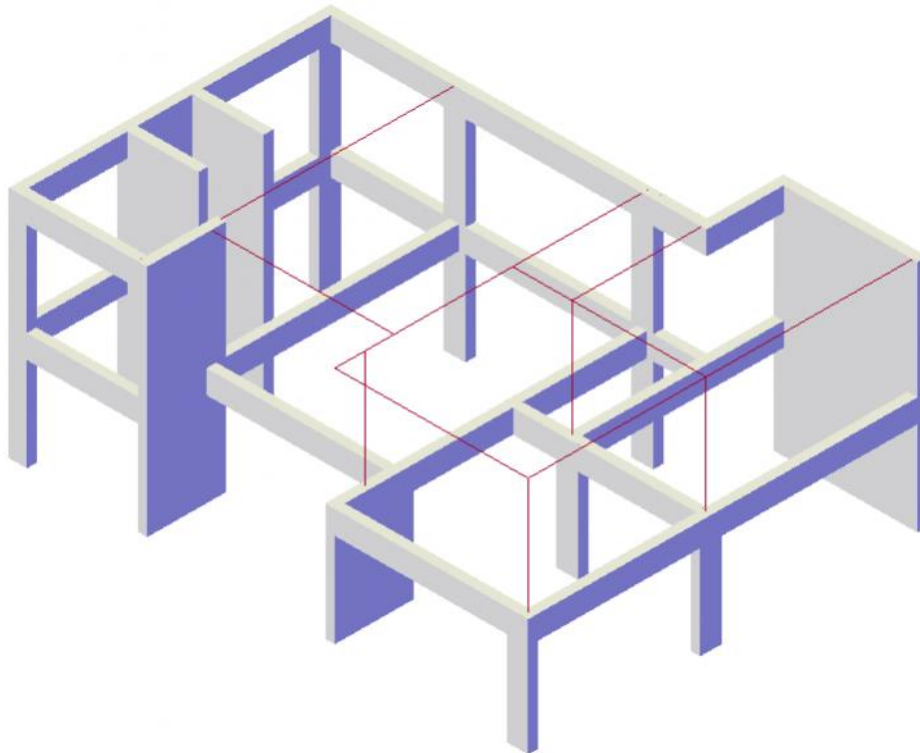




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Δομοστατικής  
Εργαστήριο Στατικής Και Αντισεισμικών Ερευνών

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ



Διπλωματική Εργασία  
Μαρία Νεφέλη Βαρθολομαίου

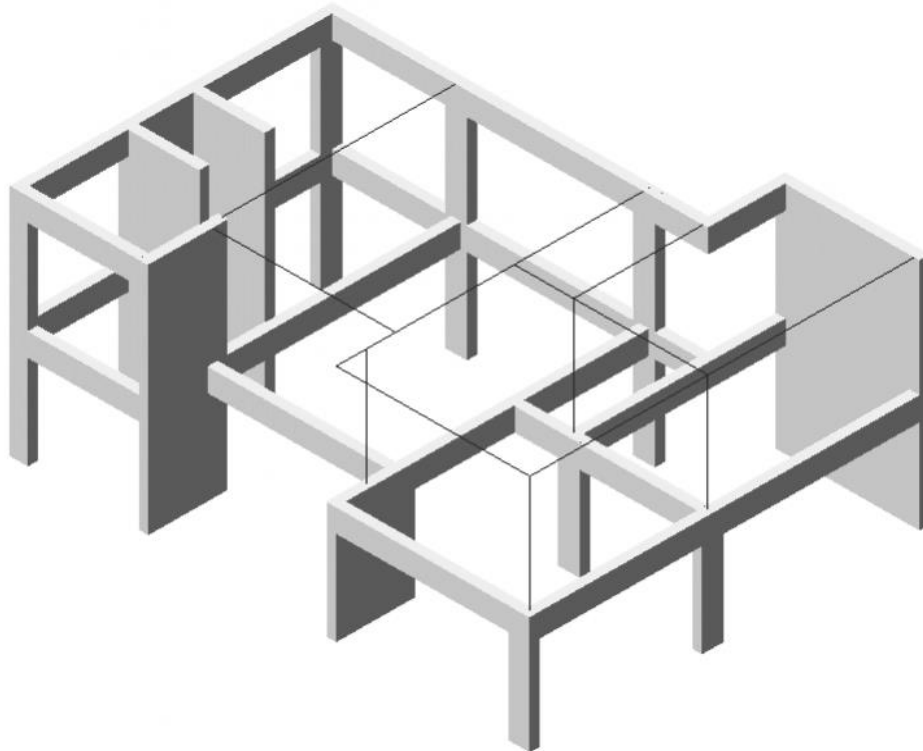
Επιβλέπων: Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ  
Αθήνα, Οκτώβριος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Δομοστατικής  
Εργαστήριο Στατικής Και Αντισεισμικών Ερευνών

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ



Διπλωματική Εργασία  
Μαρία Νεφέλη Βαρθολομαίου

Επιβλέπων: Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ  
Αθήνα, Οκτώβριος 2016



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Βησσαρίωνα Παπαδόπουλο, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και το ειλικρινές του ενδιαφέρον. Η πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια, αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Δημήτρη Γιοβάνη και τον Γιάννη Καλογερά, για τη σημαντική βοήθειά τους στην επίλυση αποριών αλλά και για το χρόνο που μου διέθεσαν μέχρι να ολοκληρωθεί η εργασία.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στην οικογένεια μου που με στήριξαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα με καμπύλες τρωτότητας. Αρχικά, έγινε ανάπτυξη της ανελαστικής στατικής υπερωθητικής ανάλυσης και του αντισεισμικού κανονισμού με στάθμες επιτελεσματικότητας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν η μέθοδος των συντελεστών για την εύρεση της στοχευόμενης μετακίνησης και η μέθοδος των καμπυλών τρωτότητας. Στη συνέχεια, έγινε εφαρμογή των παραπάνω αναλύσεων σε δύο κτίρια από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Το πρώτο διέθετε μόνο υποστυλώματα για την παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων, ενώ το δεύτερο διέθετε και τοιχία. Η προσομοίωση και η ανάλυση των κτιρίων έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, OpenSees. Τέλος, πραγματοποιήθηκε αποτίμηση και σύγκριση της αντοχής των δύο κτιρίων, με τη μέθοδο των καμπυλών τρωτότητας.

# ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis was to assess buildings of reinforced concrete with fragility curves. Initially, were developed the inelastic static incremental analysis (pushover) and the seismic design code with levels of structural performance according to Eurocode 8. Furthermore, were analytically presented the displacement coefficient method for finding the target displacement and the method of fragility curves. Subsequently, the above analyses were applied in two buildings of reinforced concrete. The first one had only columns for receiving vertical loads, while the second one had both columns and shear walls. The simulation and the analysis of buildings were done using the open source software called OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). Finally, the evaluation and the comparison of the strength of both buildings were performed by the method of fragility curves.





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.2	ΔΟΜΗ.....	2
<b>2</b>	<b>ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ</b> .....	<b>3</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	3
2.2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8.....	4
2.3	ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	7
2.4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	7
2.5	ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER) .....	8
2.5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2.5.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ .....	8
2.5.2.1	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΦΟΡΤΙΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΑΣ	8
2.5.3	ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	10
2.6	ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ .....	10
2.7	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (Drift) .....	13
2.8	ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	13
2.9	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ .....	14
2.9.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
2.9.2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ .....	15
2.10	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΕΚ 8.....	20
2.10.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	20
2.10.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ HAZUS .....	20
<b>3</b>	<b>ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ OPENSEES</b> .....	<b>23</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	23
3.1.1	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ .....	24
3.1.2	ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ .....	24
3.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	24
3.3	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ .....	37
3.4	ΕΚΔΟΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	39
<b>4</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b> .....	<b>41</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	41
4.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ Α .....	41
4.2.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΑ .....	44

4.2.1.1	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ .....	44
4.2.1.2	ΧΑΛΥΒΑΣ .....	44
4.2.2	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	44
4.2.3	ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ .....	45
4.2.4	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (Drift) .....	46
4.2.5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....	48
4.2.6	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ .....	49
4.2.6.1	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ $S_e(T_e, 5\%)$ .....	49
4.2.6.2	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ (PGA) .....	51
4.2.6.3	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ PGA- $S_e$ .....	53
4.3	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ Β.....	55
4.3.1	ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ .....	57
4.3.1.1	PUSHOVER ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΑΡΟΥΣ .....	57
4.3.1.2	PUSHOVER ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ .....	58
4.3.2	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (Drift) .....	59
4.3.3	ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ.....	61
4.3.4	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ .....	62
4.3.4.1	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ $S_e(T_e, 5\%)$ .....	62
4.3.4.2	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ (PGA) .....	64
4.3.4.3	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ PGA- $S_e$ .....	66
4.4	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΤΙΡΙΩΝ Α ΚΑΙ Β.....	68
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>71</b>

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κύριος στόχος της αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής είναι ο προσδιορισμός της έκτασης των βλαβών κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Η αποτίμηση αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα διεθνώς, αφού ένας μεγάλος αριθμός των ήδη δομημένων κατασκευών παρουσιάζεται με χαμηλού επιπέδου σεισμική ασφάλεια ως προς τις σημερινές απαιτήσεις. Η ανάγκη για σεισμική αποτίμηση μπορεί να αφορά τόσο σε προσεισμικό όσο και σε μετασεισμικό έλεγχο. Η ανάλυση τρωτότητας, ως μια πιθανοτικού τύπου διαδικασία αποτίμησης, οδηγεί στην εκτίμηση του πιθανού βαθμού βλάβης για δεδομένη στάθμη της σεισμικής έντασης.

Στην παρούσα διπλωματική, αφού παρουσιάστηκαν αναλυτικά η στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover), η μέθοδος των συντελεστών και η κατασκευή καμπυλών τρωτότητας, έγινε η εφαρμογή τους σε δύο πεντάωροφα κτίρια. Το κτίριο Α διαθέτει μόνο υποστυλώματα για ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων ενώ το κτίριο Β διαθέτει και τοίχια.

Στόχος λοιπόν της διπλωματικής αυτής είναι η αποτίμηση των δύο κτιρίων αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους όσον αφορά την αντοχή τους σε μια σεισμικής δράση.

## 1.2 ΔΟΜΗ

Παρακάτω παρατίθεται η δομή της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται συνοπτικά το κάθε κεφάλαιο.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης (Pushover) καθώς και τα βήματα κατασκευής της καμπύλης ικανότητας. Επεξηγούνται οι στάθμες επιτελεστικότητας και αναλύεται η μέθοδος των συντελεστών που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την εύρεση της στοχευόμενης μετακίνησης. Τέλος παρουσιάζεται η μέθοδος κατασκευής των καμπυλών τρωτότητας.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Λογισμικό Opensees

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται αναλυτικά οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν και τα βήματα που ακολουθήθηκαν, ώστε να προσομοιωθούν και να αναλυθούν, με τη βοήθεια του προγράμματος Opensees, οι επιλεγμένοι φορείς.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογές

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των κτιρίων Α και Β που αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Επιπλέον, αποτυπώνονται τα διαγράμματα καμπύλης ικανότητας και ανοιγμένων πλευρικών μετακινήσεων (drift). Τέλος, παρατίθενται οι καμπύλες τρωτότητας και τα συγκριτικά διαγράμματα των κτιρίων.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Βιβλιογραφία

## **2 ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας βασίζεται στην αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου ζημιών (στάθμη επιτελεστικότητας) ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού, δηλαδή στον καθορισμό του επιδιωκόμενου στόχου σεισμικής επικινδυνότητας. Η μέθοδος δηλαδή εξετάζει, τον πραγματικό τρόπο που θα συμπεριφερθεί η κατασκευή σε διάφορα επίπεδα ισχύος της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού και το αντίστοιχο αναμενόμενο επίπεδο ζημιών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς της κατασκευής και πέραν της ελαστικής περιοχής, δηλαδή μετά την εμφάνιση των ζημιών έως την οιονεί κατάρρευση.

Οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας μιας κατασκευής αποτελούν συνδυασμό μιας στάθμης επιτελεστικότητας και ενός επιπέδου της σεισμικής δράσης, που συνήθως καθορίζεται από την ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης στη διάρκεια ζωής της κατασκευής ή την ισοδύναμη περίοδο επανάληψης. Δηλαδή, κάθε στόχος σεισμικής ικανότητας καθορίζει μια ανεκτή οριακή κατάσταση βλαβών για συγκεκριμένη ισχύ της σεισμικής δόνησης. Αφού καθοριστεί ο επιθυμητός στόχος, μπορεί στη συνέχεια να γίνει αποτίμηση μιας υφιστάμενης κατασκευής, ο ανασχεδιασμός της (ενίσχυση της) ή ο σχεδιασμός μιας νέας κατασκευής. Ο καθορισμός του στόχου για τον οποίο θα γίνει ο σχεδιασμός εξαρτάται από το επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη και τη σπουδαιότητα της κατασκευής.

		Στάθμη επιτελεστικότητα		
		Περιορισμός βλαβών	Σημαντικές βλάβες	Οιονεί κατάρρευση
Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης σε 50 χρόνια	20% (Περίοδος επανάληψης 225 χρόνια)	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	Γ <sub>1</sub>
	10% (Περίοδος επανάληψης 475 χρόνια)	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	Γ <sub>2</sub>
	2% (Περίοδος επανάληψης 2475 χρόνια)	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	Γ <sub>3</sub>

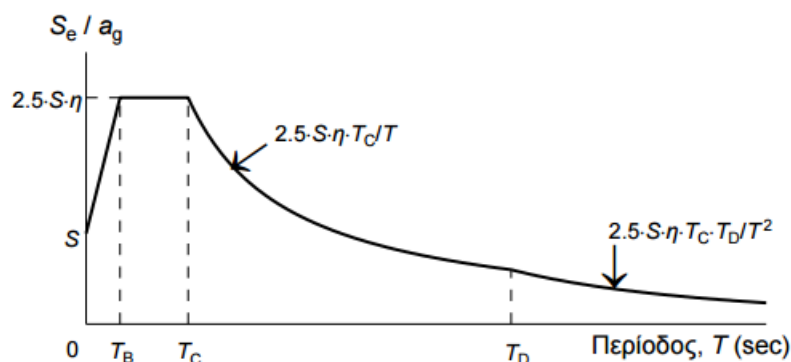
**Εικόνα 2.1:** Στόχοι σεισμικής ικανότητας κατά ΕΚ8

## 2.2 ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8

Ο Ευρωκώδικας 8 ασχολείται με τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Αναλύει το ελαστικό καθώς και το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού για την οριζόντια αλλά και την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού και παραθέτει τις παραμέτρους για τον ορισμό τους.

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί λαμβάνουν υπόψη τους την επιρροή των ιδιοτήτων του εδάφους στη μορφή του φάσματος τροποποιώντας τις χαρακτηριστικές περιόδους  $T_B$  και  $T_C$  που καθορίζουν την έναρξη της περιοχής σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και σταθερής φασματικής ταχύτητας, αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι η χαρακτηριστική περίοδος  $T_D$  που ορίζει την έναρξη της περιοχής σταθερής φασματικής μετακίνησης δεν εξαρτάται από το έδαφος.

Στη συνέχεια αναπτύσσεται μόνο το ελαστικό φάσμα για την οριζόντια συνιστώσα καθώς αυτό μόνο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.



**Εικόνα 2.2:** Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για οριζόντια σεισμική δράση και για απόσβεση 5% σύμφωνα με τον ΕΚ8

Οι αναλυτικές σχέσεις που δίνουν την ελαστική φασματική επιτάχυνση  $S_e$  σε κάθε περιοχή είναι:

$$S_e(T) = \alpha_g * S * \left[ 1 + \frac{T}{T_B} * (n * 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (2.1)$$

$$S_e(T) = \alpha_g * S * n * 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (2.2)$$

$$S_e(T) = \alpha_g * S * n * 2.5 * \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D \quad (2.3)$$

$$S_e(T) = \alpha_g * S * n * 2.5 * \frac{T_C * T_D}{T} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \quad (2.4)$$

Όπου:

$$\alpha_g = \gamma_i * \alpha_{gR} \quad (2.5)$$

$$n = \sqrt{\frac{10}{\zeta+5}} \geq 0.55 = \text{συντελεστής απόσβεσης (το } \zeta \text{ τίθεται επί τοις 100)} \quad (2.6)$$

$S$  = συντελεστής εδάφους

**Πίνακας 2.1:** Τιμές ενεργούς επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών Ελλάδας

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Εδαφική επιτάχυνση αναφοράς $a_{gR}$ (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

**Πίνακας 2.2:** Τιμές συντελεστή σπουδαιότητας  $\gamma_i$  κατά ΕΚ8

Κατηγορία σπουδαιότητας	Συντελεστής σπουδαιότητας
I (μικρή σπουδαιότητα)	0.8
II (συνήθης σπουδαιότητα)	1.0
III (μεγάλη σπουδαιότητα)	1.2
IV (πολύ μεγάλη σπουδαιότητα)	1.4

**Πίνακας 2.3:** Συντελεστής εδάφους και χαρακτηριστικές περιόδοι φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με τον ΕΚ8

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



## 2.3 ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ορίζονται τρεις στάθμες επιτελεστικότητας:

- *«Άμεση Χρήση μετά τον σεισμό»* (Immediate Occupancy-A)  
Στη στάθμη αυτή, οι βλάβες είναι τόσο μικρές ώστε αναμένεται ότι καμία λειτουργία του κτιρίου δεν διακόπτεται είτε κατά τη διάρκεια είτε μετά από τον σεισμό σχεδιασμού, εκτός ίσως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Είναι πιθανό να εμφανιστούν μερικές τριχοειδείς ρωγμές στον φέροντα οργανισμό, οι οποίες όμως δεν επηρεάζουν την ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα κατακόρυφα φορτία στον ίδιο βαθμό, όπως και πριν τον σεισμό.
- *«Προστασία Ζωής»* (Life Safety-B)  
Στη στάθμη αυτή, αναμένεται να εμφανιστούν στον φέροντα οργανισμό μετά το σεισμό επισκευάσιμες βλάβες, οι οποίες δε θα δημιουργήσουν απώλεια της στατικής ευστάθειας της κατασκευής ούτε σοβαρό τραυματισμό ατόμων. Για την επαναχρησιμοποίηση της κατασκευής μετά τον σεισμό απαιτείται να επισκευαστούν οι βλάβες.
- *«Οιονεί Κατάρρευση»* (Collapse Prevention-C)  
Στη στάθμη αυτή, αναμένεται να προκύψουν εκτεταμένες και σοβαρές βλάβες στον φέροντα οργανισμό οι οποίες δεν δύναται να επισκευαστούν. Ο φέρων οργανισμός μπορεί να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία για ένα διάστημα μετά το σεισμό, αλλά η ικανότητα αντίστασης σε οριζόντια φορτία έχει μειωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα η κατασκευή να μην διαθέτει περιθώριο ασφαλείας έναντι μερικής ή ολικής κατάρρευσης.

## 2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για τη αποτίμηση του υφιστάμενου κτιρίου απαιτείται η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης από την οποία θα προκύψουν τα απαραίτητα στοιχεία (εντατικά μεγέθη, παραμορφώσεις κτλ) για τον σκοπό αυτό. Επιγραμματικά οι μέθοδοι αυτοί είναι:

- Ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση
- Ελαστική δυναμική ανάλυση
- Ανελαστική στατική ανάλυση
- Ανελαστική δυναμική ανάλυση (ανάλυση χρονοϊστορίας)
- Προσεγγιστική αναλυτική εκτίμηση της έντασης
- Εμπειρικές μέθοδοι

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η ανελαστική στατική ανάλυση ή αλλιώς στατική υπερωθητική ανάλυση (pushover analysis). Οι αναλύσεις έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος OpenSees, το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 3.

## 2.5 ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER)

### 2.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο «στατική υπερωθητική ανάλυση» αποδίδεται στα ελληνικά ο αγγλικός όρος «static pushover analysis» και σημαίνει τη διενέργεια μιας μη γραμμικής ανάλυσης για μονότονη και σταδιακά αυξανόμενη στατική φόρτιση (επαυξητική διαδικασία) μέχρι την έλευση της κατάρρευσης του κτιρίου που αναλύεται. Ουσιαστικά, η κατασκευή φορτίζεται με σταθερά φορτία βαρύτητας και με μονοτονικά αυξανόμενα οριζόντια φορτία δεδομένης κατανομής καθ' ύψος (τριγωνική, πρώτη ιδιομορφή, ή περισσότερο πολύπλοκοι συνδυασμοί) τα οποία αναπαριστούν τις αδρανειακές δυνάμεις που εμφανίζονται στα επίπεδα των ορόφων κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Αρχικά η υπερωθητική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ως μια μέθοδος προσδιορισμού του οριακού φορτίου, στα πλαίσια της οποίας μετά από την διενέργεια της επαυξητικής διαδικασίας λαμβανόταν μία καμπύλη εξωτερικών φορτίων - μετακινήσεων (υπερωθητική καμπύλη).

Η μέθοδος έχει ως στόχο να αναδείξει με πολύ καλή προσέγγιση, την απόκριση μίας κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού δηλαδή, το μέγεθος των ανελαστικών παραμορφώσεων (αλλά και των εντασιακών μεγεθών) που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία της κατασκευής. Δίνει έτσι την δυνατότητα στο μελετητή μηχανικό να έχει πλήρη γνώση της συμπεριφοράς της σε κάθε χρονική στιγμή. Η εφαρμογή της μπορεί να γίνει τόσο σε υφιστάμενες όσο και σε νέες κατασκευές για τον έλεγχο της στατικής της συμπεριφοράς.

### 2.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Η στατική υπερωθητική ανάλυση διακρίνεται, ανάλογα με τη μορφή και τον τρόπο επιβολής των οριζόντιων φορτίων σε ανάλυση με:

- i. Φορτία γραμμικής κατανομής σταθερής αναλογίας
- ii. Φορτία ιδιομορφικής κατανομής σταθερής αναλογίας
- iii. Φορτία ιδιομορφικής κατανομής μεταβαλλόμενης αναλογίας
- iv. Φορτία πολυ-ιδιομορφικής κατανομής σταθερής ή μεταβαλλόμενης αναλογίας

Στην παρούσα διπλωματική έχει χρησιμοποιηθεί η στατική προσαυξητική ανάλυση με οριζόντια φορτία ιδιομορφικής κατανομής σταθερής αναλογίας.

#### 2.5.2.1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΦΟΡΤΙΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΑΣ

Η μέθοδος αυτή υπολογισμού των στατικών οριζόντιων φορτίων βασίζεται στις παραδοχές της απλοποιημένης φασματικής ή ισοδύναμης στατικής μεθόδου για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών όπου οι αδρανειακές δυνάμεις προσδιορίζονται με βάση τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του κτιρίου και το φάσμα σχεδιασμού. Οι δυνάμεις κατανέμονται καθ' ύψος του κτιρίου έτσι ώστε να προσεγγίζουν τις αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη σεισμική διέγερση. Μετά τη μόρφωση του μητρώου στιβαρότητας και του μητρώου μάζας του κτιρίου, υπολογίζονται η θεμελιώδης ιδιομορφή και η ιδιοπερίοδος από την επίλυση του γενικευμένου προβλήματος ιδιοτιμών:

$$[K]\{\varphi_1\} = \lambda_1 [M]\{\varphi_1\} \quad (2.7)$$

Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος προκύπτει από τη σχέση:

$$T_1 = 2\pi / \omega_{\min} \quad (2.8)$$

$$\text{όπου } \omega_{\min} = (\lambda_1)^{1/2} \quad (2.9)$$

Και  $(\{\varphi_1\}, \omega_{\min})$  είναι το ζητούμενο ιδιοζεύγος της πρώτης ή θεμελιώδους ιδιομορφής  $\{\varphi_1\}$  και της αντίστοιχης ιδιοσυχνότητας  $\omega_{\min}$ .

Στη συνέχεια υπολογίζεται η τέμνουσα βάσεως από το φάσμα σχεδιασμού και την τιμή της θεμελιώδους ιδιοπερίοδου του. Το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού αποτελεί συνήθως μια περιβάλλουσα φασμάτων τα οποία προέρχονται από μια σειρά χαρακτηριστικών επιταχυνσιογραφημάτων. Η δε μορφή του, επηρεάζεται από τη γεωγραφική θέση, το είδος του κτιρίου και από τα εδαφοτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Η τέμνουσα βάσεως υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_b = S_{a1} \sum_k m_k \quad (2.10)$$

Όπου  $m_k$  είναι η μάζα του  $k$  ορόφου ( $k=1, n$ ),  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός ορόφων και  $S_{a1}(T_1)$  είναι η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο και προκύπτει από το φάσμα σχεδιασμού. Η τέμνουσα βάσεως κατανέμεται στη στάθμη των ορόφων του κτιρίου. Έτσι η οριζόντια αδρανειακή δύναμη που αντιστοιχεί στον  $k$  όροφο ενός κτιρίου μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$F_k = \frac{m_k * \varphi_1^k}{\sum_k m_k * \varphi_1^k} * V_b \quad (2.11)$$

Όπου το διάνυσμα  $\{\varphi_1\}^T = [\varphi_1^1 \ \varphi_1^2 \ \dots \ \varphi_1^k \ \dots \ \varphi_1^n]$  έχει ως συνιστώσες τις τιμές της θεμελιώδους ιδιομορφής στις στάθμες των ορόφων  $k=1, 2, \dots, n$  του κτιρίου.

Μια προσέγγιση της καθ' ύψος κατανομής των σεισμικών φορτίων με βάση την πρώτη ιδιομορφή μπορεί να γίνει από μια τριγωνική καθ' ύψος κατανομή (όπως έγινε και στην παρούσα διπλωματική). Τότε οι συνιστώσες της θεμελιώδους ιδιομορφής στους ορόφους του κτιρίου δίνονται από τη σχέση:

$$\varphi_1 = h_k / h_n \quad (2.12)$$

όπου  $h_k$  είναι το ύψος του  $k$  ορόφου από το έδαφος.

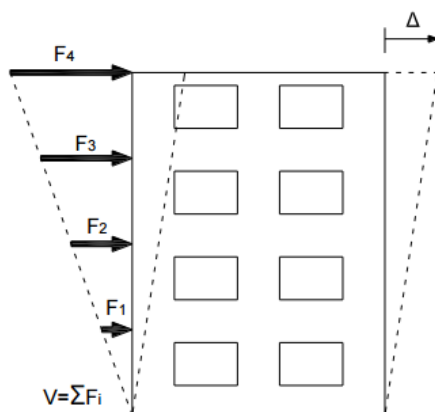
Τα οριζόντια φορτία ανά όροφο που προκύπτουν θα αποτελέσουν, είτε αυτούσια είτε μετά από κάποια κλιμάκωση, τα φορτία εκκίνησης της οριακής προσαυξητικής ανάλυσης προκειμένου να υπολογιστεί η καμπύλη ικανότητας του κτιρίου και τα άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Τα φορτία εκκίνησης αυξάνονται σταδιακά μέχρι την πλήρη κατάρρευση του φορέα, ενώ η αναλογία των φορτίων εκκίνησης μεταξύ των ορόφων παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της ανάλυσης.

### 2.5.3 ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

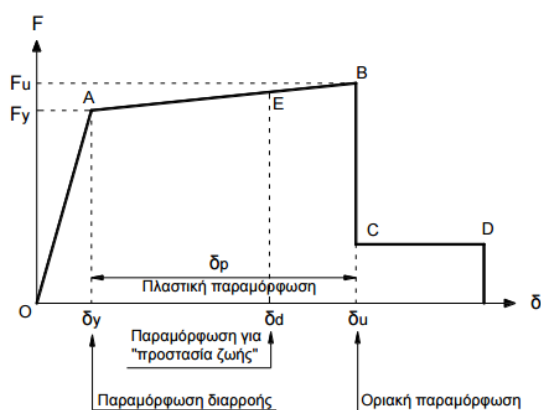
1. Η στατική υπερωθητική ανάλυση βασίζεται στην παραδοχή ότι η απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σχετίζεται με την απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος. Έτσι, λαμβάνει υπόψη μόνο την πρώτη ιδιομορφή ταλάντωσης για την κατανομή του στατικού τύπου σεισμικών φορτίων, με αποτέλεσμα η ακρίβεια της μεθόδου σε φορείς με μεγάλη επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών να μη είναι ικανοποιητική.
2. Η ανάλυση αυτή έχει αναπτυχθεί με βάση τη θεώρηση επίπεδων συστημάτων. Έτσι η εφαρμογή της σε χωρικά συστήματα δημιουργεί μια σειρά ερωτημάτων στα οποία οι κανονισμοί άλλοτε απαντούν μέσω συγκεκριμένων διατάξεων και άλλοτε αφήνουν περιθώρια πολλαπλών ερμηνειών.
3. Κατά την ανάλυση λαμβάνεται υπόψη μόνο η οριζόντια συνιστώσα του σεισμού και αγνοείται η κατακόρυφη που πιθανόν να έχει μεγαλύτερη επιρροή στην απόκριση σε κάποιες περιπτώσεις.
4. Τέλος, η ανάλυση, λόγω του στατικού της χαρακτήρα, αγνοεί την απορρόφηση ενέργειας από την κατασκευή λόγω της δυναμικής απόκρισης και θεωρεί μόνο την απορρόφηση ενέργειας μέσω των παραμορφώσεων.

### 2.6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Η στατική προσαυξητική ανάλυση στηρίζεται στον έλεγχο των μετακινήσεων, γι' αυτό απαιτεί τον προσδιορισμό τριών βασικών παραμέτρων, της ικανότητας και της απαίτησης σε μετακίνηση και της συμπεριφοράς. Η ικανότητα αυτή, της μετακίνησης, εκφράζεται μέσω της σχεδίασης της υπερωθητικής καμπύλης (καμπύλη ικανότητας) της κατασκευής. Η καμπύλη ικανότητας είναι η γραφική παράσταση της σχέσης που συνδέει την τέμνουσα βάσης μιας κατασκευής με την μετακίνηση σε ένα προκαθορισμένο σημείο, κατά κανόνα στην κορυφή της. Επειδή η ικανότητα της κατασκευής προκύπτει από την ικανότητα των επιμέρους δομικών στοιχείων, για την δημιουργία της καμπύλης θα πρέπει αρχικά να γίνει καθορισμός των νόμων που διέπουν την ανελαστική συμπεριφορά των μελών της κατασκευής. Οι νόμοι αυτοί περιγράφονται μέσω διαγραμμάτων που σχετίζουν εντατικά μεγέθη "F" με παραμορφώσεις ή σχετικές μετακινήσεις "δ".

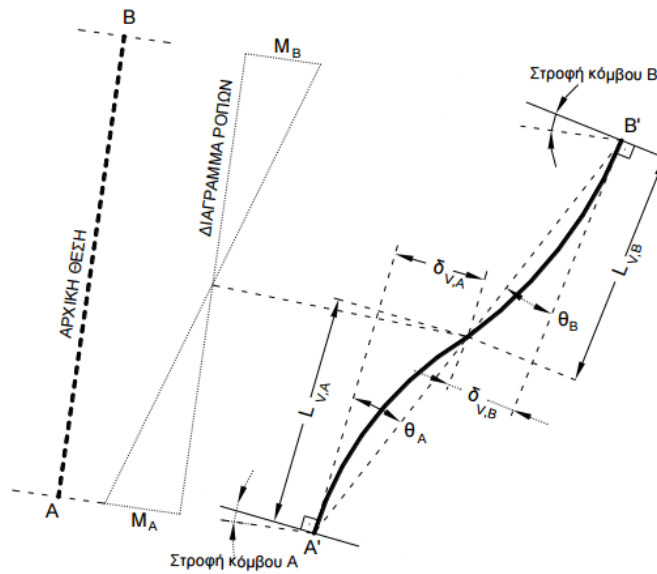


**Εικόνα 2.3:** Τριγωνική κατανομή φορτίου



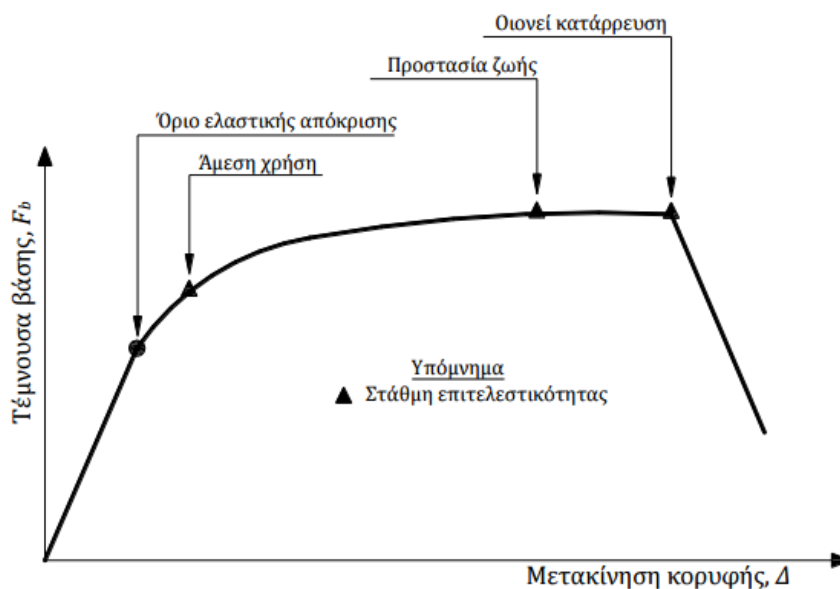
**Εικόνα 2.4:** Ιδεατή καμπύλη F-δ δομικών στοιχείων

Στα στοιχεία από ωπλισμένο σκυρόδεμα επειδή οι καμπτικές και οι διατμητικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν, ενώ οι στροφές των ακραίων διατομών των στοιχείων επηρεάζονται και από την εξόλκευση των οπλισμών στις αγκυρώσεις, η καταλληλότερη επιλογή εντατικού μεγέθους - παραμόρφωσης είναι η ροπή κάμψης  $M$  και η γωνία στροφής χορδής  $\theta$  στα άκρα του στοιχείου.



**Εικόνα 2.5:** Ορισμός γωνίας στροφής χορδής  $\theta$

Αφού καθοριστούν τα διαγράμματα  $M-\theta$  των στοιχείων της κατασκευής μπορεί πλέον να κατασκευαστεί η υπερωθητική καμπύλη όλης της κατασκευής και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτή τα σημεία που αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας.



**Εικόνα 2.6:** Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη ικανότητας

## 2.7 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (Drift)

Η ανοιγμένη πλευρική μετακίνηση κάθε ορόφου (interstorey drift) υπολογίζεται από το λόγο της διαφορικής μετατόπισης των δύο άκρων ενός τυπικού υποστυλώματος προς το ύψος του για κάθε βήμα της Pushover.

$$\text{Drift} = \frac{\text{Μετακίνηση ορόφου (i)} - \text{Μετακίνηση ορόφου (i-1)}}{\text{Υψος ορόφου (i)} - \text{Υψος ορόφου (i-1)}} \quad (2.13)$$

Ορίζονται τα όρια των τιμών του max interstorey drift  $\theta$  που αντιστοιχούν σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

Άμεση Χρήση	$0.002 \leq \theta \leq 0.004$
Προστασία Ζωής	$0.010 \leq \theta \leq 0.018$
Οιονεί Κατάρρευση	$0.030 \leq \theta$

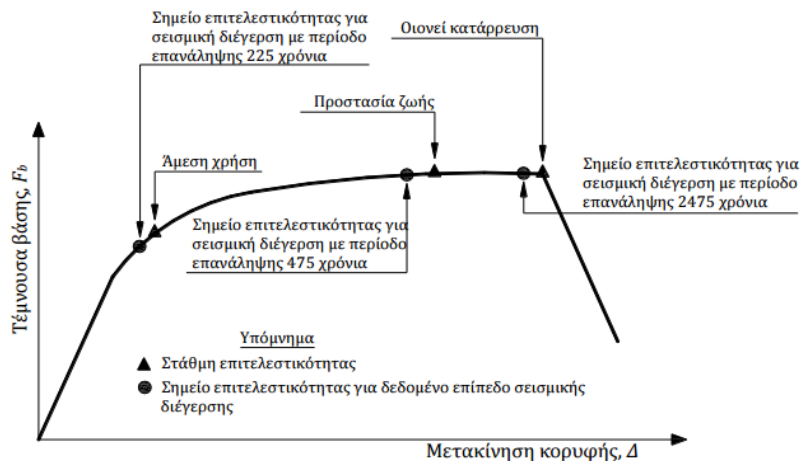
## 2.8 ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο καθορισμός των σταθμών επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη ικανότητας δεν είναι προφανής και απαιτεί συνήθως καλή κρίση μηχανικού. Αυτό συμβαίνει γιατί μία στάθμη επιτελεστικότητας για την κατασκευή ως σύνολο δεν αντιστοιχεί πάντοτε στο σημείο που το πρώτο στοιχείο της κατασκευής φτάνει σε αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας. Σε αυτό το πνεύμα γίνεται ο διαχωρισμός των στοιχείων σε *πρωτεύοντα* και *δευτερεύοντα*, ώστε να βοηθηθεί ο μηχανικός σε τέτοιου είδους κρίσεις. Πρωτεύοντα ή κύρια, θεωρούνται εκείνα που συμβάλλουν στην αντοχή και την ευστάθεια υπό σεισμικές δράσεις. Τα δευτερεύοντα στοιχεία, εξαιτίας της μικρής τους δυσκαμψίας ή αντοχής, αδυνατούν να παραλάβουν τα σεισμικά φορτία αλλά συμμετέχουν στην ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων. Για αυτά, διαφοροποιούνται τα κριτήρια επιτελεστικότητας καθώς επιτρέπονται μεγαλύτερες μετακινήσεις και βλάβες σε σχέση με τα κύρια στοιχεία. Στην παρούσα διπλωματική όλα τα στοιχεία του φέροντος οργανισμού θεωρήθηκαν πρωτεύοντα.

## 2.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ

### 2.9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να ελεγχθεί αν μια κατασκευή ικανοποιεί κάποια στάθμη επιτελεστικότητας πρέπει να ελεγχθεί εάν, για το σεισμό σχεδιασμού με την αντίστοιχη περίοδο επανάληψης, η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (στοχευόμενη μετακίνηση) αντιστοιχεί σε σημείο επιτελεστικότητας. Για τη στοχευόμενη μετακίνηση που αντιστοιχεί σε κάποια στάθμη σεισμικής δόνησης, μπορεί να ελεγχθεί σε ποιο σημείο της δικής του καμπύλης  $F - \delta$  βρίσκεται κάθε στοιχείο. Στοιχεία, στα οποία υπάρχει υπέρβαση της επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας, πρέπει να ενισχυθούν και η όλη διαδικασία να επαναληφθεί.

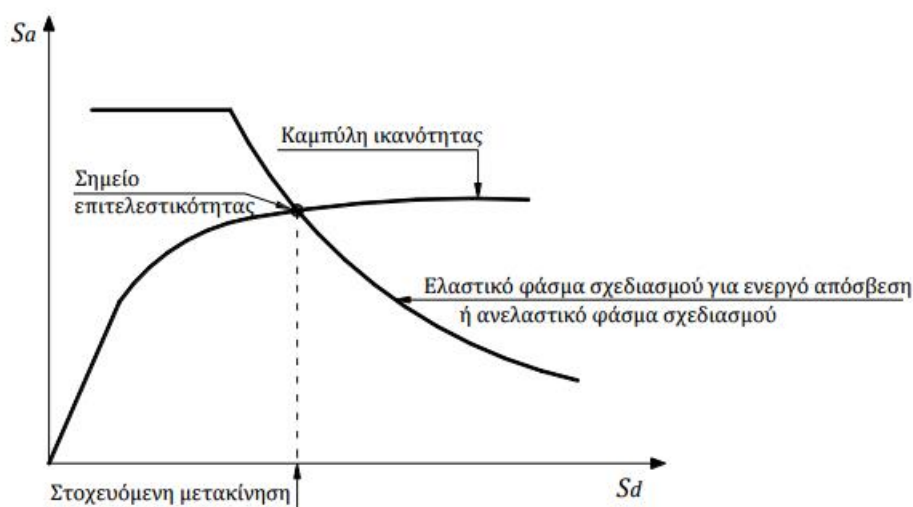


**Εικόνα 2.7:** Σύγκριση σημείου επιτελεστικότητας για το σεισμό σχεδιασμού και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας

Για τον υπολογισμό της στοχευόμενης μετακίνησης, ο ακριβέστερος τρόπος είναι με μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας. Η μέθοδος αυτή, όμως, απαιτεί εξειδικευμένα προγράμματα και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο γι' αυτό ως μία απλοποίηση του προβλήματος, η μετακίνηση μπορεί να υπολογιστεί με προσεγγιστικές μεθόδους όπως η μέθοδος των συντελεστών, η μέθοδος ATC-40, η μέθοδος N2, η ιδιομορφική στατική μη-γραμμική ανάλυση (modal pushover), η προσαρμοζόμενη στατική μη-γραμμική ανάλυση (adaptive pushover) και άλλες. Στην διπλωματική έχει υπολογιστεί η στοχευόμενη μετακίνηση με τη μέθοδο των συντελεστών, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Η φιλοσοφία υπολογισμού που ακολουθείται είναι ότι για τη στοχευόμενη μετακίνηση η ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει σεισμικά φορτία (capacity) πρέπει να είναι ίδια με την αντίστοιχη απαίτηση σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού (demand). Δηλαδή, το σημείο επιτελεστικότητας προκύπτει ως το σημείο τομής του φάσματος ικανότητας της κατασκευής και του ανελαστικού φάσματος για την αντίστοιχη πλαστιμότητα ή του ελαστικού φάσματος για την ενεργό απόσβεση.





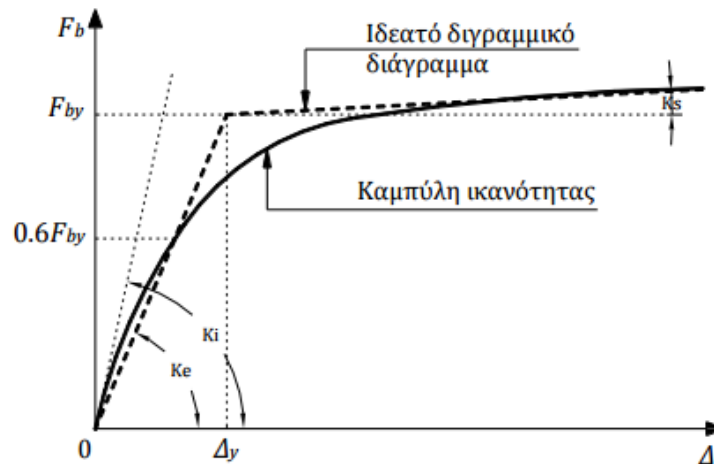
**Εικόνα 2.8:** Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

## 2.9.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής με τη μέθοδο των συντελεστών παρουσιάζεται στη FEMA 356 και τον ATC-40. Η μέθοδος βασίζεται στην ανελαστική στατική ανάλυση για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων.

**ΒΗΜΑ 1:** Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος για την καμπύλη ικανότητας

1. Κατασκευάζεται ο μετελαστικός κλάδος, με δυσκαμψία  $K_s$  ορισμένη κατά την κρίση του μηχανικού και θεωρώντας ως μέγιστη μετακίνηση το σημείο όπου η καμπύλη ικανότητας έχει γίνει περίπου οριζόντια.
2. Ορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία,  $K_e$ , από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο πάνω στην καμπύλη ικανότητας που αντιστοιχεί στο 60% της τέμνουσας διαρροής  $V_y$ . Επειδή αυτή η τιμή δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων απαιτούνται κάποιες δοκιμές.
3. Ορίζεται η τέμνουσα διαρροής,  $V_y$ , ως το σημείο τομής των ευθειών με κλίση  $K_e$  και  $K_s$ , που αντιστοιχούν στον ελαστικό και μετελαστικό κλάδο αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.9:** Κατασκευή ιδεατής διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης ικανότητας

**ΒΗΜΑ 2:** Υπολογισμός της ενεργούς θεμελιώδους ιδιοπεριόδου  $T_e$ .

Από ιδιομορφική ανάλυση υπολογίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής στη διεύθυνση που εξετάζεται, λαμβάνοντας υπόψη την αρχική ελαστική δυσκαμψία  $K_i$ . Για να υπολογίσουμε τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο που αντιστοιχεί σε δυσκαμψία  $K_e$ , χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (2.14)$$

**ΒΗΜΑ 3:** Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης  $\Delta_t$

Η στοχευόμενη μετακίνηση της κορυφής που αντιστοιχεί σε δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * C_3 * S_e * \frac{T_e^2}{4 * \pi^2} \quad (2.15)$$

Οι τιμές των παραμέτρων ορίζονται σύμφωνα με τη FEMA 356 ως εξής:

$C_0$  = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση της κορυφής,  $\Delta$ , με τη φασματική μετακίνηση,  $S_d$ .

$$\text{Ισχύει } \Delta = \Gamma * S_d * \varphi_{top} \quad (2.16)$$

όπου  $\Gamma$  ο συντελεστής συμμετοχής σύμφωνα με τη σχέση

$$\Gamma = \frac{\sum m_i * \varphi_i}{\sum m_i * \varphi_i^2} \quad (2.17)$$

Άρα,  $C_0 = \Gamma * \varphi_{top}$ . Εάν  $\varphi_{top} = 1$ , τότε  $C_0 = \Gamma$ .

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής  $\Gamma$  μπορούν να χρησιμοποιούνται οι τιμές  $\varphi_i$  που αντιστοιχούν στην 1<sup>η</sup> ιδιομορφή ή οι τιμές που αντιστοιχούν στην παραμόρφωση του κτιρίου όταν συμβαίνει η στοχευόμενη μετακίνηση. Εναλλακτικά, η τιμή του συντελεστή  $C_0$  μπορεί να λαμβάνεται απ' ευθείας από τον Πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4:** Τιμές του συντελεστή  $C_0$

Αριθμός ορόφων	Διατμητικά κτίρια		Λοιπά κτίρια
	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

$C_1$  = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$C_1 = 1.0 \quad \text{για } T_e \geq T_s \quad (2.18)$$

$$C_1 = \frac{1.0 + (R-1) * T_c / T_e}{R} \quad \text{για } T_e < T_s \quad (2.19)$$

όπου

$T_c$  = η χαρακτηριστική περίοδος του φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στο όριο μεταξύ του τμήματος σταθερής επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) και του τμήματος σταθερής ταχύτητας (φθίνων κλάδος).

$R$  = ο συντελεστής συμπεριφοράς διαρροής (=  $\alpha_y$ ) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{S_e/g}{V_y/W} * C_m \quad (2.20)$$

στην οποία:

$S_e$  = φασματική επιτάχυνση σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο  $T_e$ .

$V_y$  = τέμνουσα βάσης διαρροής σύμφωνα με τη διγραμμική απεικόνιση της καμπύλης ικανότητας

$W$  = συνολικό βάρος της κατασκευής

$C_m$  = συντελεστής που δηλώνει την ενεργό μάζα σύμφωνα με τον Πίνακα 2.5.

Εναλλακτικά, ο συντελεστής  $C_m$  μπορεί να λαμβάνεται ίσος με το λόγο της ιδιομορφικής μάζας της θεμελιώδους ιδιομορφής προς τη συνολική μάζα.

Επιπρόσθετα ισχύει:  $C_1 \leq 1.5$  για  $T_e \leq 1.0$  sec και  $C_1 \geq 1.0$ .

**Πίνακας 2.5:** Τιμές του συντελεστή  $C_m$

Αριθμός ορόφων	Πλαισιακά κτίρια από Ω.Σ.	Τοιχωματικά κτίρια από Ω.Σ.	Κτίρια 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.

$C_2$  = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μορφή των βρόχων υστέρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς. Οι τιμές του  $C_2$  για διάφορους τύπους συστημάτων και διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας δίνονται στον Πίνακα 2.6.

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή  $C_2 = 1.0$

**Πίνακας 2.6:** Τιμές του συντελεστή  $C_2$

Στάθμη επιτελεστικότητας	$T_e \leq 0.1$ sec		$T_e \geq T_s$	
	Τύπος κτιρίου 1	Τύπος κτιρίου 2	Τύπος κτιρίου 1	Τύπος κτιρίου 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

Επεξήγηση τύπων

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 στην κατηγορία 1.

Παρατήρηση: Για ενδιάμεσες τιμές ιδιοπεριόδων γίνεται γραμμική παρεμβολή.

$C_3$  = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την αύξηση των μετακινήσεων λόγω επιρροής φαινομένων δευτέρας τάξης (φαινόμενα P – Δ), που ορίζεται ως εξής:

$$C_3 = 1.0 \quad \text{για θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου (K_s > 0)} \quad (2.21)$$

$$C_3 = 1.0 + \frac{a \cdot (R-1)^{\frac{3}{2}}}{T_e} \quad \text{για αρνητική κλίση του μετελαστικού κλάδου (K_s < 0)} \quad (2.22)$$

Όπου  $a = K_s / K_e$

Η τιμή του συντελεστή  $C_3$  δε χρειάζεται να υπερβαίνει την τιμή:

$$C_3 \leq 1.0 + 5 * \frac{(\theta-1)}{T_e} \quad (2.23)$$

Όπου  $\theta$  = συντελεστής σχετικής μεταθετότητας, ίσος με τη μέγιστη τιμή των αντίστοιχων συντελεστών  $\theta_i$  των ορόφων, οι οποίοι ορίζονται από τη σχέση:

$$\theta_i = \frac{P_i \cdot \delta_i}{V_i \cdot h_i} \quad (2.24)$$

Όπου:

$P_i$  = το κατακόρυφο φορτίο του  $i$  ορόφου

$V_i$  = η συνολική τέμνουσα δύναμη του  $i$  ορόφου στην εξεταζόμενη διεύθυνση για το σεισμικό συνδυασμό, σύμφωνα με την κλασική ανάλυση

$h_i$  = ύψος του  $i$  ορόφου

$\delta_i$  = σχετική μετακίνηση της πλάκας του ορόφου στην εξεταζόμενη διεύθυνση, μετρούμενη στο κέντρο δυσκαμψίας (center of rigidity).

## 2.10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΕΚ8

### 2.10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καμπύλες τρωτότητας αποτελούν μία μέθοδο προσέγγισης της σεισμικής αποτίμησης μίας κατασκευής. Υπολογίζουν την πιθανότητα εμφάνισης μίας συγκεκριμένης στάθμης βλάβης για μία δεδομένη σεισμική ένταση, βασισμένες σε μία παραδοχή που αφορά τον τύπο της στατιστικής κατανομής (λογαριθμοκανονική). Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στη συνέχεια είναι γνωστή ως μεθοδολογία HAZUS και προϋποθέτει την δημιουργία της καμπύλης ικανότητας και τον ορισμό της φασματικής επιτάχυνσης που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας. Οι καμπύλες τρωτότητας μπορούν να δημιουργηθούν με κριτήριο την φασματική επιτάχυνση  $S_e$ , την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA ή και άλλα κριτήρια.

### 2.10.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ HAZUS

Οι τιμές των καμπύλων τρωτότητας για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας, δηλαδή οι συσχετισμοί της πιθανότητας  $P(\theta_{\max(\text{ορόφου})} > \theta_{\text{crit}})$  με το αντίστοιχο μέτρο έντασης  $S_e(T_e, 5\%)$  υπολογίζεται με βάση τη λογαριθμοκανονική συνάρτηση κατανομής:

$$P(\theta_{\max, \text{ορόφου}} > \theta_{\text{crit}}) = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} * \ln\left(\frac{S_e}{S_{e,SE}}\right)\right] \quad (2.25)$$

Όπου  $\beta_{ds}$  είναι η συνολική λογαριθμοκανονική τυπική απόκλιση που περιγράφει τη συνολική μεταβλητότητα της κατάστασης βλάβης και υπολογίζεται με βάση τη μεθοδολογία του Hazus ως εξής:

$$\beta_{ds} = \sqrt{(\text{CONV}[\beta_C, \beta_D])^2 + (\beta_{T,ds})^2} \quad (2.26)$$

Όπου:

$\beta_C$  = η λογαριθμοκανονική παράμετρος τυπικής απόκλισης που περιγράφει την μεταβλητότητα της καμπύλης ικανότητας.

$\beta_D$  = η λογαριθμοκανονική παράμετρος τυπικής απόκλισης που περιγράφει την μεταβλητότητα του φάσματος απαίτησης.

$\text{CONV}[\beta_C, \beta_D]$  = είναι μία πεπλεγμένη σχέση που δηλώνει τη σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ των δυο μεταβλητών λόγω του ότι το φάσμα απαίτησης εξαρτάται από την καμπύλη αντίστασης της κατασκευής. Δηλαδή, συνδυάζει τις αντίστοιχες συνεισφορές των δύο αυτών μεταβλητών στη συνολική μεταβλητότητα.

$\beta_{T,ds}$  = η λογαριθμοκανονική παράμετρος τυπικής απόκλισης που περιγράφει τη μεταβλητότητα του ορίου του μέτρου βλάβης. Δηλαδή εδώ, τη μεταβλητότητα του ορίου σχετικής μετακίνησης των ορόφων της κάθε στάθμης επιτελεστικότητας  $\theta_{\max, \text{στάθμης}}$ . Απλοποιητικά λαμβάνεται ίση με

0.2, 0.4 και 0.6 για τις στάθμες επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση, Προστασία Ζωής και Οιονει Κατάρρευση αντίστοιχα.

$\kappa$  = ο συντελεστής που εκφράζει την υποβάθμιση του δομικού συστήματος μετά τη διαρροή της κατασκευής. Είναι ένα άμεσο μέτρο των επιπτώσεων στο σεισμικό επίπεδο σχεδιασμού και στην ποιότητα της κατασκευής ανάλογα με τη μεταβλητότητα της απόκρισης.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία Hazus κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος που διαθέτουν μέχρι τρεις (3) ορόφους κατατάσσονται στην κατηγορία χαμηλού ύψους, κτίρια από τέσσερις (4) μέχρι επτά (7) ορόφους χαρακτηρίζονται ως μεσαίου ύψους και κτίρια από οχτώ (8) και πάνω ορόφους ως μεγάλου ύψους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η κατασκευή αποτελείται από πέντε (5) ορόφους άρα ανήκει στην κατηγορία μεσαίου ύψους. Επιπλέον, η υποβάθμιση του δομικού συστήματος μετά την διαρροή θεωρείται μικρή οπότε  $\kappa \geq 0.9$ . Τέλος, ο συντελεστής  $\beta_c$  παίρνει την τιμή 0.2 λόγω της μικρής μεταβλητότητας της καμπύλης ικανότητας.

Η πεπλεγμένη σχέση  $CONV[\beta_c, \beta_D]$  επιλύεται με έναν περίπλοκο αριθμητικό υπολογισμό, γι' αυτό παρακάτω παρατίθεται ένας βοηθητικός πίνακας προσδιορισμού της.

**Πίνακας 2.7:** Υπολογισμός παραμέτρων HAZUS

Building System <sup>2</sup>	Post-Yield Degradation of Structural System <sup>3</sup>								
	Minor Degradation ( $\kappa \geq 0.9$ )			Major Degradation ( $\kappa = 0.5$ )			Extreme Degradation ( $\kappa \leq 0.1$ )		
	Damage Variability <sup>4</sup> ( $\beta_{T,ds}$ )			Damage Variability <sup>4</sup> ( $\beta_{T,ds}$ )			Damage Variability <sup>4</sup> ( $\beta_{T,ds}$ )		
	Small (0.2)	Mod. (0.4)	Large (0.6)	Small (0.2)	Mod. (0.4)	Large (0.6)	Small (0.2)	Mod. (0.4)	Large (0.6)
Structural Systems with Very Small Capacity Curve Variability <sup>5</sup> ( $\beta_c = 0.1$ )									
Structure	0.60	0.70	0.80	0.70	0.80	0.90	0.85	0.95	1.05
NSD	0.60	0.70	0.80	0.80	0.85	0.95	0.90	1.00	1.10
NSA	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65
Structural Systems with Small Capacity Curve Variability <sup>5</sup> ( $\beta_c = 0.2$ )									
Structure	0.65	0.75	0.85	0.75	0.85	0.95	0.95	1.00	1.10
NSD	0.65	0.70	0.85	0.80	0.85	1.00	0.95	1.00	1.10
NSA	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65
Structural Systems with Moderate Capacity Curve Variability <sup>5</sup> ( $\beta_c = 0.3$ )									
Structure	0.65	0.75	0.85	0.80	0.85	0.95	0.95	1.00	1.10
NSD	0.65	0.75	0.85	0.80	0.90	1.00	0.95	1.05	1.15
NSA	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65
Structural Systems with Large Capacity Curve Variability <sup>5</sup> ( $\beta_c = 0.4$ )									
Structure	0.70	0.75	0.90	0.80	0.90	1.00	1.00	1.05	1.15
NSD	0.70	0.75	0.90	0.85	0.90	1.00	1.00	1.05	1.15
NSA	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65

Με βάση τον πίνακα 2.7 προκύπτουν οι παρακάτω τιμές των συντελεστών :

<b>Στάθμη Επιτελεσματικότητας</b>	<b>CONV[<math>\beta_c, \beta_D</math>]</b>	<b><math>\beta_{T,ds}</math></b>	<b><math>\beta_{ds}</math></b>
Άμεση Χρήση	0.65	0.2	0.68
Προστασία Ζωής	0.75	0.4	0.85
Οιονεί Κατάρρευση	0.85	0.6	1.04



## 3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ OPENSEES

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στη δυτική ακτή των Η.Π.Α, από το Pacific Earthquake Engineering Research Center, με κύριο σκοπό την ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Παρέχει στους χρήστες πληθώρα επιλογών καθώς διαθέτει μεγάλο εύρος στοιχείων (γραμμικά, επιφανειακά, χωρικά) που μπορούν να συνδυαστούν με σύνθετους νόμους υλικών, ώστε να μπορέσουν να προσεγγίσουν, όσο το δυνατόν καλύτερα, την πραγματική συμπεριφορά των εκάστοτε κατασκευών μέσω μη γραμμικών στατικών και δυναμικών αναλύσεων.

Στο OpenSees η εισαγωγή του προσομοιώματος και των παραμέτρων της ανάλυσης γίνεται μέσω εντολών γραμμένων σε γλώσσα C++, οι οποίες εκτελούνται με τη βοήθεια ενός διερμηνέα που είναι προγραμματισμένος σε γλώσσα Tcl. Η χρήση εντολών της Tcl κατά τη μόρφωση του φορέα και την εκτέλεση των αναλύσεων μπορεί να βοηθήσει τόσο στην αποφυγή σφαλμάτων όσο και στην ευκολότερη χρήση του λογισμικού. Οι βασικές λειτουργίες του Opensees είναι η προσομοίωση (Modeling) του φορέα, η ανάλυση (Analysis) και η έκδοση αποτελεσμάτων (Output Specifications).

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, το OpenSees χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση μη γραμμικών στατικών αναλύσεων σε κτίρια από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν δύο φορείς, ο πρώτος διέθετε μόνο υποστυλώματα και παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2 ενώ ο δεύτερος διέθετε και τοιχία και παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.3. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή της προσομοίωσης των φορέων στο OpenSees και αναλύονται λεπτομερώς τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων, οι νόμοι των υλικών και οι παράμετροι της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν.

### 3.1.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Η αρχιτεκτονική του λογισμικού OpenSees καθώς και η προσέγγιση του δωρεάν και ανοιχτού τύπου κώδικα, παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους χρήστες που ενδιαφέρονται για προχωρημένες προσομοιώσεις δομικών και γεωτεχνικών συστημάτων με ρεαλιστικά μοντέλα μη γραμμικής συμπεριφοράς. Οι χρήστες μπορούν να προσθέσουν περαιτέρω δυνατότητες προσομοίωσης και έχουν ευελιξία στον τρόπο αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων. Επιπλέον, το λογισμικό αυτό διαθέτει σύντομο και απλουστευμένο εγχειρίδιο χρήσης στο διαδίκτυο καθώς και τρόπους επικοινωνίας με άλλους χρήστες για επίλυση προβλημάτων. Τέλος, διαθέτει μεγάλο εύρος πεπερασμένων στοιχείων (γραμμικά, επιφανειακά, χωρικά) υλικών και δυνατοτήτων ανάλυσης (στατική-δυναμική, γραμμική μη-γραμμική) για όλα τα στάδια της προσομοίωσης.

### 3.1.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Η απουσία γραφικού περιβάλλοντος το καθιστά δύσχρηστο, τόσο για τον έλεγχο της ορθότητας του προσομοιώματος, όσο και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το εγχειρίδιο χρήσης που παρέχεται στο διαδίκτυο δεν ενημερώνεται συχνά, με αποτέλεσμα ο χρήστης να πρέπει να αναζητά συνεχώς τις νέες εξελίξεις.

## 3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

- Καθορισμός των διαστάσεων του μοντέλου και των βαθμών ελευθερίας κάθε κόμβου

#### **Εντολή:**

*model BasicBuilder -ndm\$ndm -ndf\$ndf*

Στη θέση \$ndm δίνουμε τον αριθμό 2 ή 3 ανάλογα με το αν έχουμε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο μοντέλο αντίστοιχα.

Στη θέση \$ndf δίνουμε έναν από τους αριθμούς 1 έως 6 ανάλογα με το πόσους βαθμούς ελευθερίας θέλουμε να έχει κάθε κόμβος του μοντέλου μας.

Το μοντέλο στην παρούσα διπλωματική είναι τρισδιάστατο με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (3 μεταφορικούς και 3 στροφικούς) άρα έχουμε -ndm3 -ndf6.

- Συντεταγμένες κόμβων

#### **Εντολή:**

*node \$nodeTag \$coords*

Στη θέση \$nodeTag δίνουμε την αρίθμηση του κόμβου και στη θέση \$coords τις συντεταγμένες του.

Για τρισδιάστατο μοντέλο στη θέση \$coords βάζουμε \$X \$Y \$Z (αλλιώς μόνο \$X \$Y)

- Κόμβοι διαφράγματος  
Με την εντολή αυτή εξασφαλίζουμε την διαφραγματική λειτουργία του κάθε ορόφου.

**Εντολή:**

*rigidDiaphragm \$perpDirn \$masterNodeTag \$slaveNodeTag1 \$slaveNodeTag2 ...*

Στη θέση \$perpDirn δίνουμε τον αριθμό του επιπέδου που είναι κάθετο στο επίπεδο που θέλουμε άκαμπτο. Δηλαδή, άμα θέλουμε διαφραγματική λειτουργία στο επίπεδο X-Y ο αριθμός που αντιστοιχεί στο κάθετο επίπεδο είναι το 3.

Στη θέση \$masterNodeTag δίνουμε τον αριθμό του κόμβου σύμφωνα με τον οποίο θέλουμε να κινούνται οι υπόλοιποι κόμβοι.

Στις θέσεις \$slaveNodeTag δίνουμε τους αριθμούς των κόμβων που θέλουμε να εξαρτώνται και να κινούνται όπως ο master node.

- Στηρίξεις του φορέα

**Εντολή:**

*fix \$nodeTag \$ConstrValues*

Στη θέση \$nodeTag δίνουμε τον αριθμό του κόμβου, τους βαθμούς ελευθερίας του οποίου θέλουμε να δεσμεύσουμε.

Στη θέση \$ConstrValues προσδιορίζουμε ποιους βαθμούς ελευθερίας δεσμεύουμε. Όταν για σε κάποιο βαθμό ελευθερίας δίνουμε την τιμή 0 συνεπάγεται πως είναι ελεύθερος, ενώ όταν του δίνουμε την τιμή 1 είναι δεσμευμένος. Βάζουμε τόσους αριθμούς όσους βαθμούς ελευθερίας έχει ο κόμβος.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχουμε δεσμεύσει όλους τους μεταφορικούς και στροφικούς βαθμούς ελευθερίας σε όλους τους κόμβους του ισογείου.

Δηλαδή έχουμε fix \$nodeTag 1 1 1 1 1 1

Στους κόμβους του διαφράγματος έχουμε δεσμεύσει μόνο την μετακίνηση κατά Z και τη στροφή κατά X και Y.

Δηλαδή έχουμε fix \$masterNodeTag 0 0 1 1 1 0

- Μάζες σε κάθε κόμβο

**Εντολή:**

*mass \$nodeTag \$massValues*

Στη θέση \$nodeTag δίνουμε τον αριθμό του κόμβου στον οποίο θα δώσουμε την τιμή της μάζας.

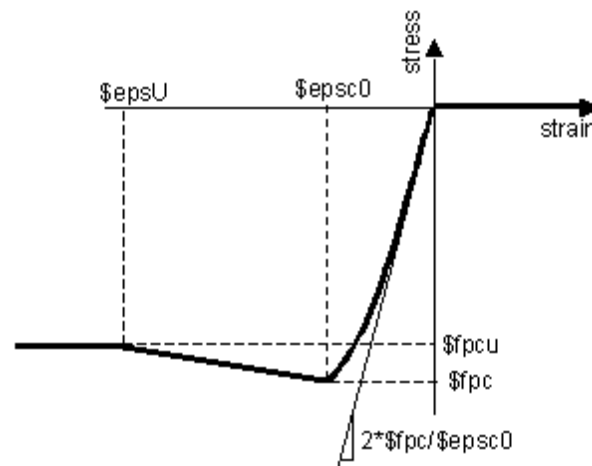
Στη θέση \$massValues δίνουμε σε κάθε βαθμό ελευθερίας την αντίστοιχη τιμή της μάζας.

Στο φορέα μας έχουμε δώσει τιμές μάζας στους μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας X, Y και σε όλους τους υπόλοιπους μία πολύ μικρή τιμή μάζας της τάξεως του 0.001.

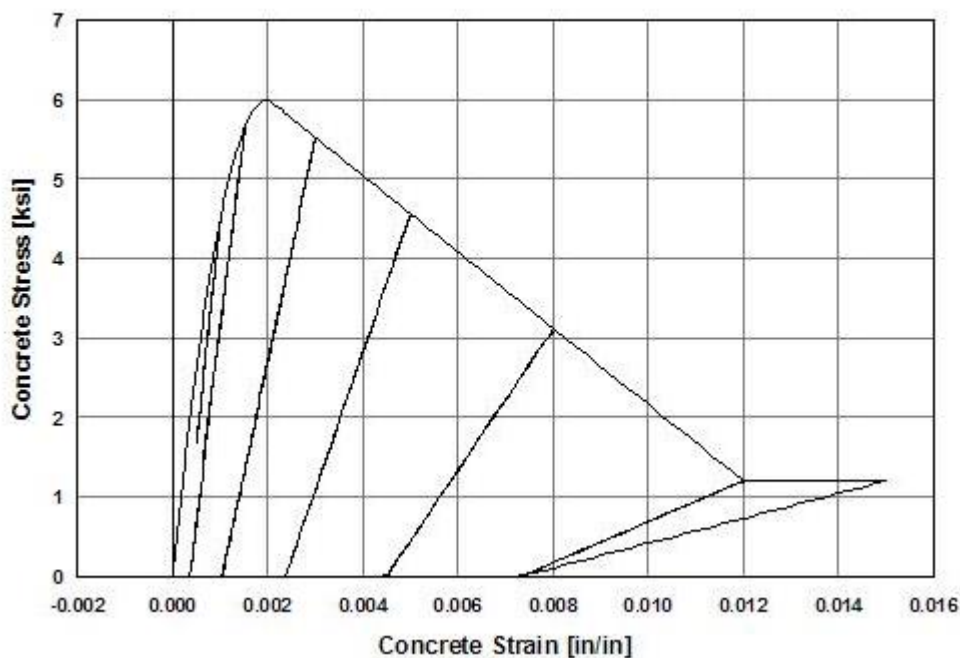
- Υλικά

➤ Σκυρόδεμα

Το OpenSees διαθέτει αρκετούς νόμους τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα. Στη διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκε το **Concrete01 Material - Zero Tensile Strength** στο οποίο είναι ενσωματωμένος ο νόμος των **Kent-Scott-Par**. Το υλικό αυτό θεωρεί μηδενικές τις εφελκυστικές αντοχές του σκυροδέματος ακόμα και πριν τη ρηγμάτωσή του.



**Εικόνα 3.1:** Καταστατικός νόμος τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος



**Εικόνα 3.2:** Υστερητικό μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος

### **Εντολή:**

*uniaxialMaterial Concrete01 \$matTag \$frc \$epsc0 \$frcu \$epsU*

Στη θέση *\$matTag* δίνουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί σε αυτό το υλικό.

Στη θέση *\$frc* δίνουμε τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις 28 μέρες.

Στη θέση *\$epsc0* δίνουμε τη θλιπτική παραμόρφωση για τη μέγιστη αντοχή που ορίσαμε προηγουμένως (*frc*).

Στη θέση *\$frcu* δίνουμε την τάση θραύσης του σκυροδέματος.

Στη θέση *\$epsU* δίνουμε την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη τάση θραύσης.

Στην περίπτωση περισφιγμένου σκυροδέματος, λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων του, αυξάνονται οι τιμές στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Ανάλογα λοιπόν με την τιμή του  $\omega_w$  (ενεργό ποσοστό περισφιγξης) έχουμε:

$$f_{cd,c} = (1 + 2.5\omega_w) * f_{cd} \quad \text{για } \omega_w \leq 0.10 \quad (3.1)$$

$$f_{cd,c} = (1.125 + 1.25\omega_w) * f_{cd} \quad \text{για } \omega_w \geq 0.10 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = 0.002 (f_{cd,c} / f_{cd})^2 \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 0.0035 + 0,1\omega_w \quad (3.4)$$

Ως  $a$  συμβολίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης,  $a = a_n \cdot a_s$

Για ορθογωνική διατομή:

$$a_n = 1 - \sum_n b_i^2 / 6b_0h_0 \quad (3.5)$$

$$a_s = (1 - s/2b_0) * (1 - s/2h_0) \quad (3.6)$$

$n$ : το συνολικό πλήθος των διαμηκών ράβδων που συγκρατούνται από κλειστούς ή μονοσκελείς συνδετήρες

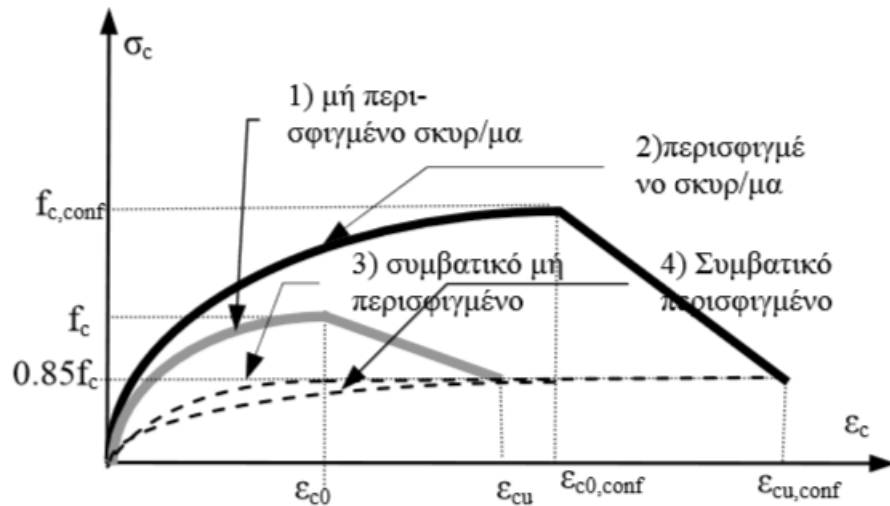
$b_i$ : η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ράβδων που συγκρατούνται με συνδετήρες

$b_0, h_0$ : το πλάτος και το ύψος αντίστοιχα του περισφιγμένου πυρήνα (μετρημένο μέχρι τον κεντροβαρικό άξονα των συνδετήρων)

$s$ : η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων

Το  $\omega_w$  συμβολίζει το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περισφιγξης και ορίζεται ως εξής:

$$\omega_w = \frac{\text{όγκος συνδετήρων}}{\text{όγκος σκυροδέματος}} * \frac{f_y}{f_c} \quad (3.7)$$



**Εικόνα 3.3:** Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων περισφιγμένου και μη περισφιγμένου σκυροδέματος

➤ Χάλυβας

Για την προσομοίωση του διαμήκους χάλυβα εντός της διατομής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο **Steel01 Material**.

**Εντολή:**

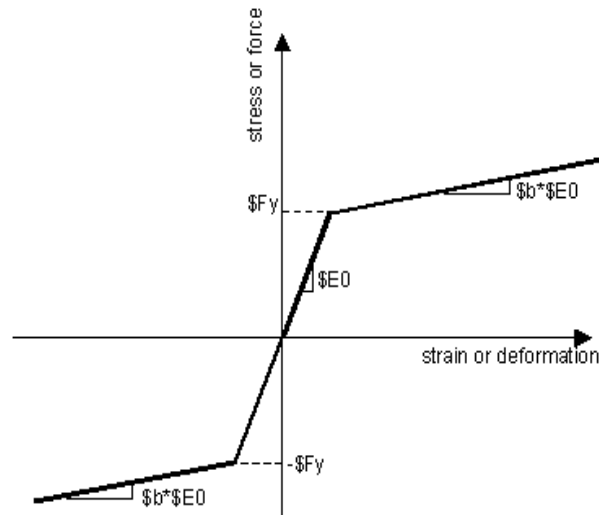
*uniaxialMaterial Steel01 \$matTag \$Fy \$E \$b*

Στη θέση του  $\$matTag$  δίνουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί σε αυτό το υλικό.

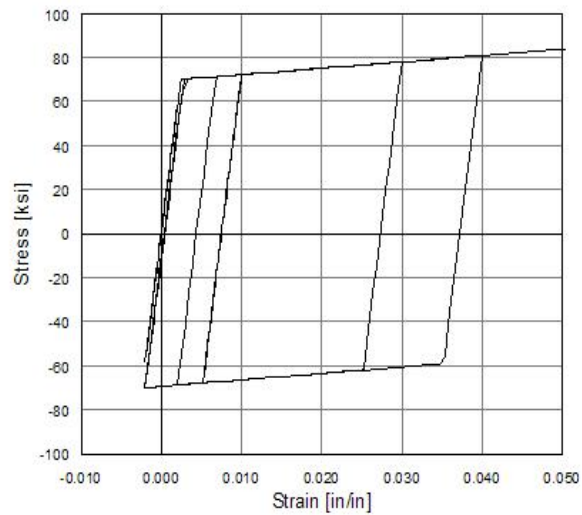
Στη θέση  $\$Fy$  δίνουμε την τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα.

Στη θέση  $\$E$  δίνουμε την τιμή του αρχικού μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα.

Στη θέση  $\$b$  δίνουμε το λόγο του μέτρου ελαστικότητας μετά από τη διαρροή του χάλυβα ως προς το αρχικό μέτρο ελαστικότητας.



**Εικόνα 3.4:** Καταστατικός νόμος τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα



**Εικόνα 3.5:** Υστερητικό μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα με ιστροπική κράτυνση



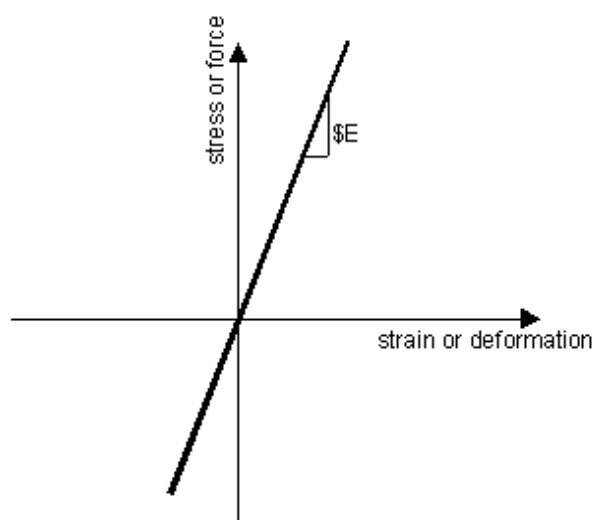
➤ Ελαστικό υλικό

**Εντολή:**

*uniaxialMaterial Elastic \$matTag \$E*

Στη θέση \$matTag δίνουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί σε αυτό το υλικό.

Στη θέση \$E δίνουμε το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.



**Εικόνα 3.6:** Καταστατικός νόμος τάσεων-παραμορφώσεων ελαστικού υλικού

• Διατομές

Στο OpenSees υπάρχουν πολλά είδη διατομής που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Για το συγκεκριμένο φορέα επιλέχθηκε διατομή που ακολουθεί τη θεωρία της κατανεμημένης πλαστικότητας με πολυστρωματική θεώρηση (fibers).

**Εντολή:**

*Section Fiber \$sectionTag {*

*fiber <.....>*

*patch <.....>*

*layer <.....>*

*}*

Στη θέση \$sectionTag δίνουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί σε αυτή τη διατομή.

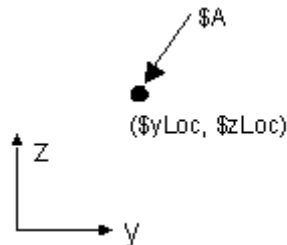
Η εντολή `fiber` μας δίνει τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε μια ράβδο στη διατομή μας (Εικόνα 3.7).

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

Στις θέσεις `$yLoc` και `$xLoc` δίνουμε τις συνταταγμένες που θέλουμε να τοποθετήσουμε τη ράβδο, ως προς το τοπικό σύστημα αξόνων.

Στη θέση `$A` δίνουμε το εμβαδό της διατομής της ράβδου.

Στη θέση `$matTag` δίνουμε τον αριθμό του υλικού που θέλουμε να είναι η ράβδος μας.



**Εικόνα 3.7:** fiber

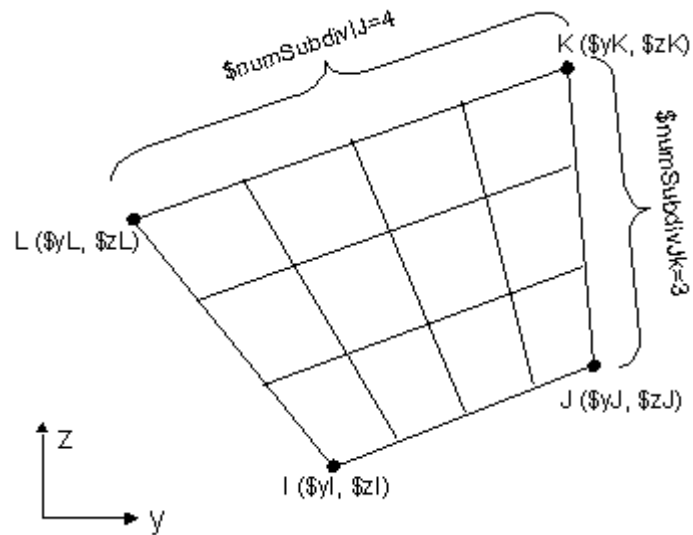
Η εντολή `patch quad/circ` μας δίνει τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε μια ορθογωνική/κυκλική διατομή που να ακολουθεί τη στρωσιγενή θεώρηση (Εικόνα 3.8).

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

Στη θέση `$matTag` δίνουμε τον αριθμό του υλικού που θέλουμε να έχει η διατομή μας.

Στις θέσεις `$numSubdivIJ` και `$numSubdivJK` δίνουμε τον αριθμό των στρώσεων που θέλουμε να έχουμε μεταξύ των σημείων I-J και J-K αντίστοιχα.

Στις θέσεις `$yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL` δίνουμε τις συντεταγμένες των σημείων I J K L ως προς το τοπικό σύστημα της διατομής του στοιχείου. Τα τέσσερα αυτά σημεία είναι οι κορυφές της ορθογωνικής διατομής.



**Εικόνα 3.8:** quadrilateral patch

Η εντολή `layer straight` μας δίνει τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε μια ευθεία σειρά από ράβδους στη διατομή μας (Εικόνα 3.9).

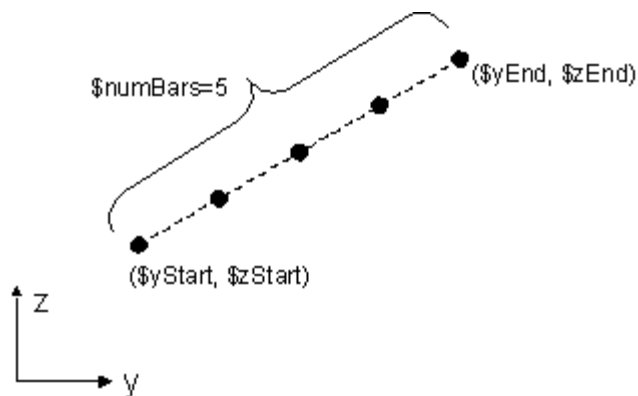
*-layer straight \$matTag \$numBars \$areaBar \$yStart \$zStart \$yEnd \$zEnd*

Στη θέση `$matTag` δίνουμε τον αριθμό του υλικού των ράβδων μας.

Στη θέση `$numBars` δίνουμε τον αριθμό των ράβδων που θέλουμε να τοποθετηθούν στη σειρά.

Στη θέση `$areaBar` δίνουμε το εμβαδόν τη διατομής της κάθε ράβδου μας.

Στις θέσεις `$yStart $zStart $yEnd $zEnd` δίνουμε τις συντεταγμένες της πρώτης και της τελευταίας ράβδου της ευθείας μας.



**Εικόνα 3.9:** layer straight

Στις διατομές που έχουμε φτιάξει μπορούμε να προσθέσουμε την παραλαβή ενός συγκεκριμένου είδους έντασης από ένα υλικό της επιλογής μας.

**Εντολή:**

*section Aggregator \$secTag \$matTag1 \$string1... <-section \$sectionTag>*

Στη θέση *\$secTag* δίνουμε τον αριθμό της νέας διατομής που δημιουργείται μετά την προσθήκη παραλαβής ενός εντατικού μεγέθους.

Στη θέση *\$matTag* δίνουμε τον αριθμό του υλικού από το οποίο θα παραλάβουμε το εντατικό μέγεθος.

Στη θέση *\$string* δίνουμε το είδος του εντατικού μεγέθους που θέλουμε να προσθέσουμε.

Στη θέση *\$sectionTag* δίνουμε τον αριθμό της διατομής στην οποία θέλουμε να δώσουμε τη νέα ιδιότητα.

Στις διατομές των υποστυλωμάτων μας στο συγκεκριμένο φορέα έχουμε προσθέσει στρέψη (T).

- Στοιχεία Δοκού-Υποστυλώματος

Για την προσομοίωση των δοκών και των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού-υποστυλώματος καταμεμημένης πλαστικότητας, τα οποία βασίζονται στη μέθοδο των δυνάμεων (Force Based Beam-Column Elements). Τα στοιχεία αυτά εξασφαλίζουν απόλυτη ισορροπία μεταξύ των εσωτερικών εντατικών μεγεθών και των εξωτερικών δράσεων, διότι στην περίπτωση τους οι συναρτήσεις συναρμογής που χρησιμοποιούνται βασίζονται στις εσωτερικές δυνάμεις και όχι στις εσωτερικές παραμορφώσεις. Επίσης με τη μέθοδο των δυνάμεων επιτυγχάνεται γρηγορότερη σύγκλιση.

Για να ορίσουμε ένα στοιχείο πρέπει να μεταφέρουμε τις πληροφορίες του στοιχείου από το τοπικό σύστημα αξόνων στο καθολικό.

### **Εντολή:**

```
geomTransf Linear $transfTag $vecxzX $vecxzY $vecxzZ
geomTransf P-Delta $transfTag $vecxzX $vecxzY $vecxzZ
```

Στη θέση  $\$transfTag$  δίνουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί σε αυτή τη μετατροπή.

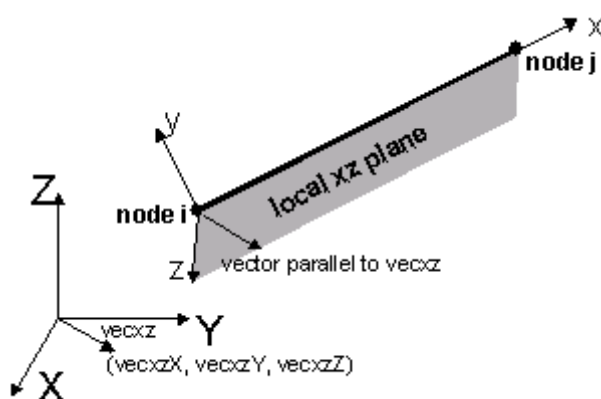
Στις θέσεις  $\$vecxzX$   $\$vecxzY$   $\$vecxzZ$  δίνουμε τις συνιστώσες ενός μοναδιαίου διανύσματος.

Πιο αναλυτικά:

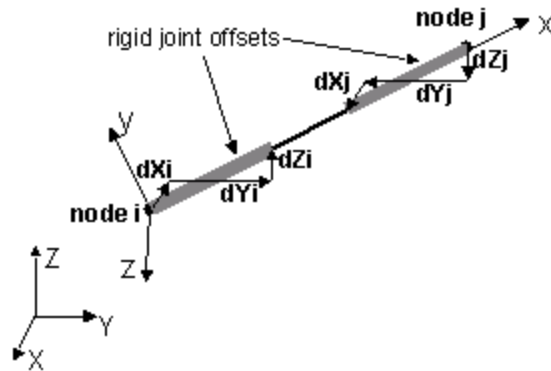
Στο τοπικό σύστημα αξόνων ο X είναι ο άξονας που τρέχει μέσα στο στοιχείο ενώ οι άξονες Y και Z βρίσκονται πάνω στο επίπεδο της διατομής.

Στο καθολικό σύστημα αξόνων (στο συγκεκριμένο φορέα) ο X και ο Y άξονας βρίσκονται στο επίπεδο της κάτοψης του φορέα ενώ ο Z είναι κάθετος σε αυτούς.

Παρατηρούμε, ο άξονας Z του τοπικού συστήματος αξόνων του στοιχείου με ποιον άξονα του καθολικού συστήματος συμπίπτει και δίνουμε στο διάνυσμα αυτού του άξονα την τιμή 1. Στα υπόλοιπα διανύσματα δίνουμε την τιμή 0.



**Εικόνα 3.10:** Διάνυσμα στο τοπικό επίπεδο x-z



**Εικόνα 3.11:** Διάγραμμα στο τοπικό σύστημα του στοιχείου

### **Εντολή:**

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

Στη θέση  $\$eleTag$  δίνουμε τον αριθμό του στοιχείου.

Στις θέσεις  $\$iNode$   $\$jNode$  δίνουμε τους αριθμούς των κόμβων στους οποίους συνδέεται το στοιχείο.

Στη θέση  $\$numIntgrPts$  δίνουμε τον αριθμό των σημείων που θέλουμε κατά μήκος της διατομής να γίνει η σύγκλιση της μεθόδου.

Στη θέση  $\$secTag$  δίνουμε τον αριθμό της διατομής που θέλουμε να έχει το στοιχείο μας.

Στη θέση  $\$transfTag$  δίνουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί στην εντολή μεταφοράς από το τοπικό στο καθολικό σύστημα αξόνων.

### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι αναλύσεις του φορέα επιτυγχάνονται με τα εξής βήματα:

- **Constraint Handler:** ορισμός μεθόδου σχηματισμού των εξισώσεων κόμβων.
  - Plain constraints
  - Penalty Method
  - Lagrange Multipliers
  - Transformation Method

Οι βαθμοί ελευθερίας μπορούν να αναλυθούν σε μη συμπυκνωμένους  $U_R$  και σε συμπυκνωμένους  $U_C$

$$U = \begin{pmatrix} U_R \\ U_C \end{pmatrix}$$

- **DOF Numberer:** αρίθμηση των βαθμών ελευθερίας στα σχηματιζόμενα μητρώα με μια από τις μεθόδους:
  - Plain
  - RCM
- **SystemOfEqn/Solver:** μέθοδος διαχείρισης του συστήματος εξισώσεων με μία από τις μεθόδους:
  - system ProfileSPD
  - system BandSPD
  - system SparseSPD
  - system BandGeneral
  - system SparseGeneral
  - system Umfpack
- **Test Command:** έλεγχος σύγκλισης επαναληπτικής μεθόδου επίλυσης

Ο έλεγχος εφαρμόζεται με την εξίσωση  $K\Delta U=R$  και πρέπει να ικανοποιεί μια από τις ακόλουθες εξισώσεις (check) :

- Norm Unbalance  $\sqrt{(R^{\wedge}R)} < tol$
- Norm Displacement Increment  $\sqrt{\Delta U^T \Delta U} < tol$
- Energy Increment  $\frac{1}{2}(\Delta U^T R) < tol$

**Εντολή:**

*Test \$check \$tol \$maxNumIter*

Στη θέση \$tol δίνουμε την ανοχή σύγκλισης

Στη θέση \$maxNumIter δίνουμε τον μέγιστο αριθμό των βημάτων μέχρι τη σύγκλιση

- Solution Algorithm: επιλογή αλγορίθμου για την επίλυση

Ανάλογα με το είδος του αλγόριθμου που επιλέγουμε καθορίζεται και η ακολουθία των βημάτων για την επίλυση της μη-γραμμικής εξίσωσης.

- Linear Algorithm
- Newton Algorithm
- Newton with Line Search Algorithm
- Modified Newton Algorithm
- Modified Newton Algorithm
- Krylov-Newton Method
- BFGS Algorithm
- Broyden Algorithm

Οι μη-γραμμικές αναλύσεις χωρίζονται σε:

- Στατικές αναλύσεις  $R(U, I) = \lambda P^* - F_R(U)$
- Δυναμικές αναλύσεις  $R(U, \dot{U}, \ddot{U}) = P(t) - F_1(\ddot{U}) - F_R(U, \dot{U})$

- Integrator: επιβολή φόρτισης με έλεγχο φορτίου

Για στατική ανάλυση:

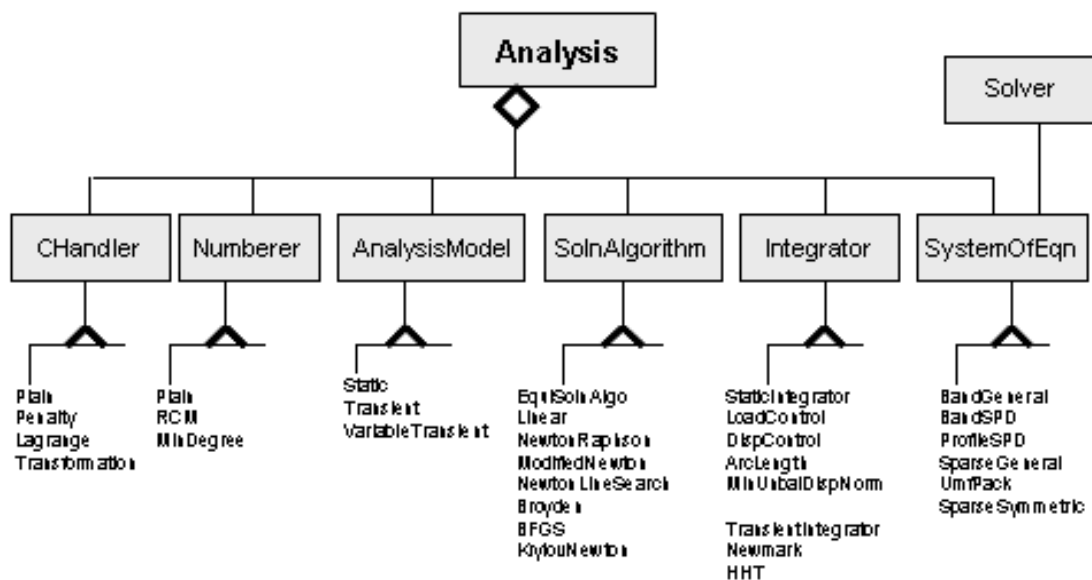
- Load Control  $\lambda_n = \lambda_{n-1} + d\lambda$
- Displacement Control  $U_j^n = U_j^{n-1} + dU_j$
- MinUnbalDispNorm  $d/d\lambda (dU_n^T D U_n) = 0$
- ArcLength  $dU_n^T dU_n + \alpha^2 d\lambda_n = ds^2$

Για δυναμική ανάλυση:

- Newmark Method
- Hilbert-Hughes-Taylor Method



- Analysis Model: εκτέλεση της ανάλυσης
  - Static Analysis
  - Transient Analysis
  - Variable Transient Analysis
- Analyze Command: επικαλείται από την εντολή *Analysis* και προσδιορίζει τον αριθμό βημάτων στον οποίο θα γίνει η ανάλυση.



**Εικόνα 3.12:** Απεικόνιση των στοιχείων που συνθέτουν την ανάλυση του προσομοιώματος στο OpenSees

### 3.4 ΕΚΔΟΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταγράφονται με την εντολή *Recorder*. Ανάλογα με την πληροφορία που θέλουμε να καταγράψουμε έχουμε τα εξής είδη recorder:

- Node Recorder
- Node Envelope Recorder
- Drift Recorder
- Element Recorder
- ElementEnvelopeRecorder
- Plot Recorder

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το *node recorder* για καταγραφή της μετατόπισης κόμβων ( $\delta$ ) και της τέμνουσας βάσης ( $V$ ), και το *drift recorder* για να καταγραφεί το πηλίκο της διαφορικής μετατόπισης δύο κόμβων ως προς τη μεταξύ τους απόσταση. Πιο συγκεκριμένα:

**Εντολή:**

```
recorder Node -file $fileName -time -node $node1... -dof $respType  
recorder Drift -file $fileName -time -iNode $inode1... -jNode $jnode1... -dof $dof1... -perpDirn  
$perpDirn1...
```

Στη θέση *\$fileName* δίνουμε ένα όνομα στο αρχείο μας.

Στη θέση *\$node1...* δίνουμε τον αριθμό του κόμβου για τον οποίο θέλουμε τις πληροφορίες.

Στις θέσεις *\$inode1* και *\$jnode1* δίνουμε τον πρώτο και τον δεύτερο αριθμό του ζεύγους κόμβων για τους οποίους ψάχνουμε το πηλίκο.

Στη θέση *\$dof* δίνουμε τον βαθμό ελευθερίας του κόμβου στον οποίο θέλουμε να γίνει καταγραφή.

Στη θέση *\$perpDirn1* δίνουμε την διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση που θέλουμε να καταγραφεί η απόκριση.

Στη θέση *\$respType* δίνουμε το είδος της απόκρισης που θέλουμε να καταγραφεί. Τα είδη απόκρισης είναι τα εξής:

- Disp = μετατόπιση
- Vel = ταχύτητα
- Accel = επιτάχυνση
- Reaction = αντίδραση
- Eigen  $i$  = ιδιοδιάνυσμα για την  $i$  ιδιόμορφη

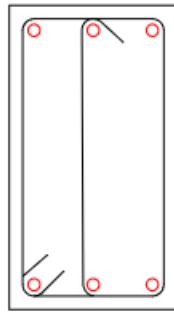
## 4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση δύο φορέων, οι οποίοι προσομοιώθηκαν με το πρόγραμμα OpenSees με ραβδωτά μη γραμμικά στοιχεία στα οποία ισχύει η κατανεμημένη πλαστικότητα με πολυστρωματική θεώρηση. Στους φορείς αυτούς εφαρμόστηκαν η μέθοδος των συντελεστών και η μέθοδος εξαγωγής των καμπυλών τρωτότητας.

### 4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ Α

Ο υπό μελέτη φορέας αποτελείται από πέντε (5) ορόφους με συνολικό ύψος δεκαπέντε μέτρα (15 m). Κάθε όροφος έχει τυπικό ύψος τρία μέτρα (3 m) και το πάχος πλάκας σε όλους τους ορόφους είναι ενιαίο, ίσο με δεκαοχτώ εκατοστά (18 cm). Όλοι οι όροφοι έχουν την ίδια κάτοψη η οποία δεν παρουσιάζει συμμετρία ούτε κατά Χ ούτε κατά Υ. Οι αναλύσεις έγιναν κατά την δυσμενέστερη διεύθυνση, την Χ. Παρακάτω παρουσιάζεται η χαρακτηριστική κάτοψη του πρώτου (1<sup>ου</sup>) ορόφου του φορέα, με τους κόμβους (κόκκινοι σταυροί), τις δοκούς και τα υποστυλώματα όπως εισήχθησαν στο OpenSees (Εικόνα 4.3). Ο κόμβος με αριθμό 30001 βρίσκεται στο κέντρο βάρους του ορόφου και σύμφωνα με αυτόν κινούνται διαφραγματικά όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Οι δοκοί έχουν διαστάσεις 25x60 cm και οπλισμό 6Φ12 διαμήκη και 8Φ10 εγκάρσιο (Εικόνα 4.1). Τα υποστυλώματα έχουν διατομή 55x25 cm και οπλισμό 4Φ18 και 4Φ14 διαμήκη και Φ8/10 εγκάρσιο (Εικόνα 4.2).

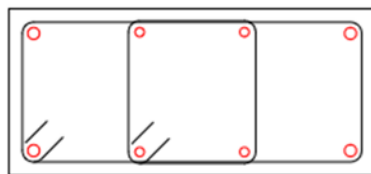


(25/60)

3φ12+3φ12

φ8/10

**Εικόνα 4.1:** Διατομή δοκού



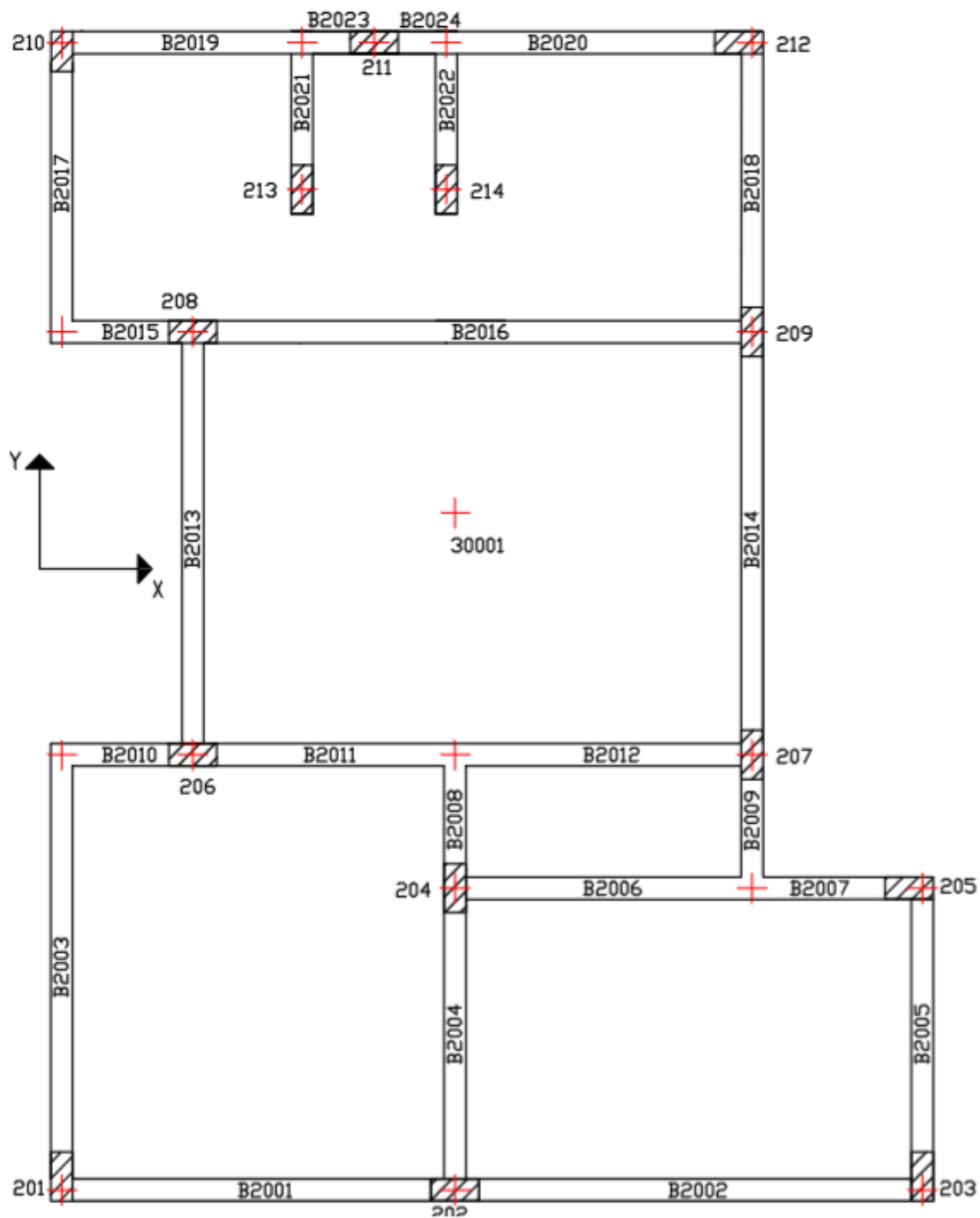
(55/25)

4φ18+4φ14

φ8/10

φ12/10  $L_{κρ}=0.60$

**Εικόνα 4.2:** Διατομή υποστυλώματος



**Εικόνα 4.3:** Κάτοψη κτιρίου A

## 4.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΑ

### 4.2.1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ο φορέας αποτελείται εξ' ολοκλήρου από οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 και μέτρου ελαστικότητας  $E_{cm}=30.5\text{GPa}$ .

### 4.2.1.2 ΧΑΛΥΒΑΣ

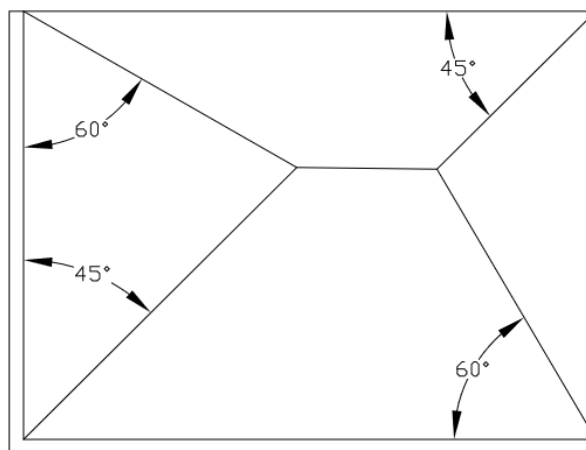
Ο διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός έχει χαρακτηριστική αντοχή 500MPa (B500c) και μέτρο ελαστικότητας  $E=200\text{GPa}$ .

## 4.2.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΦΟΡΤΙΑ

- Ίδιο βάρος ωπλισμένου σκυροδέματος:  $25 \text{ kN/m}^3$
- Ίδιο βάρος πλάκας ( $h_{\text{πλάκας}} = 0.18 \text{ m}$ ):  $4.5 \text{ kN/m}^2$
- Πρόσθετο μόνιμο φορτίο:  $1.2 \text{ kN/m}^2$
- Κινητό φορτίο:  $2 \text{ kN/m}^2$

Σε κάθε πλάκα του φορέα εφαρμόζονται τα μόνιμα (G) και κινητά (Q) φορτία της, τα οποία συνδυάζονται σύμφωνα με τη σχέση  $G+\psi_2*Q$ . Η τιμή του συντελεστή  $\psi_2$  για την οιονεί μόνιμη τιμή των κινητών φορτίων λαμβάνεται ίση με  $\psi_2 = 0.3$ .

Η μεταφορά του συνολικού φορτίου του ως άνω συνδυασμού από τις πλάκες στις δοκούς, γίνεται μέσω των επιφανειών επιρροής.



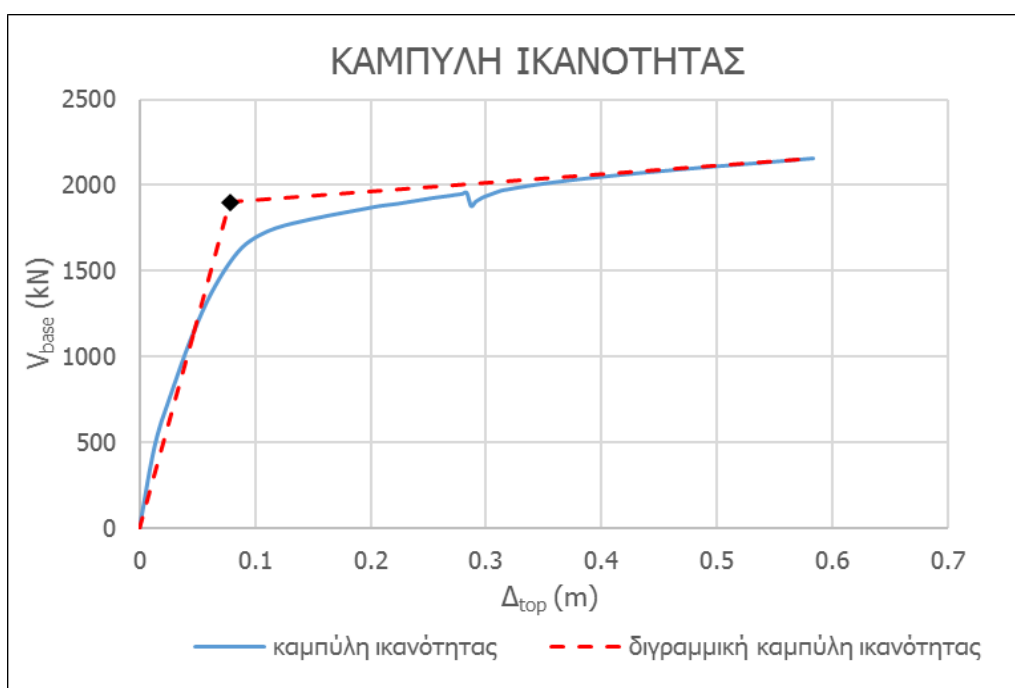
**Εικόνα 4.4: Κατανομή του φορτίου τετραέρειστων πλακών**

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.4, όταν σε μια γωνία συναντώνται δύο πλευρές ομοειδούς στήριξης, η γωνία μερισμού είναι  $45^\circ$ . Ενώ αν συναντώνται μια πλευρά πλήρως πακτωμένη με μία ελεύθερα εδραζόμενη πλευρά, η γωνία μερισμού προς την πλευρά της πάκτωσης είναι  $60^\circ$ .

Οι δοκοί φορτίζονται με το ίδιο βάρος τους, καθώς και με τα φορτία πλακών που μεταφέρονται σε αυτές με βάση την παραπάνω διαδικασία.

### 4.2.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Μετά από την πραγματοποίηση της ιδιομορφικής και στατικής ανάλυσης για τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας και τα οριζόντια φορτία του φορέα, με τη βοήθεια του Opensees, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για την σχεδίαση της καμπύλης ικανότητας. Η καμπύλη ικανότητας, όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.6, είναι η γραφική παράσταση που συνδέει την μετατόπιση κορυφής ( $\Delta_{top}$ ) με την τέμνουσα βάσης ( $V_{base}$ ).



Το σημείο διαρροής στη διγραμμική καμπύλη ορίζεται έτσι ώστε τα εμβαδά των χωρίων των δύο καμπυλών να είναι περίπου ίσα και η διγραμμική καμπύλη να τέμνει την καμπύλη ικανότητας στο σημείο που αντιστοιχεί σε  $0.6 \cdot V_y$ . Από την διγραμμικοποίηση προκύπτει  $V_y=1900$  kN και  $\delta_y=0.078$  m.

Στη παρούσα διπλωματική για την μέθοδο των συντελεστών επιλέχθηκαν οι συντελεστές:

$$C_0 = 1.3 \quad C_1 = 1.0 \quad C_2 = 1.0 \quad C_3 = 1.0$$

Για το ελαστικό φάσμα επιλέχθηκαν:

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας  $a_{gR}=0.16 g$

Κατηγορία σπουδαιότητας II  $\gamma_i=1.0$

Κατηγορία εδάφους B:  $T_B=0.15 s$   $T_C=0.5 s$   $T_D=2.5 s$   $S=1.2$

Η ιδιοπερίοδος της πρώτης ιδιομορφής (θεμελιώδης) προέκυψε από την ιδιομορφική ανάλυση  $T_1=0.65 s$ . Με τη μέθοδο των συντελεστών, η οποία αναλύεται στο κεφάλαιο 2.8, προκύπτει ελαστική ιδιοπερίοδος  $T_e=0.79 s$  και από το ελαστικό φάσμα κατά ΕΚ.Ω.Σ 8, το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 2.2, προκύπτει ελαστική επιτάχυνση  $S_e=3.03 m/s^2$ .

Τέλος, προκύπτει σχετική μετατόπιση  $\Delta_t=0.063 m$ .

#### 4.2.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (Drift)

Αρχικά ορίστηκαν τα όρια των τιμών του max interstorey drift  $\theta$  που αντιστοιχούν σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

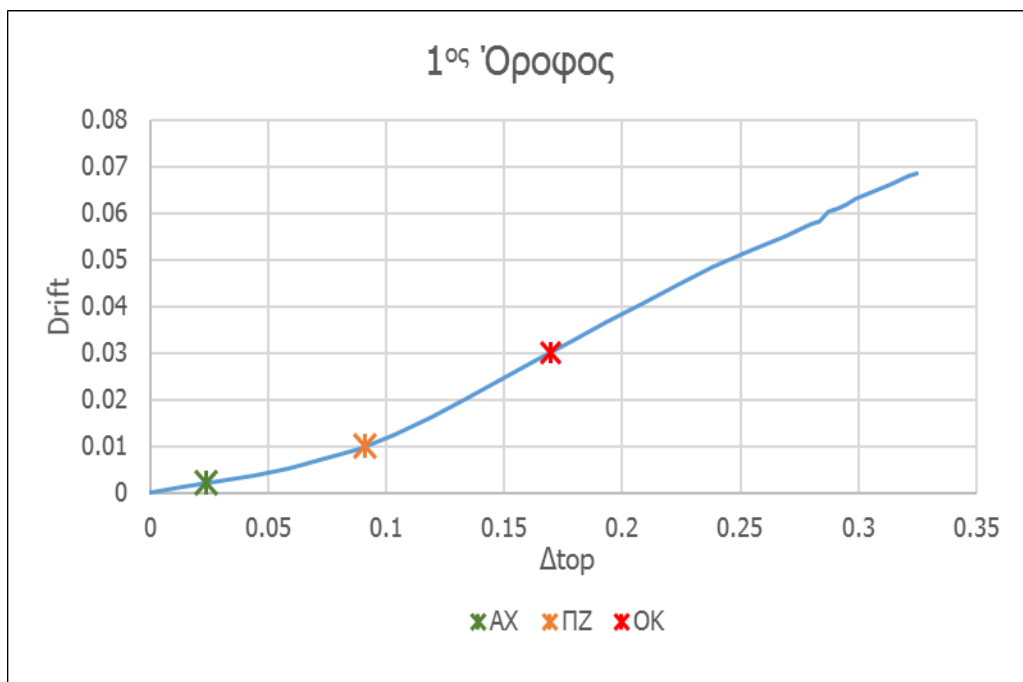
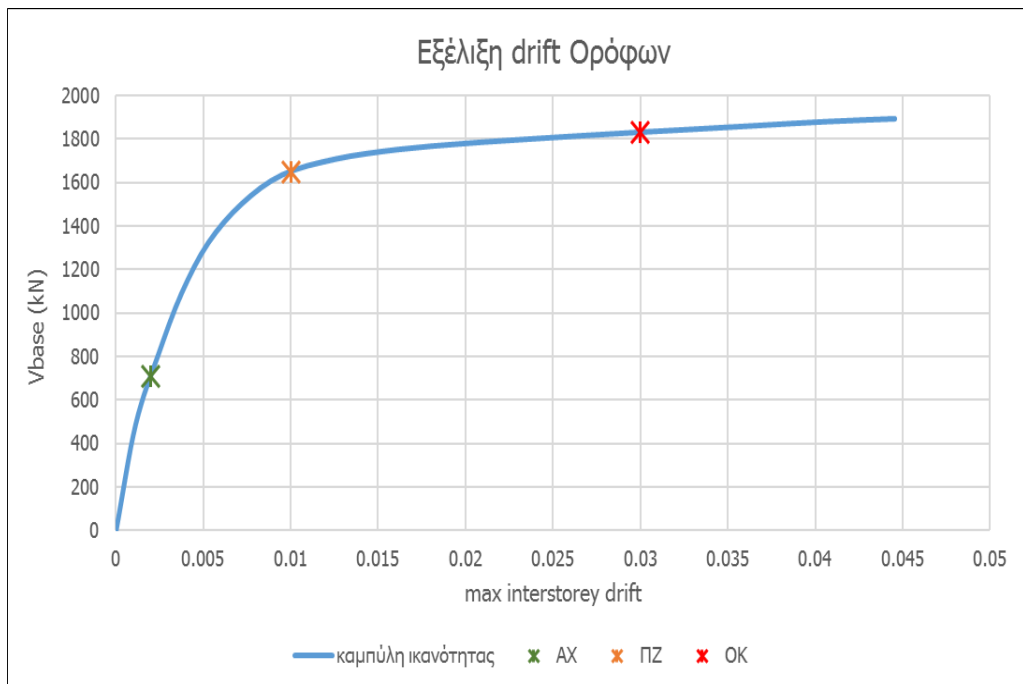
Άμεση Χρήση	$0.002 \leq \theta \leq 0.004$
Προστασία Ζωής	$0.010 \leq \theta \leq 0.018$
Οιονεί Κατάρρευση	$0.030 \leq \theta$

Από τα παραπάνω όρια επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη κατασκευή οι μικρότερες τιμές κάθε διαστήματος δηλαδή 0.002 , 0.010 , 0.03 για τις στάθμες Άμεση Χρήση, Προστασία Ζωής και Οιονεί Κατάρρευση αντίστοιχα.

Υπολογίζοντας για κάθε όροφο και για κάθε βήμα της Pushover το λόγο της διαφορικής μετατόπισης των δύο άκρων ενός τυπικού υποστυλώματος προς το ύψος του για κάθε όροφο (interstorey drift) και κατά συνέπεια την μέγιστη σχετική μετατόπιση ανά βήμα και έχοντας ως δεδομένη τη μέγιστη σχετική στροφή για κάθε επίπεδο βλάβης ( $\theta_{max}$ ) μπορούμε να εντοπίσουμε την μετατόπιση κορυφής  $\delta_{top}$  που αντιστοιχεί σε αυτή τη στροφή και στη συνέχεια την φασματική επιτάχυνση  $S_e$  που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο  $T_e$  για κάθε στάθμη.

<b>Drift</b>	<b><math>\Delta_{top}</math></b>	<b>V</b>	<b><math>S_e</math></b>
0.002	0.023774	707.5143	1.152289
0.01	0.090965	1649.297	4.408989
0.03	0.169424	1833.442	8.211787





#### 4.2.5 ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

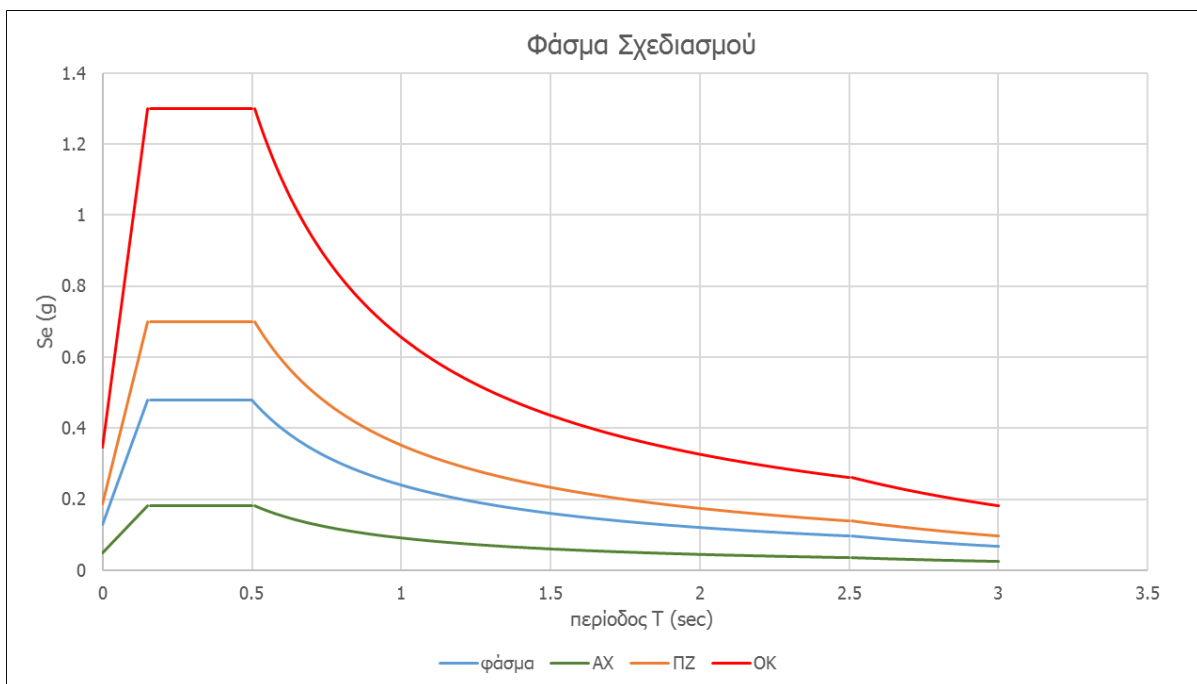
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού με τα χαρακτηριστικά:

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας  $a_{gR}=0.16 \text{ g}$

Κατηγορία σπουδαιότητας II  $\gamma_i=1.0$

Κατηγορία εδάφους B:  $T_B=0.15 \text{ s}$   $T_C=0.5 \text{ s}$   $T_D=2.5 \text{ s}$   $S=1.2$

και τα κλιμακούμενα φάσματα για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας: Άμεση Χρήση, Προστασία Ζωής και Οιονεί Κατάρρευση σύμφωνα με το λόγο  $S_{e,ΣΕ}/S_e$ .



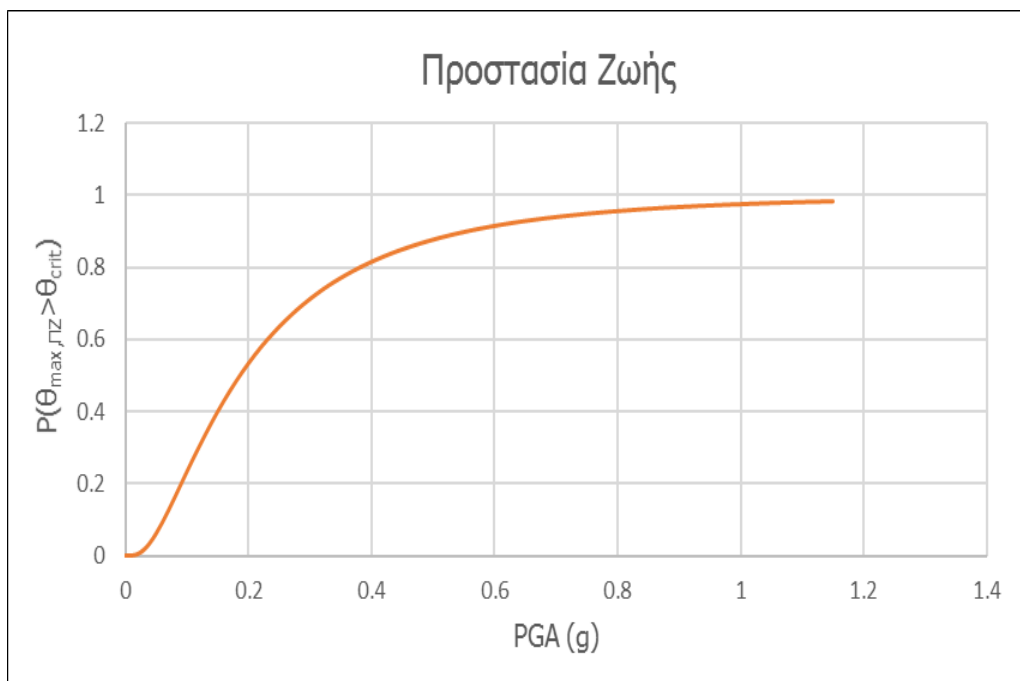
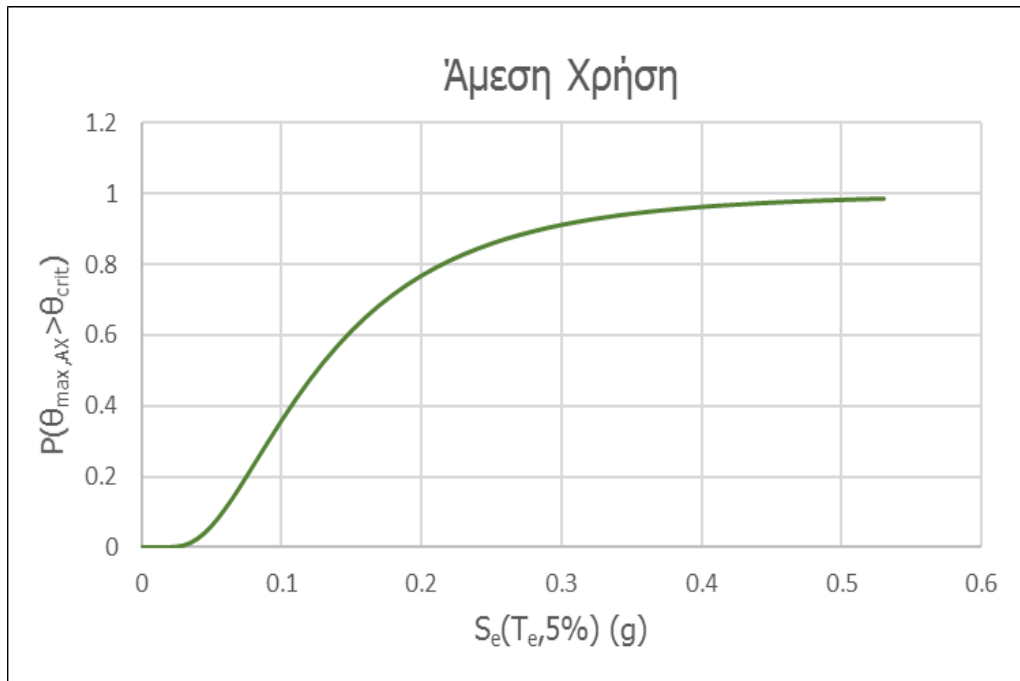
η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης (PGA) βρίσκεται από την πρώτη τιμή της φασματικής επιτάχυνσης για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

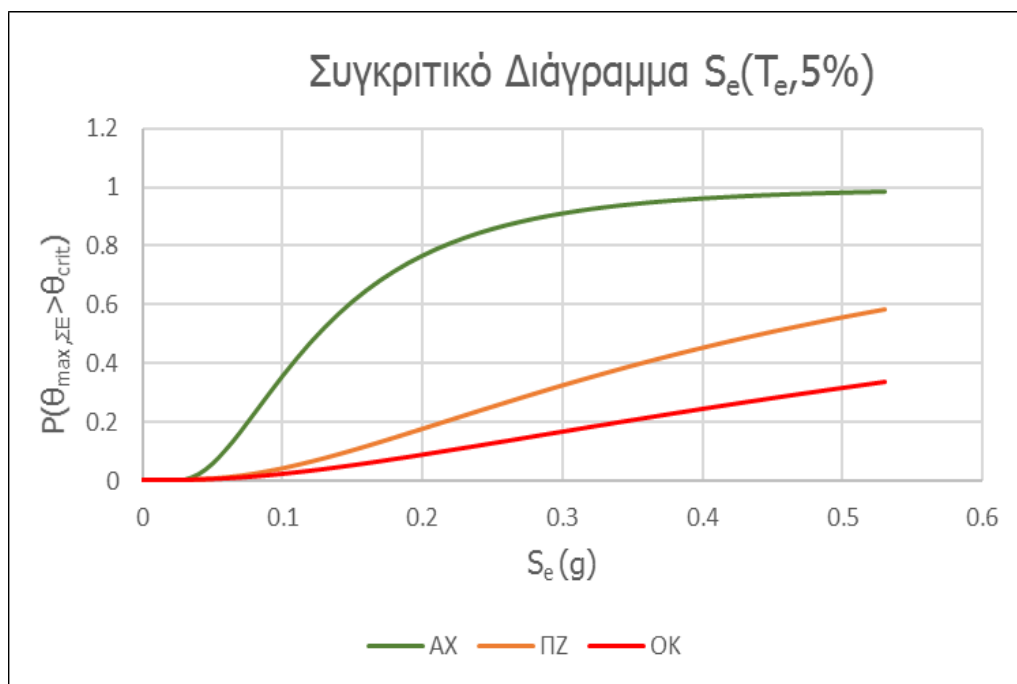
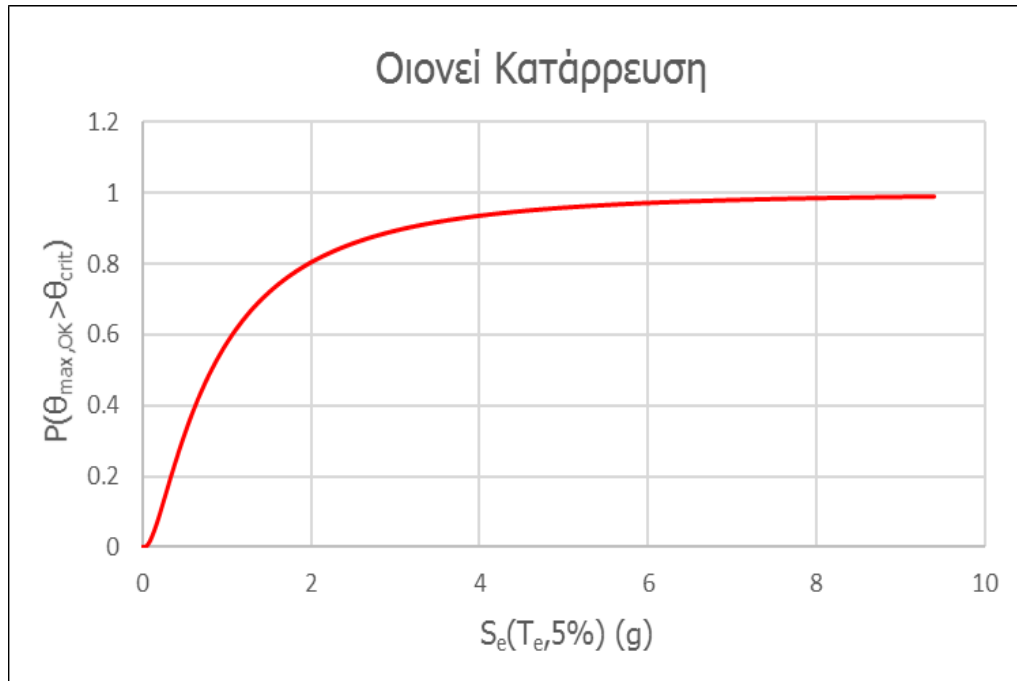
Στην προκειμένη περίπτωση:

Στάθμη επιτελεστικότητας	PGA ( $\text{m/s}^2$ )
Άμεση Χρήση	0.39
Προστασία Ζωής	1.53
Οιονεί Κατάρρευση	2.85

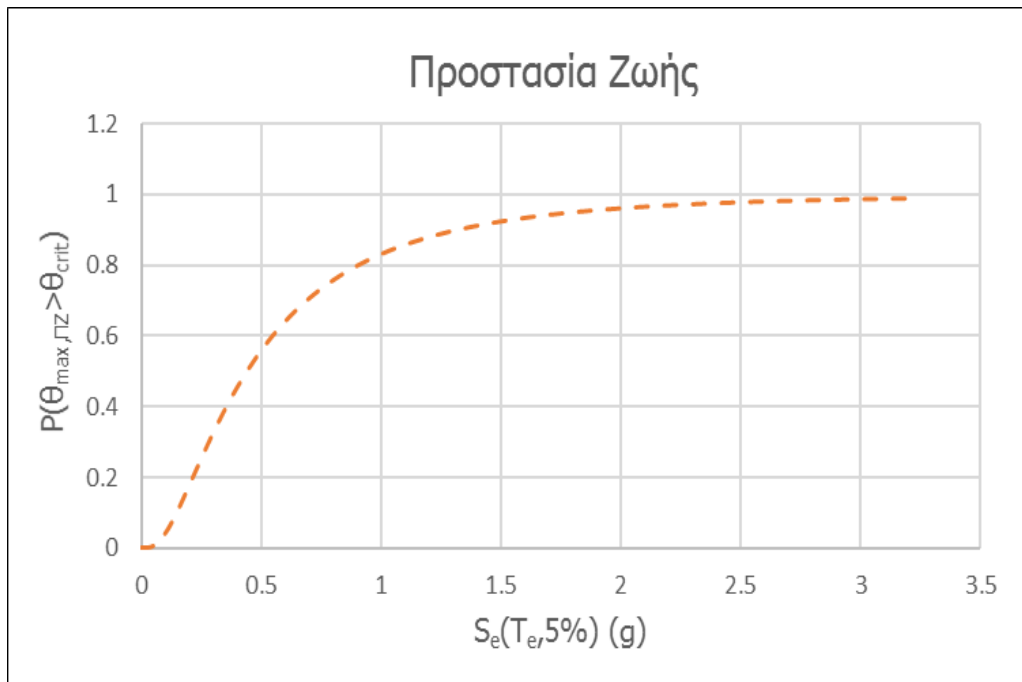
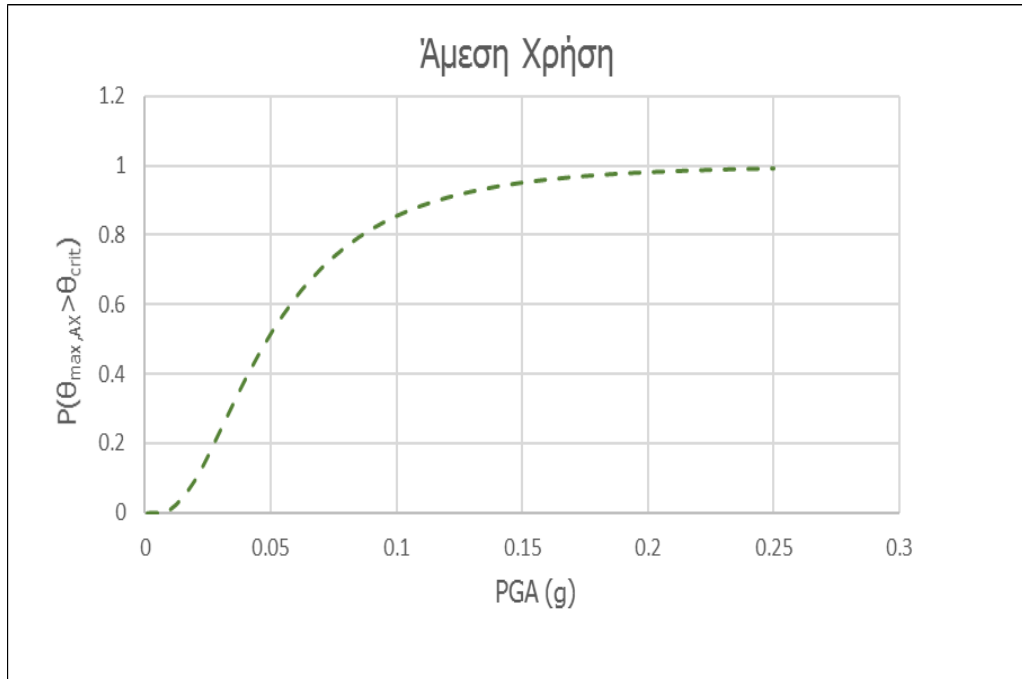
## 4.2.6 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

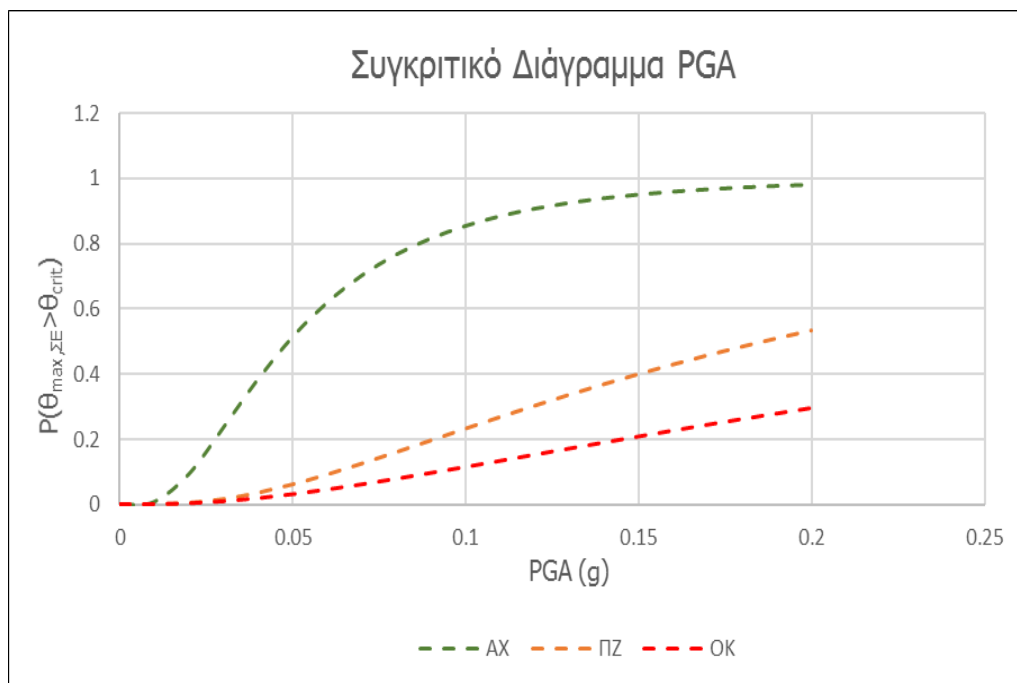
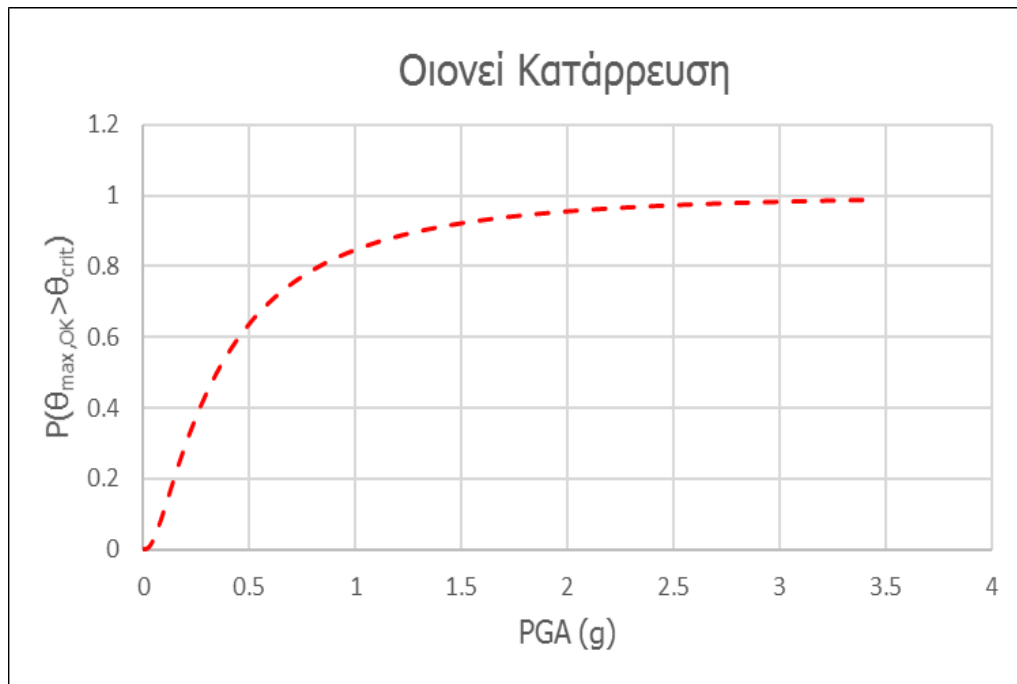
### 4.2.6.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ $S_e(T_e, 5\%)$





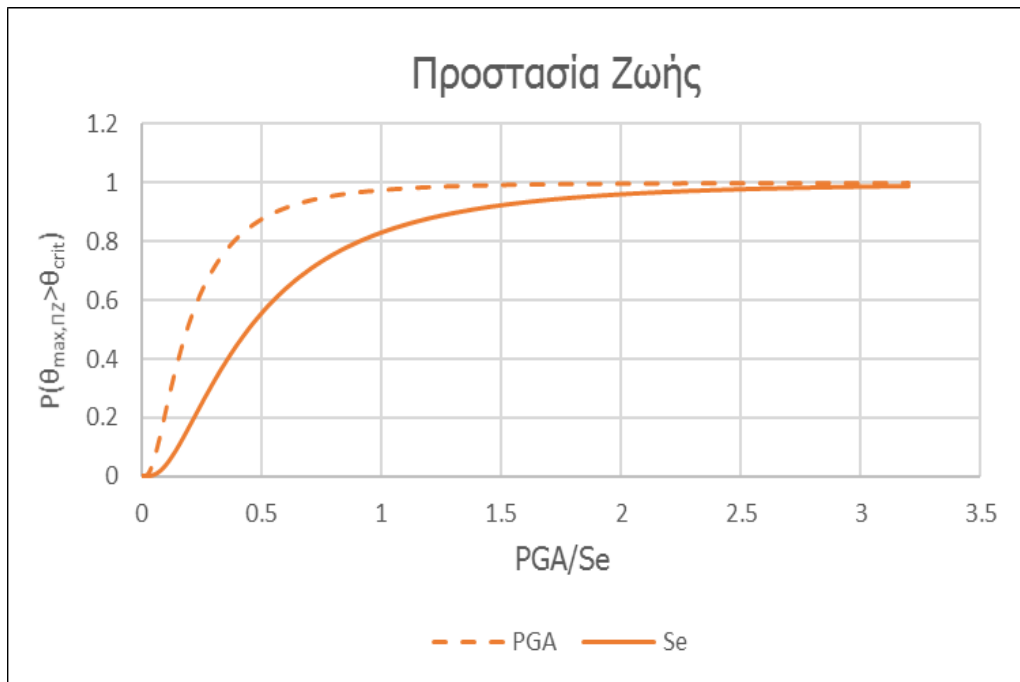
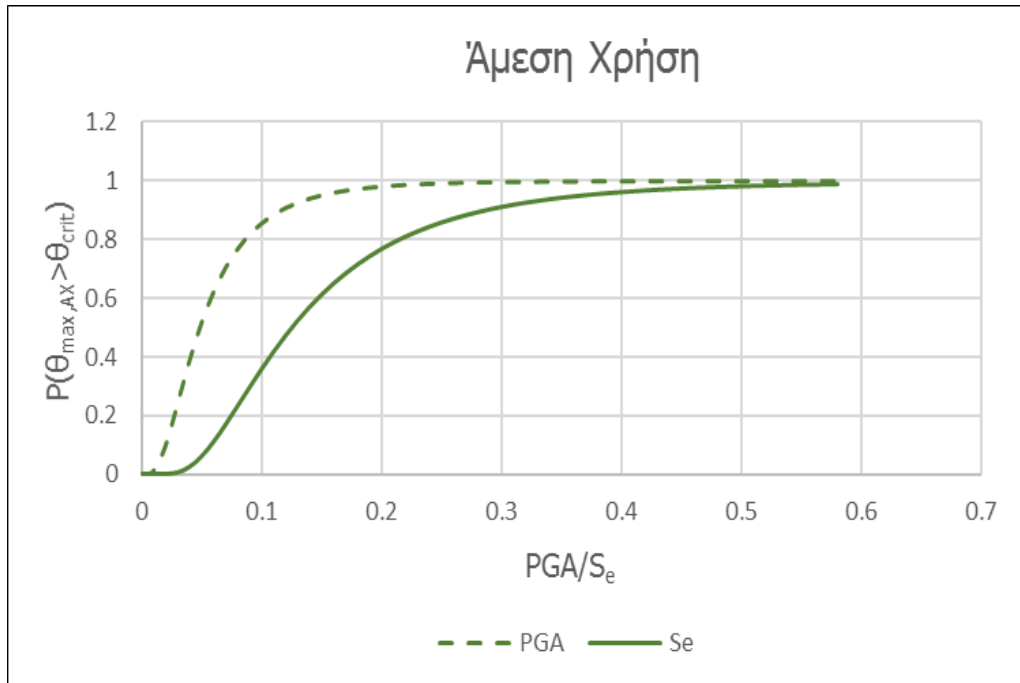
## 4.2.6.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ (PGA)

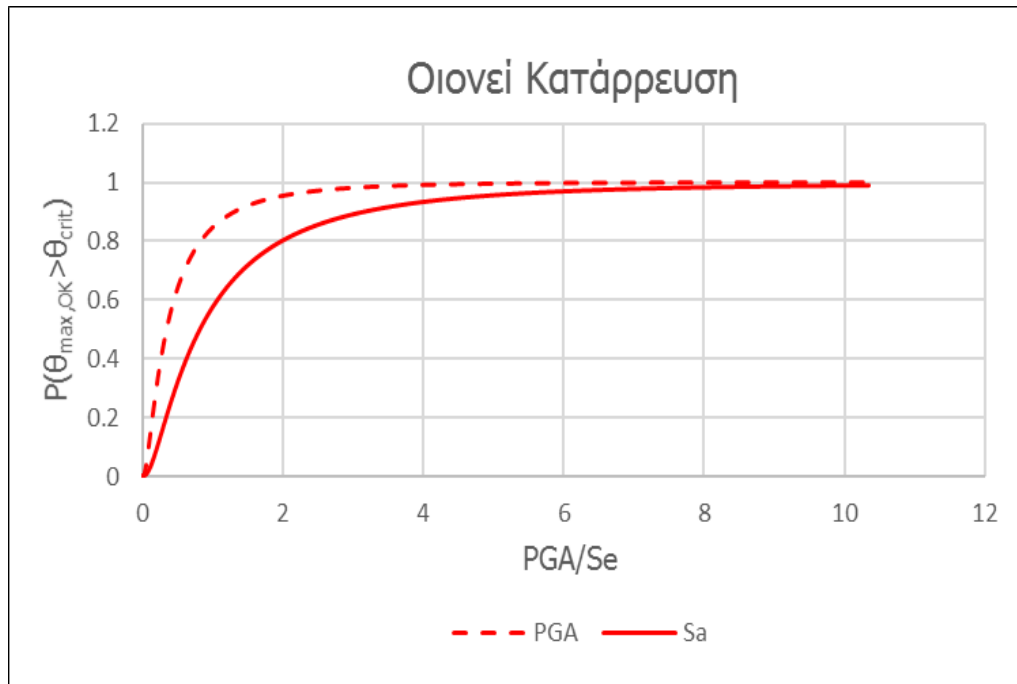




Όπως ήταν αναμενόμενο και φαίνεται και από το τελευταίο διάγραμμα, όσο η στάθμη επιτελεσματικότητας γίνεται δυσμενέστερη τόσο μικραίνει η πιθανότητα υπέρβασης του  $\theta_{\max,\Sigma E}$ .

## 4.2.6.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ PGA-Se



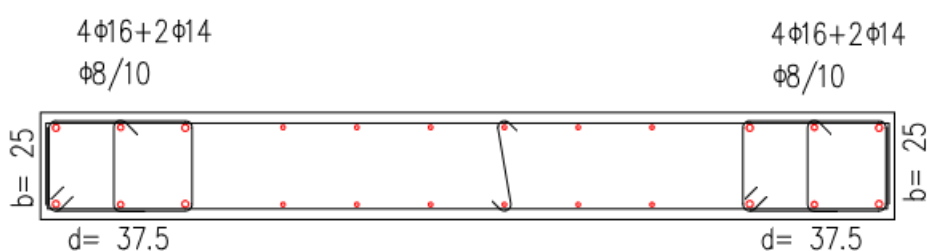


Παρατηρούμε ότι η καμπύλη τρωτότητας ως προς τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης (PGA) είναι δυσμενέστερη από αυτή ως προς τη φασματική επιτάχυνση ( $S_e$ ), δηλαδή για την ίδια τιμή σεισμικής έντασης έχουμε μεγαλύτερη πιθανότητα να πραγματοποιηθούν σοβαρές ζημιές στην κατασκευή μας.



### 4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ Β

Το κτίριο Β (Εικόνα 4.7) έχει όλα τα χαρακτηριστικά υλικών και διατομών δοκών και υποστυλωμάτων όπως και το κτίριο Α που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.2. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.3 αντικαταστήσαμε τα υποστυλώματα 203 και 204 με ένα τοίχιο ( $W_2$ ) διατομής 365x25 cm όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6. Τα υποστυλώματα 206, 208, 211, 213 και 214 αντικαταστάθηκαν το καθένα από ένα τοίχιο ( $W_1$ ) διατομής διατομής 200x25 cm όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5.



$$\frac{(200/25)}{}$$

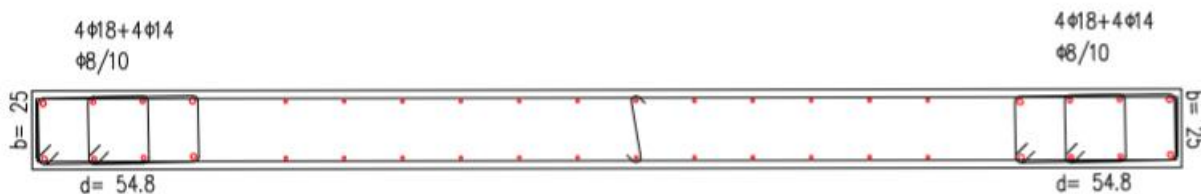
$$K: 2\Phi 10/20 \quad O: 2\Phi 10/20$$

$$A: 4\Phi 16 + 2\Phi 14$$

$$\Delta: 4\Phi 16 + 2\Phi 14$$

$$\Sigma: \Phi 8/10$$

**Εικόνα 4.5:** Διατομή τοιχίου  $W_1$



$$\frac{(365/25)}{}$$

$$K: 2\Phi 10/20 \quad O: 2\Phi 10/20$$

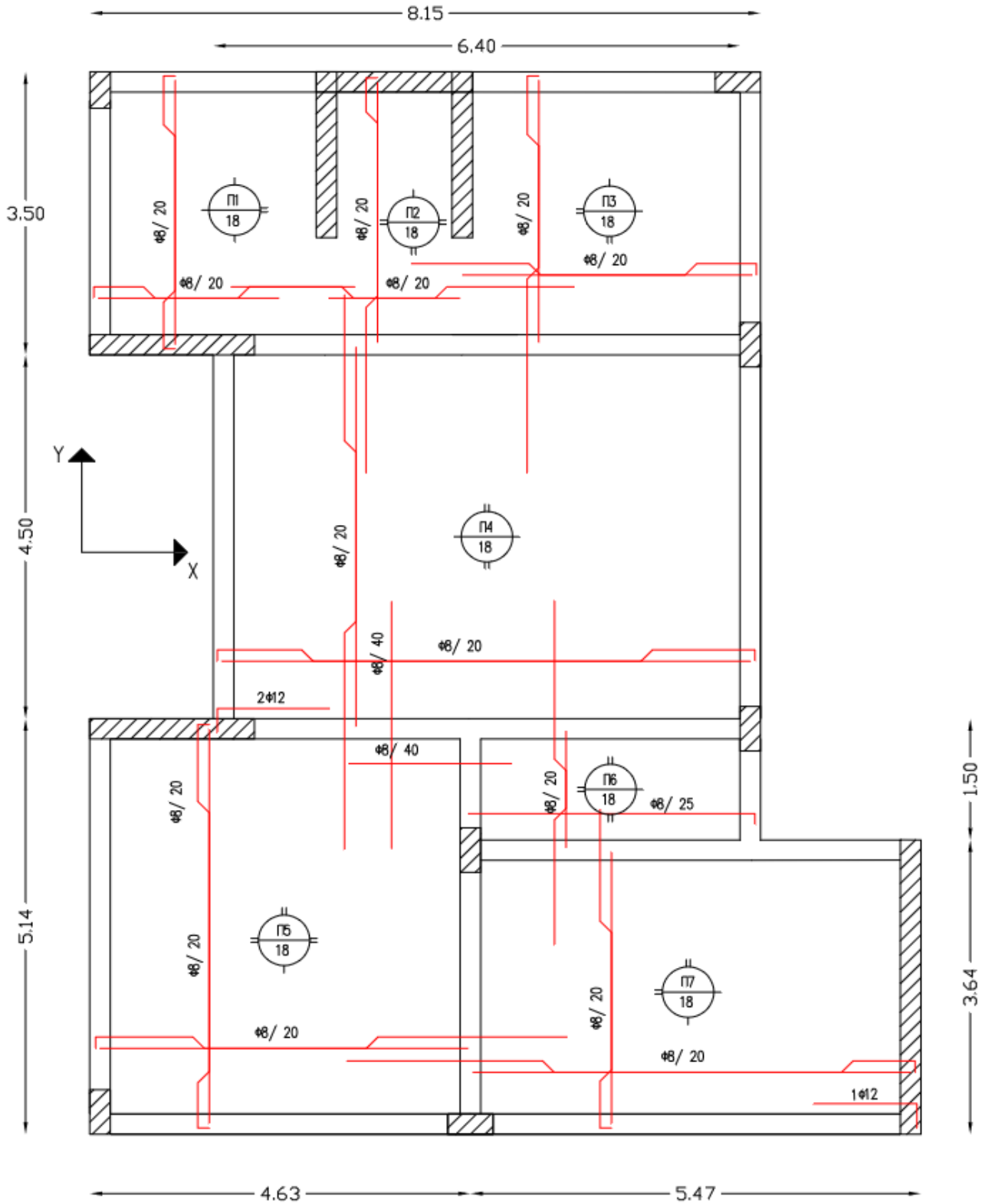
$$A: 4\Phi 18 + 4\Phi 14$$

$$\Delta: 4\Phi 18 + 4\Phi 14$$

$$\Sigma: \Phi 8/10$$

**Εικόνα 4.6:** Διατομή τοιχίου  $W_2$

Ακολουθεί η τελική χαρακτηριστική κάτοψη του 1<sup>ου</sup> ορόφου με τις διαστάσεις της και τους οπλισμούς πλακών.



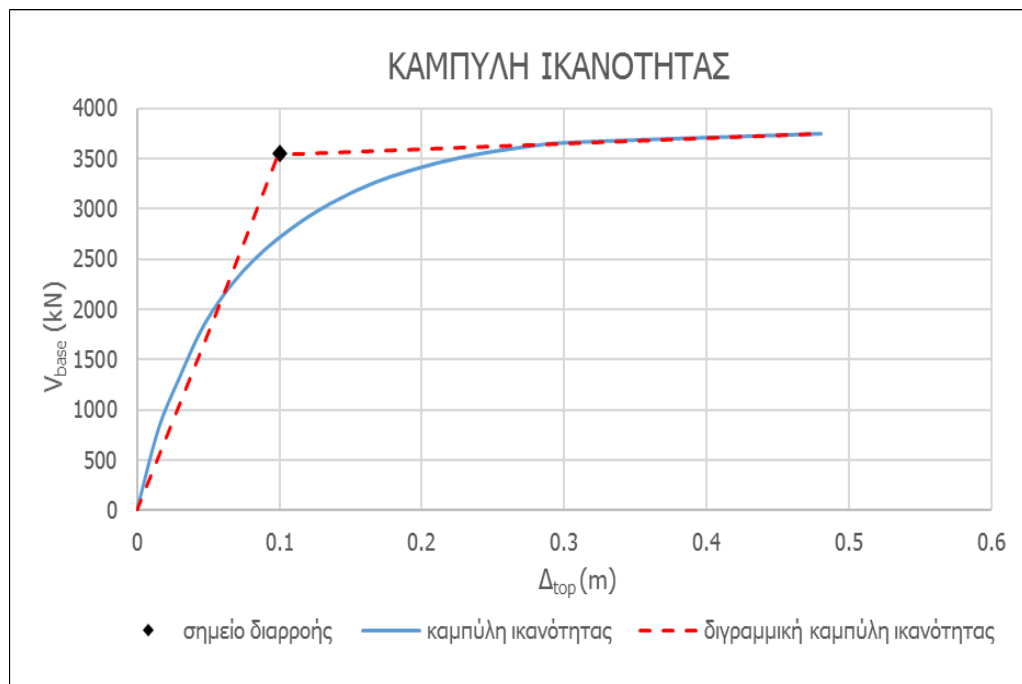
**Εικόνα 4.7:** Κάτοψη κτιρίου Β

### 4.3.1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Η στατική ανάλυση pushover για το κτίριο Β έγινε με δύο εκδοχές. Στην πρώτη εκδοχή τα οριζόντια φορτία ασκούνται στο κέντρο βάρους του φορέα κατά τη διεύθυνση Χ ενώ στην δεύτερη, ασκούνται στο κέντρο ελαστικής στροφής (Κ.Ε.Σ.) κατά την διεύθυνση Χ και κατά 30% κατά την διεύθυνση Υ.

Ακολουθούν οι καμπύλες ικανότητας για τις δύο εκδοχές.

#### 4.3.1.1 PUSHOVER ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΑΡΟΥΣ



Μετά από την διγραμμικοποίηση της καμπύλης, σύμφωνα με τη μέθοδο των συντελεστών, προέκυψε η τέμνουσα διαρροής  $V_y = 3550$  kN και η μετατόπιση διαρροής  $\delta_y = 0.1$  m.

Από την στατική ανάλυση προέκυψε η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος  $T_e = 0.41$  s και με τη μέθοδο των συντελεστών βρέθηκε η ελαστική ιδιοπερίοδος  $T_e = 0.5$  s. Στη συνέχεια, από το ελαστικό φάσμα με τις ακόλουθες παραδοχές:

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας  $a_{gR} = 0.16$  g

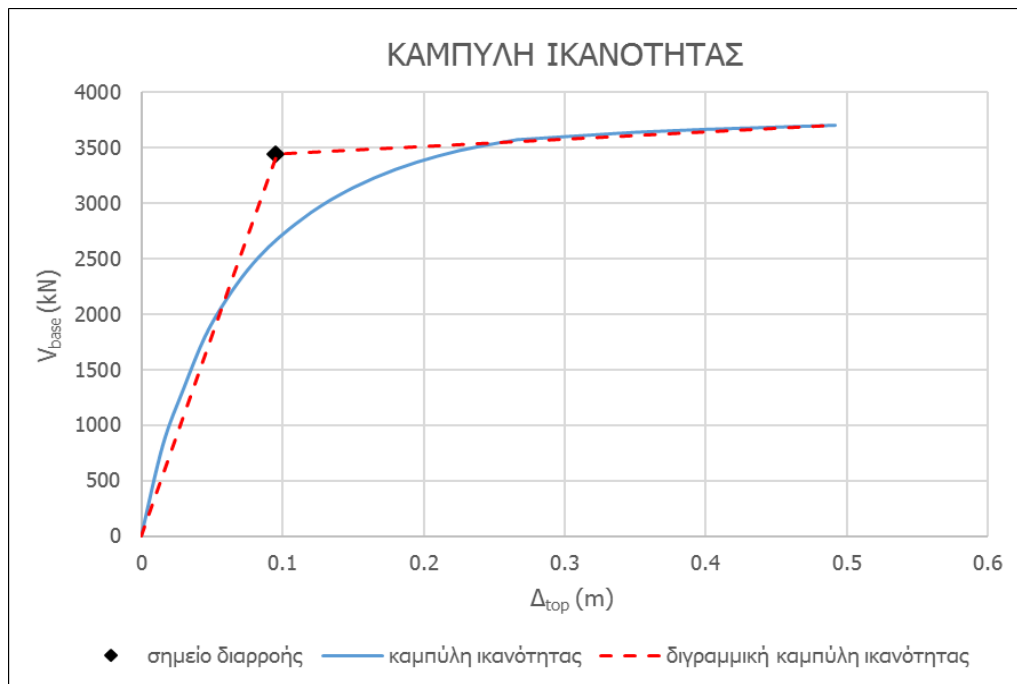
Κατηγορία σπουδαιότητας II  $\gamma_i = 1.0$

Κατηγορία εδάφους B:  $T_B = 0.15$  s  $T_C = 0.5$  s  $T_D = 2.5$  s  $S = 1.2$

βρέθηκε ελαστική επιτάχυνση  $S_e(T_e, 5\%) = 4.8$  m/s<sup>2</sup>.

Τέλος, από την μέθοδο των συντελεστών προέκυψε σχετική μετατόπιση  $\Delta_t = 0.04$  m

## 4.3.1.2 PUSHOVER ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ



Μετά από την διγραμμικοποίηση της καμπύλης, σύμφωνα με τη μέθοδο των συντελεστών, προέκυψε η τέμνουσα διαρροής  $V_y = 3450$  kN και η μετατόπιση διαρροής  $\delta_y = 0.095$  m.

Από την στατική ανάλυση προέκυψε η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος  $T_1 = 0.41$  s και με τη μέθοδο των συντελεστών βρέθηκε η ελαστική ιδιοπερίοδος  $T_e = 0.5$  s. Τέλος, προέκυψε σχετική μετατόπιση  $\Delta_t = 0.04$  m.

Παρατηρούμε ότι και στις δύο εκδοχές τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια, με οριακά πιο κρίσιμη ως προς την τέμνουσα διαρροής, την ανάλυση pushover στο κέντρο ελαστικής στροφής του φορέα.

Ακολουθεί η αποτίμηση του φορέα με καμπύλες τρωτότητας για την εκδοχή 2.

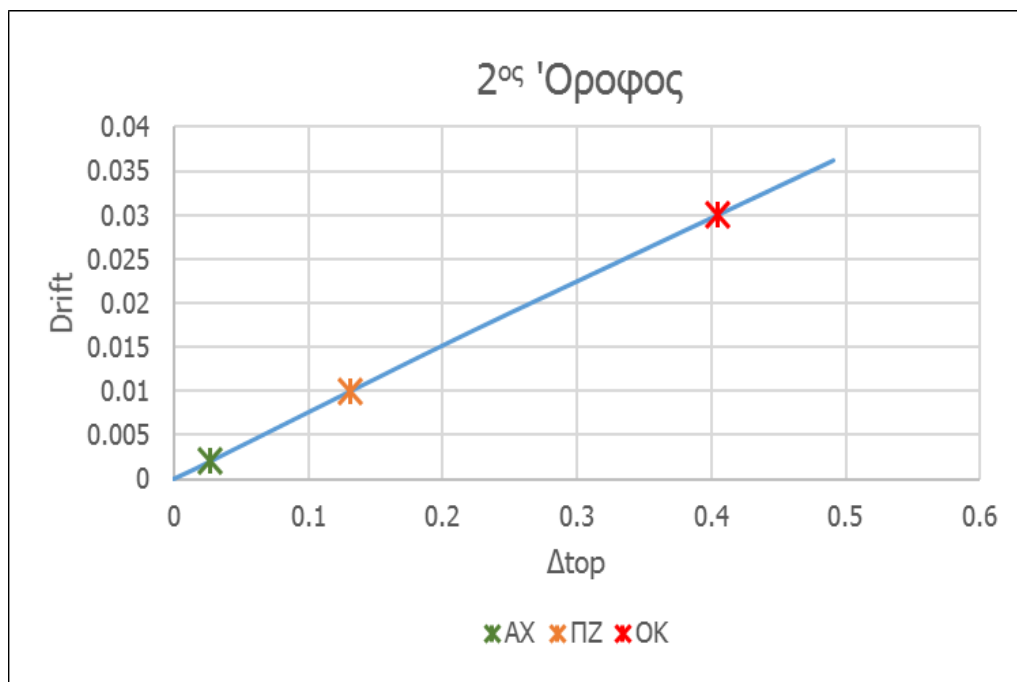
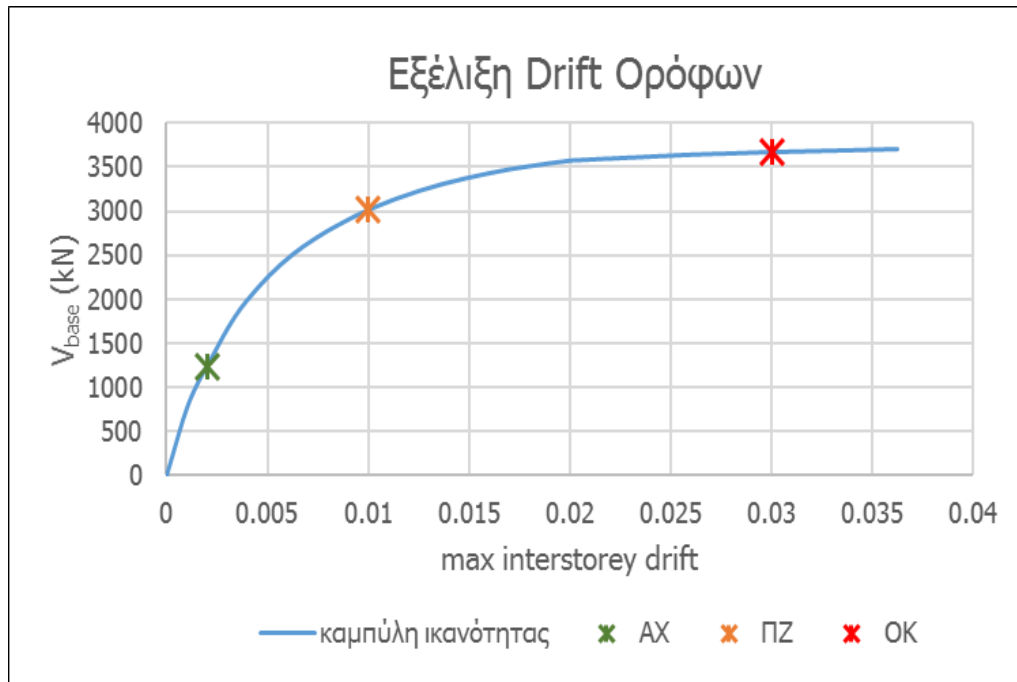
### 4.3.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (Drift)

Τα όρια των τιμών του max interstorey drift  $\theta$  επιλέγονται ίδια με πριν, δηλαδή:

Στάθμη Επιτελεστικότητας	max interstorey drift ( $\theta$ )
Άμεση Χρήση	0.002
Προστασία Ζωής	0.01
Οιονεί Κατάρρευση	0.03

Αφού υπολογίσαμε για κάθε όροφο και για κάθε βήμα της Pushover το λόγο της διαφορικής μετατόπισης των δύο άκρων ενός τυπικού υποστυλώματος προς το ύψος του για κάθε όροφο (interstorey drift) και κατά συνέπεια την μέγιστη σχετική μετατόπιση ανά βήμα και έχοντας ως δεδομένη τη μέγιστη σχετική στρόφη για κάθε επίπεδο βλάβης ( $\theta_{max}$ ) εντοπίσαμε την μετατόπιση κορυφής  $\delta_{top}$  που αντιστοιχεί σε αυτή τη στρόφη και στη συνέχεια την φασματική επιτάχυνση  $S_e$  που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη ιδιοπερίοδο  $T_e$  για κάθε στάθμη.

Drift	$\Delta_{top}$ (m)	V (kN)	$S_e$ (m/s <sup>2</sup> )
0.002	0.027	1234.3	3.3
0.01	0.13	3014.4	16
0.03	0.41	3670.6	49



### 4.3.3 ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

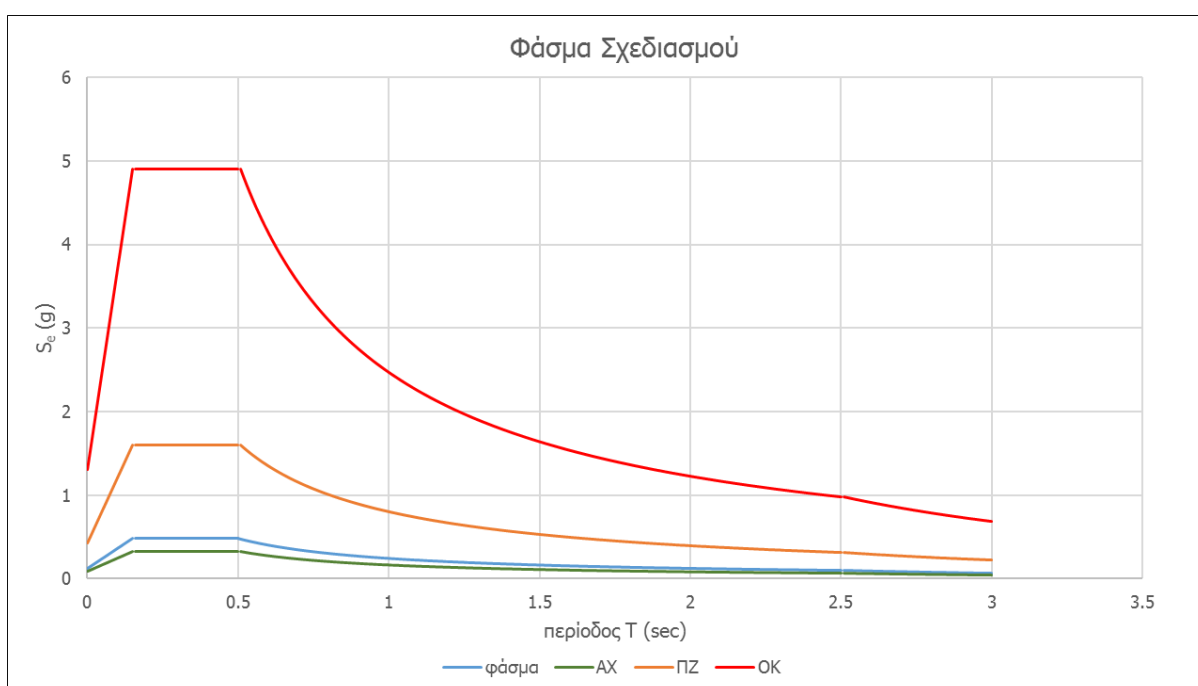
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού με τα χαρακτηριστικά:

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας  $a_{gR}=0.16 g$

Κατηγορία σπουδαιότητας II  $\gamma_i=1.0$

Κατηγορία εδάφους B:  $T_B=0.15 s$   $T_C=0.5 s$   $T_D=2.5 s$   $S=1.2$

και τα κλιμακούμενα φάσματα για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας: Άμεση Χρήση, Προστασία Ζωής και Οιονεί Κατάρρευση σύμφωνα με το λόγο  $S_{e,SE}/S_e$ .



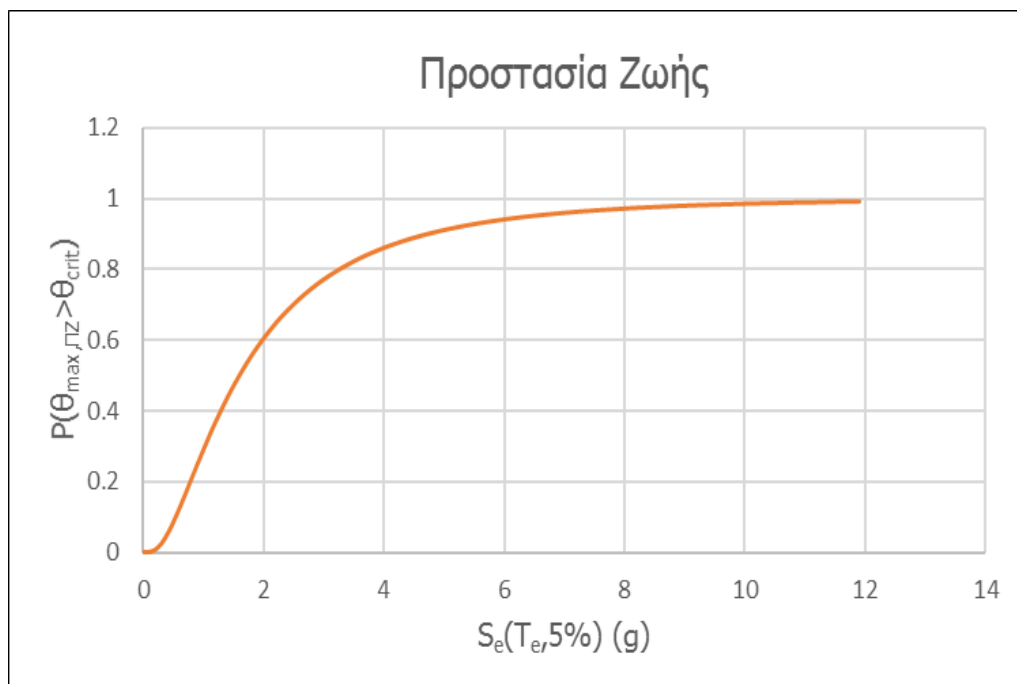
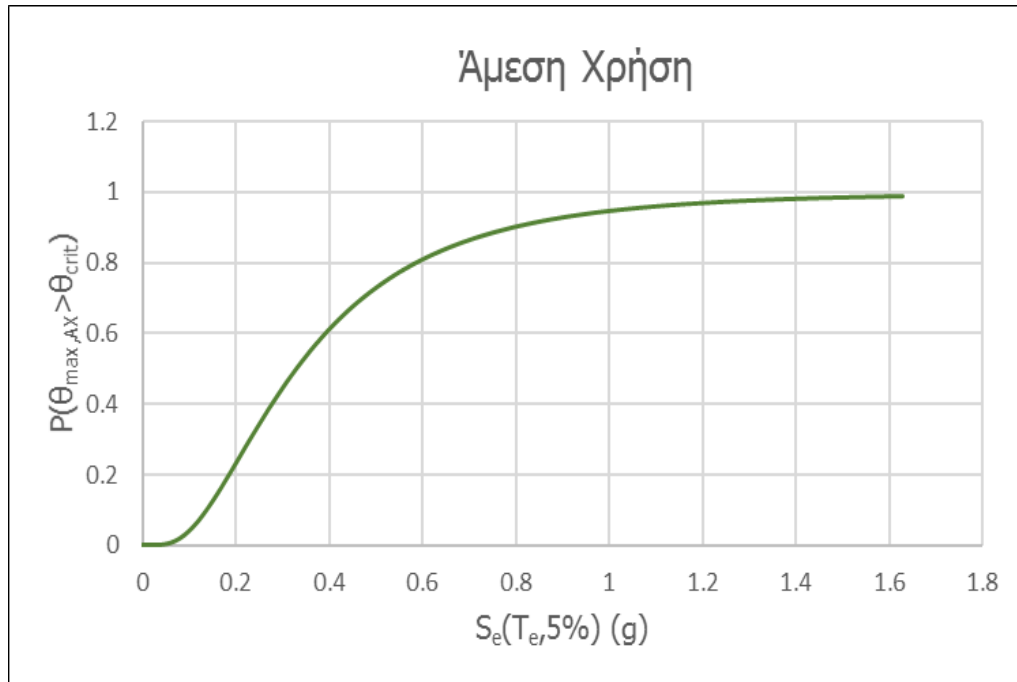
η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης (PGA) βρίσκεται από την πρώτη τιμή της φασματικής επιτάχυνσης για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

Στην προκειμένη περίπτωση:

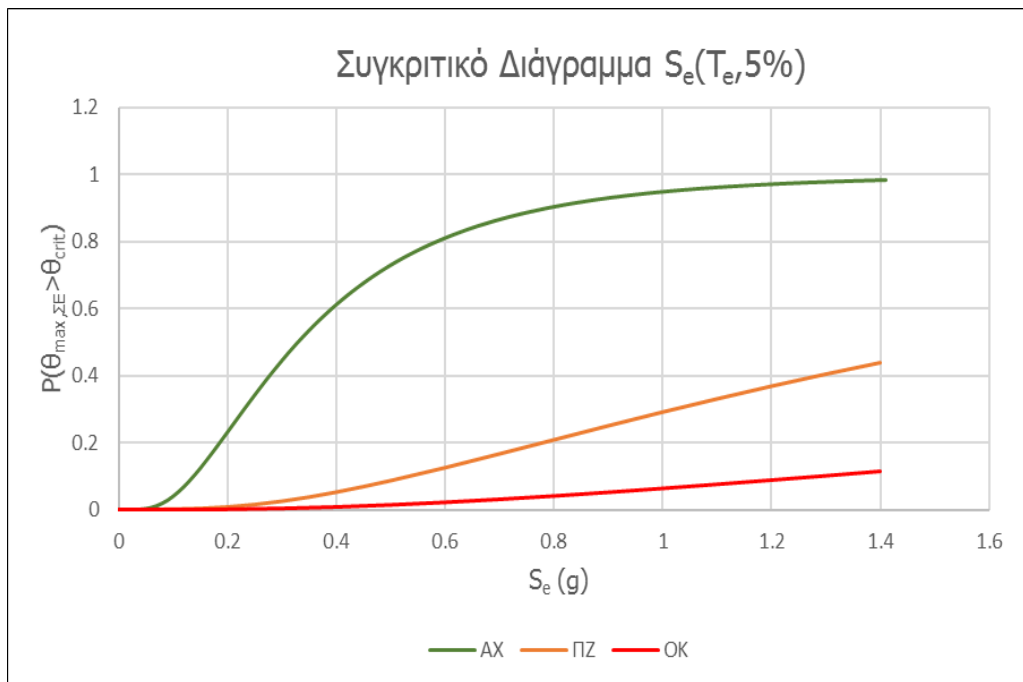
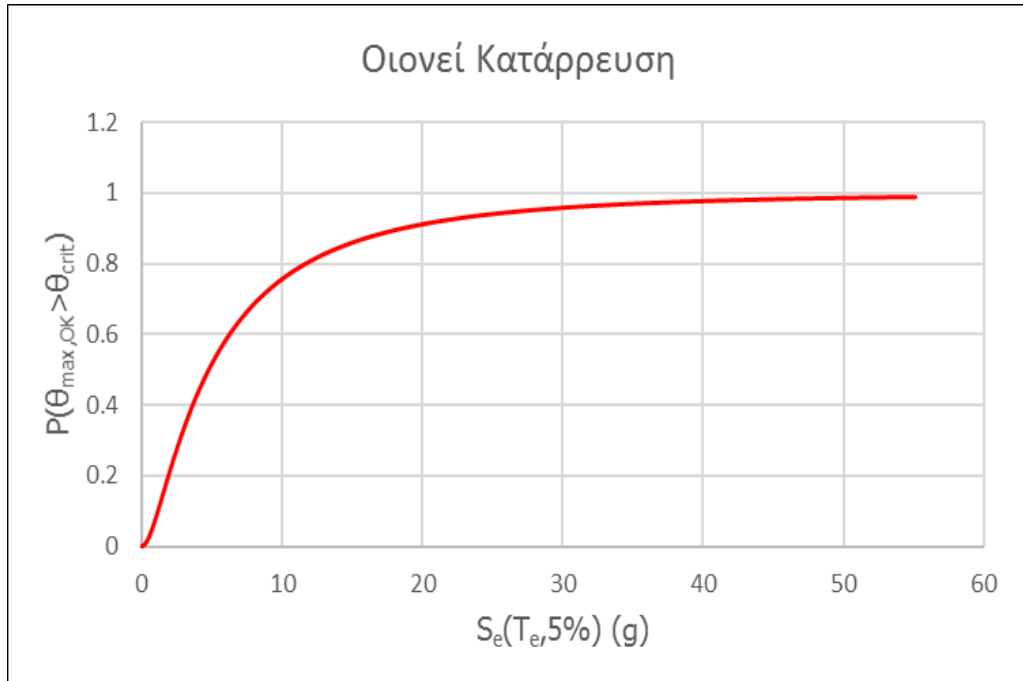
Στάθμη επιτελεστικότητας	PGA (m/s <sup>2</sup> )
Άμεση Χρήση	0.9
Προστασία Ζωής	4.3
Οιονεί Κατάρρευση	13.1

### 4.3.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

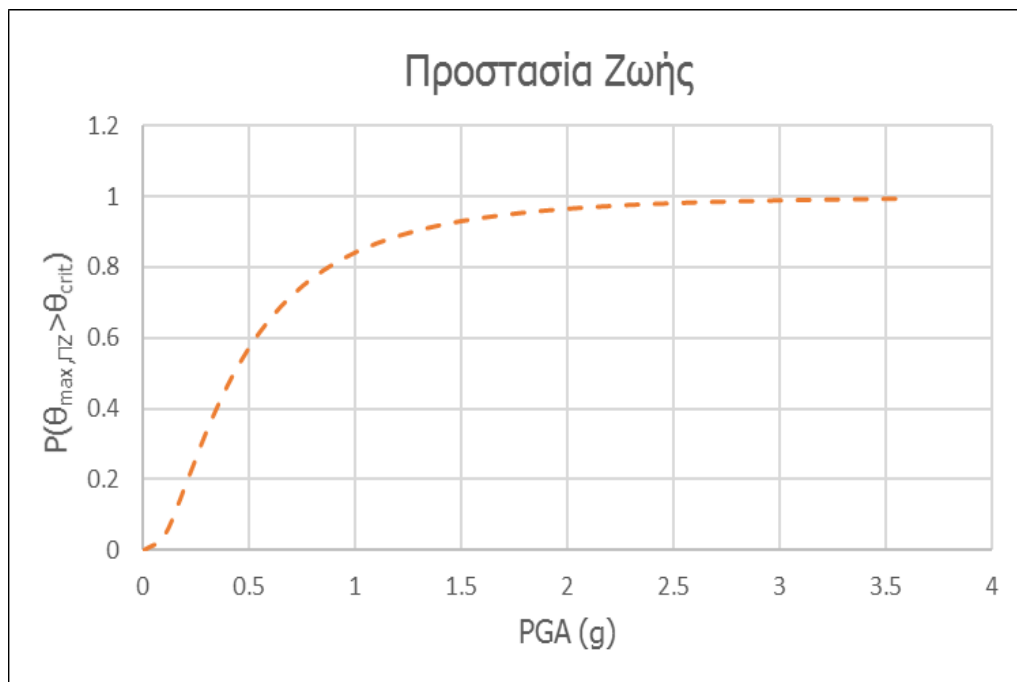
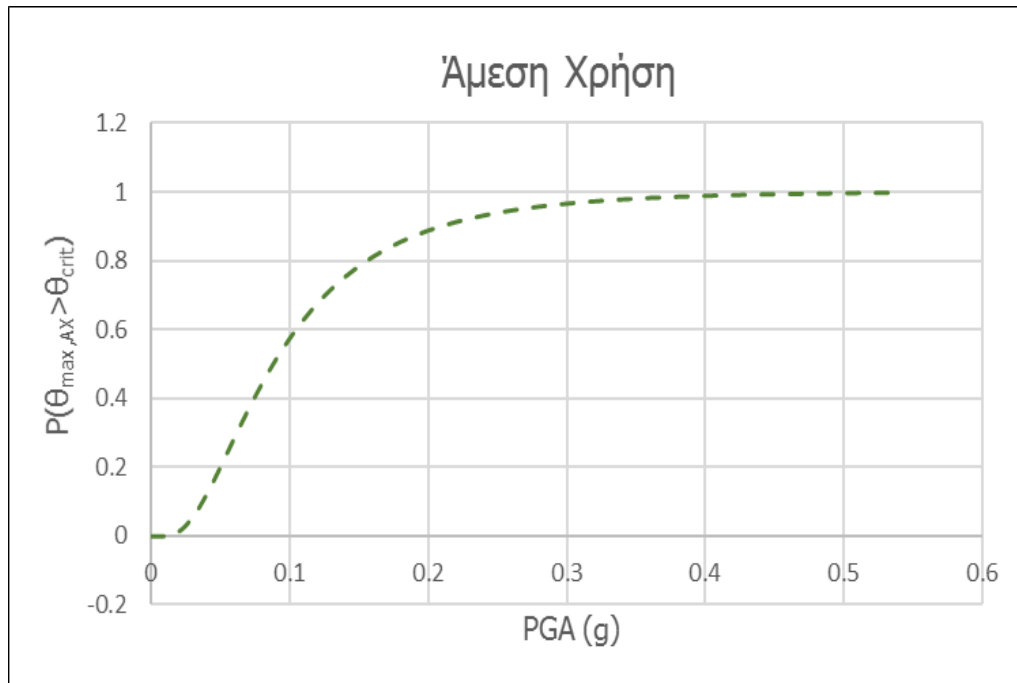
#### 4.3.4.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ $S_e(T_e, 5\%)$

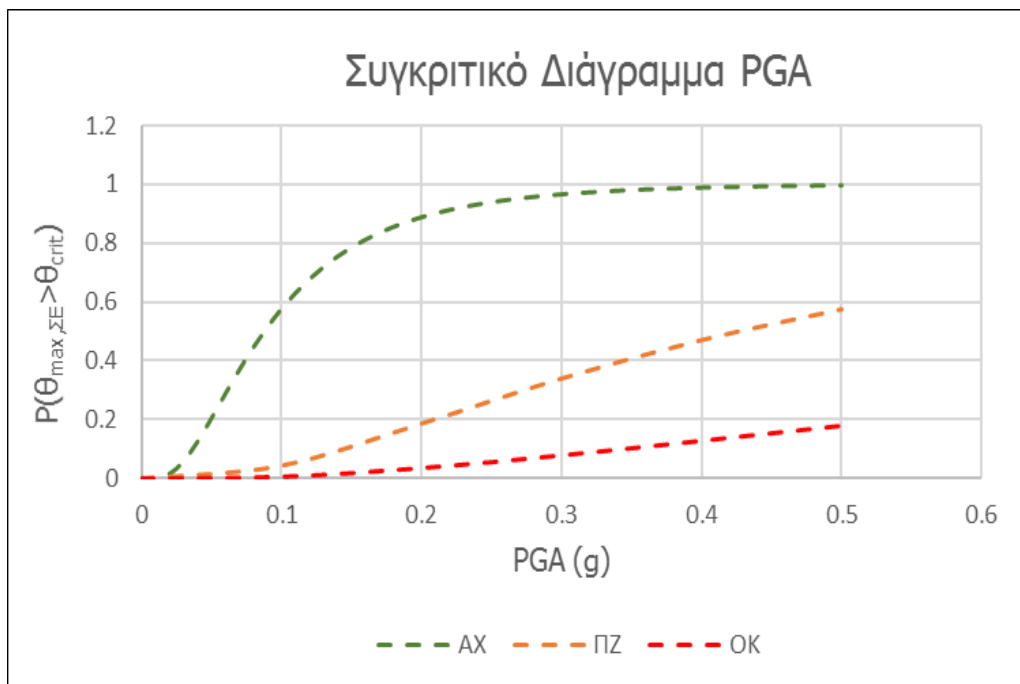
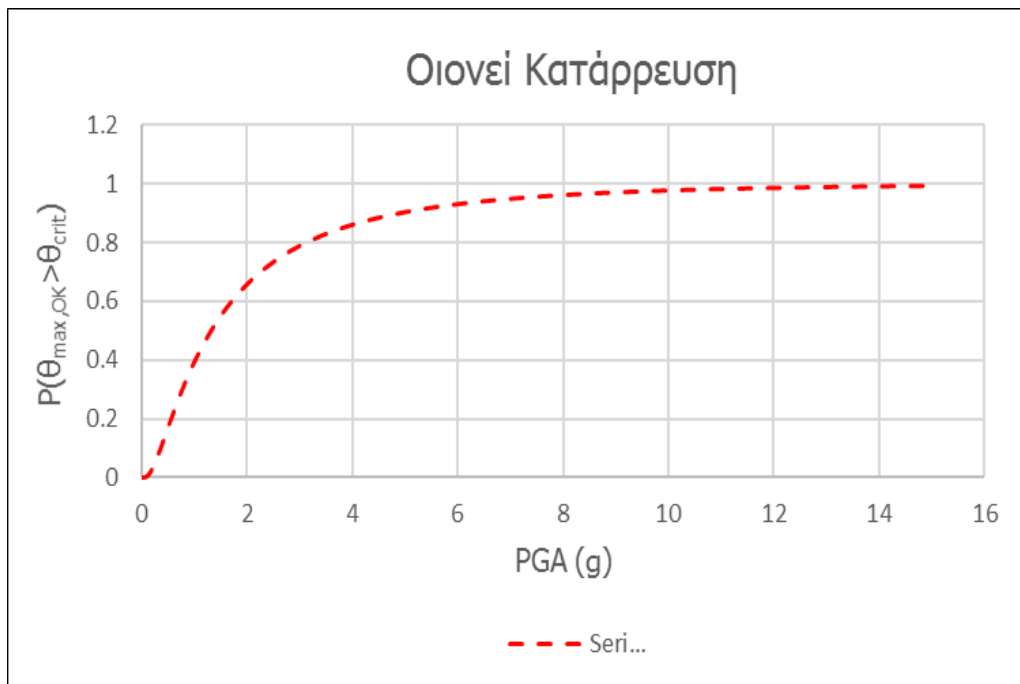




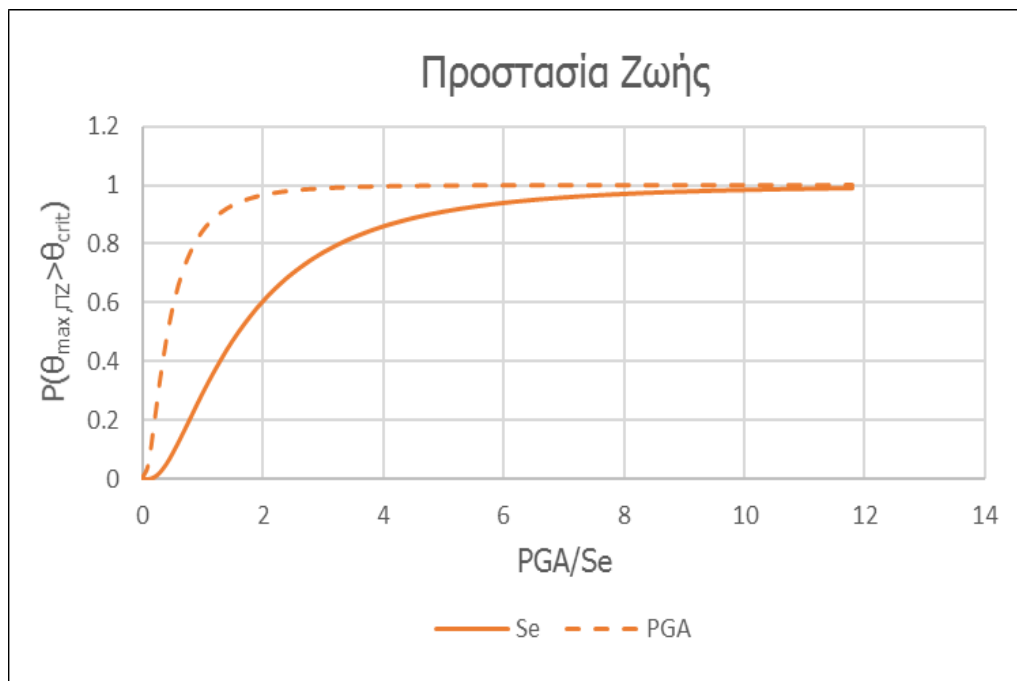
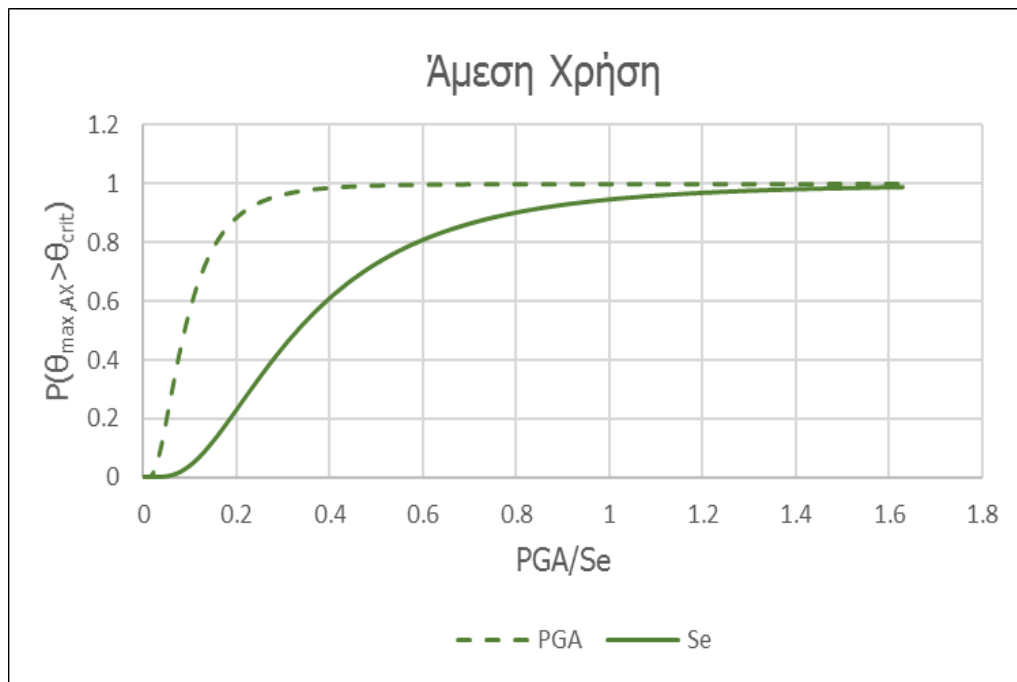


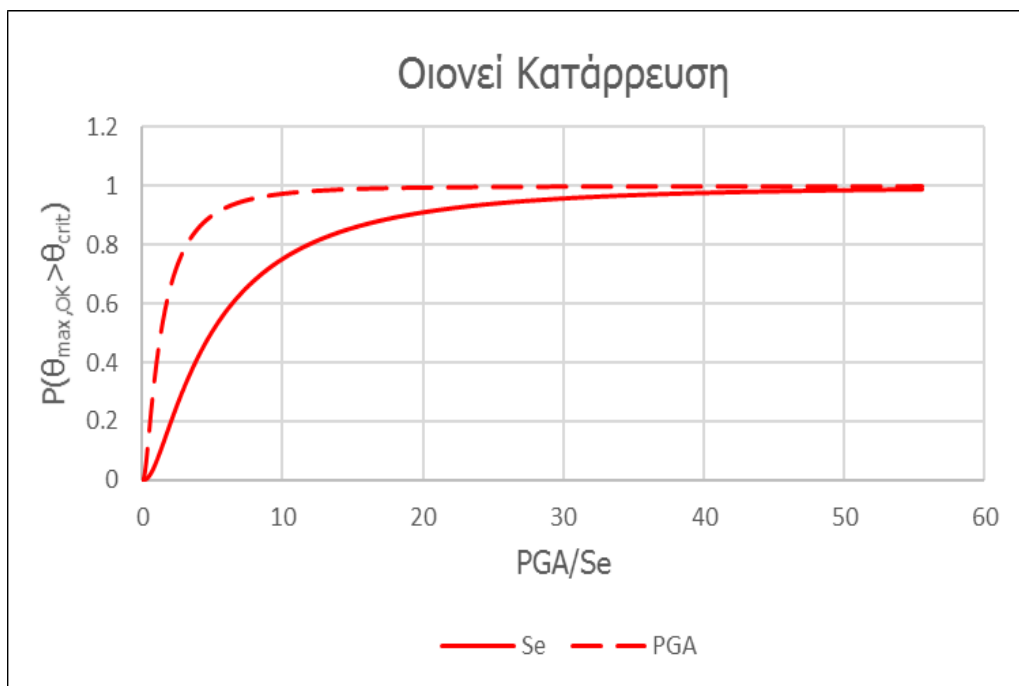
## 4.3.4.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ (PGA)





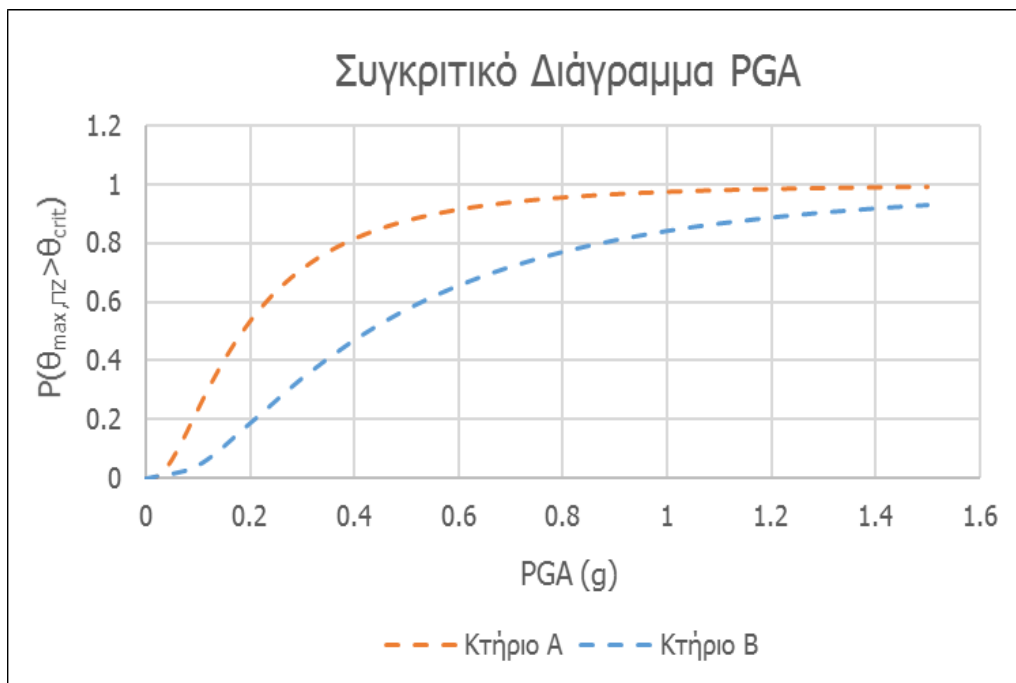
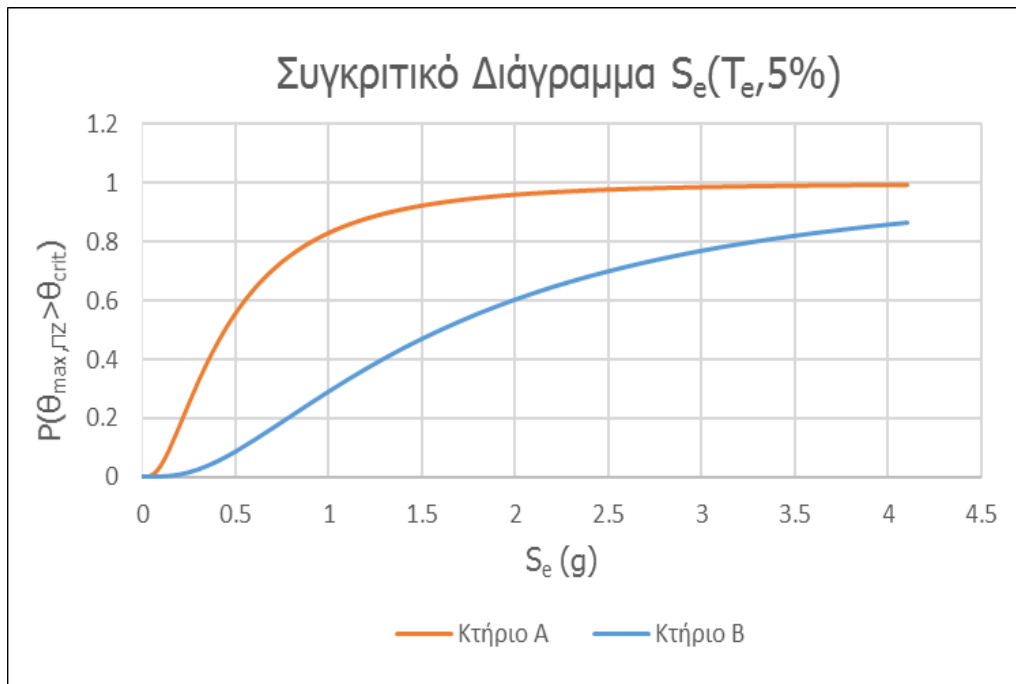
## 4.3.4.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ PGA-Se





Από τα συγκριτικά διαγράμματα PGA- $S_e$  προκύπτει ότι οριακά πιο κρίσιμος είναι ο έλεγχος με τη μέγιστη επιτάχυνση (PGA).

#### 4.4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΤΙΡΙΩΝ Α ΚΑΙ Β



Παρατηρούμε πως το κτίριο Β με τα τοιχία έχει αρκετά λιγότερες πιθανότητες να ξεπεράσει τη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής, από ότι το κτίριο Α που έχει μόνο υποστυλώματα.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε αποτίμηση δύο πενταώροφων κτιρίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση καμπυλών τρωτότητας. Και τα δύο κτίρια, αφού προσομοιώθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος OpenSees, υποβλήθηκαν σε ανελαστική στατική υπερωθητική (pushover) ανάλυση κατά τη διεύθυνση Χ, η οποία κρίθηκε κρισιμότερη. Τέλος, έγινε αποτίμηση της κατασκευής, εξαγοντας τις καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων. Ως μέτρο βλάβης για τον έλεγχο συμπεριφοράς της κατασκευής, επιλέχθηκε η ανοιγμένη πλευρική μετακίνηση των ορόφων (drift).

Το κτίριο Α, ως κατακόρυφα στοιχεία, διαθέτει μόνο υποστυλώματα. Για την εκτέλεση της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης εφαρμόσαμε τριγωνική πλευρική φόρτιση κατά την διεύθυνση Χ, ασκούμενη στη κέντρο βάρους του κάθε ορόφου. Παρατηρούμε, λοιπόν, από το διάγραμμα  $\Delta_{top}$ -Drift της παραγράφου 4.2.4 ότι η κατασκευή παρουσιάζει σε κάθε βήμα των αναλύσεων τα μεγαλύτερα drift στον πρώτο (1<sup>ο</sup>) όροφο. Πρέπει να σημειωθεί όμως, πως τα αποτελέσματα της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από τη μορφή των οριζόντιων σεισμικών φορτίων που επιβάλλονται.

Το κτίριο Β, ως κατακόρυφα στοιχεία, διαθέτει εκτός από υποστυλώματα, και τοιχία. Η στατική υπερωθητική ανάλυση του έγινε με δύο συνδυασμούς δράσεων. Στον πρώτο συνδυασμό εφαρμόσαμε τριγωνική πλευρική φόρτιση κατά την διεύθυνση Χ, ασκούμενη στο κέντρο βάρους του ορόφου, όπως και στο κτίριο Α. Στο δεύτερο συνδυασμό, η τριγωνική πλευρική φόρτιση ασκήθηκε με εκκεντρότητα στο κτίριο, ίση με την απόσταση του κέντρου βάρους (Κ.Β.) από το κέντρο ελαστικής στροφής (Κ.Ε.Σ.) του ορόφου, σύμφωνα με τους κανονισμούς. Επιπλέον, αυτή η φόρτιση ασκήθηκε ταυτόχρονα και κατά την διεύθυνση Υ σε ποσοστό 30%. Οριακά κρισιμότερος κρίθηκε ο δεύτερος συνδυασμός όπως φαίνεται και από την καμπύλη ικανότητας στην παράγραφο 4.3.1.2. Επιπλέον, παρατηρούμε από το διάγραμμα  $\Delta_{top}$ -Drift της παραγράφου 4.3.2, ότι το κτίριο Β παρουσιάζει σε κάθε βήμα των αναλύσεων τα μεγαλύτερα drift στον δεύτερο (2<sup>ο</sup>) όροφο.

Η ανάλυση της τρωτότητας των δύο κατασκευών, όπου επιλέχθηκαν οι τιμές 0.002, 0.01 και 0.03 ως όρια των drift για τις στάθμες επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση, Προστασία Ζωής και Οιονεί Κατάρρευση αντίστοιχα, έχει γίνει ως προς την ελαστική επιτάχυνση  $S_e$  και ως προς τη μέγιστη επιτάχυνση PGA. Η σύγκριση των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται τόσο στην παράγραφο 4.2.6.3 για το κτίριο Α όσο και στην παράγραφο 4.3.4.3 για το κτίριο Β δείχνουν πως υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης της εκάστοτε στάθμης επιτελεστικότητας όταν οι καμπύλες τρωτότητας έχουν εξαχθεί ως προς την μέγιστη επιτάχυνση PGA.

Συγκριτικά, το κτίριο Β με τα τοιχία παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε σεισμική δράση από ότι το κτίριο Α. Αυτό παρατηρείται τόσο από τις καμπύλες ικανότητας, όπου το κτίριο Β έχει μεγαλύτερη τέμνουσα διαρροής από το κτίριο Α, όσο και από τη στοχευόμενη μετακίνηση. Η στοχευόμενη μετακίνηση του κτιρίου Β βρίσκεται πολύ κοντά στην στάθμη επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση ενώ η στοχευόμενη μετακίνηση του κτιρίου Α βρίσκεται ανάμεσα στις στάθμες Προστασία Ζωής και Άμεση Χρήση, και είναι πιο κοντά στην Προστασία Ζωής. Επιπλέον, γίνεται φανερό και από τα συγκριτικά διαγράμματα των καμπυλών τρωτότητας της παραγράφου 4.4, όπου το κτίριο Α έχει περισσότερες πιθανότητες να υπερβεί την εκάστοτε στάθμη επιτελεστικότητας. Συνολικά όμως, και τα δύο κτίρια παρουσιάζουν μια αρκετά καλή συμπεριφορά σε σεισμικές δράσεις. Για πληρέστερο έλεγχο καλό θα ήταν και η διεξαγωγή δυναμικής προσομοιωτικής ανάλυσης (incremental dynamic analysis).



## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τάσιος , Γιαννόπουλος , Τρέζος, Τσουκαντάς , Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με βάση τον νέο ελληνικό κανονισμό Σκυροδέματος, Αθήνα 2005
2. Γιάννης Ν. Ψυχάρης, Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας, Αθήνα 2015
3. Μ. Φραγκιαδάκης, Βέλτιστος Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών, Διδακτορική Διατριβή, Απρίλιος 2006
4. Μ. Παπαδρακάκης , Πλαστική Ανάλυση Ραβδωτών Φορέων – Σύγχρονες Μέθοδοι, Αθήνα 2013
5. ΕΚΩΣ 2000, Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου σκυροδέματος
6. ΕΑΚ -2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
7. Πρότυπο EN 1998-1:2004, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών, Μέρος 1 Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια
8. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), "Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)", Αθήνα 2012
9. Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves, et al. (2007), "OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) Command Language Manual"
10. Σ. Πανταζοπούλου & Δ. Τιμοσίδης, Παρουσίαση Προγράμματος OpenSees, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
11. V. Papadopoulos and N.D. Lagaros (2013). "Performance-based optimum design of structure with vulnerability objectives", Int. J. Reliability and Safety, Vol. 7, No. 1, p. 75-94.
12. FEMA-National Institute of Building Sciences. "HAZUS-MH MR1, Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model", Washington, DC, 2003.

13. Ανδρέας Ι. Κάππος & Γεώργιος Παπαδόπουλος, Υπολογισμός Καμπύλων Τρωτότητας για Ελληνικά Κτίρια από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 2006
14. Α.Ι. Καραμπίνης & Α.Κ. Ελευθεριάδου, Αναλυτική Αποτίμηση της Σεισμικής Τρωτότητας Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 2006