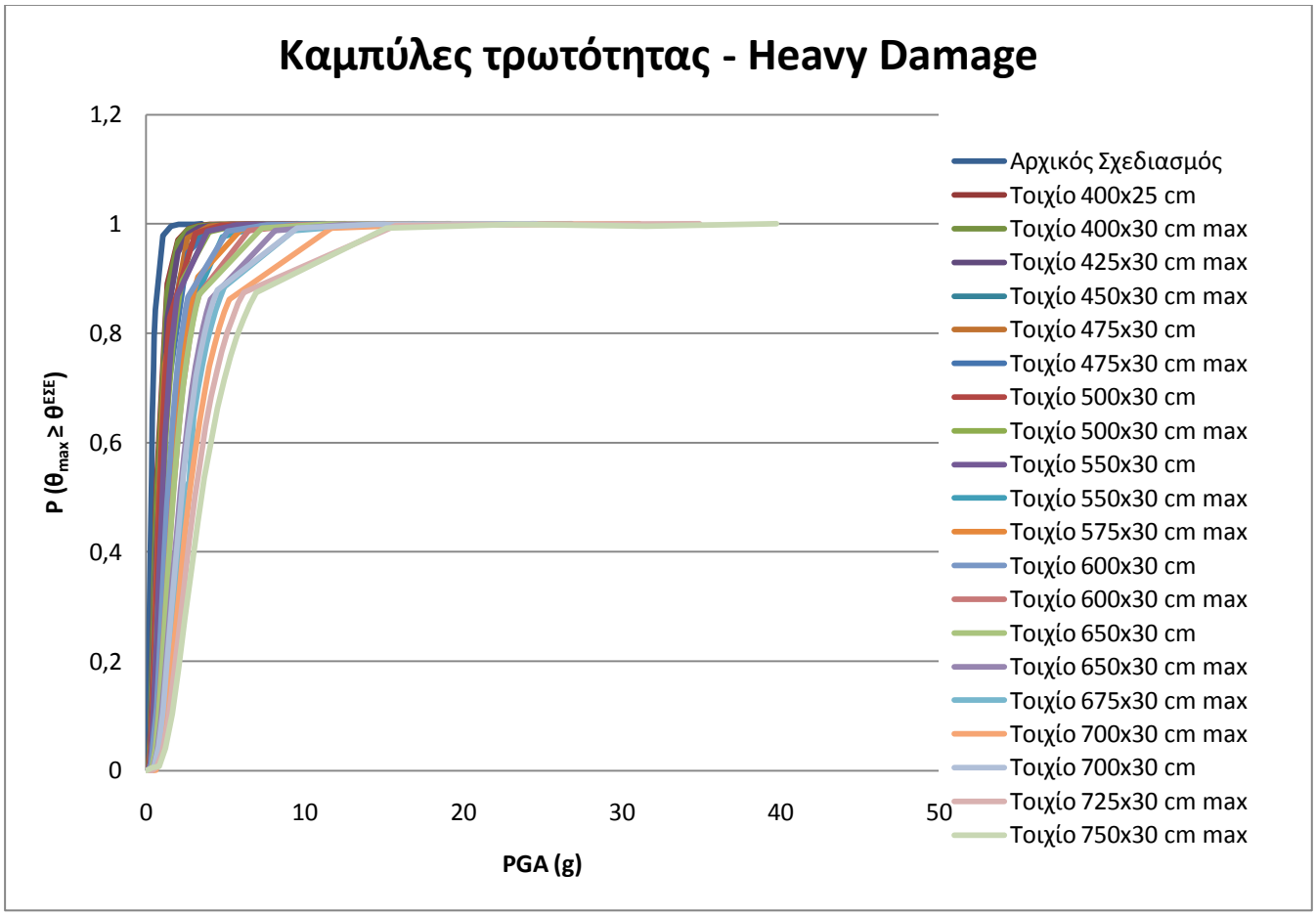
Όπως και με το μονώροφο έτσι και για το τριώροφο για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επιρροή των διαφόρων κριτηρίων τρωτότητας θα προχωρήσουμε σε διάφορους σχεδιασμούς , ξεκινώντας από τον αρχικό και επαυξάνοντας τα τοιχία $K_2$ ,$K_4$ , $K_5$ της κατασκευής μας. Εν συνεχεία για κάθε σχεδιασμό αφού κατασκευάσουμε την αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας ως προς την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA) με την χρήση της μεθόδου των συντελεστών, μπορούμε να εξετάσουμε εάν πληρούνται τα κριτήρια για κάθε σενάριο (όπως αυτά αναπτύχθηκαν παραπάνω).

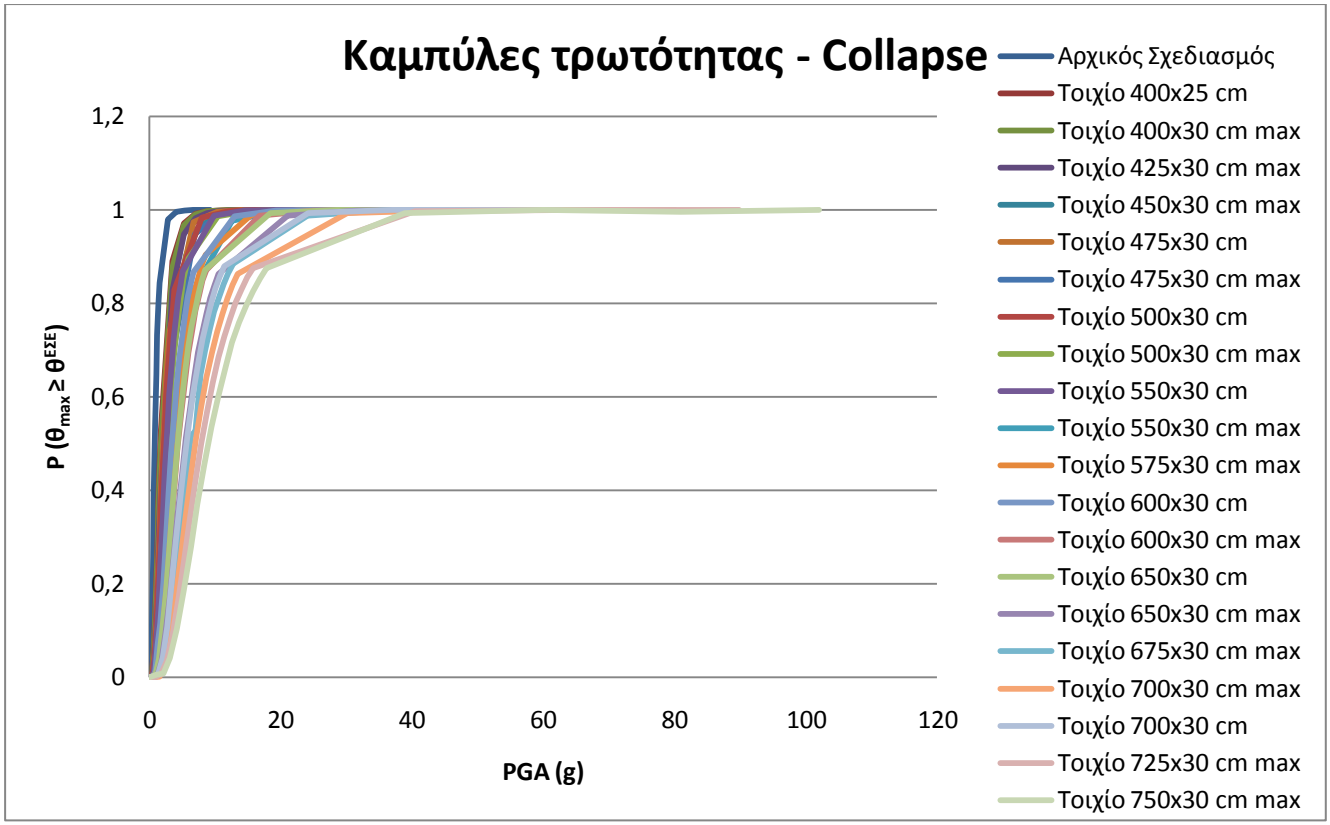
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τους υπολογισμούς καθώς και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές τιμές του max interstorey drift είναι ίδιες με αυτές του διώροφου.

Για κάθε σχεδιασμό έγινε εξέταση της συμπεριφοράς της κατασκευής με 2 διαφορετικούς τρόπους όπλισης των τοιχίων ακριβώς όπως και στο μονώροφο (μέγιστος και ελάχιστος οπλισμός). Οι αριθμοί σε κάθε σχεδιασμό αναφέρονται στο μέγεθος των τοιχίων $K_2$ ,$K_4$ , $K_5$ . Οι σχεδιασμοί που εξετάστηκαν στο μονώροφο είναι 1) ο αρχικός , 2)4.00 x 0.25 max , 3)4.00 x 0.30 max , 4)4.25 x 0.30 max , 5) 4.50x 0.30 max, 6)4.75 x 0.30, 7)4.75 x 0.30 max , 8) 5.00 x 0.30, 9)5.00 x 0.30 max , 10)5.50 x 0.30, 11) 5.50 x 0.30 max , 12)5.75 x 0.30 max , 13)6.00 x 0.30 ,14)6.00 x 0.30 max, 15)6.50 x 0.30 , 16)6.50 x 0.30 max ,17) 6.75 x 0.30 max 18) 7.00 x 0.30 ,19)700 x 0.30 max 20)7.25 x 0.30 max 21)7.50 x 0.30 max.

Στο τριώροφο οι συντελεστές είναι για τον αρχικό σχεδιασμό και είναι όπως αναφέραμε και παραπάνω $C_0$ =1.3, $C_1$ =1.13, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Στη περίπτωση του τριώροφου όμως για όλους του υπόλοιπους σχεδιασμούς προέκυψαν διαφορετικοί συντελεστές. Έτσι για τους επιπλέον σχεδιασμούς οι συντελεστές είναι οι $C_0$ =1.3, $C_1$ =1.0, $C_2$ =1.0, $C_3$=1.0 . Είναι προφανές ότι για κάθε σχεδιασμό αλλάζουν οι εκάστοτε τιμές της $T_e$ και της $S_a$ . Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες τρωτότητας για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας .


Καμπύλες τρωτότητας - Light Damage
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
P (θmax ≥ θΕΣΕ)
0
2
4
6
8
10
12
14
PGA (g)
Αρχικός Σχεδιασμός
Τοιχίο 400x25 cm
Τοιχίο 400x30 cm max
Τοιχίο 425x30 cm max
Τοιχίο 450x30 cm max
Τοιχίο 475x30 cm
Τοιχίο 475x30 cm max
Τοιχίο 500x30 cm
Τοιχίο 500x30 cm max
Τοιχίο 550x30 cm
Τοιχίο 550x30 cm max
Τοιχίο 575x30 cm max
Τοιχίο 600x30 cm
Τοιχίο 600x30 cm max
Τοιχίο 650x30 cm
Τοιχίο 650x30 cm max
Τοιχίο 675x30 cm max
Τοιχίο 700x30 cm max
Τοιχίο 700x30 cm
Τοιχίο 725x30 cm max
Τοιχίο 750x30 cm max


Καμπύλες τρωτότητας - Heavy Damage
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
P (θmax ≥ θΕΣΕ)
0
10
20
30
40
50
PGA (g)
Αρχικός Σχεδιασμός
Τοιχίο 400x25 cm
Τοιχίο 400x30 cm max
Τοιχίο 425x30 cm max
Τοιχίο 450x30 cm max
Τοιχίο 475x30 cm
Τοιχίο 475x30 cm max
Τοιχίο 500x30 cm
Τοιχίο 500x30 cm max
Τοιχίο 550x30 cm
Τοιχίο 550x30 cm max
Τοιχίο 575x30 cm max
Τοιχίο 600x30 cm
Τοιχίο 600x30 cm max
Τοιχίο 650x30 cm
Τοιχίο 650x30 cm max
Τοιχίο 675x30 cm max
Τοιχίο 700x30 cm max
Τοιχίο 700x30 cm
Τοιχίο 725x30 cm max
Τοιχίο 750x30 cm max




| **Μέγεθος τοχώματος** | **Occasional Event (0.11 g)** | **Rare Event (0.31 g)** | **Maximum Considered Event (0.78 g)** |
|---|---|---|---|
| Αρχικό | 0.53983 | 0.48255 | 0.4582 |
| 4.00 x 0.25 max | 0.17879 | 0.1113 | 0.100027 |
| 4.00 x 0.30 max | 0.16109 | 0.10383 | 0.08851 |
| 4.25 x 0.30 max | 0.11314 | 0.06811 | 0.05821 |
| 4.50 x 0.30 max | 0.0537 | 0.02807 | 0.02385 |
| 4.75 x 0.30 | 0.09342 | 0.0542 | 0.0505 |
| 4.75 x 0.30 max | 0.0503 | 0.02619 | 0.02222 |
| 5.00 x 0.30 | 0.0778 | 0.04457 | 0.04182 |
| 5.00 x 0.30 max | 0.04648 | 0.01923 | 0.01659 |
| 5.50 x 0.30 | 0.04363 | 0.02385 | 0.02122 |
| 5.50 x 0.30 max | 0.01222 | 0.0048 | 0.00402 |
| **5.75 x 0.30 max** | **0.01028** | **0.00415** | **0.00357** |
| 6.00 x 0.30 | 0.0139 | 0.00676 | 0.00657 |
| 6.00 x 0.30 max | 0.00657 | 0.00233 | 0.00199 |
| 6.50 x 0.30 | 0.00496 | 0.00226 | 0.00219 |
| **6.50 x 0.30 max** | **0.00199** | **0.00066** | **0.000598** |
| 6.75 x 0.30 max | 0.001 | 0.000315 | 0.00027 |
| 7.00 x 0.30 | 0.00126 | 0.0005 | 0.00048 |
| 7.00 x 0.30 max | 0.00048 | 0.00015 | 0.00013 |
| 7.25 x 0.30 max | 0.00022 | 0.00006 | 0.00005 |
| **7.50 x 0.30 max** | **0.00004** | **0** | **0** |

Πίνακας Πιθανοτήτων Τριώροφου 6.3

Από τις παραπάνω καμπύλες τρωτότητας προέκυψε και ο πίνακας που δείχνει τις τιμές που παίρνει η πιθανότητα υπέρβασης της οριακής τιμής του max interstorey drift που έχουμε ορίσει για κάθε συνδυασμό στάθμης επιτελεστικότητας με το αντίστοιχο επίπεδο σεισμικού κινδύνου.

Με βάση τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα μπορούμε εκ νέου να συγκρίνουμε την επιλογή των εκάστοτε κριτηρίων τρωτότητας , μέσω των σεναρίων Α , Β και Γ , στην επιλογή της τελικής μορφής της κατασκευής. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι στην περίπτωση του τριώροφου το σενάριο Α καλύπτεται από τον σχεδιασμό με τοιχία 6.50 x 0.30 max . Για τον ίδιο φορέα το σενάριο Β καλύπτεται από τον σχεδιασμό με τοιχία 5.75 x 0.30 max , ενώ το σενάριο Γ από τον σχεδιασμό με τοιχία 7.50 x 0.30 max .

Εύκολα αντιλαμβανόμαστε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τρία σενάρια ότι και πάλι το δυσμενέστερο από τα τρία είναι το Γ ,γεγονός αναμενόμενο αφού όπως έχουμε ήδη αναφέρει το σενάριο Γ είναι και το συντηρητικότερο από τα τρία. Αυτό φαίνεται εύκολα από το γεγονός ότι έχει τοιχία μεγαλύτερα κατά ένα μέτρο από το σενάριο Α και κατά 1.75 μέτρα από το σενάριο Β. Από τα απομένοντα 2 σενάρια αυτό με τα μικρότερα τοιχία είναι και στη περίπτωση του τριώροφου το σενάριο Β μιας και όπως παρατηρούμε τα τοιχία του σχεδιασμού που ικανοποιεί τα κριτήρια τρωτότητάς του είναι κατά 0.75 μέτρα μικρότερα από αυτόν του σεναρίου Α.

Εκτός των σεναρίων Α , Β και Γ μπορούμε τώρα να ορίσουμε και ένα ακόμη ευνοϊκότερο σενάριο το οποίο εάν το είχαμε επιλέξει θα μας έδινε τον καλύτερο δυνατό βαθμό αξιοποίησης των πιθανοτικών κριτηρίων σε συνδυασμό με όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος τοιχίων. Έστω λοιπόν ένα σενάριο Δ με τα παρακάτω κριτήρια τρωτότητας

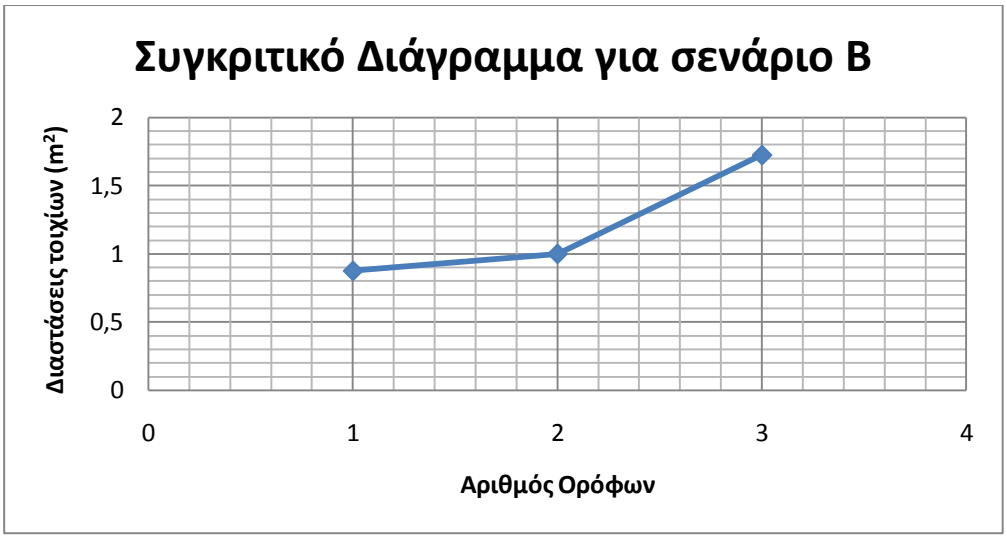
<u>Σενάριο Δ</u>

Σε μια τέτοια επιλογή σεναρίου θα μας αρκούσε ο σχεδιασμός με τοιχία μεγέθους 5.00 x 0.30 max , δηλαδή ένας σχεδιασμός μικρότερος κατά 0.75 μέτρα από αυτόν του σεναρίου Β που ήταν και το ευνοϊκότερο

## 6.5 Σύγκριση ευμενέστερου σεναρίου για κάθε κατασκευή

Από τα παραπάνω μπορούμε να αποκτήσουμε μια πιο σαφή εικόνα για το πώς επηρεάζεται ο σχεδιασμός μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα από την επιλογή των κριτηρίων τρωτότητας. Μπορούμε επίσης με τα δεδομένα που προκύπτουν από την εξέταση της επιρροής αυτής να συγκρίνουμε ,από την άποψη των διαστάσεων των τοιχίων, την μεταβολή του βέλτιστου σχεδιασμού για το ευμενέστερο σενάριο σε σχέση με την εκάστοτε κατασκευή (Μονώροφο , Διώροφο ,Τριώροφο).

Όπως είδαμε λοιπόν στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου και για τις τρεις κατασκευές ευμενέστερο αποδείχτηκε το σενάριο Β. Έχουμε επομένως τη δυνατότητα να εξετάσουμε πως μεταβάλλονται οι ελάχιστες διαστάσεις των τοιχίων που ικανοποιούν το ευμενέστερο αυτό σενάριο ως προς τον αριθμό των ορόφων της κατασκευής. Προκύπτει έτσι το επόμενο διάγραμμα (Διάγραμμα 6.1).




Διάγραμμα 6.1

Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε την σχέση μεταξύ μεγέθους τοιχίων και αύξησης των ορόφων της κατασκευής. Παρατηρούμε λοιπόν ότι σημειώνεται μια αύξηση του ελάχιστου μεγέθους τοιχίων που ικανοποιούν το σενάριο όσο μεγαλώνει ο αριθμός των ορόφων. Αξίζει να σημειωθεί ότι για το μονώροφο στο παραπάνω γράφημα έγινε επιλογή διαστάσεων με ελάχιστο οπλισμό (2.50 x 0.35 m). Αντίθετα για το Διώροφο και το Τριώροφο επιλέχθηκαν σχεδιασμοί με μέγιστο οπλισμό (4.00 x 0.25 max και 5.75 x 0.30 max αντίστοιχα). Μια λιγότερο συντηρητική (δηλαδή επιλογή με μέγιστο οπλισμό) επιλογή και στο μονώροφο θα μπορούσε να μας οδηγήσει σε ακόμη μικρότερη διάσταση τοιχίων για αυτό στο παραπάνω γράφημα. Παρατηρούμε δηλαδή ότι η μέγιστη διάσταση τοιχίου (με ελάχιστο οπλισμό) για το Μονώροφο είναι και πάλι μικρότερη από την ελάχιστη διάσταση (με μέγιστο οπλισμό) για το Διώροφο.

# Κεφάλαιο 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την χρήση των αποτελεσμάτων και για τους τρείς φορείς από ωπλισμένο σκυρόδεμα που αναπτύχθηκαν παραπάνω, καθώς και με την σύγκριση που κάναμε στα αποτελέσματα της εκάστοτε κατασκευής για τα διάφορα σενάρια τρωτότητας μπορούμε να εξάγουμε αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα.

Αρχικά , ως προς τα σενάρια τρωτότητας , αφού ορίσαμε τρία σενάρια με διαφορετική φιλοσοφία κριτηρίων τρωτότητας στο κάθε ένα μπορέσαμε να παρατηρήσουμε ότι όντως για κάθε σενάριο διαφορετικό ως προς τα κριτήρια τρωτότητας είχαμε διαφορετικό σχεδιασμό βέλτιστης κατασκευής (από την άποψη των διαστάσεων των τοιχίων που θα χρησιμοποιηθούν). Είδαμε έτσι διαφορές ανάμεσα στον σχεδιασμό με τα μέγιστα τοιχία και τον σχεδιασμό με τα ελάχιστα τοιχία που κυμαίνονταν από 2 μέτρα για το μονώροφο και 1.50 μέτρα για το διώροφο έως τα 1.75 μέτρα και το τριώροφο. Γίνεται έτσι άκρως κατανοητό ότι μια πιθανή υπερεκτίμηση των κριτηρίων τρωτότητας μπορεί να μας οδηγήσει σε μια πολύ σοβαρή υπερδιαστασιολόγηση της κατασκευής μας. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να γίνεται αρχικά μια διερεύνηση ως προς το κατά πόσον αυστηρά θα πρέπει να είναι τα κριτήρια που θα υιοθετήσουμε χωρίς όμως να φτάσουμε σε επίπεδα τέτοια ώστε να οδηγηθούμε σε υπερδιαστασιολόγηση.

Είδαμε επίσης ότι με την χρήση των κριτηρίων τρωτότητας μπορούμε να βρούμε για την εκάστοτε κατασκευή μας ένα σενάριο (το σενάριο Δ ή ένα αντίστοιχό του) του οποίου ο αντίστοιχος σχεδιασμός σε συνάρτηση με τα όρια του να είναι ο κατά δυνατόν αποδοτικότερος. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει βέβαια να αναφέρουμε ότι κάθε φορά τα όρια τρωτότητας που επιλέγουμε θα πρέπει να είναι αρκούντος συντηρητικά. Δηλαδή σε κάθε περίπτωση και σε κάθε σενάριο που θα εξετάζεται για την εκάστοτε κατασκευή τα τελικά όρια του σεναρίου θα πρέπει να είναι σε τέτοιο επίπεδο ώστε να εγγυώνται και να εξασφαλίζουν την ασφάλεια της κατασκευής ως προς τον σεισμικό κίνδυνο. Εκτός αυτού η επιλογή των ορίων αυτών είναι και αποτέλεσμα της επιλογής του εκάστοτε ιδιοκτήτη της κατασκευής και της ανάγκης που ο ίδιος έχει για ασφάλεια και αντοχή ως προς τον σεισμικό κίνδυνο. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατόν να επιλεγούν σενάρια εξαιρετικά συντηρητικά (και επομένως με ελάχιστη πιθανότητα να ξεπεραστούν τα όρια που έχουν επιλεγεί) αλλά που θα οδηγήσουν και σε σημαντική αύξηση του κόστους.

Παρατηρήσαμε, επιπλέον ,ότι κατά την επιλογή των κριτηρίων τρωτότητας σε κάθε σενάριο θα πρέπει για όλες τις στάθμες επιτελεστικότητας (και το επίπεδο βλάβης της κατασκευής) να ακολουθείται η ίδια αυστηρότητα στον καθορισμό των ορίων. Αυτό πρέπει να συμβαίνει γιατί όπως αποδείχτηκε και στα τρία

παραδείγματα κατασκευών που εξετάσαμε ακόμη και μία τιμή από τις τρεις που αντιστοιχούν σε κάθε σενάριο να είναι υπερβολικά συντηρητική είναι αρκετή ώστε να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολογημένο σχεδιασμό. Αυτό για παράδειγμα φαίνεται με ξεκάθαρο τρόπο όταν στο τριώροφο για μια αλλαγή στην πιθανότητα που αντιστοιχεί στο Maximum Considered Event στο σενάριο A (από 0.05 % σε 0.5 %) θα αρκούσε ο σχεδιασμός 5.50 x 0.30 max αντί του σχεδιασμού 6.50 x 0.30 max στον οποίο και τελικά καταλήξαμε.

Όμως η χρήση των κριτηρίων τρωτότητας επηρεάζει και κατά έναν ακόμη τρόπο μια κατασκευή από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Όπως είδαμε στα παραδείγματα που αναπτύχθηκαν, κάθε κατασκευή εξετάστηκε και για σχεδιασμούς με μέγιστο και ελάχιστο οπλισμό στα τοιχία τους. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε πολύ εύκολα να φτάσουμε σε σχεδιασμούς με ελάχιστο και μέγιστο δυνατό ποσοστό χάλυβα (εννοείται με διαφορετικό μέγεθος τοιχίων) που να έχουν τις ίδιες πιθανότητες να ξεπεράσουν τα όρια που έχουμε θέσει. Έτσι με μία σύγκριση στο κόστος της κατασκευής ενός φορέα με τοιχία μεγαλύτερα σε μέγεθος αλλά με λιγότερο αναλογικά χάλυβα σε σχέση με έναν φορέα που θα έχει μικρότερα τοιχία αλλά αναλογικά περισσότερο χάλυβα μπορούμε να οδηγηθούμε στην επιλογή του οικονομικότερου στην ανέγερση φορέα που θα καλύπτει τις απαιτήσεις των κριτηρίων τρωτότητας που έχουμε επιλέξει.

Τέλος , κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας είδαμε ότι και στις τρεις κατασκευές που εξετάσαμε οδηγηθήκαμε σε έναν αρκετά μεγάλο μέγεθος τοιχίων. Η υπερδιαστασιολόγηση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μέθοδο των συντελεστών η οποία γενικά μπορεί να θεωρηθεί αρκετά συντηρητική. Αυτό συμβαίνει γιατί η ‘’στατιστική ‘’ αυτή μέθοδος (σε αντίθεση με άλλες μεθόδους μη γραμμικών αναλύσεων) βασίζεται στην απόκριση ενός μονοβαθμίου και ο υπολογισμός την απόκρισης της κατασκευής σε κάθε όροφο γίνεται με βάση τη παραμόρφωση για συγκεκριμένη κατανομής των φορτίων καθύψος [10]. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκύψει ,επίσης, και ως λογικό συμπέρασμα από το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε το Φάσμα Σχεδιασμού του Ευρωκώδικα που γενικά είναι εξ’ ορισμού συντηρητικό.

Κλείνοντας, καταλήγουμε από τα παραπάνω στο συμπέρασμα ότι με την σωστή επιλογή των κριτηρίων τρωτότητας σε μια κατασκευή ωπλισμένου σκυροδέματος μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε τον σχεδιασμό της κατασκευής μας τόσο από άποψη απόδοσης όσο και από άποψη οικονομίας και να οδηγηθούμε ως εκ τούτου στην ασφαλέστερη, με βάση τα κριτήρια αυτά, διαθέσιμη λύση.

# Βιβλιογραφία


1) Τάσιος , Γιαννόπουλος , Τρέζος Τσουκαντάς , ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΝΕΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ Αθήνα 2005
2) ΕΚΩΣ 2000 ,Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου σκυροδέματος
3) ΕΑΚ -2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
4) Πρόδρομος Δ. Ζαράρης Μέθοδοι Υπολογισμού Σιδηροπαγούς σκυροδέματος
5) Μ. Φραγκιαδάκης, Βέλτιστος Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών, Διδακτορική Διατριβή , Απρίλιος 2006
6) Papadopoulos V. & Lagaros N.D,Performance-Based Optimum Design of Structures with Vulnerability Objectives, to appear.
7) Κοκολάκης Γ. & Σπηλιώτης Ι. , Εισαγωγή Στην Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική , Οκτώβριος 1999
8) Anil. K. Chopra Dynamics Of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering ,Copyright 2007
9) Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves, et al., Opensees (Open Systen for Earthquake Engineering Simulation) Command Language Manual, July 2007
10) Γιάννης Ν. Ψυχάρης Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας , Αθήνα 2010
11) Ευρωκώδικας 2 –Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα
12) Ευρωκώδικας 8 – Αντισεισμικός κανονισμός
13) Ι.Θ. Κατσικαδέλης , Δυναμική των Κατασκευών – ΤΟΜΟΣ Ι & ΙΙ , Αθήνα 2007
14) Μ. Παπαδρακάκης , Πλαστική Ανάλυση Ραβδωτών Φορέων – Σύγχρονες Μέθοδοι , Αθήνα 1996
15) Κ. Αναστασιάδης , Αντισεισμικές Κατασκευές ΤΟΜΟΣ 1, Θεσσαλονίκη 2001
16) Π.Γ. Καρύδης & Ι.Μ. Ταφλαμπάς , Τεχνική σεισμολογία – Παραδοσεις 2006-2007
17) Άνθιμος Χρυστοφής ,Επιτελεστικός Σχεδιασμός Κτιρίων με Κριτήρια Τρωτότητας, διπλωματική εργασία Αθήνα 2010
18) Γεώργιος Παναγόπουλος & Ανδρέας Ι. Κάππος Υπολογισμός Καμπύλων τρωτότητας για ελληνικά κτίρια από Ο/Σ ,15$^{ο}$ συνέδριο ΕΤΕΚ Σκυροδέματος ,Οκτώβριος 2006
19) M. Shinozuka , M.Q. Feng , H. Kim, T Uzawa and T. Ueda , Statistical Analysis of Fragility Curves , Los Angeles California 2001
20) Dimitrios Vamvatsikos and C.Allin Cornell , Incremental Dynamic Analysis ,2002
21) Dimitrios Vamvatsikos and Michalis Fragiadakis , Incremental Dynamic Analysis for Estimating Seismic Performance Sensitivity and Uncertainty ,2002

22) Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. (2002),Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission , Research-Directorate General, Environment and Climate Programme .