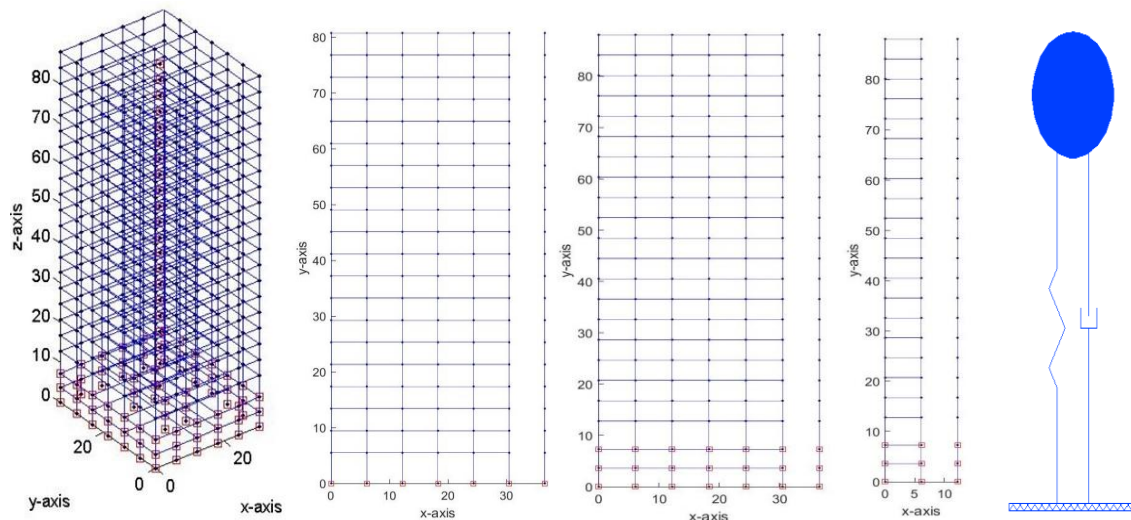




Επιρροή του προσομοιώματος στην εκτιμώμενη  
σεισμική απόκριση 20-όροφου μεταλλικού κτιρίου  
με πλαισιακό φορέα



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΠΜΣ: "Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών"

Χρήστος Γ. Λαχανάς

Επιβλέπων: Δημήτριος Βαμβάτσικος

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

EMK ME 2016/05

Λαχανάς Χ. Γ. (2016).  
Επιρροή του προσομοιώματος στην εκτιμώμενη σεισμική απόκριση 20-όροφου  
μεταλλικού κτιρίου με πλαίσιακό φορέα  
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2016/05  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Lachanas C. G. (2016).  
Model type effects on the estimated seismic response of a 20-story  
steel moment resisting frame  
Master Thesis (MSc) ΕΜΚ ΜΕ 2016/05  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες .....	5
1 Εισαγωγή .....	7
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	10
1.3 Οργάνωση των περιεχομένων .....	14
2 Παρουσίαση του κτιρίου .....	15
2.1 Γενικά-Γεωμετρία φορέα .....	15
2.2 Στοιχεία διατομών μελών .....	17
2.3 Στοιχεία υλικού-Φορτία .....	19
3 Προσομοίωση του κτιρίου-Αναλύσεις .....	21
3.1 Κατηγορίες προσομοιωμάτων .....	21
3.1.1 Τρισδιάστατο προσομοίωμα .....	21
3.1.2 Δισδιάστατο προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων .....	22
3.1.3 Δισδιάστατο προσομοίωμα πλήρους πλαισίου .....	23
3.1.4 Δισδιάστατο προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος.....	23
3.1.5 Μονοβάθμιο προσομοίωμα.....	24
3.2 Αναλύσεις στα προσομοιώματα.....	25
3.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση- Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis) .....	25
3.2.2 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA).....	25
4 Τρισδιάστατη προσομοίωση.....	29
4.1 Προσομοίωση.....	29
4.1.1 Γενικά.....	29
4.1.2 Προσομοίωση με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας.....	31
4.1.3 Προσομοίωση με στοιχεία ινών .....	32
4.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων .....	33
4.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση.....	33
4.2.2 Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis).....	35
4.2.3 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA).....	35
5 Δισδιάστατη προσομοίωση πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων .....	39
5.1 Προσομοίωση.....	39
5.1.1 Γενικά.....	39
5.1.2 Προσομοίωση με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας.....	41
5.1.3 Προσομοίωση με στοιχεία ινών .....	44
5.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων .....	44
5.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση.....	44
5.2.2 Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis).....	45
5.2.3 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA).....	46
6 Δισδιάστατη προσομοίωση πλήρους πλαισίου.....	51
6.1 Προσομοίωση.....	51
6.1.1 Γενικά.....	51
6.1.2 Προσομοίωση με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας.....	51
6.1.3 Προσομοίωση με στοιχεία ινών .....	52

6.2	Αποτελέσματα Αναλύσεων .....	52
6.2.1	Ιδιομορφική Ανάλυση.....	52
6.2.2	Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis).....	53
6.2.3	Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA).....	54
7	Δισδιάστατη προσομοίωση ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος .....	59
7.1	Προσομοίωση.....	59
7.2	Αποτελέσματα Αναλύσεων .....	61
7.2.1	Ιδιομορφική Ανάλυση.....	61
7.2.2	Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis).....	62
7.2.3	Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA).....	63
8	Προσομοίωση ισοδύναμου μονοβάθμιου.....	67
8.1	Προσομοίωση-Αποτελέσματα αναλύσεων.....	67
8.1.1	Γενικά.....	67
8.1.2	Μονοβάθμιο (1302).....	69
8.1.3	Μονοβάθμιο (12205).....	71
8.1.4	Μονοβάθμιο (1204).....	73
8.1.5	Μονοβάθμιο (1214).....	74
9	Σύγκριση της απόκρισης βάσει προσομοίωσης.....	77
9.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	77
9.2	Σύγκριση εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης.....	79
9.3	Σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών προσομοίωσης.....	83
9.3.1	Συνδυασμός 1 .....	86
9.3.2	Συνδυασμός 2.....	88
9.3.3	Συνδυασμός 3.....	91
9.3.4	Συνδυασμός 4.....	93
9.3.5	Συνδυασμός 5.....	96
9.3.6	Συνδυασμός 6.....	98
9.3.7	Συνδυασμός 7.....	102
9.4	Σύγκριση των μέσων αποκρίσεων των κατηγοριών.....	105
9.5	Τελική Πρόταση.....	110
10	Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	115
11	Βιβλιογραφία.....	119



## **Επιρροή του προσομοιώματος στην εκτιμώμενη σεισμική απόκριση 20-όροφου μεταλλικού κτιρίου με πλαισιακό φορέα**

Λαχανάς Χ. Γ. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

### **Περίληψη**

Τα σύγχρονα προγραμματιστικά περιβάλλοντα, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, παρέχουν τη δυνατότητα στο μελετητή πολιτικό μηχανικό για μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών τόσο υπό στατικές όσο και υπό δυναμικές φορτίσεις μέσω της ανάπτυξης και ανάλυσης προσομοιωμάτων των κατασκευών. Ωστόσο, εστιάζοντας στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης ενός κτιρίου μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, η αύξηση της πολυπλοκότητας του προσομοιώματος συνεπάγεται σημαντική αύξηση στο υπολογιστικό κόστος, γεγονός το οποίο οδηγεί στην ανάπτυξη και μελέτη απλούστερων ισοδύναμων προσομοιωμάτων. Αντιλαμβάνεται λοιπόν κανείς ότι στις λοιπές αβεβαιότητες με τις οποίες συνδέεται η διαδικασία της αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς, προστίθεται και η αβεβαιότητα λόγω προσομοιώματος, η οποία αναλύεται σε δύο επιμέρους συνιστώσες. Η πρώτη αφορά την αβεβαιότητα λόγω του τύπου του προσομοιώματος, ενώ η δεύτερη στην αβεβαιότητα λόγω των παραμέτρων του προσομοιώματος.

Με την παρούσα εργασία, επιχειρείται η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που αφορά τον τύπο του προσομοιώματος, για την οποία οι έως σήμερα βιβλιογραφικές αναφορές είναι περιορισμένες. Συγκεκριμένα, μελετάται ένα σύγχρονα σχεδιασμένο 20-όροφο μεταλλικό κτίριο με πλαισιακό φορέα. Ξεκινώντας από το τρισδιάστατο προσομοίωμα του κτιρίου και ακολουθώντας σταδιακή απλοποίηση του προσομοιώματος σε δισδιάστατο προσομοίωμα πλαισίου πολλών ανοιγμάτων και δισδιάστατο προσομοίωμα πλαισίου ενός ανοίγματος, καταλήγουμε στο ισοδύναμο μονοβάθμιο προσομοίωμα, όπως αυτό παράγεται από τη στατική μη γραμμική ανάλυση του αντίστοιχου πολυβαθμίου. Εντός της κάθε κατηγορίας πολυβαθμίων προσομοιωμάτων, διερευνάται επίσης, η χρήση εναλλακτικών τύπων προσομοίωσης των μελών χρησιμοποιώντας είτε στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας είτε στοιχεία ινών. Συνολικά από τις 5 κατηγορίες προσομοιωμάτων μελετώνται 36 προσομοιώματα, εκ των οποίων τα 18 αφορούν τα πολυβάθμια και τα υπόλοιπα 18 τα αντίστοιχα μονοβάθμια.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση της σεισμικής απόκρισης πραγματοποιείται στα προσομοιώματα ικανοτική δυναμική ανάλυση. Η σύγκριση της σεισμικής απόκρισης βάσει προσομοιώματος γίνεται τόσο εντός της κάθε κατηγορίας προσομοιωμάτων, όσο και μεταξύ των κατηγοριών. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ της διάμεσου των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης σε κάθε προσομοίωμα, ενώ κατά τη σύγκριση εξετάζονται περιπτώσεις με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα, λόγω της χαμηλής αξιοπιστίας αυτών που οφείλεται στο μεγάλο ύψος του κτιρίου. Καταληκτικά, στην τελική πρόταση προτείνονται κάποια συνολικά αποτελέσματα για κάθε μια από τις κατηγορίες προσομοίωσης.

MASTER THESIS  
EMK ME 2016/05

**Model type effects on the seismic response of a 20-story  
steel moment resisting frame**

Lachanas C. G. (supervised by Vamvatsikos D.)

**Abstract**

The rapid development of computational methods has enabled the use of complex finite element models to assess the behaviour of structures under both static and dynamic loads. However, focusing on the study of a building's seismic response through nonlinear dynamic analysis, increasing model complexity incurs significant computational costs. Accordingly, this results to the use of simpler equivalent models. It thus becomes obvious, that model uncertainty needs to be added to the uncertainties encumbering the evaluation of seismic response. Model uncertainty comprises two contributions, namely model type uncertainty and model parameters uncertainty.

Herein, the quantification of model type uncertainty is undertaken, as an initial attempt in a field where little literature exists. Specifically, a modern 20-story steel moment-resisting frame is investigated. Beginning from the 3D frame model of the building and adopting a gradual simplification of the model to 2D multi-bay frame and 2D single-bay frame models, the study concludes with the equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) models of the building, produced from the pushover analysis of each multi-degree-of-freedom (MDOF) model. In each category of MDOF models, the use of alternative member models is investigated, using either lumped plasticity or distributed plasticity fiber section beam-column elements. All in all for the 5 model categories, 36 models are studied, 18 of which refer to MDOF models and the remaining 18 to equivalent SDOF models.

For comparing the predicted seismic response to be made, each model is assessed using Incremental Dynamic Analysis (IDA). The model dependency of the response is evaluated both within each broad model category, as well as among different categories. In all cases, the basis for comparison is the median IDA curve of each model, whereas results with and without the inclusion of SDOF models are presented due to their low fidelity for tall building. In conclusion, some ensemble values are recommended to quantify the uncertainty for each model category.

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας το δεύτερο κύκλο σπουδών μου στο ΕΜΠ, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου διότι χωρίς τη στήριξη αυτής δε θα έφτανα έως εδώ.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κύριο Δημήτριο Βαμβάτσικο, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Και τούτο διότι πέρα από την άμεση και συνεχή καθοδήγηση και την άριστη συνεργασία κατά την εκπόνηση της εργασίας, μου έδωσε τη δυνατότητα να έρθω σε επαφή με αντικείμενα πέρα από τα συνηθισμένα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους Δασκάλους μου στο ΕΜΠ.

Χρήστος Γ. Λαχανάς  
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π  
Αθήνα, Οκτώβριος 2016



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Η επιστήμη του πολιτικού μηχανικού εκ φύσεως συνδέεται με αβεβαιότητες. Οι αβεβαιότητες αυτές απορρέουν τόσο από την αδυναμία πρόβλεψης κάποιων γεγονότων λόγω της εκ φύσεως τυχαιότητας αυτών, όπως για παράδειγμα η ακριβής πρόβλεψη ενός σεισμικού γεγονότος, όσο από την ελλιπή γνώση, όπως για παράδειγμα η ακριβής εκτίμηση των ιδιοτήτων ενός υλικού ή λοιπών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής. Η διαφορά μεταξύ του πρώτου είδους το οποίο ονομάζεται φυσική (κυβευτική) ή στατιστική αβεβαιότητα και του δεύτερου το οποίο ονομάζεται επιστημική ή συστηματική αβεβαιότητα, έγκειται στο ότι η επιστημική αβεβαιότητα δύναται να μειωθεί μέσα από πρόσθετες πειραματικές μετρήσεις, ενώ η φυσική όχι. Ωστόσο, όταν επρόκειτο για επιστημικές αβεβαιότητες, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η πλήρης εξάλειψη τους προϋποθέτει γνώση ή οποία ορισμένες φορές είναι δύσκολο έως αδύνατο να αποκτηθεί. Για παράδειγμα θα πρέπει να γνωρίζουμε την αντοχή του χάλυβα σε κάθε σημείο μιας μεταλλικής κατασκευής προκειμένου να πραγματοποιηθεί αποτίμηση της σεισμικής της συμπεριφοράς. Στους σύγχρονους κανονισμούς σχετικά με το σχεδιασμό ή την αποτίμηση υφισταμένων κατασκευών, η αντιμετώπιση-εξάλειψη της αβεβαιότητας η οποία λαμβάνεται ενιαία δίχως τον παραπάνω διαχωρισμό, επιχειρείται μέσα από διάφορους συντελεστές ασφαλείας. Στόχος των εν λόγω συντελεστών είναι είτε η απομείωση των αντοχών είτε η επαύξηση των δράσεων επιχειρώντας έτσι μια συντηρητική υπέρ της ασφαλείας αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων.

Εστιάζοντας στην απόκριση ενός κτιρίου κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος, οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί σχετικά με το σχεδιασμό νέων κατασκευών (EC-8, ΕΑΚ2000 κ.α), προσπαθώντας να παρέχουν στους μηχανικούς μία απλή όσον αφορά την κατανόηση και την υλοποίηση διαδικασία σχεδιασμού, βασίζονται στο σχεδιασμό μέσω της ελαστικής φασματικής ανάλυσης με φάσμα το οποίο αντιστοιχεί σε σεισμικό γεγονός με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια δηλαδή περίοδο επαναφοράς 475 χρόνια. Οι όποιες αβεβαιότητες σχετικά με το σεισμικό γεγονός, την ποιότητα του εδάφους, είτε την ίδια την κατασκευή, λαμβάνονται υπόψη με διάφορους συντελεστές, όπως για παράδειγμα οι συντελεστές σπουδαιότητας, φασματικής ενίσχυσης λόγω εδάφους κ.α. Η ικανότητα δε της εκάστοτε κατασκευής για απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική απόκριση μέσω της ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων στα μέλη της, λαμβάνεται υπόψη, μέσω της μείωσης των σεισμικών δράσεων με τη χρήση ενός ενιαίου συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ , ο οποίος λαμβάνεται κανονιστικά ανάλογα με το είδος της κατασκευής και τη διάταξη του συστήματος παραλαβής των σεισμικών δράσεων. Η παραπάνω διαδικασία, γνωστή και ως μέθοδος των δυνάμεων, λόγω των απλοποιήσεων τις οποίες εμπεριέχει αδυνατεί αρκετές φορές να ικανοποιήσει το στόχο της, οδηγώντας άλλοτε σε αντιοικονομικές και άλλοτε σε επισφαλείς λύσεις.

Νεότερη αντίληψη σχετικά με το σχεδιασμό αποτελεί ο σχεδιασμός με βάση την επιθυμητή επιτελεστικότητα Performance Based Design (PBS) ή αλλιώς σχεδιασμός με βάση τις μετακινήσεις Displacement Based Design (DBS). Η λογική αυτή του σχεδιασμού έγκειται στην επιλογή ενός επιθυμητού επιπέδου επιτελεστικότητας, επιθυμητού επιπέδου βλαβών της κατασκευής κατά τη διάρκεια του σεισμού, ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς του σεισμικού γεγονότος και ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία

σχεδιασμού και αποτίμησης της συμπεριφοράς της κατασκευής επιδιώκοντας την ικανοποίηση του στόχου της επιθυμητής επιτελεστικότητας. Άλλες σύγχρονες μέθοδοι, θεωρούν ακριβέστερη τη διαδικασία σχεδιασμού ή αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς με βάση την πιθανότητα υπέρβασης της στάθμης επιτελεστικότητας παρά της πιθανότητα υπέρβασης του συγκεκριμένου μεγέθους της σεισμικής έντασης.

Η διαδικασία της αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς ενός υφιστάμενου-σχεδιασμένου κτιρίου γίνεται κυρίως μέσα από μη γραμμικές μεθόδους, είτε στατικές (Ικανοτική Στατική Ανάλυση-Pushover Analysis), είτε με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσα από μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας με ολοκλήρωση στο χρόνο. Αντίστοιχες μέθοδοι σχετικές με την αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης μιας κατασκευής ακολουθούνται και για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας και των απωλειών (loss assessment) κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Για τη διενέργεια όλων αυτών των μη γραμμικών αναλύσεων χρησιμοποιούνται κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης της κατασκευής μέσα από προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.

Η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά τις τελευταίες δεκαετίες και του κλάδου της υπολογιστικής μηχανικής παρέχει τη δυνατότητα στους μηχανικούς, μέσα από σύγχρονα προγραμματιστικά περιβάλλοντα, για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων των κατασκευών, καθώς και για τη διενέργεια γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Στην αγορά διατίθεται μία πλούσια γκάμα λογισμικών που αφορούν την προσομοίωση και ανάλυση κατασκευών υπό σεισμικές δράσεις, τα οποία πέραν των υπολογιστικών τους δυνατοτήτων παρέχουν και πλούσιο γραφικό περιβάλλον δίνοντας στο χρήστη καλή εποπτεία του προσομοιώματος το οποίο δημιουργεί. Δίνεται η δυνατότητα έτσι στο μελετητή μηχανικό για ανάπτυξη πολύπλοκων τρισδιάστατων μοντέλων, τόσο για το σχεδιασμό μια νέας κατασκευής όσο και για την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών, χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους υλικών (γραμμικά, μη γραμμικά), διατομών (σημειακά ελατήρια, διατομές ινών), στοιχείων (στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας, στοιχεία ινών κ.α) και αναλύσεων (γραμμικές, μη γραμμικές κλπ.).

Ωστόσο, εστιάζοντας στην αποτίμηση μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, η χρήση των παραπάνω χωρικών προσομοιωμάτων έχει ως συνέπεια σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Για παράδειγμα ένα εμπορικό λογισμικό χρειάζεται περίπου υπολογιστικό χρόνο μίας ημέρας προκειμένου να πραγματοποιήσει μη γραμμική δυναμική ανάλυση για μία σεισμική καταγραφή. Αντιλαμβάνεται κανείς έτσι με βάση τον απαιτούμενο αριθμό καταγραφών βάσει των κανονισμών για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, το πόσο χρόνο απαιτεί η παραπάνω διαδικασία. Το πρόβλημα εν μέρει λύνεται με τη χρήση προγραμμάτων ανοιχτού κώδικα, ωστόσο, η χρήση τους περιορίζεται σε ακαδημαϊκό-ερευνητικό επίπεδο κυρίως. Το προαναφερθέν χρονικό κόστος σε συνδυασμό με την τεχνικοοικονομική φύση του επαγγέλματος του πολιτικού μηχανικού καθιστά πολλές φορές ασύμφορη τη χρήση τρισδιάστατων μοντέλων.

Προς αυτή την κατεύθυνση, έχει επικρατήσει η ευρεία χρήση απλούστερων προσομοιωμάτων, τα οποία προκύπτουν από τα πολυπλοκότερα βάσει απλοποιητικών παραδοχών. Έτσι αντί για τη χρήση τρισδιάστατων προσομοιωμάτων, χρησιμοποιούνται είτε δισδιάστατα στα οποία προσομοιώνονται μόνο τα συστήματα ανάληψης σεισμικών δράσεων σε κάθε κύρια διεύθυνση του κτιρίου, είτε ισοδύναμα μονοβάθμια (Equal Single Degree Of Freedom systems ESDOFs) τα οποία παράγονται από τα αντίστοιχα πολυβάθμια μέσω της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης (Pushover Analysis). Στα απλοποιητικά αυτά προσομοιώματα μειώνεται κατά πολύ ο υπολογιστικός χρόνος, ενώ επίσης είναι ευκολότερη η δημιουργία του προσομοιώματος. Επίσης, στη βιβλιογραφία και στην πράξη χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι (π.χ. Modified Mercalli Intensity), οι

οποιές αν και γρήγορες στην εκτέλεσή τους δεν παύουν να είναι εμπειρικές με αποτέλεσμα να περιγράφουν τα συγκεκριμένα κτίρια της τότε εποχής που έγινε ο σεισμός και να αφορούν τη συγκεκριμένη τοποθεσία και σεισμικό γεγονός. Επίσης, τα αποτελέσματα αυτά των εμπειρικών μεθόδων δεν προέρχονται τις περισσότερες φορές από τη διενέργεια αναλύσεων, παρά από τη συλλογή κάποιων στατιστικών στοιχείων με βάση κάποιες τοπικές καταγραφές, γεγονός το οποίο τις καθιστά ιδιαίτερα επισφαλείς.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι στις λοιπές αβεβαιότητες προστίθεται και η αβεβαιότητα λόγω προσομοιώματος (Modeling Uncertainty). Το βασικό ερώτημα που τίθεται είναι το κατά πόσο η χρήση των απλουστευτικών αυτών προσεγγίσεων-προσομοιωμάτων επηρεάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων και την αξιοπιστία αυτών. Εστιάζοντας στην αβεβαιότητα προσομοιώματος, θεωρείται ότι συναρτάται από δύο βασικές παραμέτρους-συνιστώσες. Η πρώτη αφορά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τον τύπο του μοντέλου που χρησιμοποιείται (model type uncertainty), δηλαδή εάν γίνεται χρήση τρισδιάστατου ή δισδιάστατου προσομοιώματος κλπ.. Η δεύτερη συνιστώσα της συνολικής αβεβαιότητας προσομοιώματος, αφορά τις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται (model parameters uncertainty) όπως είναι για παράδειγμα η τιμή της αντοχής του υλικού κλπ.

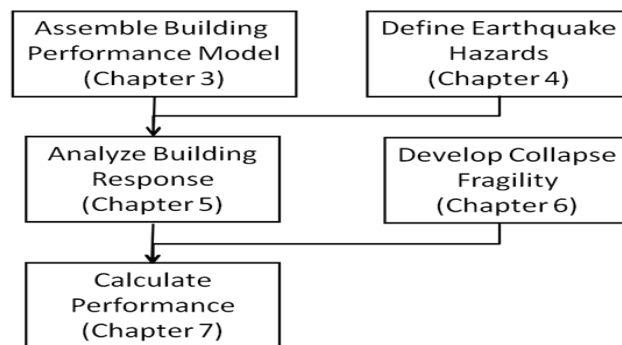
Με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η αβεβαιότητα λόγω του τύπου του προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, επιχειρείται η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας λόγω τύπου προσομοιώματος για 2D-όροφο υπάρχον σύγχρονα σχεδιασμένο μεταλλικό κτίριο με πλαισιακό φορέα ανάληψης των σεισμικών δράσεων. Για το σκοπό αυτό, ξεκινώντας από το τρισδιάστατο (3D) προσομοίωμα της κατασκευής και ακολουθώντας πορεία απλοποίησης του προσομοιώματος σε δισδιάστατο (2D) προσομοίωμα πλαισίου πολλών ανοιγμάτων, ισοδύναμο δισδιάστατο (2D) πλαίσιο ενός ανοίγματος και ακολούθως σε ισοδύναμο μονοβάθμιο (SDOF) προσομοίωμα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της σεισμικής απόκρισης. Δεν εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η χρήση εμπειρικών μεθόδων που αναφέρεται παραπάνω. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης που διενεργείται στα προσομοιώματα τα οποία εξετάζονται στα πλαίσια της εργασίας. Συγκεκριμένα, διενεργείται Ικανοτική Δυναμική Ανάλυση IDA (Incremental Dynamic Analysis) όπως αυτή προτάθηκε από του Vamvatsikos and Cornell το 2002, ενώ η σύγκριση της απόκρισης πραγματοποιείται μεταξύ των διαμέσων (διάμεση καμπύλη IDA) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των προσομοιωμάτων.

Επιπροσθέτως, εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης (3D,2D) διερευνάται η χρήση εναλλακτικών τύπων διατομών και στοιχείων μελών και το πώς αυτή επηρεάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Αυτό γίνεται με χρήση είτε στοιχείων συγκεντρωμένης πλαστικότητας, είτε κατανεμημένης πλαστικότητας με διατομές ινών, στην προσομοίωση των μελών. Με αλλά λόγια, εντός της κάθε κατηγορίας πολυβάθμιων προσομοιωμάτων περιέχονται περισσότερα του ενός προσομοιώματα, ενώ στην κατηγορία των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων βρίσκονται τα αντίστοιχα ισοδύναμα μονοβάθμια των πολυβάθμιων προσομοιωμάτων. Μέσω της διαδικασίας η οποία περιγράφεται παραπάνω, επιχειρείται η εξαγωγή κάποιων αποτελεσμάτων ώστε να είναι σε θέση ο μελετητής να γνωρίζει ανάλογα με το προσομοίωμα το οποίο χρησιμοποιεί την ακρίβεια την αξιοπιστία και την ασφάλεια των αποτελεσμάτων του.

## 1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Ενώ σε όλη την έκταση της σχετικής βιβλιογραφίας γίνεται σαφής αναφορά στην αβεβαιότητα λόγω προσομοιώματος, συγκεκριμένα νούμερα υπάρχουν κυρίως για την αβεβαιότητα λόγω των παραμέτρων του προσομοιώματος, παρόλο που εκ των δύο προαναφερθέντων συνιστωσών της αβεβαιότητας προσομοιώματος η αβεβαιότητα λόγω του τύπου του προσομοιώματος είναι πιο σημαντική. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω της χρήσης διαφορετικού τύπου προσομοιώματος παράγεται μεροληψία (bias) και μεγάλες διαφορές μεταξύ τρισδιάστατων και δισδιάστατων ή ισοδύναμων μονοβαθμίων προσομοιωμάτων.

Στις αμερικάνικες οδηγίες που εκδόθηκαν από την FEMA (Federal Emergency Management Agency), το 2012, με τίτλο FEMA P-58, παρέχεται μια μεθοδολογία για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων. Η μεθοδολογία που ακολουθείται, βασίζεται στη διαμόρφωση ενός προσομοιώματος της συμπεριφοράς του κτιρίου και ο προσδιορισμός της επιτελεσματικότητας του κτιρίου γίνεται με χρήση συναρτήσεων τρωτότητας για όλα εκείνα τα στοιχεία, δομικά ή μη, που φέρουν κάποια οικονομική ή λειτουργική σημασία. Στη μέθοδο γίνεται εκτενής χρήση προσομοιώσεων monte carlo. Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία αφορά και εφαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο κτίριο κάθε φορά.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας FEMA P-58.

Στο πέμπτο κεφάλαιο των οδηγιών γίνεται αναφορά στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του κτιρίου. Παρουσιάζονται δύο διαδικασίες σχετικά με την εκτίμηση των διάμεσων των μεγεθών που επηρεάζουν και καθορίζουν την απόκριση από άποψη βλαβών, δομικών ή μη. Η πρώτη αφορά τη διενέργεια μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας, ενώ η δεύτερη βασίζεται στη χρήση μιας απλοποιητικής διαδικασίας, στην οποία χρησιμοποιείται γραμμική στατική ανάλυση και η δύναμη διαρροής (yield strength) της κατασκευής. Εστιάζοντας εδώ στην πρώτη εκ των δύο διαδικασιών, η αβεβαιότητα προέρχεται από τρεις πηγές, την αβεβαιότητα λόγω προσομοιώματος (modeling uncertainty), λόγω του αριθμού των καταγραφών (record to record variability), και λόγω της εδαφικής κίνησης (ground motion variability). Ειδικά για την πρώτη ή οποία ενδιαφέρει εδώ, η αβεβαιότητα προσομοιώματος,  $\beta_m$ , προκύπτει από ανακρίβειες όσον αφορά την προσομοίωση των μελών, της απόσβεσης και της μάζας, και υπολογίζεται ως διασπορά στα αποτελέσματα από τη σχέση:

$$\beta_m = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_q^2}, \quad (1.1)$$



όπου  $\beta_c$  είναι οι αβεβαιότητα σχετικά με τα στοιχεία του κτιρίου, όπως για παράδειγμα την αντοχή των υλικών ή τις ιδιότητες των μελών, τα οποία μπορεί να διαφέρουν από αυτά τα οποία έχουν θεωρηθεί. Η παράμετρος  $\beta_q$  αναφέρεται στην αβεβαιότητα λόγω της ποιότητας και των ελλείψεων του αναλυτικού μοντέλου που χρησιμοποιείται. Στα παρακάτω σχήματα Σχήμα 1.2, Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι τιμές των δύο συνιστωσών της αβεβαιότητας λόγω προσομοιώματος.

**Table 5-1 Values of Dispersion for Construction Quality Assurance,  $\beta_c$**

<b>Building Definition and Construction Quality Assurance</b>	<b><math>\beta_c</math></b>
<p><i>Superior Quality, New Buildings:</i> The building is completely designed and will be constructed with rigorous construction quality assurance, including special inspection, materials testing, and structural observation.</p> <p><i>Superior Quality, Existing Buildings:</i> Drawings and specifications are available and field investigation confirms they are representative of the actual construction, or if not, the actual construction is understood. Material properties are confirmed by extensive materials testing.</p>	0.10
<p><i>Average Quality, New Buildings:</i> The building design is completed to a level typical of design development; construction quality assurance and inspection are anticipated to be of limited quality.</p> <p><i>Average Quality, Existing Buildings:</i> Documents defining the building design are available and are confirmed by visual observation. Material properties are confirmed by limited materials testing.</p>	0.25
<p><i>Limited Quality, New Buildings:</i> The building design is completed to a level typical of schematic design, or other similar level of detail.</p> <p><i>Limited Quality, Existing Buildings:</i> Construction documents are not available and knowledge of the structure is based on limited field investigation. Material properties are based on default values typical for buildings of the type, location, and age of construction.</p>	0.40

Σχήμα 1.2: Αβεβαιότητα-διασπορά  $\beta_c$  μεθοδολογίας FEMA P-58.

**Table 5-2 Values of Dispersion for Quality of the Analytical Model,  $\beta_q$**

<b>Quality and Completeness of the Analytical Model</b>	<b><math>\beta_q</math></b>
<p><i>Superior Quality:</i> The numerical model is robust over the anticipated range of response. Strength and stiffness deterioration and all likely failure modes are explicitly modeled. Model accuracy is established with data from large-scale component tests through failure.</p> <p><i>Completeness:</i> The mathematical model includes all structural components and nonstructural components in the building that contribute to strength or stiffness.</p>	0.10
<p><i>Average Quality:</i> The numerical model for each component is robust over the anticipated range of displacement or deformation response. Strength and stiffness deterioration is fairly well represented, though some failure modes are simulated indirectly. Accuracy is established through a combination of judgment and large-scale component tests.</p> <p><i>Completeness:</i> The mathematical model includes most structural components and nonstructural components in the building that contribute significant strength or stiffness.</p>	0.25
<p><i>Limited Quality:</i> The numerical model for each component is based on idealized cyclic envelope curves from ASCE/SEI 41-06 or comparable guidelines, where strength and stiffness deterioration and failure modes are not directly incorporated in the model.</p> <p><i>Completeness:</i> The mathematical model includes structural components in the seismic-force-resisting system.</p>	0.40

Σχήμα 1.3: Αβεβαιότητα-διασπορά  $\beta_c$  μεθοδολογίας FEMA P-58.

Στις οδηγίες της FEMA με τίτλο FEMA P695 (2009) παρέχεται μία μεθοδολογία σχε- τικά με την εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς μέσα από την όσο το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Η χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας προτείνεται παράλληλα με τους κανονισμούς σχεδιασμού. Στο πέμπτο κεφάλαιο των οδηγιών, όπου αναφέρεται ανάπτυξη του μη γραμμικού μοντέλου, η αβεβαιότητα λόγω προσομοιώματος  $\beta_{MDL}$  εκφράζεται ως διασπορά επι των αποτελεσμάτων της απόκρισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4, ανάλογα με την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου. Η κατάταξη του μοντέλου από άποψη ποιότητα (A) Superior έως (D) Poor έγκειται στο κατά πόσο μπορεί να αποδώσει το εύρος των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την κατάρρευση (collapse). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, αναφέρεται σε ένα σύνολο κτιρίων, ενώ εξετάζει μόνο τη στάθμη επιτελεστικότητας της κατάρρευσης (collapse damage state).

Representation of Collapse Characteristics	Accuracy and Robustness of Models		
	High	Medium	Low
High. Index models capture the full range of the archetype design space and structural behavioral effects that contribute to collapse.	(A) Superior $\beta_{MDL} = 0.10$	(B) Good $\beta_{MDL} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{MDL} = 0.35$
Medium. Index models are generally comprehensive and representative of the design space and behavioral effects that contribute to collapse.	(B) Good $\beta_{MDL} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{MDL} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{MDL} = 0.50$
Low. Significant aspects of the design space and/or collapse behavior are not captured in the index models.	(C) Fair $\beta_{MDL} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{MDL} = 0.50$	--

Σχήμα 1.4: Αβεβαιότητα  $\beta_{MDL}$  μεθοδολογίας FEMA P695 κατά την ανάπτυξη του μη γραμμικού μοντέλου.

Αντίστοιχα στο έβδομο κεφάλαιο, ο προσδιορισμός της τρωτότητας κάθε συστήματος προσδιορίζεται από τη μεταβλητή  $S_{CT}$  η οποία είναι ίση με το γινόμενο της μέσης τιμής των επιταχύνσεων που οδηγούν σε κατάρρευση,  $S_{CT}$  και της μεταβλητής  $\lambda_{TOT}$  η οποία είναι λογαριθμοκανονική με μία μέση τιμή και διασπορά  $\beta_{TOT}$  όπου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TR}^2 + \beta_{MDL}^2}, \quad (1.2)$$

και αναφέρεται στη συνολική αβεβαιότητα του συστήματος, όπου η αβεβαιότητα προσομοιώματος,  $\beta_{MDL}$ , εισέρχεται σε συνδυασμό με τις λοιπές αβεβαιότητες που αφορούν κατά σειρά:  $\beta_{RTR}$  αβεβαιότητα σχετική με την κατάρρευση από καταγραφή σε καταγραφή (record to record collapse uncertainty),  $\beta_{DR}$  αβεβαιότητα λόγω σχεδιασμού (design requirements-related collapse uncertainty) και  $\beta_{TR}$  αβεβαιότητα λόγω δεδομένων που σχετίζονται με την κατάρρευση (test data-related collapse uncertainty).

Για συστήματα με πλαστιμότητα  $\mu_T$  μεγαλύτερη ή ίση του 3, οι τιμές τις  $\beta_{TOT}$  δίνονται όπως και οι αντίστοιχες τιμές της  $\beta_{MDL}$  ανάλογα με την ποιότητα του μοντέλου (A)-(D) και ανάλογα την ποιότητα των δεδομένων. Συνοπτικά εδώ στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζονται οι τιμές για ποιότητες μοντέλων (A) και (B).

**Table 7-2a Total System Collapse Uncertainty ( $\beta_{TOT}$ ) for Model Quality (A) Superior and Period-Based Ductility,  $\mu_T \geq 3$**

Quality of Test Data	Quality of Design Requirements			
	(A) Superior	(B) Good	(C) Fair	(D) Poor
(A) Superior	0.425	0.475	0.550	0.650
(B) Good	0.475	0.500	0.575	0.675
(C) Fair	0.550	0.575	0.650	0.725
(D) Poor	0.650	0.675	0.725	0.825

**Table 7-2b Total System Collapse Uncertainty ( $\beta_{TOT}$ ) for Model Quality (B) Good and Period-Based Ductility,  $\mu_T \geq 3$**

Quality of Test Data	Quality of Design Requirements			
	(A) Superior	(B) Good	(C) Fair	(D) Poor
(A) Superior	0.475	0.500	0.575	0.675
(B) Good	0.500	0.525	0.600	0.700
(C) Fair	0.575	0.600	0.675	0.750
(D) Poor	0.675	0.700	0.750	0.825

Σχήμα 1.5: Αβεβαιότητα  $\beta_{TOT}$  μεθοδολογίας FEMA P695.

Και στις δύο μεθοδολογίες που παρουσιάζονται παραπάνω, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές της διασποράς δεν προέρχονται από στοιχεία αναλύσεων, αλλά από εμπειρογνώμονες (Expert's opinions) βασισμένους σε πλαίσια πιθανοτικών θεωρήσεων.

Αναφορές σχετικές με την αβεβαιότητα προσομοιώματος, συναντάμε επίσης από τους Cornell et al (2002) όπου χρησιμοποιείται πιθανοτική ανάλυση για το προσδιορισμό της αβεβαιότητας σχετικής με την εδαφική κίνηση (ground motion), την σεισμική απαίτηση (demand) και την ικανότητα της κατασκευής (capacity) και ουσιαστικά παρέχεται η πιθανοτική θεώρηση η οποία χρησιμοποιείται σχεδόν από το σύνολο των μεταγενέστερων μελετών. Επίσης, από τους Chi et al (1997) διερευνάται μέσω διαφορετικών προσομοιωμάτων η σεισμική απόκριση 17-όροφου κτιρίου πλαισιακού φορέα το οποίο υπέστη βλάβες κατά το σεισμό του Northridge. Ακόμη, η αβεβαιότητα προσομοιώματος, κυρίως ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, μελετάται από τους Porter et al (2002), Wen et al (2003), Liel et al (2009), Vamvatsikos & Fragkiadakis (2010), Kazantzi & Vamvatsikos & Lignos (2014), ενώ αντίστοιχες μελέτες επικεντρωμένες σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουμε από τους Kwon et al (2006) και Jalayer et al (2010).

### 1.3 Οργάνωση των περιεχομένων

Το παρόν πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, αφορά στην εισαγωγή στο θέμα το οποίο μελετάται και την ανάλυση του στόχου της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική διερεύνηση επί του θέματος της αβεβαιότητας προσομοιώματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση του κτιρίου το οποίο μελετάται. Η εν λόγω παρουσίαση αρχικώς αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου τόσο σε κάτοψη όσο και σε όψη. Εν συνεχεία επεκτείνεται στην περιγραφή του στατικού συστήματος του φορέα και του συστήματος ανάληψης των σεισμικών δράσεων. Επίσης, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διατομών των δοκών και των υποστυλωμάτων. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα στοιχεία του υλικού τα οποία αφορούν στη διαπιστωμένη αντοχή του χάλυβα, η οποία αφορά τη διαδικασία της αποτίμησης, καθώς και τα στοιχεία των φορτίων-μαζών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην προσομοίωση του κτιρίου. Αρχικώς γίνεται αναφορά στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και πραγματοποίηση των αναλύσεων. Εν συνεχεία, γίνεται συνοπτική παρουσίαση των 5 συνολικά κατηγοριών προσομοιωμάτων οι οποίες μελετώνται στα πλαίσια της εργασίας. Επίσης, γίνεται αναφορά στο είδος των αναλύσεων που πραγματοποιούνται στα προσομοιώματα κάθε κατηγορίας, ενώ επίσης παρουσιάζονται τα στοιχεία των καταγραφών που χρησιμοποιούνται στην ικανοτική δυναμική ανάλυση.

Στα κεφάλαια τέσσερα έως οκτώ, γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των 5 κατηγοριών προσομοιωμάτων. Αρχικώς για κάθε μια κατηγορία παρουσιάζονται αναλυτικά τα προσομοιώματα εντός αυτής και ο τρόπος με τον οποίο αυτά δημιουργούνται, τόσο για τα προσομοιώματα με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας όσο και για αυτά με στοιχεία ινών. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης, της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης και της ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης στα προσομοιώματα. Ειδικά όσον αφορά την κατηγορία των μονοβαθμίων προσομοιωμάτων, παρουσιάζεται η πορεία δημιουργίας τους μέσω της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης και τα αποτελέσματα της ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης για ένα μονοβάθμιο προσομοίωμα προερχόμενο από κάθε κατηγορία πολυβαθμίων προσομοιωμάτων.

Στο ένατο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με τη σύγκριση των διαφόρων προσομοιωμάτων. Η σύγκριση γίνεται μέσω της διαμέσου των αποτελεσμάτων της ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης σε κάθε προσομοίωμα. Η εν λόγω σύγκριση γίνεται τόσο μεταξύ των προσομοιωμάτων εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης, όσο και μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών. Επίσης, συγκρίνεται η συνολική μέση απόκριση μεταξύ κάθε κατηγορίας. Τέλος, προτείνονται κάποια συνολικά αποτελέσματα για κάθε κατηγορία προσομοιωμάτων.

Στο δέκατο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, καταγράφονται τα όποια συμπεράσματα προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης πέραν των όποιων συμπερασμάτων, καταγράφονται και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα ώστε να επεκταθεί και κατά το δυνατόν να ολοκληρωθεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 2 Παρουσίαση του κτιρίου

### 2.1 Γενικά-Γεωμετρία φορέα

Το κτίριο το οποίο μελετάται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι ένα 20-όροφο σύγχρονα σχεδιασμένο μεταλλικό κτίριο με πλαισιακό φορέα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για το SAC LA20 Pre-Northridge όπως προτείνεται από τους Gupta & Krawinkler (1999) και τους Foutch & Yun το (2001). Πρόκειται για πρότυπο κτιρίου το οποίο βρίσκεται στο Los Angeles των ΗΠΑ, το οποίο είναι σχεδιασμένο με βάση τους κανονισμούς σχεδιασμού που ίσχυαν για κτίρια με πλαισιακή λειτουργία πριν από το σεισμό του Northridge το 1994, κατά τον οποίο προέκυψαν αστοχίες σε αυτή την κατηγορία κτιρίων τέτοιες που οδήγησαν στην αναθεώρηση της λογικής του σχεδιασμού.

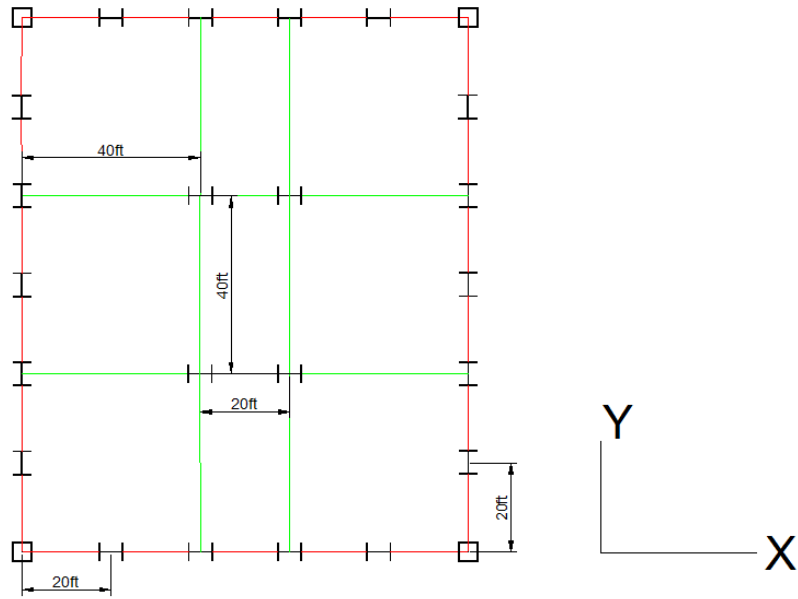
Η γεωμετρία του φορέα παρουσιάζεται στην κάτοψη (Σχήμα 2.1) και στην όψη ενός τυπικού πλαισίου ροπής στη διεύθυνση X (Σχήμα 2.2). Το κτίριο αποτελείται από 20 ορόφους και 2 υπόγεια. Το ύψος των υπογείων 2 και 1 είναι 12ft (1ft=30.48cm) ή 3.66m, το ισόγειο έχει ύψος 18ft ή 5.49m, ενώ οι υπόλοιποι 19 όροφοι έχουν ύψος 13ft ή 3.96m. Το κτίριο είναι κανονικό σε κάτοψη, ενώ οι διαστάσεις της κάτοψης του είναι 100ft ή 30.48m στη διεύθυνση X επί 120ft ή 36.57m στη διεύθυνση Y, δηλαδή συνολικό εμβαδόν κάθε ορόφου 1114.65m<sup>2</sup>.

Στην περίμετρο του κτιρίου είναι τοποθετημένα τα πλαίσια ροπής SMRF (Steel Moment Resisting Frame), με κόκκινο χρώμα στην κάτοψη, τα οποία είναι 5 ανοιγμάτων στη διεύθυνση X μήκους 20ft ή 6.10m και 6 αντίστοιχα ανοιγμάτων μήκους 20 ft στη διεύθυνση Y. Σε κάθε διεύθυνση η ανάλυση των σεισμικών δράσεων γίνεται από 2 πλαίσια ροπής. Επίσης, υπάρχει εσωτερικό βαρυντικό πλαίσιο, η σύνδεση του οποίου με τα περιμετρικά πλαίσια ροπής γίνεται μέσω δοκών οι οποίες φαίνονται με πράσινο χρώμα στην κάτοψη μήκους 40 ft ή 12.19m. Τα υποστυλώματα του βαρυντικού πλαισίου είναι τοποθετημένα όμοια με εκείνα των πλαισίων ροπής της διεύθυνσης X έτσι ο ισχυρός τους άξονας yy να είναι παράλληλος στην εγκάρσια κύρια διεύθυνση Y.

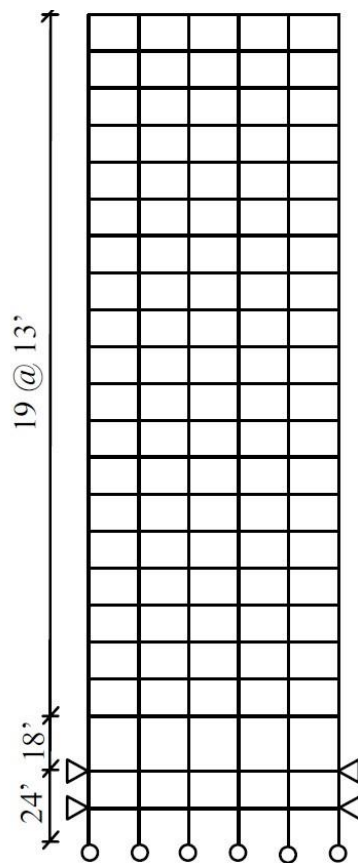
Οι συνδέσεις δοκών υποστυλωμάτων στα πλαίσια ροπής είναι συγκολλητές συνδέσεις ροπής δίχως απομείωση της διατομής της δοκού στον κόμβο δηλαδή όχι RBS (Reduced Beam Section). Οι συνδέσεις του βαρυντικού πλαισίου με τα περιμετρικά πλαίσια είναι απλές συνδέσεις τέμνουσας συγκολλητές όπως και οι συνδέσεις μεταξύ των υποστυλωμάτων του πλαισίου βαρύτητας. Η αποκατάσταση της συνέχειας των υποστυλωμάτων καθ' ύψος είναι πλήρης.

Στη σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου, λόγω της γεωμετρίας και του μεγάλου του ύψους παίζουν σημαντικό ρόλο τα καθολικά φαινόμενα δευτέρας τάξεως (P-Δ). Η πιο δύσκαμπτη διεύθυνση του κτιρίου είναι η Y με τα πλαίσια των 6 ανοιγμάτων. Επίσης, λόγω απουσίας τοιχωμάτων (συνδέσμων δυσκαμψίας), η συμπεριφορά του κτιρίου είναι πλησιέστερη στη διατμητική (shear building).





Σχήμα 2.1: Κάτοψη τυπικού ορόφου κτιρίου LA20.



Σχήμα 2.2: Πλαίσιο ροτής στη διεύθυνση X (βάσει Gupta & Krawinkler (1999)).

## 2.2 Στοιχεία διατομών μελών

Στα πλαίσια ροπής στις δύο διευθύνσεις, τα γωνιακά υποστυλώματα είναι κοιλοδοκοί τετραγωνικής διατομής HSS (Hollow Square Sections), ώστε να συμμετέχουν στην λειτουργία των πλαισίων ροπής και στις δύο διευθύνσεις. Τα εσωτερικά υποστυλώματα είναι διατομής διπλής συμμετρίας ή διπλά ταυ βάσει των αμερικάνικων προδιαγραφών (W sections), τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να κάμπτονται περί των ισχυρό τους άξονα σε κάθε διεύθυνση στην οποία συμμετέχουν στην ανάληψη των σεισμικών δράσεων μέσω της πλαισιακής λειτουργίας. Οι δοκοί των πλαισίων ροπής (girders) είναι επίσης διπλά ταυ W. Σε κάθε όροφο οι διατομές των γωνιακών υποστυλωμάτων, των εσωτερικών υποστυλωμάτων και των δοκών στα πλαίσια ροπής είναι ενιαίες και για τις δύο διευθύνσεις. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι διατομές των μελών στα πλαίσια ροπής.

Πίνακας 2.1: Διατομές των γωνιακών υποστυλωμάτων, των εσωτερικών υποστυλωμάτων και των δοκών καθ' ύψος στα πλαίσια ροπής (in). Σε παρένθεση οι συνδέσεις καθ' ύψος με ή χωρίς αλλαγή διατομής (βάσει Gupta & Krawinkler (1999)).

Όροφος/Πάτωμα	Γωνιακά Υποστυλώματα (HSS)	Εσωτερικά Υποστυλώματα (W)	Δοκοί Πλαισίων (W)
-2/-1	15X15X2.00	W24X335	W14X22
-1/1	15X15X2.00	W24X335	W30X99
1/2	15X15X2.00	W24X335	W30X99
2/3	15X15X2.00 (15X15X1.25)	W24X335 (W24X335)	W30X99
3/4	15X15X1.25	W24X335	W30X99
4/5	15X15X1.25	W24X335	W30X99
5/6	15X15X1.25 (15X15X1.00)	W24X335 (W24X229)	W30X108
6/7	15X15X1.00	W24X229	W30X108
7/8	15X15X1.00	W24X229	W30X108
8/9	15X15X1.00 (15X15X1.00)	W24X229 (W24X229)	W30X108
9/10	15X15X1.00	W24X229	W30X108
10/11	15X15X1.00	W24X229	W30X108
11/12	15X15X1.00 (15X15X1.00)	W24X229 (W24X192)	W30X99
12/13	15X15X1.00	W24X192	W30X99
13/14	15X15X1.00	W24X192	W30X99
14/15	15X15X1.00 (15X15X0.75)	W24X192 (W24X131)	W30X99
15/16	15X15X0.75	W24X131	W30X99
16/17	15X15X0.75	W24X131	W30X99
17/18	15X15X0.75 (15X15X0.75)	W24X131 (W24X117)	W27X84
18/19	15X15X0.75	W24X117	W27X84
19/20	15X15X0.75 (15X15X0.50)	W24X117 (W24X84)	W24X62
20/Οροφή	15X15X0.50	W24X84	W21X50

Στο εσωτερικό πλαίσιο για την παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων, τα υποστυλώματα είναι διατομής διπλού ταυ (W sections), όπως και οι διατομές των δοκών. Και εδώ οι διατομές των υποστυλωμάτων είναι οι ίδιες σε κάθε όροφο και για τα τέσσερα υποστυλώματα, ενώ για τις δοκούς διαφοροποιούνται οι διατομές μεταξύ των δοκών με μήκος 20ft και αυτών με μήκος 40ft. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι διατομές των μελών των βαρυντικών πλαισίων καθ' ύψος του κτιρίου.

Πίνακας 2.2: Διατομές των υποστυλωμάτων, των δοκών μήκους 20ft και των δοκών μήκους 40ft καθ' ύψος στο πλαίσιο βαρύτητας (in). Σε παρένθεση οι συνδέσεις καθ' ύψος με ή χωρίς αλλαγή διατομής (βάσει Gupta & Krawinkler (1999)).

Όροφος/Πάτωμα	Υποστυλώματα (W)	Δοκοί μήκους 20ft (W)	Δοκοί μήκους 40ft (W)
-2/-1	W14X550	W14X22	W21X50
-1/1	W14X550	W16X26	W24X68
1/2	W14X550	W14X22	W21X50
2/3	W14X550 (W14X455)	W14X22	W21X50
3/4	W14X455	W14X22	W21X50
4/5	W14X455	W14X22	W21X50
5/6	W14X455 (W14X370)	W14X22	W21X50
6/7	W14X370	W14X22	W21X50
7/8	W14X370	W14X22	W21X50
8/9	W14X370 (W14X311)	W14X22	W21X50
9/10	W14X311	W14X22	W21X50
10/11	W14X311	W14X22	W21X50
11/12	W14X311 (W14X257)	W14X22	W21X50
12/13	W14X257	W14X22	W21X50
13/14	W14X257	W14X22	W21X50
14/15	W14X257 (W14X176)	W14X22	W21X50
15/16	W14X176	W14X22	W21X50
16/17	W14X176	W14X22	W21X50
17/18	W14X176 (W14X109)	W14X22	W21X50
18/19	W14X109	W14X22	W21X50
19/20	W14X109 (W14X43)	W14X22	W21X50
20/Οροφή	W14X43	W12X16	W21X44



## 2.3 Στοιχεία υλικού-Φορτία

Ο δομικός χάλυβας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε είναι ο ASTM A.36 1961-1990. Η ονομαστική του αντοχή διαρροής είναι 36ksi (1ksi=6.894757MPa) δηλαδή περίπου 248MPa, το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) είναι 200GPa και ο λόγος Poisson είναι 0.3. Ωστόσο, επειδή κατά την αποτίμηση δε χρησιμοποιείται η ονομαστική αντοχή αλλά η αναμενόμενη-διαπιστωμένη τιμή αυτής, στις αναλύσεις χρησιμοποιείται η τιμή  $f_y=49.2\text{ksi}$  δηλαδή περίπου 340MPa. Η τιμή αυτή της αντοχής διαρροής λαμβάνεται στην παρούσα εργασία τόσο για τα υποστυλώματα όσο και για τις δοκούς.

Οι μάζες οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης του κτιρίου, παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.3 όπως δίνονται από τους Gupta και Krawinkler (1999). Προφανώς τα υπόγεια, τα οποία δε συμμετέχουν στη δυναμική απόκριση της κατασκευής δεν έχουν μάζα. Τα αντίστοιχα κατακόρυφα φορτία προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας της μάζα επί την επιτάχυνση βαρύτητας ( $g=9,81\text{m/s}^2$ ). Οι τιμές αυτές προέκυψαν από το συνυπολογισμό του ίδιου βάρους του χάλυβα, των μόνιμων και κινητών φορτίων, καθώς και από τα φορτία των στηθαίων των επενδύσεων κλπ. Οι μάζες αντιστοιχούν σε κάθε διάφραγμα (στάθμη ορόφου), ενώ τα κατακόρυφα φορτία κατανέμονται στα υποστυλώματα με βάση την ζώνη επιρροής τους όπως παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Η απόσβεση της κατασκευής είναι 2% όπως λαμβάνεται για μεταλλικό κτίριο με συγκολλητές συνδέσεις.

Πίνακας 2.3: Μάζες ορόφων κτιρίου LA20 (βάσει Gupta & Krawinkler (1999), (1 kpf=1000lbf όπου 1lbf=4.448222N).

Όροφος	Μάζα ( kps <sup>2</sup> /ft )
Οροφή ισογείου	38.63
Οροφή ορόφων 1-19	37.76
Οροφή ορόφου 20	40.06



## **3 Προσομοίωση του κτιρίου-Αναλύσεις**

### **3.1 Κατηγορίες προσομοιωμάτων**

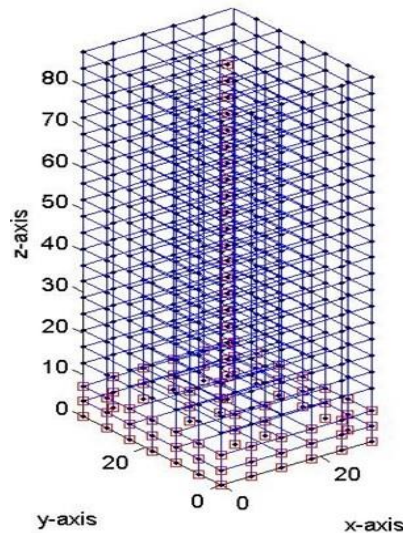
Η προσομοίωση του κτιρίου ξεκινώντας από την ανάπτυξη του τρισδιάστατου προσομοιώματος και ακολουθώντας πορεία απλοποίησης του προσομοιώματος καταλήγει στο ισοδύναμο μονοβάθμιο προσομοίωμα του κτιρίου. Συνολικά μελετώνται 5 διαφορετικές κατηγορίες προσομοιωμάτων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την απλοποίηση του προσομοιώματος εξετάζεται μόνο η διεύθυνση X με το πλαίσιο ροπής 5 ανοιγμάτων ως η δυσμενέστερη, καθώς πρόκειται για την πιο εύκαμπτη διεύθυνση της κατασκευής.

Για την προσομοίωση του κτιρίου και τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), το οποίο μέσω ανάπτυξης κώδικα πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει την προσομοίωση σεισμών σε προσομοιώματα κατασκευών. Η προσομοίωση γίνεται με πεπερασμένα στοιχεία δοκού-στύλου, ενώ προσομοιώνονται μόνο τα κύρια στοιχεία (δοκοί-υποστυλώματα) του κτιρίου. Επίσης, το μήκος των στοιχείων δίνεται για τα υποστυλώματα ίσο με το μήκος του εκάστοτε ορόφου, ενώ για τις δοκούς ίσο με το μήκος του ανοίγματος το οποίο συνδέουν δίχως να προσομοιώνεται ξεχωριστά η περιοχή της σύνδεσης (panel zone).

Συνολικά από τις 5 κατηγορίες προσομοίωσης έχουμε 36 προσομοιώματα, 18 από τις 4 κατηγορίες πολυβαθμίων και τα αντίστοιχα 18 μονοβάθμια προσομοιώματα. Στον Πίνακα 3.1 στο τέλος της παρούσας ενότητας παρουσιάζεται συγκεντρωτικά για τις 5 κατηγορίες προσομοίωσης το όνομα και ο κωδικός κάθε προσομοιώματος, προκειμένου να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των διαφορών προσομοιωμάτων και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αυτών στα επόμενα κεφάλαια.

#### **3.1.1 Τρισδιάστατο προσομοίωμα**

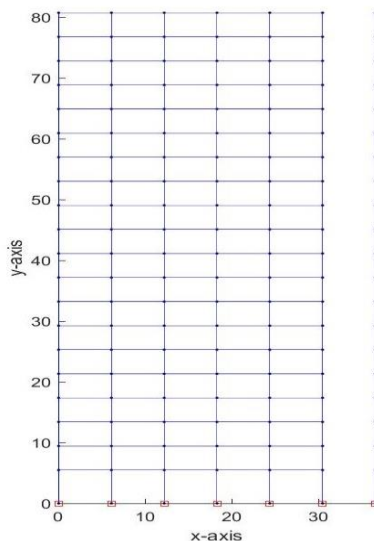
Πρόκειται για το τρισδιάστατο προσομοίωμα της κατασκευής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Είναι το τέλειο προσομοίωμα από άποψης ακρίβειας. Προσομοιώνονται οι 20 όροφοι και τα 2 υπόγεια ενώ προσομοιώνονται τόσο τα στοιχεία (δοκοί-υποστυλώματα) των περιμετρικών πλαισίων ροπής όσο και αυτά του εσωτερικού βαρυτικού πλαισίου. Στην εργασία μελετώνται 3 διαφορετικά τρισδιάστατα προσομοιώματα, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, η διαφοροποίηση των οποίων έγκειται στην προσομοίωση των διατομών και των μελών. Η συγκεκριμένη κατηγορία προσομοιωμάτων αναφέρεται και ως LA20 3D FRAME.



Σχήμα 3.1: Τρισδιάστατο προσομοίωμα κτιρίου (LA20 3D FRAME).

### 3.1.2 Δισδιάστατο προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων

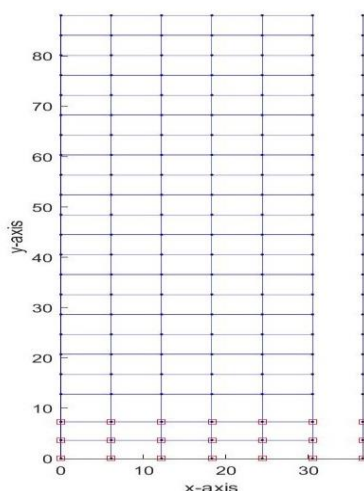
Η δεύτερη κατηγορία προσομοιωμάτων αναφέρεται στη δισδιάστατη προσομοίωση μόνο των 20 ορόφων του κτιρίου χωρίς τα 2 υπόγεια. Στη συγκεκριμένη κατηγορία προσομοιώνεται το ένα εκ των δύο πλαισίων 5 ανοιγμάτων που μετέχουν στην ανάληψη των σεισμικών δράσεων στη διεύθυνση X. Επίσης, σε επίπεδο ορόφου τα χαρακτηριστικά των διατομών, δοκών και υποστυλωμάτων, όπως και τα φορτία είναι ενιαία σε κάθε μέλος και ίσα με των μέσο όρο των τιμών των στοιχείων του ορόφου. Στην κατηγορία αυτή μελετώνται 6 διαφορετικά προσομοιώματα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το προσομοίωμα της συγκεκριμένης κατηγορίας. Ο στύλος που φαίνεται στο σχήμα να είναι ασύνδετος με τους υπόλοιπους, τοποθετείται για να ληφθούν υπόψη τα καθολικά φαινόμενα δευτέρας τάξεως (P-Δ) (leaning column), τεχνική η οποία χρησιμοποιείται και στις υπόλοιπες κατηγορίες δισδιάστατων προσομοιωμάτων. Η συγκεκριμένη κατηγορία αναφέρεται και ως LA20 2D 20 FRAME.



Σχήμα 3.2: Δισδιάστατο προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων (LA20 2D 20 FRAME).

### 3.1.3 Δισδιάστατο προσομοίωμα πλήρους πλαισίου

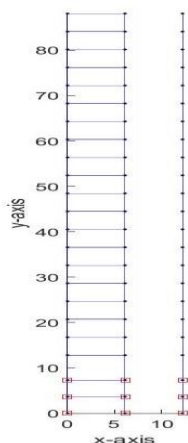
Η τρίτη κατηγορία προσομοιωμάτων Σχήμα 3.3, αφορά τη δισδιάστατη προσομοίωση τόσο των 20 ορόφων όσο και των δύο υπογείων του κτιρίου. Και εδώ προσομοιώνεται το ένα εκ των δύο πλαισίων ροπής στη διεύθυνση X. Εδώ τα χαρακτηριστικά των διατομών και τα φορτία είναι τα ακριβή στοιχεία κάθε διατομής και όχι ο μέσος όρος όπως στην προηγούμενη κατηγορία. Μελετώνται 4 διαφορετικά προσομοιώματα σε αυτή την κατηγορία τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6. Η συγκεκριμένη κατηγορία αναφέρεται και ως LA20 2D REAL FRAME.



Σχήμα 3.3: Δισδιάστατο προσομοίωμα πλήρους πλαισίου (LA20 2D REAL FRAME).

### 3.1.4 Δισδιάστατο προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος

Η τελευταία κατηγορία δισδιάστατων προσομοιωμάτων, αφορά στην προσομοίωση του πλαισίου ροπής 5 ανοιγμάτων στη διεύθυνση X, μέσω ενός ισοδύναμου πλαισίου 1 ανοίγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Στην κατηγορία αυτή προσομοιώνονται τόσο οι 20 όροφοι όσο και τα δύο υπόγεια του κτιρίου. Τα 5 διαφορετικά προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7. Η συγκεκριμένη κατηγορία αναφέρεται και ως LA20 2D ONE BAY FRAME.



Σχήμα 3.4: Δισδιάστατο προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος (LA20 2D ONE BAY FRAME.)

### 3.1.5 Μονοβάθμιο προσομοίωμα

Για κάθε ένα από τα 18 προσομοιώματα του κτιρίου που αναφέρονται παραπάνω παράγεται μέσω της ανάλυσης Pushover το αντίστοιχο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα και μελετάται η σεισμική του απόκριση. Η δημιουργία των ισοδύναμων μονοβαθμίων και τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8. Η συγκεκριμένη κατηγορία αναφέρεται και ως LA20 SDOF.

Πίνακας 3.1: Ονομασία και κωδικός προσομοιώματος στις 5 κατηγορίες προσομοίωσης.

A/A	Κατηγορία Προσομοίωσης	Όνομα Προσομοιώματος	Κωδικός
1	3Δ Προσομοίωμα	LA20 3D FRAME ELC	301
2	3Δ Προσομοίωμα	LA20 3D FRAME UNELC	302
3	3Δ Προσομοίωμα	LA20 3D FRAME FBS	303
4	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων	LA20 2D 20 FRAME ELC	2201
5	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων	LA20 2D 20 FRAME EP	2202
6	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων	LA20 2D 20 FRAME EHNRL1	2203
7	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων	LA20 2D 20 FRAME EHNRL2	2204
8	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων	LA20 2D 20 FRAME EHNRL2	2205
9	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων	LA20 2D 20 FRAME FBS	2206
10	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου	LA20 2D REAL FRAME ELC	201
11	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου	LA20 2D REAL FRAME UNELC	202
12	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου	LA20 2D REAL FRAME FBS	203
13	2Δ Προσομοίωμα πλήρους πλαισίου	LA20 2D REAL FRAME MXED	204
14	2Δ Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος	LA20 2D ONE BAY FRAME ELC	211
15	2Δ Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος	LA20 2D ONE BAY FRAME EP	212
16	2Δ Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος	LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1	213
17	2Δ Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος	LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1	214
18	2Δ Προσομοίωμα ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος	LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL2	215
19	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 3D ELC	1301
20	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 3D UNELC	1302
21	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 3D FBS	1303
22	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D 20 ELC	12201
23	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D 20 EP	12202
24	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D 20 EHNRL1	12203
25	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D 20 EHNRL2	12204
26	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D 20 EHNRL2	12205
27	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D 20 FBS	12206
28	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D REAL ELC	1201
29	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D REAL UNELC	1202
30	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D REAL FBS	1203
31	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D REAL MXED	1204
32	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY ELC	1211
33	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY EP	1212
34	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY EHNRL1	1213
35	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY EHNRL2	1214
36	1Δ Προσομοίωμα	LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY EHNRL2	1215

## 3.2 Αναλύσεις στα προσομοιώματα

### 3.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση- Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis)

Σε κάθε προσομοίωμα, αρχικώς πραγματοποιείται ιδιομορφική ανάλυση για την εκτίμηση των ιδιοπεριόδων ταλάντωσης της κατασκευής. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η πλέον εύκαμπτη διεύθυνση της κατασκευής είναι η διεύθυνση X, επομένως, και λόγω κανονικότητας του κτιρίου, η πρώτη ιδιομορφή είναι κυρίως μεταφορική κατά X.

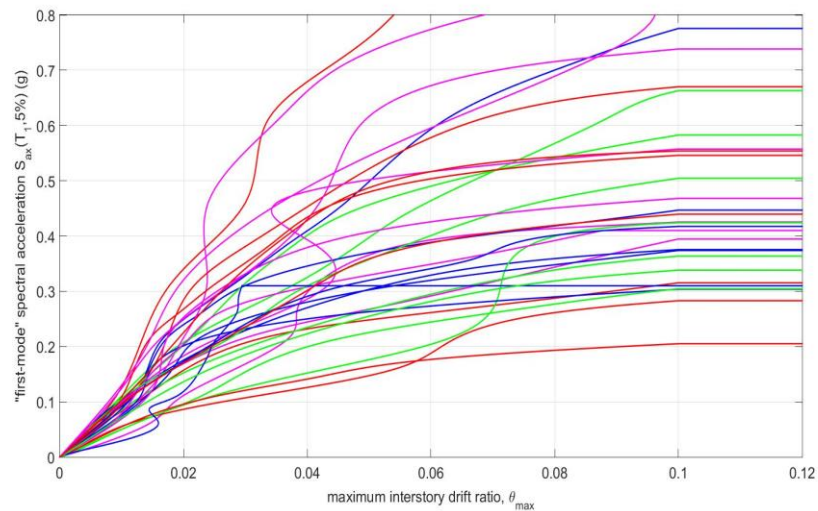
Επίσης, πραγματοποιείται στατική μη γραμμική ανάλυση μέσω της μεθόδου σταδιακής προσαύξησης της οριζόντιας φόρτισης, μέθοδος γνωστή ως Pushover Analysis. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί έναν γρήγορο τρόπο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας σχεδιασμένης κατασκευής σε οριζόντια φόρτιση. Η μέθοδος βασίζεται στην απόκριση σε οριζόντια φόρτιση του ισοδύναμου μονοβάθμιου της κατασκευής (ESDOF) και μέσω αυτής εξάγεται η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής, η οποία συνήθως είναι της μορφής τέμνουσα βάσης με μετακίνηση κορυφής ( $V_b$ - $\delta_{roof}$ ). Ωστόσο, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μεθόδου περιορίζεται κυρίως σε κανονικά κτίρια χαμηλού ύψους των οποίων η συμπεριφορά σε οριζόντια φόρτιση καθορίζεται από την πρώτη ιδιομορφή ταλάντωσης (Ποσοστό συμμετοχής ή δρώσα ιδιομορφική μάζα πρώτης ιδιομορφής πάνω από 90%). Στην περίπτωση του κτιρίου μας, το μεγάλο ύψος και το ποσοστό συμμετοχής πρώτης ιδιομορφής, το οποίο σε όλα τα προσομοιώματα είναι κάτω από 90% καθιστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pushover επισφαλής. Ωστόσο, το χαμηλό υπολογιστικό κόστος της μεθόδου σε συνδυασμό με την εξαγωγή μέσω αυτής των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων του κτιρίου (LA20 SDOFs) οδηγούν στη χρήση της.

### 3.2.2 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA)

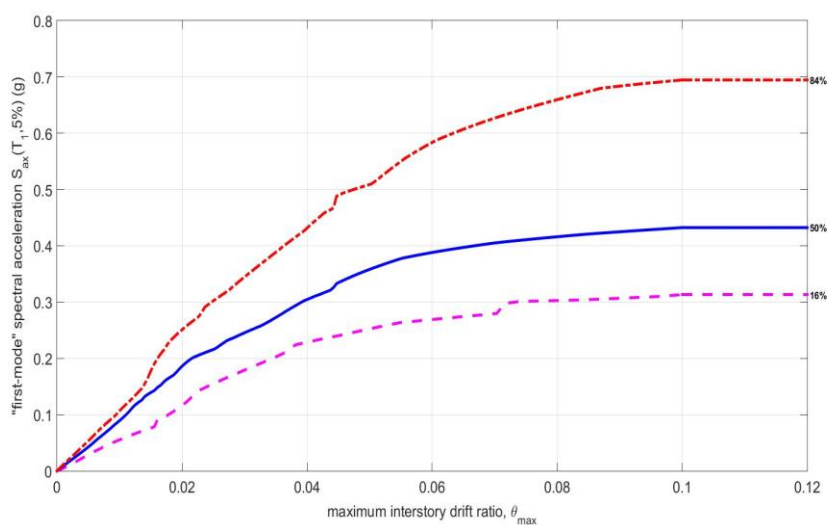
Προκειμένου να γίνει η σύγκριση της σεισμικής απόκρισης του κτιρίου βάσει των διαφορετικών προσομοιωμάτων, πραγματοποιείται μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας μέσα από τη μέθοδο IDA ή αλλιώς Ικανοτική Δυναμική ανάλυση, όπως προτάθηκε από τους Vamvatsikos & Cornell το 2002. Η μέθοδος, συνοπτικά, αναφέρεται στη διενέργεια μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων μέσα από την κλιμάκωση δεδομένων σεισμικών εδαφικών καταγραφών σε διαφορετικά επίπεδα έντασης. Η κλιμάκωση γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μελετηθεί το συνολικό φάσμα συμπεριφοράς της κατασκευής από την απόκριση της στην ελαστική περιοχή σε χαμηλά επίπεδα έντασης μέχρι την ανελαστική περιοχή και τελικώς στην κατάρρευση σε υψηλότερα επίπεδα έντασης.

Στην παρούσα εργασία, ως μέτρο έντασης IM (Intensity Measure) το οποίο στη μέθοδο αποτελεί το χαρακτηριστικό της κίνησης του εδάφους, επιλέγεται η φασματική επιτάχυνση στην πρώτη ιδιομορφή  $S_a(T_1, 5\%)$  και ως παράμετρος απόκρισης της κατασκευής EDP (Engineering Demand Parameter) η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση των ορόφων της κατασκευής  $\theta_{max}$  (maximum interstorey drift). Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι η απόσβεση στο μέτρο έντασης είναι πάντα 5% ανεξάρτητα από την απόσβεση της κατασκευής. Επίσης, προκειμένου τα αποτελέσματα μεταξύ τρισδιάστατων, δισδιάστατων και μονοβάθμιων προσομοιωμάτων να είναι άμεσα συγκρίσιμα, ως παράμετρος απόκρισης  $\theta_{max}$  και στα τρισδιάστατα προσομοιώματα, λαμβάνεται η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση των ορόφων στη διεύθυνση X αντί για την τιμή της επαλληλίας SRSS των μέγιστων γωνιακών παραμορφώσεων στις δύο διευθύνσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποτυπώνονται σε καμπύλες IM-EDP ( $S_a(T_1, 5\%)$  -  $\theta_{max}$ ) (Σχήμα 3.5). Επίσης, προκειμένου να γίνει η σύγκριση μεταξύ των αποκρίσεων βάσει προσομοιώματος, υπολογίζονται τα ποσοστημόρια που αντιστοιχούν σε πιθανότητα υπέρβασης της εκάστοτε τιμής  $\theta_{max}$  ίση με 16%, 50% (διάμεση καμπύλη IDA), 84%.

Συνολικά, χρησιμοποιούνται 30 πραγματικές σεισμικές καταγραφές τα στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Συγκεκριμένα, στα τρισδιάστατα μοντέλα εισάγονται και οι δύο οριζόντιες συνιστώσες (X,Y) των καταγραφών, ενώ στα δισδιάστατα μοντέλα μόνο οι συνιστώσες στη διεύθυνση X. Δεν μελετώνται οι κατακόρυφες συνιστώσες των καταγραφών κατά διενέργεια της ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης. Κάθε καταγραφή κλιμακώνεται σε 10 διαφορετικά επίπεδα έντασης, επομένως σε κάθε προσομοίωμα εκτελούνται 300 μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις. Τα εν λόγω 10 σημεία ενώνονται με χρήση spline (spline interpolation) προκειμένου να παραχθεί η καμπύλη IDA.



Σχήμα 3.5: Καμπύλες ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA curves).



Σχήμα 3.6: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA curves).



Πίνακας 3.2: Καταγραφές που χρησιμοποιούνται στην IDA όπως λήφθηκαν από τη βάση καταγραφών του PEER ( Pacific Earthquake Engineering Research Center). Παρουσιάζονται για κάθε καταγραφή το σεισμικό γεγονός από το οποίο προέρχεται η καταγραφή, το μέγεθος του σεισμού  $M$ , η απόσταση της καταγραφής από το ρήγμα  $R_{jb}$ , η θέση της καταγραφής, η διεύθυνση σε μοίρες των δύο συνιστωσών της εδαφικής κίνησης όπως εφαρμόστηκαν στις διευθύνσεις X και Y, και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA (Peak Ground Acceleration) σε κάθε διεύθυνση.

A/A	Σεισμικό Γεγονός	M	$R_{jb}$ (km)	Θέση Καταγραφής	Διεύθυνση (X) (Y)	PGA(g) (X) (Y)
1	Superstition Hills 24/11/87	6.54	22.25	Plaster City	(045) (135)	(0.121) (0.186)
2	Superstition Hills 24/11/87	6.54	17.03	Brawley Airport	(225) (315)	(0.156) (0.116)
3	Superstition Hills 24/11/87	6.54	23.85	Wildlife Liquefaction Array	(090) (360)	(0.181) (0.207)
4	Superstition Hills 24/11/87	6.54	13.03	Westmoreland Fire Station	(090) (180)	(0.172) (0.210)
5	Superstition Hills 24/11/87	6.54	18.20	El Centro Imp. Co Cent	(000) (090)	(0.358) (0.258)
6	San Fernando 09/02/71	6.61	22.77	LA Hollywood Store	(090) (180)	(0.210) (0.174)
7	Imperial Valley 15/10/79	6.53	7.29	Chihuahua	(012) (282)	(0.270) (0.254)
8	Imperial Valley 15/10/79	6.53	30.33	Plaster City	(045) (135)	(0.042) (0.057)
9	Imperial Valley 15/10/79	6.53	13.52	Compuertas	(015) (285)	(0.186) (0.147)
10	Imperial Valley 15/10/79	6.53	17.94	El Centro Array #12	(140) (230)	(0.143) (0.116)
11	Imperial Valley 15/10/79	6.53	21.98	El Centro Array #13	(140) (230)	(0.117) (0.139)
12	Imperial Valley 15/10/79	6.53	14.75	Westmoreland Fire Station	(090) (180)	(0.074) (0.110)
13	Imperial Valley 15/10/79	6.53	19.76	El Centro Array #1	(140) (230)	(0.140) (0.134)
14	Northridge 17/01/94	6.69	36.90	Leona Valley #2	(000) (090)	(0.091) (0.063)
15	Northridge 17/01/94	6.69	35.46	Lake Hughes #1	(000) (090)	(0.087) (0.077)
16	Northridge 17/01/94	6.69	19.73	Hollywood Storage FF	(090) (360)	(0.231) (0.358)
17	Northridge 17/01/94	6.69	23.5	Baldwin Hills	(090) (360)	(0.239) (0.168)
18	Northridge 17/01/94	6.69	0.00	Canoga Park –Topanga Canyon	(106) (196)	(0.356) (0.420)
19	Northridge 17/01/94	6.69	12.42	LA- Faring Rd	(000) (090)	(0.273) (0.242)
20	Northridge 17/01/94	6.69	25.66	LA- Fletcher Dr	(144) (234)	(0.161) (0.240)
21	Northridge 17/01/94	6.69	20.36	Centinela St	(155) (245)	(0.465) (0.322)
22	Northridge 17/01/94	6.69	21.64	Glendale Las Palmas	(177) (267)	(0.357) (0.206)
23	Loma Prieta 18/10/89	6.93	24.52	Hollister Differential Array	(165) (255)	(0.269) (0.279)
24	Loma Prieta 18/10/89	6.93	11.03	WAHO	(000) (090)	(0.370) (0.638)
25	Loma Prieta 18/10/89	6.93	30.25	Halls Valley	(000) (090)	(0.134) (0.102)
26	Loma Prieta 18/10/89	6.93	24.24	Agnews State Hospital	(000) (090)	(0.172) (0.159)
27	Loma Prieta 18/10/89	6.93	19.90	Anderson Dam Downstream	(270) (360)	(0.244) (0.240)
28	Loma Prieta 18/10/89	6.93	20.44	Coyote Lake Dam (Downst.)	(195) (285)	(0.160) (0.179)
29	Loma Prieta 18/10/89	6.93	23.92	Sunnyvale Colton Ave.	(270) (360)	(0.207) (0.209)
30	Loma Prieta 18/10/89	6.93	27.67	Hollister South & Pine	(000) (090)	(0.370) (0.178)



## 4 Τρισδιάστατη προσομοίωση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην κατηγορία των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων έχουμε 3 διαφορετικά προσομοιώματα. Η διαφορά μεταξύ των τριών έγκειται στη διαφορετική προσομοίωση σε επίπεδο τύπου μέλους και διατομής. Στην τρισδιάστατη προσομοίωση προσομοιώνονται όλα τα δομικά μέλη της κατασκευής, δηλαδή τόσο τα περιμετρικά πλαίσια για την ανάληψη των σεισμικών δράσεων όσο και τα στοιχεία του εσωτερικού πλαισίου για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων. Στα επόμενα, παρουσιάζονται τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα και ακολούθως τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε αυτά.

### 4.1 Προσομοίωση

#### 4.1.1 Γενικά

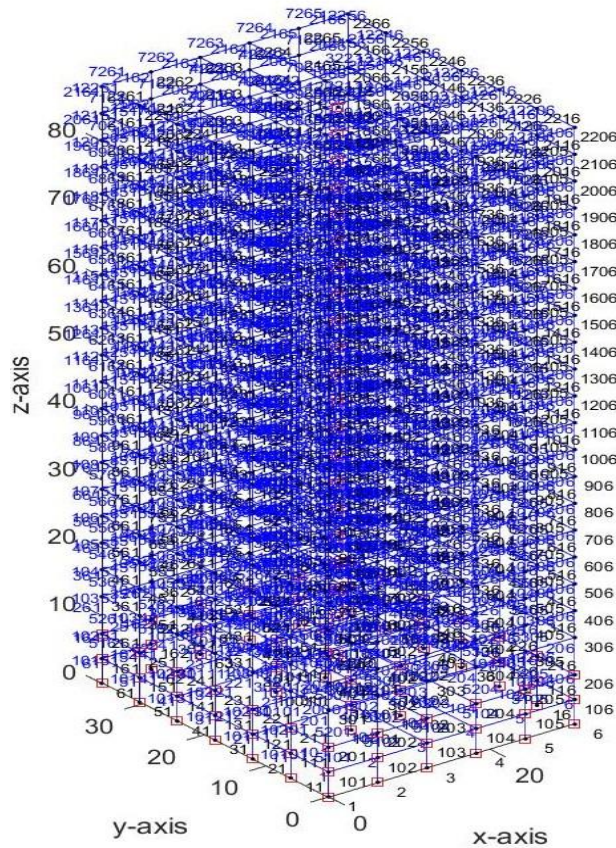
Για την προσομοίωση έγινε χρήση πεπερασμένων στοιχείων δοκού-στύλου. Οι διαστάσεις των ανοιγμάτων των ορόφων και των μελών είναι αυτές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2. Στα δύο πρώτα προσομοιώματα χρησιμοποιούνται στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας ή σημειακής πλαστιμότητας (*lumped plasticity members*) στα οποία το ελαστικό τμήμα του μέλους περιβάλλεται από δύο στρωφικά ελατήρια στα άκρα για την προσομοίωση των πλαστικών αρθρώσεων, ενώ στο τρίτο χρησιμοποιούνται στοιχεία κατανεμημένης πλαστικότητας και συγκεκριμένα στοιχεία ινών (*fiber sections*), όπου κάθε ίνα αποτελεί ένα μονοαξονικό ελατήριο στο οποίο δίνεται ο νόμος υλικού ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) και παράγεται η καμπύλη ( $M$ - $\theta$ ) στη διατομή.

Και στις τρεις εκδοχές ο κάρναβος και αρίθμηση μελών και κόμβων είναι ίδια όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, όπου με μαύρο χρώμα παρουσιάζεται η αρίθμηση των κόμβων και με μπλε των μελών. Η προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας γίνεται με χρήση κινηματικής δέσμευσης στο κάθε διάφραγμα (οροφή ορόφου). Η προσομοίωση των δύο υπογείων, δεδομένου ότι δε μετέχουν στη σεισμική απόκριση, ουσιαστικά γίνεται προκειμένου να προσομοιωθεί η δυσκαμψία της σύνδεσης των υποστυλωμάτων στη στάθμη του εδάφους, αντί να χρησιμοποιηθεί πακτωμένη πλήρη σύνδεση. Οι κόμβοι του υπογείου δεσμεύονται σχετικά με τη δυνατότητα οριζόντιας μετακινήσεις ενώ η σύνδεση στη βάση των υποστυλωμάτων του δευτέρου υπογείου δίνεται αρθρωτή ( $t_x, t_y$  ελεύθερα).

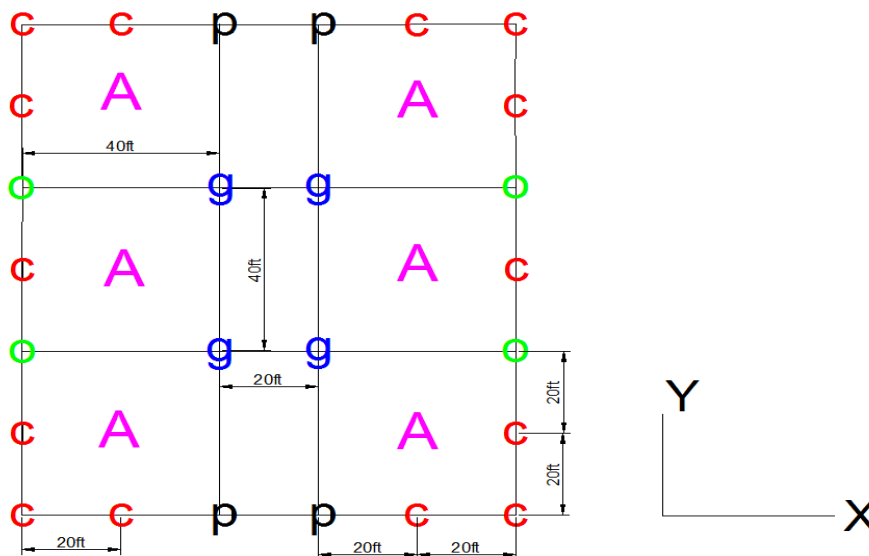
Οι μάζες δίνονται στο κέντρο κάθε διαφράγματος βάσει των τιμών που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2. Τα κατακόρυφα φορτία δίνονται απευθείας στα υποστυλώματα με βάση την ζώνη επιρροής του καθενός. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, έχουμε 4 διαφορετικές κατηγορίες υποστυλωμάτων με βάση τα φορτία που παίρνει το καθένα. Με βάση τη μάζα κάθε ορόφου, υπολογίζουμε την κατανεμημένη μάζα  $d_{mass}$  διαιρώντας την ολική μάζα με το εμβαδόν της κάτοψης του ορόφου που είναι  $12000\text{ft}^2$  ( $l_x=100\text{ft}$  επί  $l_y=120\text{ft}$ ). Εν συνεχεία, από την παρακάτω σχέση υπολογίζονται τα φορτία των βασικών τετραγωνικών επιφανειών φόρτισης (Σχήμα 4.2), εμβαδού 2 ανοιγμάτων των πλαισίων στη διεύθυνση X επί 2 ανοιγμάτων στη διεύθυνση Y ( $2 \cdot cDist_x=40\text{ft}$  επί  $2 \cdot cDist_y=40\text{ft}$ ),  $A$ :

$$A = d_{mass} \cdot 2 \cdot cDist_x \cdot 2 \cdot cDist_y \cdot g, \quad (4.1)$$

Το συνολικό φορτίο του κάθε ορόφου είναι  $7.5A$ . Έτσι, τα υποστυλώματα  $c$  παίρνουν φορτίο  $2A/16$ , τα υποστυλώματα  $p$   $5A/16$ , τα υποστυλώματα  $o$   $6A/16$  και τέλος τα υποστυλώματα του εσωτερικού βαρυντικού πλαισίου  $g$   $12A/16$ .



Σχήμα 4.1: Αρίθμηση κόμβων (μαύρο χρώμα) και μελών (μπλε χρώμα) στο LA20 3D FRAME.



Σχήμα 4.2: Φορτικές επιφάνειες A και 4 διαφορετικές κατηγορίες υποστυλωμάτων από άποψη κατακόρυφων φορτίων.

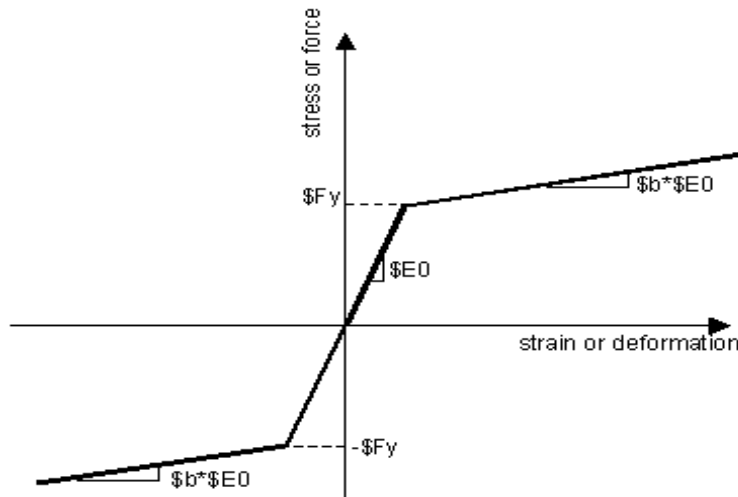
#### 4.1.2 Προσομοίωση με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας

Στην τρισδιάστατη προσομοίωση της κατασκευής με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας μελετώνται δύο διαφορετικά προσομοιώματα. Η διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων έγκειται στην προσομοίωση των υποστυλωμάτων. Στο πρώτο εκ των δύο, τα προσομοιώματα θεωρούνται πλήρως ελαστικά, θεωρήσει η οποία είναι αρκετά συνήθης για περίπτωση σχεδιασμένων κτιρίων όπου αναμένεται η πλαστικοποίηση των δοκών να προηγηθεί αυτής των υποστυλωμάτων (ικανοτικός σχεδιασμός). Αντίθετα, στο δεύτερο προσομοίωμα τα υποστυλώματα προσομοιώνονται όμοια με τις δοκούς ως ανελαστικά. Το πρώτο προσομοίωμα αναφέρεται ως LA20 3D FRAME ELC (301), ενώ το δεύτερο ως LA20 3D FRAME UNELC (302). Και στις δύο προσομοιώσεις γίνεται ακριβής υπολογισμός των γεωμετρικών στοιχείων των διατομών δοκών και υποστυλωμάτων (A,I,W). Τα στοιχεία του υλικού ( $f_y$ , E, G), ορίζονται με βάση τις τιμές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2.

Στο LA20 3D FRAME ELC (301), τα υποστυλώματα τόσο των περιμετρικών υποστυλωμάτων των πλαισίων ροπής όσο και αυτά του βαρυντικού πλαισίου δίνονται πλήρως ελαστικά (elastic Beam Column) με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Οι δοκοί των πλαισίων ροπής δίνονται ως μέλη σημειακής πλαστιμότητας (beam with hinges). Ως μήκος σημειακού ελατηρίου-πλαστικής άρθρωσης στα δύο άκρα του στοιχείου δίνεται το 1/15 του μήκους του στοιχείου. Προκειμένου να οριστεί ο νόμος που διέπει τη συμπεριφορά των μη γραμμικών σημειακών ελατηρίων στα πλαίσια ροπής γίνεται με χρήση του υλικού Steel 01 του OpenSees (Σχήμα 4.3) και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κάθε μέλους για κάμψη ως προς τον ισχυρό του άξονα yy ( $W_{ply}$ ,  $I_{yy}$ ). Επίσης, ορίζεται και ένα ελαστικό υλικό για παραλαβή της στρέψης. Η κράτνση (hardening) δίνεται 0.3%. Οι δοκοί του βαρυντικού πλαισίου και αυτές της σύνδεσης εσωτερικού με εξωτερικά πλαίσια, δίνονται με τον ίδιο τρόπο ως στοιχεία σημειακής πλαστιμότητας. Ωστόσο, προκειμένου να προσομοιωθεί η αρθρωτή σύνδεση αυτών με τα υποστυλώματα, στον ορισμό της συμπεριφοράς του σημειακού ελατηρίου που αναφέρεται παραπάνω, γίνεται απομείωση της αντοχής (Mpl) και της αρχικής ελαστικής δυσκαμψίας (E) στο 25% των αρχικών τιμών.

Στο LA20 3D FRAME UNELC (302), η μόνη διαφοροποίηση αφορά στον ορισμό των υποστυλωμάτων τόσο των πλαισίων ροπής όσο και αυτών του βαρυντικού πλαισίου ως στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας. Ο ορισμός των σημειακών ελατηρίων-θέσεων πλαστικής άρθρωσης στα εσωτερικά υποστυλώματα των πλαισίων ροπής και σε αυτά του βαρυντικού πλαισίου γίνεται όμοια με τις δοκούς των πλαισίων ροπής που αναφέρεται παραπάνω. Στα γωνιακά υποστυλώματα των πλαισίων ροπής, το γεγονός ότι συμμετέχουν στην απόκριση και στις δύο κύριες διευθύνσεις οδηγεί στον ορισμό ενός επιπλέον υλικού (M-θ) Steel 01 με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής του μέλους στην ασθενή διεύθυνση ( $W_{plz}$ ,  $I_{zz}$ ), τα οποία λόγω κοιλοδοκού τετραγωνικής διατομής είναι ίδια με τα αντίστοιχα του ισχυρού άξονα του μέλους.

Παράλληλα, και στις δύο προσομοιώσεις, ο γεωμετρικός μετασχηματισμός για τη μετατροπή από το τοπικό στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων της δυσκαμψίας και της αντοχής επιλέγεται γραμμικός για τις δοκούς (linear transformation), καθώς δεν λαμβάνουν αξονική δύναμη, ενώ για τα υποστυλώματα επιλέγεται PDelta Transformation, προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη τα καθολικά φαινόμενα δευτέρας τάξεως P-Δ.



Σχήμα 4.3: Υλικό Steel01 (βάσει Opensees Manual).

### 4.1.3 Προσομοίωση με στοιχεία ινών

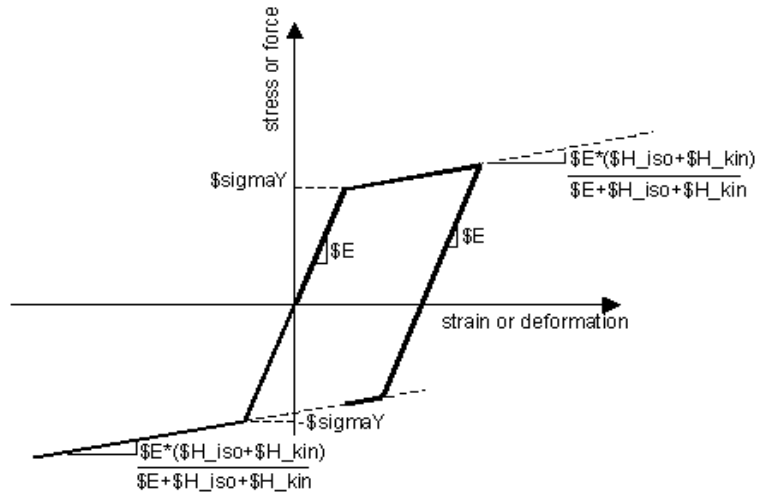
Στο τρίτο προσομοίωμα της κατηγορίας των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων χρησιμοποιούνται στοιχεία ινών. Στην περίπτωση αυτή, ορίζεται ο νόμος συμπεριφοράς του υλικού των ινών και εν συνεχεία τα στοιχεία ορίζονται ως στοιχεία κατανεμημένης πλαστικότητας βάσει ευκαμψίας (force based elements, force Beam Column). Ο ορισμός του υλικού γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του υλικού και με κράτυνση σχεδόν μηδενική (0.3%), χρησιμοποιώντας το υλικό Hardening του Opensees (Σχήμα 4.4).

Ο ορισμός των διατομών των μελών γίνεται μέσω του διαχωρισμού της διατομής σε επιμέρους τμήματα με χρήση διατομών ινών (Σχήμα 4.5), ανάλογα με τον τύπο της διατομής. Συγκεκριμένα, προκειμένου να οριστούν οι διατομές ινών για τα γωνιακά υποστυλώματα διατομής HSS, το κάθε μέλος χωρίζεται σε 10 επιμέρους τμήματα καθ' ύψος, 10 επιμέρους τμήματα στο πλάτος και 2 τμήματα στο πάχος της διατομής. Στα υπόλοιπα στοιχεία τα οποία είναι διατομής W, ορίζονται 10 επιμέρους τμήματα-διατομές καθ' ύψος του κορμού, 10 επίσης επιμέρους τμήματα-διατομές στο πλάτος των πελμάτων και από 2 επιμέρους τμήματα στο πάχος του κορμού και των πελμάτων.

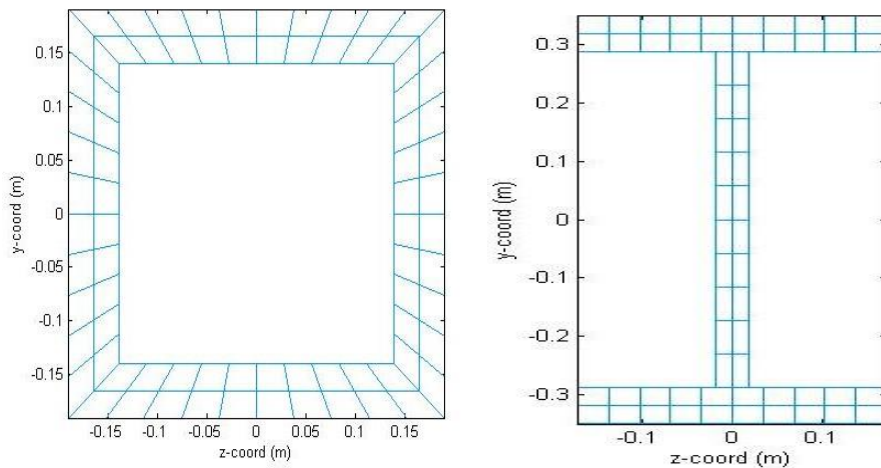
Κατά τον ορισμό των στοιχείων (force Beam Column), επιλέγονται 5 σημεία ολοκλήρωσης (integration points) κατά μήκος του κάθε στοιχείου. Η μέθοδος ολοκλήρωσης που επιλέγεται είναι η Gauss-Lobatto Integration, η οποία είναι η πιο διαδεδομένη, διότι εισάγει από ένα σημείο ολοκλήρωσης στα δύο άκρα του κάθε στοιχείου, όπου αναμένεται η ανάπτυξη των μεγαλύτερων ροπών κάμψεως.

Ο γεωμετρικός μετασχηματισμός των στοιχείων είναι και σε αυτή την περίπτωση όμοιος με των δύο προηγούμενων για υποστυλώματα και δοκούς. Θα πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι η πολύ μικρή συνεισφορά στη σεισμική απόκριση της κατασκευής των δοκών του βαρυντικού πλαισίου και αυτών της σύνδεσης των υποστυλωμάτων του πλαισίου βαρύτητας με τα υποστυλώματα στα περιμετρικά πλαίσια ροπής, σε συνδυασμό με την αρθρωτή σύνδεση στα άκρα αυτών, οδηγεί στη μη προσομοίωση τους με στοιχεία ινών και στη διατήρηση της προσομοίωσης τους με στοιχεία σημειακής πλαστιμότητας, όπως στα προηγούμενα δύο προσομοιώματα.

Το προσομοίωμα αναφέρεται ως LA20 3D FRAME FBS (303).



Σχήμα 4.4: Υλικό Hardening (βάσει Opensees Manual).



Σχήμα 4.5: Αριθμός-Διάταξη των ινών στις διατομές ανάλογα με τον τύπο της διατομής.

## 4.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων

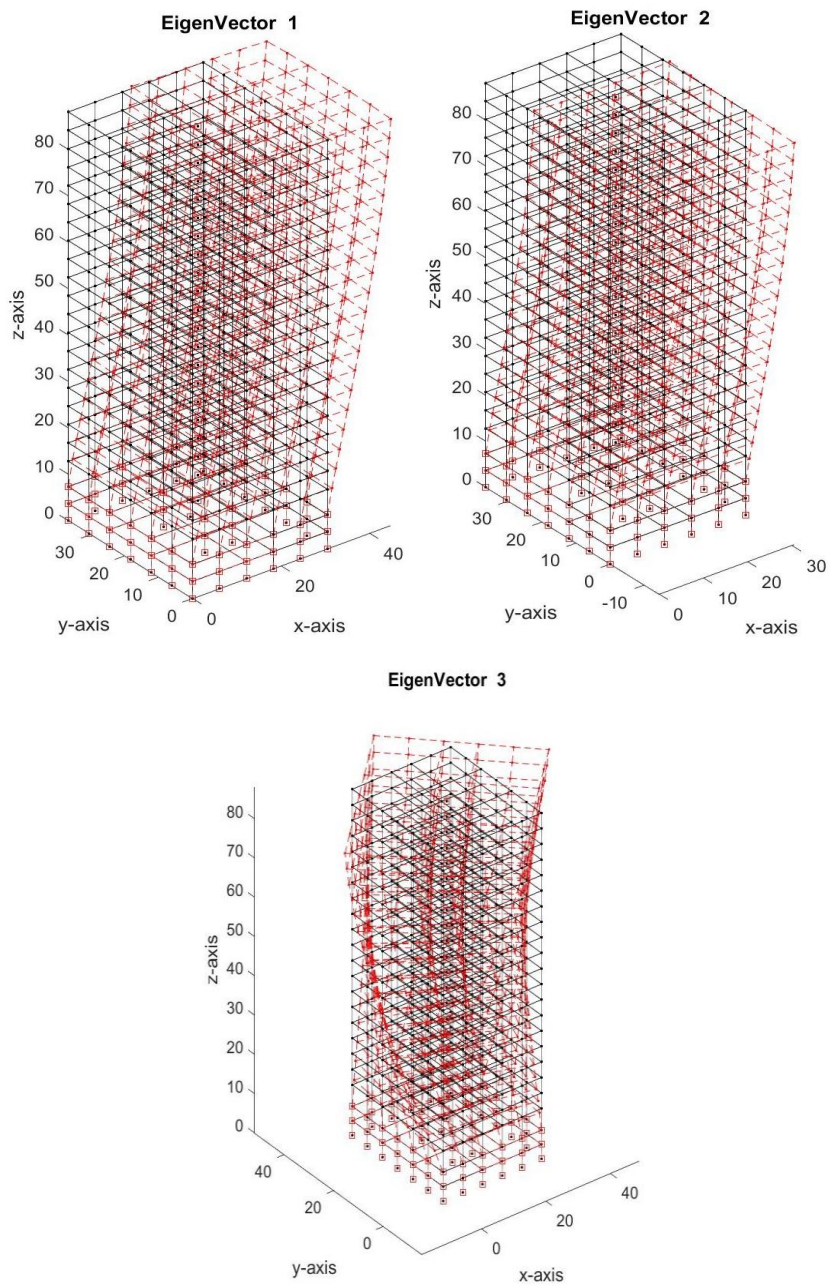
### 4.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης στα 3 διαφορετικά τρισδιάστατα προσομοιώματα. Δίνονται τα αποτελέσματα των ιδιοπεριόδων των 4 πρώτων ιδιομορφών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στα τρία προσομοιώματα η πρώτη ιδιομορφή είναι μεταφορική κατά X με ποσοστό συμμετοχής περίπου 80%. Η δεύτερη είναι κυρίως μεταφορική στη διεύθυνση Y με αντίστοιχο ποσοστό συμμετοχής, ενώ οι επόμενες δύο είναι κυρίως στροφικές. Στο Σχήμα 4.6 αποτυπώνεται η μορφή των 3 πρώτων ιδιομορφών.



Πίνακας 4.1: Ιδιοπερίοδοι 4 πρώτων ιδιομορφών τρισδιάστατων προσομοιωμάτων.

Προσομοίωμα (Κωδικός)	T1 (s)	T2 (s)	T3(s)	T4 (s)
LA20 3D FRAME ELC (301)	3.64	3.31	1.94	1.25
LA20 3D FRAME UNELC (302)	3.61	3.29	1.94	1.24
LA20 3D FRAME FBS (303)	3.68	3.34	1.27	1.16



Σχήμα 4.6: Σχήμα 3 πρώτων ιδιομορφών στα τρισδιάστατα προσομοιώματα.

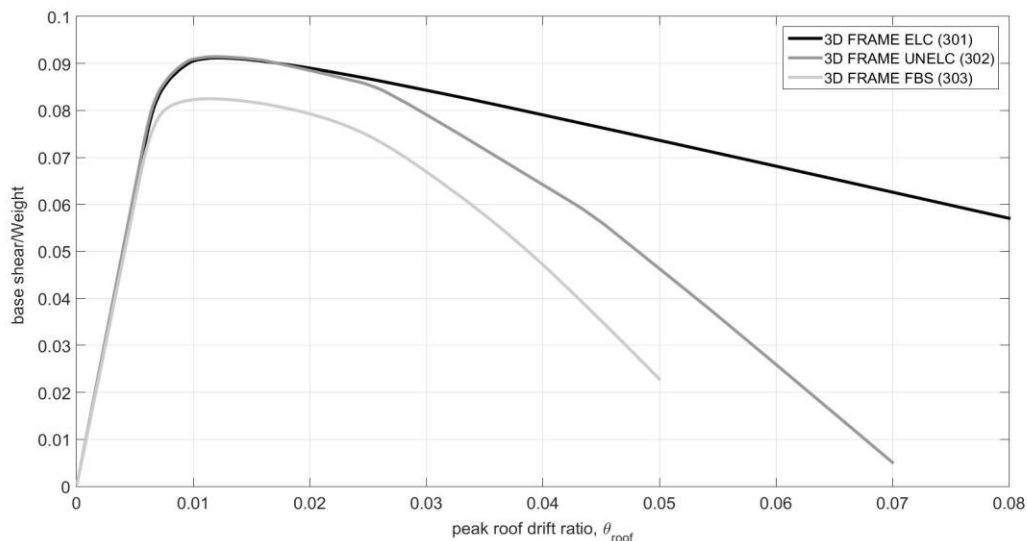


#### 4.2.2 Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis)

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας για τα 3 τρισδιάστατα προσομοιώματα όπως προέκυψαν από την ικανοτική στατική ανάλυση Pushover βάσει την πρώτη ιδιομορφή. Η κάθε καμπύλη ικανότητας σχεδιάζεται σε άξονες x,y οπού στο άξονα x γωνιακή παραμόρφωση της οροφής του κτιρίου ως προς τη βάση του (roof drift) και στον άξονα y η τέμνουσα βάσης που πρόκυψε από την ανάλυση, διαιρεμένη με το συνολικό βάρος κτιρίου. Βάσει των Gupta και Krawinkler (1999), η συνολική μάζα του κτιρίου είναι 11067579.13kg επομένως το συνολικό βάρος είναι 108573 kN. Η φόρτιση καθ' ύψος του κτιρίου ακολουθεί την κατανομή ισοδύναμης πλευρικής δύναμης βάσει της σχέσης:

$$F_i = F_b \cdot \frac{m_i \cdot z_i^2}{\sum m_i \cdot z_i^2}, \quad (4.2)$$

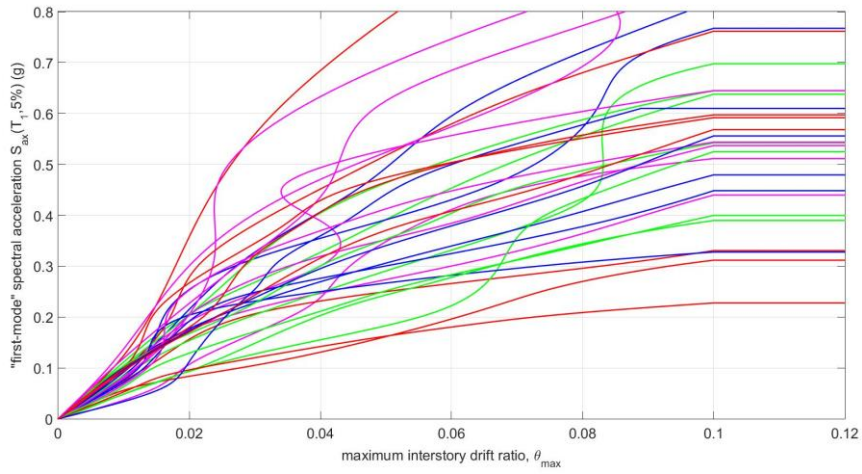
όπου  $F_i$  το οριζόντιο φορτίο σε κάθε όροφο  $F_b$  η συνολική τέμνουσα βάσης,  $m_i$  η μάζα του κάθε ορόφου και  $z_i$  η απόσταση της στάθμης κάθε ορόφου από το έδαφος. Ο συντελεστής  $k$  ο οποίος συναρτάται από την περίοδο ταλάντωσης, δίνεται ίσος με 2 καθώς  $T_1 > 2.5s$ . Τα φορτία δίνονται στο κέντρο κάθε διαφράγματος (master node) με τρόπο ώστε το άθροισμα όλων να ισούται με τη μονάδα.



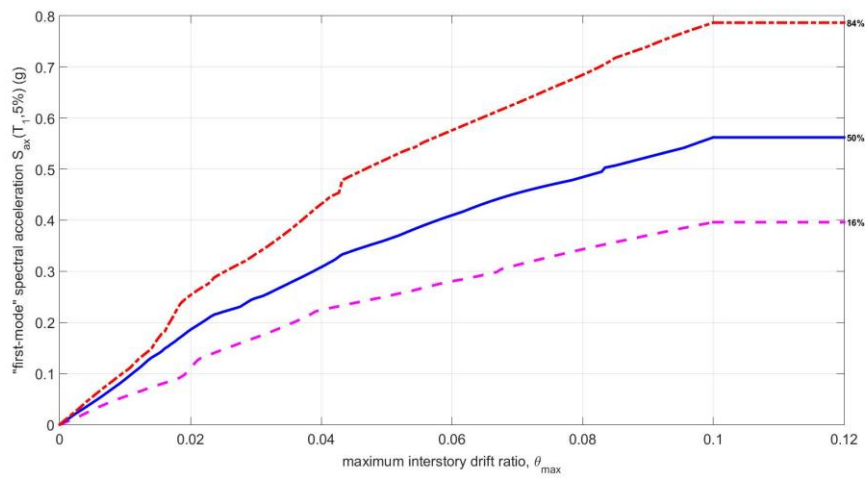
Σχήμα 4.7: Καμπύλες ικανότητας της ανάλυσης Pushover των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων.

#### 4.2.3 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA)

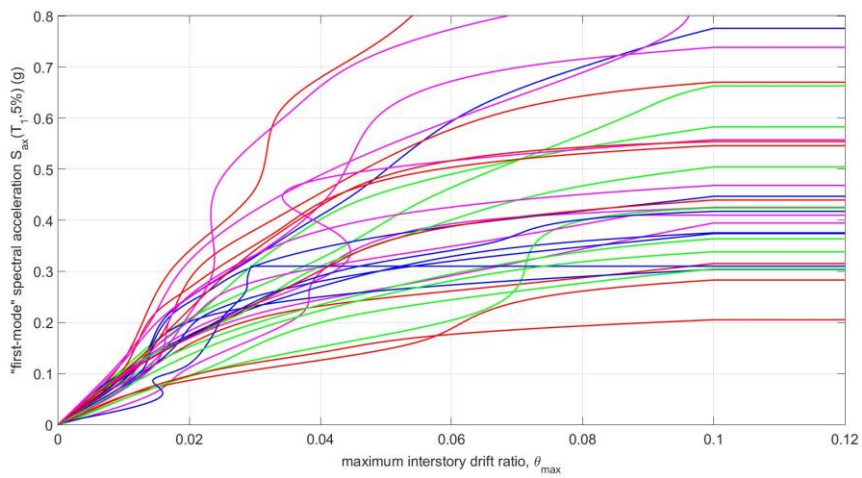
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τη μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, σύμφωνα με τη μέθοδο ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA). Από τα αποτελέσματα της IDA στα 3 προσομοιώματα σχεδιάζονται οι καμπύλες IDA κάθε καταγραφής, καθώς επίσης και οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε ποσοστημόρια ή αλλιώς σε πιθανότητα υπέρβασης της εκάστοτε τιμής  $\theta_{max}$  16% , 50% , 84% , (fractile IDA curves), έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων. Επίσης, η αναγωγή σε ποσοστημόρια γίνεται επειδή η σύγκρισή μεταξύ των προσομοιωμάτων γίνεται με βάση το ποσοστημόριο 50% ή διάμεσο των αποτελεσμάτων της IDA (median IDA curve).



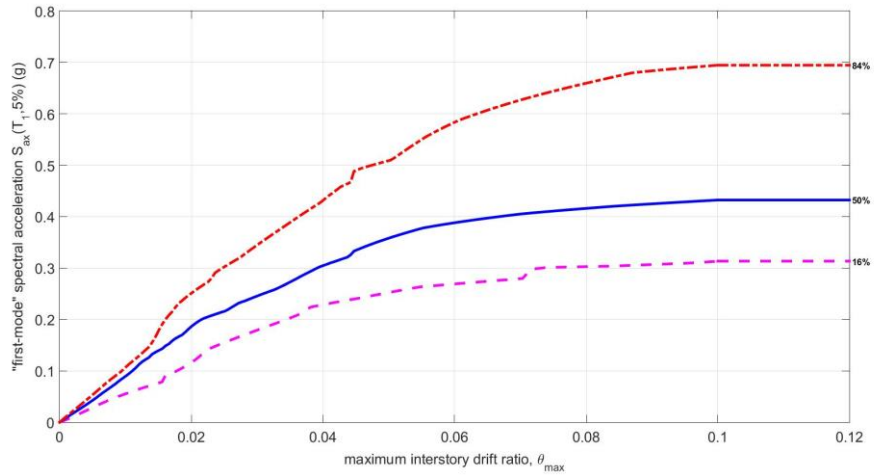
Σχήμα 4.8: Καμπύλες IDA στο LA20 3D FRAME ELC (301).



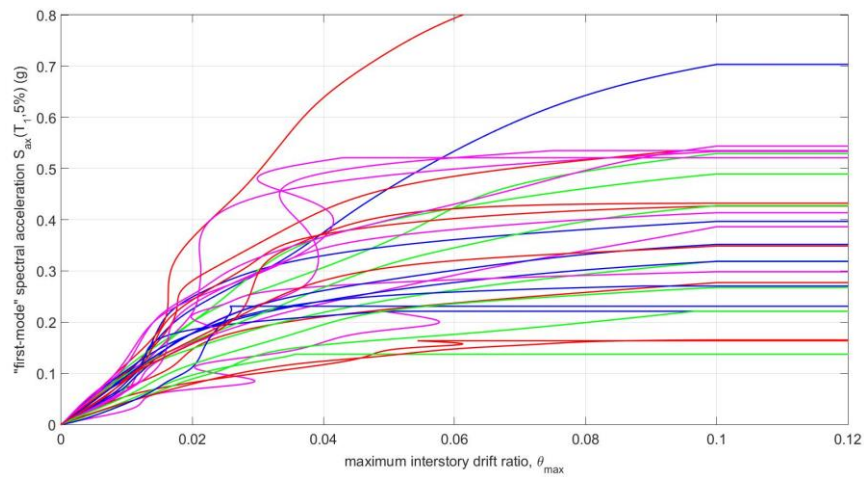
Σχήμα 4.9: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 3D FRAME ELC (301).



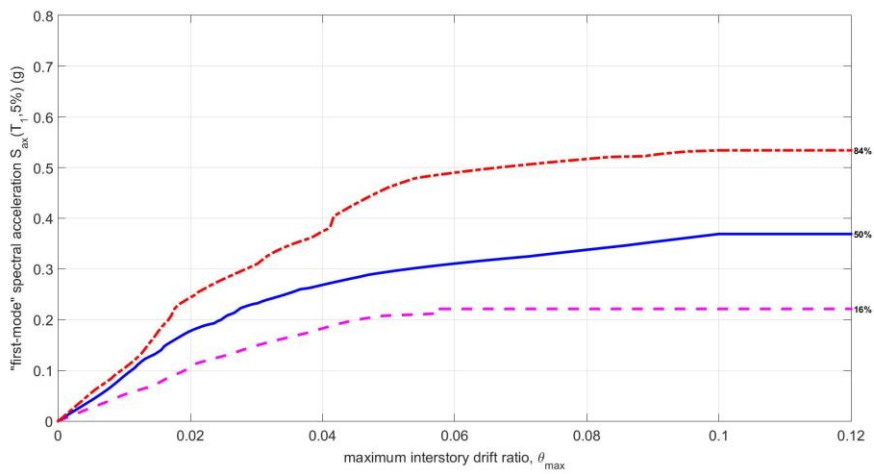
Σχήμα 4.10: Καμπύλες IDA στο LA20 3D FRAME UNELC (302).



Σχήμα 4.11: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 3D FRAME UNELC (302).



Σχήμα 4.12: Καμπύλες IDA στο LA20 3D FRAME FBS (303).



Σχήμα 4.13: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 3D FRAME FBS (303).



## 5 Δισδιάστατη προσομοίωση πλήρους πλαισίου άνευ υπογείων

### 5.1 Προσομοίωση

#### 5.1.1 Γενικά

Η πρώτη απλοποίηση από τρισδιάστατο προσομοίωμα σε δισδιάστατο αναφέρεται, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, στην προσομοίωση μόνο των 20 ορόφων του κτιρίου δίχως τα δύο υπόγεια. Αποτελεί συνήθεις πρακτική η μη προσομοίωση των υπογείων σε μεταλλικά κτίρια, λόγω της μη συμμετοχής τους στη σεισμική απόκριση, ενώ η σύνδεση των υποστυλωμάτων του ισογείου στο έδαφος θεωρείται πάκτωση. Στην εν λόγω κατηγορία έχουμε 6 διαφορετικά προσομοιώματα.

Προσομοιώνεται το ένα εκ των δύο πλαίσια ροπής στη διεύθυνση X. Η προσομοίωση γίνεται και σε αυτή την περίπτωση με χρήση στοιχείων σημειακής πλαστιμότητας και στοιχεία ιών. Στο Σχήμα 5.1, παρουσιάζεται η αρίθμηση των μελών και των κόμβων στα 6 προσομοιώματα της κατηγορίας. Στη συγκεκριμένη κατηγορία προσομοιωμάτων, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (A,I,W) των δοκών και των υποστυλωμάτων δίνονται όμοια σε κάθε όροφο και ίσα με το μέσο όρο των αντίστοιχων μεγεθών των στοιχείων του ορόφου. Στις δοκούς, με βάση την παραπάνω παραδοχή, δεν έχουμε κάποια διαφοροποίηση σε σχέση με το τρισδιάστατο προσομοίωμα καθώς όλες οι δοκοί στη στάθμη των ορόφων είναι ίδιες. Αντίθετα στα υποστυλώματα, σε κάθε όροφο δίνεται ο μέσος όρος των χαρακτηριστικών των διατομών, δηλαδή των 2 γωνιακών κοιλοδοκών και των 4 εσωτερικών υποστυλωμάτων.

Ο στύλος που στο Σχήμα 5.1 φαίνεται ασύνδετος με το πλαίσιο των 5 ανοιγμάτων χρησιμοποιείται για τα βαρυτικά φορτία και την προσομοίωση των καθολικών φαινομένων δευτέρας τάξεως P-Δ (leaning column), ενώ και στα 6 προσομοιώματα τα υποστυλώματα του στύλου P-Δ είναι ελαστικά με γεωμετρικά χαρακτηριστικά (A,I) ίσα με το άθροισμα των αντίστοιχων χαρακτηριστικών των στύλων του πλαισίου βαρύτητας και των υποστυλωμάτων των πλαισίων ροπής στην εγκάρσια διεύθυνση Y. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα υποστυλώματα του βαρυτικού πλαισίου, δίνεται η ροπή αδράνειας των στύλων ως προς τον ισχυρό τους άξονα ( $I_{yy}$ ), ενώ από τα υποστυλώματα του πλαισίου ροπής στη διεύθυνση Y δίνεται ως προς τον ασθενή τους άξονα ( $I_{zz}$ ). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, στο μισό κτίριο αντιστοιχούν 2 υποστυλώματα από το πλαίσιο βαρύτητας και  $4+2*0.5=5$  υποστυλώματα από τα πλαίσια ροπής στη διεύθυνση Y. Η σύνδεση του στύλου P-Δ με το πλαίσιο γίνεται μέσω κινηματικής δέσμευσης σε επίπεδο ορόφου για την προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας.

Δεδομένου ότι προσομοιώνεται το μισό κτίριο, δίνονται οι μισές μάζες από αυτές που δόθηκαν στα τρισδιάστατα προσομοιώματα. Για τον υπολογισμό του ποσοστού του κατακόρυφου φορτίου το οποίο αντιστοιχεί στο πλαίσιο ροπής και αυτού το οποίο αντιστοιχεί στο στύλο P-Δ, γίνεται η παρακάτω θεώρηση με βάση τις κατηγορίες υποστυλωμάτων από άποψη φορτίου όπως παρουσιάστηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με βάση το Σχήμα 5.3, στο κάθε ένα πλαίσιο ροπής βρίσκονται 4 υποστυλώματα  $c$  και 2 υποστυλώματα  $p$ . Στον υπόλοιπο μισό όροφο έχουμε 2 υποστυλώματα  $o$ , 2 υποστυλώματα  $g$  και 3 ( $2+2*0.5$ ) υποστυλώματα  $c$ .

Άρα:

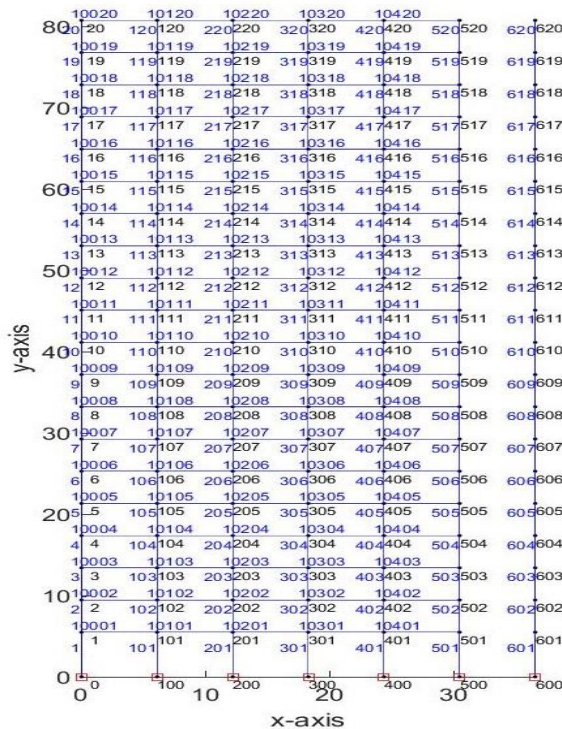
$$SMRF = 4c + 2p = 4 \cdot \frac{2A}{16} + 2 \cdot \frac{5A}{16} = \frac{18A}{16}, \quad (5.1)$$

$$PD = 2o + 2g + 3c = 2 \cdot \frac{6A}{16} + 2 \cdot \frac{12A}{16} + 3 \cdot \frac{2A}{16} = \frac{42A}{16}, \quad (5.2)$$

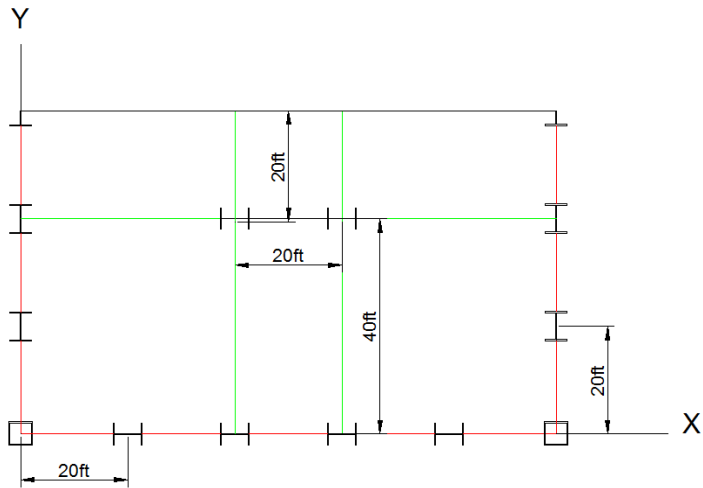
$$SMRF / PD = 0.428, \quad (5.3)$$

Άρα από το φορτίο κάθε ορόφου, το 43% αντιστοιχεί στους στύλους του πλαισίου ροπής, και το υπόλοιπο περίπου 57% στο στύλο Ρ-Δ. Στη συγκεκριμένη κατηγορία, τα φορτία στους στύλους κάθε ορόφου, όμοια με τα γεωμετρικά στοιχεία, είναι ίδια και ίσα με το μέσο όρο του φορτίου των στοιχείων του ορόφου.

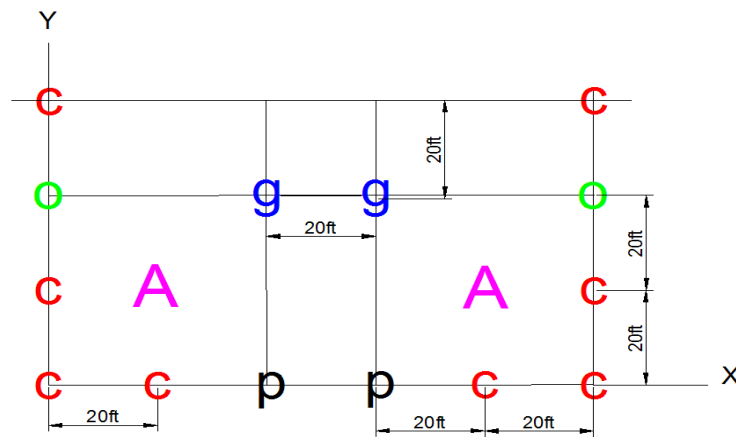
Επιπροσθέτως, σε αυτή την κατηγορία, όμοια με τα προηγούμενα και στα 6 προσομοιώματα ο γεωμετρικός μετασχηματισμός των συντεταγμένων στα υποστρώματα τόσο του πλαισίου όσο και του στύλου Ρ-Δ είναι PDelta Transformation, ενώ των δοκών γραμμικός (linear transformation).



Σχήμα 5.1: Αρίθμηση κόμβων (μαύρο χρώμα) και μελών (μπλε χρώμα) στο LA20 2D 20 FRAME.



Σχήμα 5.2: Κάτοψη μισού κτιρίου για τη δισδιάστατη προσομοίωση.

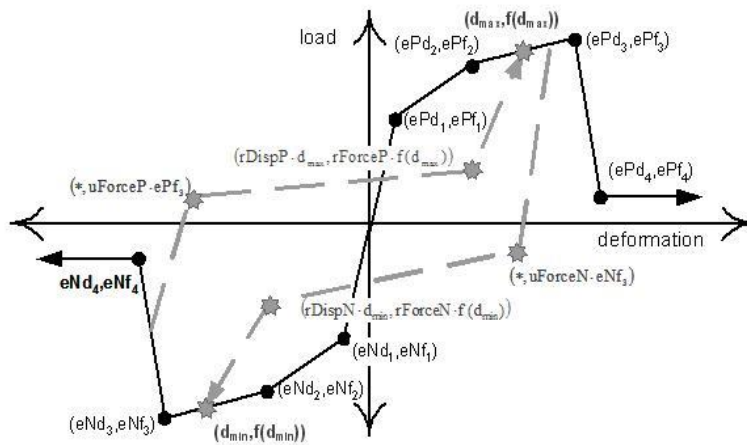


Σχήμα 5.3: Κατηγορίες υποστυλωμάτων από άποψη φορτίου, για υπολογισμού του ποσοστού του κατακόρυφου φορτίου πλαισίου ροπής και στύλου P-Δ.

### 5.1.2 Προσομοίωση με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας

Τα 5 από τα 6 συνολικά προσομοιώματα της παρούσας κατηγορίας προσομοιώνονται με χρήση στοιχείων συγκεντρωμένης πλαστικότητας ή σημειακής πλαστιμότητας (lumped plasticity). Στο πρώτο εξ αυτών, σε αναλογία με τα τρισδιάστατα προσομοιώματα, τα υποστυλώματα προσομοιώνονται ως ελαστικά μέλη (elastic Beam Column) και οι δοκοί ως ανελαστικά (beam with hinges). Στην προσομοίωση των δοκών το μήκος των ελατηρίων-πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα δίνεται ίσο με 1/15 του συνολικού μήκους του στοιχείου. Για την προσομοίωση του νόμου συμπεριφοράς του μη γραμμικού τμήματος στα άκρα του κάθε μέλους χρησιμοποιείται το υλικό Pinching4 του Opensees (Σχήμα 5.4). Στην περίπτωση αυτή θεωρείται πλήρης ελαστοπλαστική συμπεριφορά, με κράτυνση 0.3%, χωρίς περιορισμό σχετικά με τη στροφική ικανότητα της διατομής του κάθε μέλους. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα αναφέρεται ως LA20 2D 20 FRAME ELC (2201).

Στο δεύτερο προσομοίωμα, τόσο τα υποστυλώματα όσο και οι δοκοί είναι ανελαστικά στοιχεία, με προσομοίωση όμοια με αυτή των δοκών του πρώτου προσομοιώματος. Το προσομοίωμα αυτό αναφέρεται στα παρακάτω ως LA20 2D 20 FRAME UNELC (2202).



Σχήμα 5.4: Υλικό Pinching4 (βάσει Opensees Manual).

Στα επόμενα τρία προσομοιώματα, η προσομοίωση των στροφικών ελατηρίων-πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των μελών του πλαισίου ροπής γίνεται με χρήση του τροποποιημένου μοντέλου των Ibarra & Krawinkler (2005) (Σχήμα 5.5), όπου οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων της καμπύλης ροπής-στροφής ( $M-\theta$ ) υπολογίστηκαν με βάση τις σχέσεις και τιμές που προτείνονται από τους Lignos & Krawinkler (2011) για συνδέσεις χωρίς απομείωση διατομής της δοκού (other-than-RBS) ως εξής:

Η ενεργός ροπή διαρροής  $M_y$  δίνεται ως η πλαστική ροπή αντοχής της διατομής για κάμψη περί των ισχυρό άξονα  $yy$ ,  $M_{pl}$ , πολλαπλασιασμένη επί 1.17. Άρα εξαρχής, εδώ έχουμε μια αυξημένη αντοχή σε σχέση με τα υπόλοιπα προσομοιώματα. Ο λόγος της μέγιστης μετελαστικής ροπής αντοχής προς την ενεργό ροπή διαρροής είναι:

$$M_c / M_y = 1.10, \quad (5.4)$$

ενώ η απομένουσα αντοχή  $M_r$  δίνεται ως:

$$M_r = \kappa \cdot M_y = 0.40 \cdot M_y, \quad (5.5)$$

Όσον αφορά τις στροφές  $\theta$  αυτές υπολογίζονται ως εξής: Η στροφή διαρροής κάθε μέλους, υπολογίζεται για κάμψη διπλή καμπυλότητας (double curvature bending), από τη σχέση:

$$\theta_y = \frac{M_y \cdot l}{6 \cdot E \cdot I_{yy}}, \quad (5.6)$$

όπου  $l$  το μήκος του κάθε στοιχείου. Όσον αφορά τη μετελαστική στροφή της διατομής, προτείνονται δύο είδη σχέσεων με βάση το ύψος της διατομής. Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι προκειμένου να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές για τις γωνιακές κοιλοδοκούς, αυτές ελήφθησαν ως ισοδύναμες διατομές  $W$ . Οι σχέσεις για τον υπολογισμό των στροφών  $\theta_p$ ,  $\theta_{pc}$  είναι οι εξής:



Για 102mm (4in) <math>d < 914\text{mm}</math> (36in):

$$\theta_p = 0.0865 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.365} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.140} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.340} \cdot \left(\frac{c^1_{unit} \cdot d}{533}\right)^{-0.721} \cdot \left(\frac{c^2_{unit} \cdot F_y}{355}\right)^{-0.230}, \quad (5.7)$$

$$\theta_{pc} = 5.63 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.565} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.800} \cdot \left(\frac{c^1_{unit} \cdot d}{533}\right)^{-0.280} \cdot \left(\frac{c^2_{unit} \cdot F_y}{355}\right)^{-0.430}, \quad (5.8)$$

Για <math>d > 533\text{mm}</math> (21in):

$$\theta_p = 0.318 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.550} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.345} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{-0.0230} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.090} \cdot \left(\frac{c^1_{unit} \cdot d}{533}\right)^{-0.330} \cdot \left(\frac{c^2_{unit} \cdot F_y}{355}\right)^{-0.130}, \quad (5.9)$$

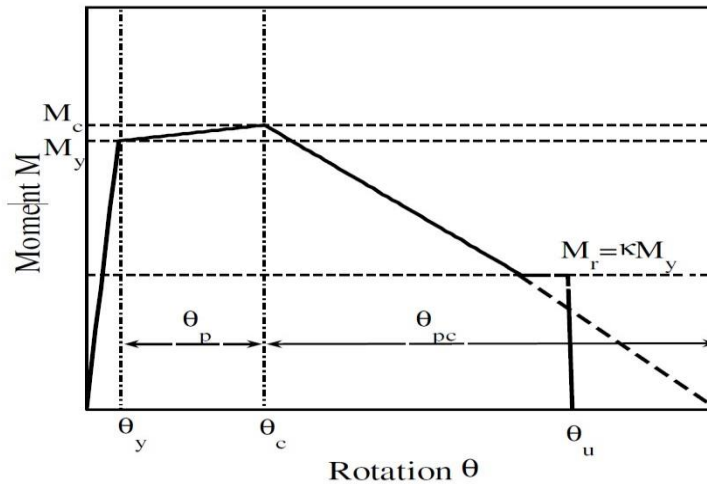
$$\theta_{pc} = 7.50 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.610} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.710} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{-0.110} \cdot \left(\frac{c^1_{unit} \cdot d}{533}\right)^{-0.161} \cdot \left(\frac{c^2_{unit} \cdot F_y}{355}\right)^{-0.320}, \quad (5.10)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, ο λόγος <math>h/t\_w</math> λαμβάνεται από τους πίνακες των χαρακτηριστικών των διατομών όπως και τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία των διατομών που αφορούν το ύψος <math>d</math>, το πλάτος και πάχος πέλματος <math>b\_f</math>, <math>t\_f</math>. Οι παράμετροι <math>c\_{unit}</math> δίνονται και οι δύο ίση με τη μονάδα καθώς δουλεύουμε σε μονάδες mm και MPa, ενώ η αντοχή <math>F\_y</math> δίνεται ίση με την αναμενόμενη που όπως έχει αναφερθεί είναι ίση 49.2ksi (340MPa).

Για το μήκος <math>L</math> δίνεται το καθαρό διατμητικό μήκος του κάθε στοιχείου (shear span), όπου για κάμψη διπλής καμπυλότητας (double curvature bending) είναι ίσο με το μισό καθαρό (clear span) μήκος του στοιχείου, δηλαδή το μήκος του στοιχείου από παρειά σε παρειά. Η μόνη διαφοροποίηση αφορά τα υποστυλώματα του ισογείου, όπου για τον υπολογισμό των στροφών στη βάση λαμβάνεται το 70% του καθαρού μήκους του στοιχείου, ενώ στην κορυφή το 30%, δίνοντας εντέλει την τιμή του ημιαθροίσματος των δύο.

Για τον λόγο <math>L\_b/r\_y</math>, ο οποίος αναφέρεται στην ευαισθησία σε οριζόντιο στρεπτικό λυγισμό των στοιχείων (lateral torsional buckling), δεδομένου ότι δεν έχουμε επαρκή περαιτέρω στοιχεία και λόγω της όπως αναφέρεται από τους Lignos & Krawinkler (2011) μικρής επιρροής του στα αποτελέσματα για συνδέσεις χωρίς απομείωση στη διατομή της δοκού (non-RBS), λαμβάνεται σε όλα τα στοιχεία ίσος με 50.

Η τιμή της οριακής στροφής αστοχία <math>\theta\_u</math>, προτείνεται για στοιχεία non-RBS μεταξύ 0.05-0.06 rad, ωστόσο, η εν λόγω τιμή ενδέχεται να είναι έως και τρεις φορές μεγαλύτερη.



Σχήμα 5.5: Τροποποιημένο μοντέλο Ibarra & Krawinkler (βάσει Lignos & Krawinkler (2011)).

Στο πρώτο εκ των τριών προσομοιωμάτων, LA20 2D 20 FRAME EHNRL (2203), από τα παραπάνω, για την προσομοίωση των μελών γίνεται χρήση μόνο των στροφών  $\theta_y$ ,  $\theta_p$ . Η ροπή διαρροής  $M_y$  όμως στα μέλη δίνεται χωρίς την επαύξηση 17% και η κράτυνση 0.3% όμοια με το προηγούμενο προσομοίωμα της κατηγορίας. Η κλίση καθοδικού κλάδου δίνεται (post carrying) ίση με το 10% της κλίσης του αρχικού ελαστικού κλάδου και η απομένουσα αντοχή στο 30% της ροπής  $M_y$ .

Στα δύο επόμενα προσομοιώματα, η προσομοίωση των μελών γίνεται με χρήση ακριβώς του τροποποιημένου μοντέλου Ibarra & Krawinkler (2005) και τις παραπάνω σχέσεις. Η μόνη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο είναι στην οριακή στροφή αστοχίας της διατομής, όπου στην πρώτη, LA20 2D 20 FRAME EHNRL1 (2204), δίνεται ίση με 0.06rad, ενώ στη δεύτερη, LA20 2D 20 FRAME EHNRL2 (2205), δίνεται ίση με 0.18rad.

### 5.1.3 Προσομοίωση με στοιχεία ινών

Το προσομοίωμα αυτής της κατηγορίας με στοιχεία ινών, LA20 2D 20 FRAME FBS (2206), δεδομένου ότι δεν μπορεί να προσομοιωθεί με στοιχεία ινών ο μέσος όρος των χαρακτηριστικών των διατομών κάθε ορόφου, κατασκευάζεται με χρήση των ίδιων διατομών ινών που χρησιμοποιούνται και στο τρισδιάστατο προσομοίωμα και αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.

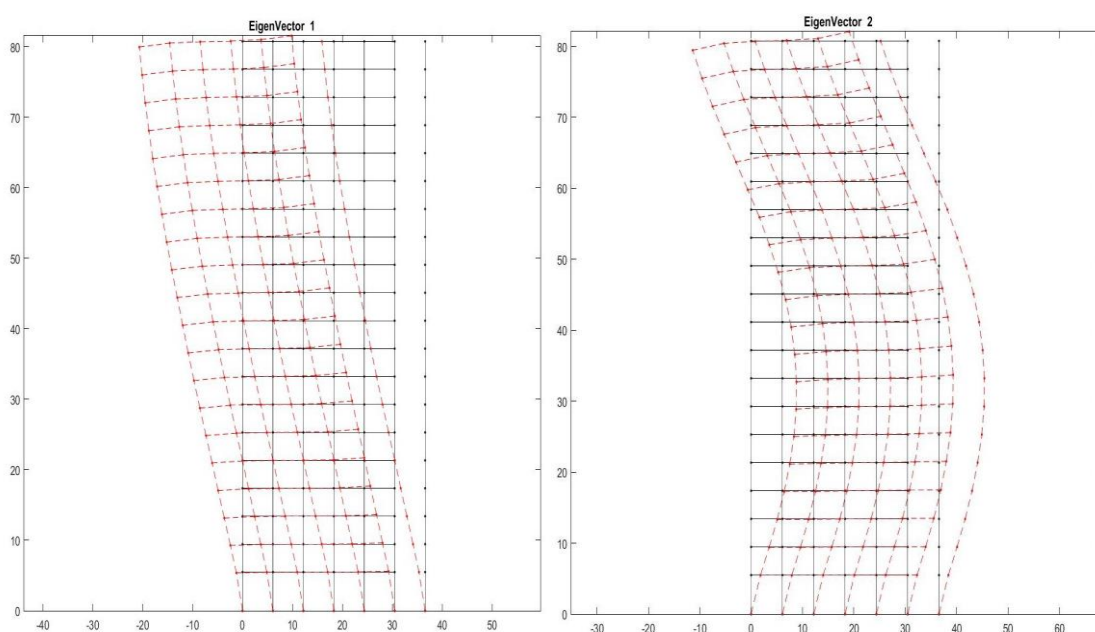
## 5.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων

### 5.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

Στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης των προσομοιωμάτων αυτής της κατηγορίας. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι ιδιοπερίοδοι των 2 πρώτων ιδιομορφών. Το ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής και στα 6 προσομοιώματα αυτής της κατηγορίας είναι και εδώ περίπου 80%. Επίσης στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται το σχήμα των 2 πρώτων ιδιομορφών.

Πίνακας 5.1: Ιδιοπερίοδοι 2 πρώτων ιδιομορφών των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D 20 FRAME.

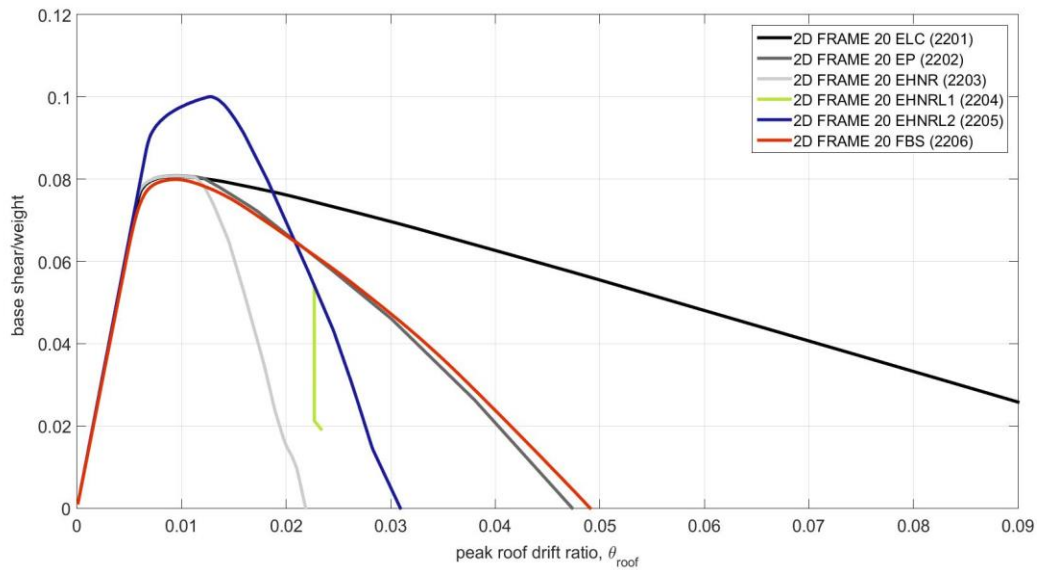
Προσομοίωμα (Κωδικός)	T1 (s)	T2 (s)
LA20 2D 20 FRAME ELC (2201)	3.81	1.33
LA20 2D 20 FRAME EP (2202)	3.78	1.32
LA20 2D 20 FRAME EHNRL (2203)	3.78	1.32
LA20 2D 20 FRAME EHNRL1 (2204)	3.78	1.32
LA20 2D 20 FRAME EHNRL2 (2205)	3.78	1.32
LA20 2D 20 FRAME FBS (2206)	3.83	1.33



Σχήμα 5.6: Σχήμα 2 πρώτων ιδιομορφών στα προσομοιώματα της κατηγορίας LA20 2D 20 FRAME.

### 5.2.2 Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis)

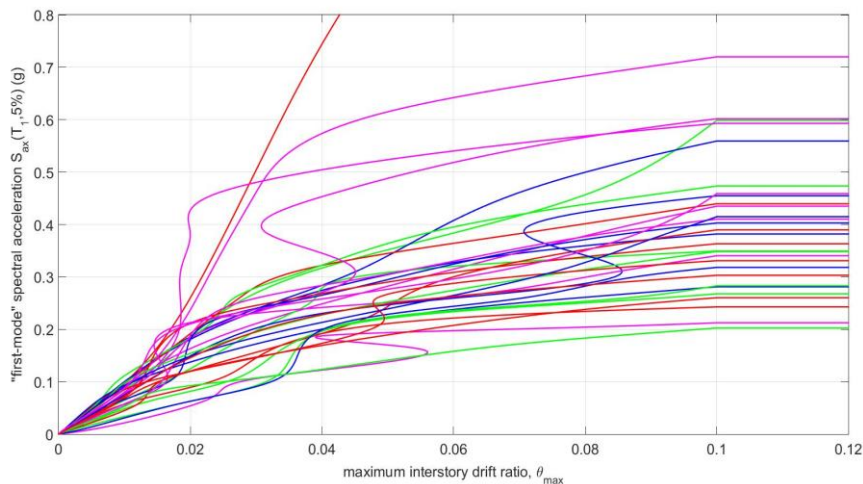
Στο Σχήμα 5.7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pushover στη συγκεκριμένη κατηγορία προσομοιωμάτων. Τα φορτία σε κάθε όροφο-διάφραγμα δίνονται με βάση το ιδιοδιάνυσμα της πρώτης ιδιομορφής. Η κάθε καμπύλη ικανότητας σχεδιάζεται σε άξονες  $x, y$  ( $\theta_{roof} Vb/W$ ) όμοια με αυτές των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων, μόνο που προφανώς ως βάρος λαμβάνεται το μισό βάρος του κτιρίου.



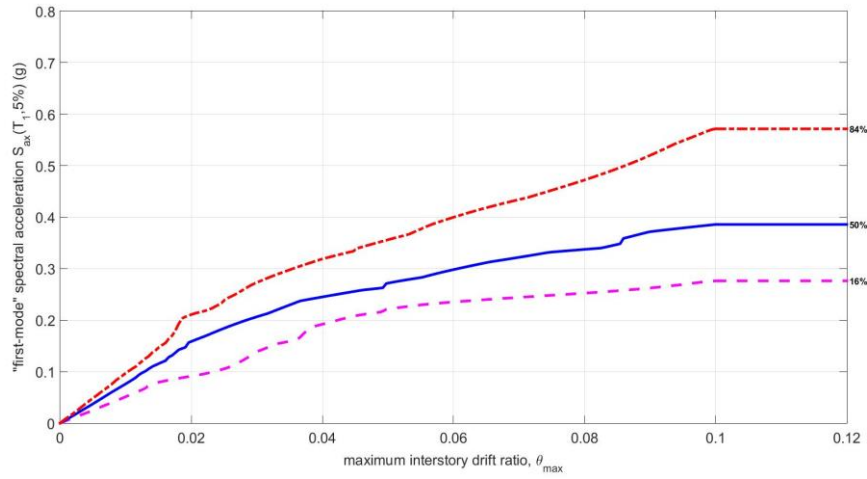
Σχήμα 5.7: Καμπύλες ικανότητας της ανάλυσης Pushover των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D 20 FRAME.

### 5.2.3 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA)

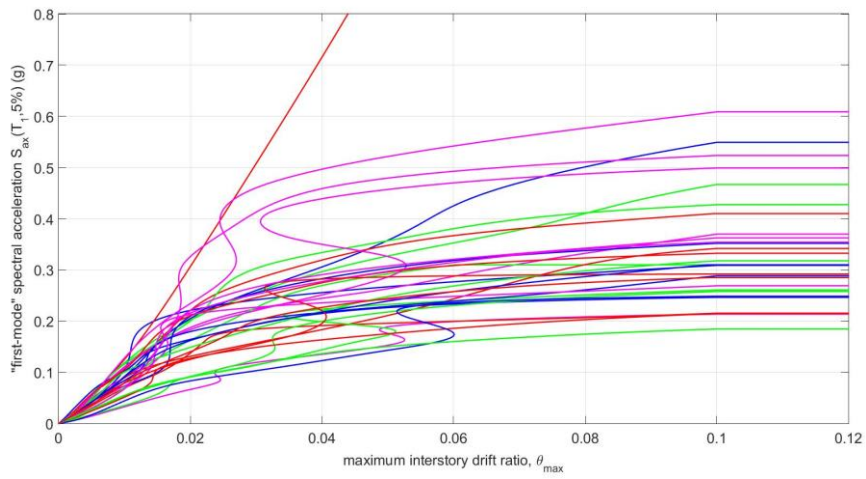
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τη μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης σύμφωνα με τη μέθοδο ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA). Από τα αποτελέσματα της IDA στα 6 προσομοιώματα σχεδιάζονται οι καμπύλες IDA καθώς και αυτές των ποσοστημορίων 16% , 50% (διάμεση καμπύλη IDA), 84%, (fractile IDA curves), όπως και στα τρισδιάστατα προσομοιώματα.



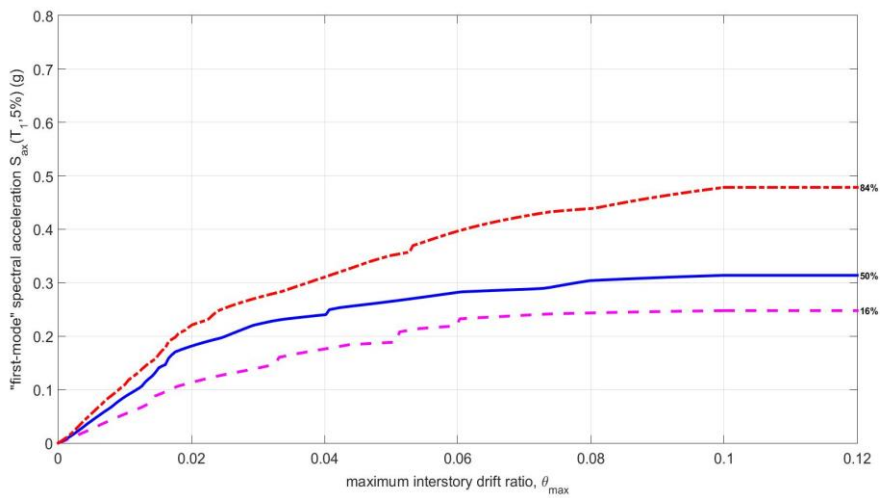
Σχήμα 5.8: Καμπύλες IDA στο LA20 2D 20 FRAME ELC (2201).



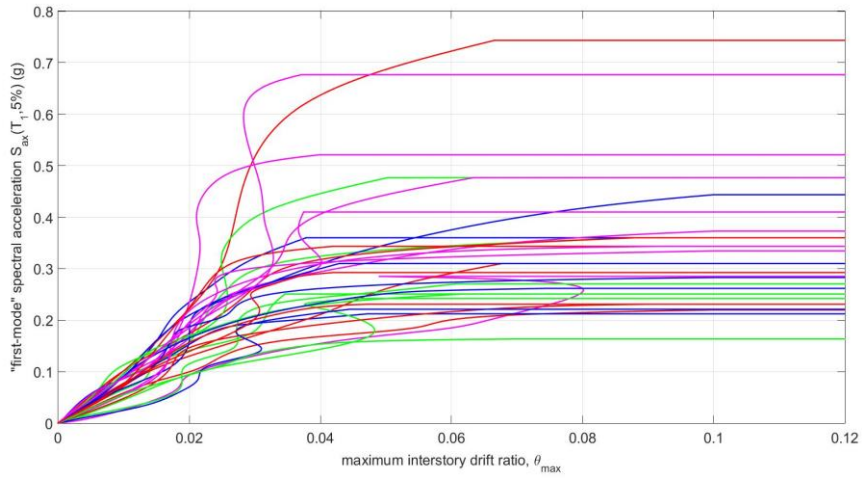
Σχήμα 5.9: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D 20 FRAME ELC (2201).



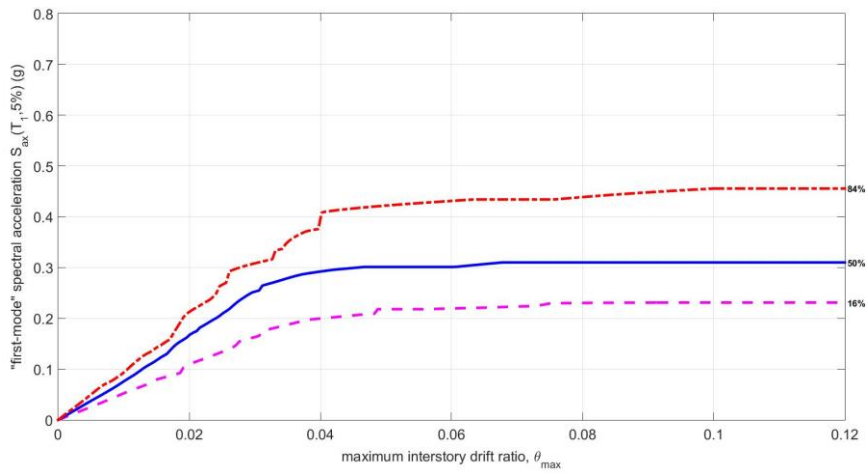
Σχήμα 5.10: Καμπύλες IDA στο LA20 2D 20 FRAME EP (2202).



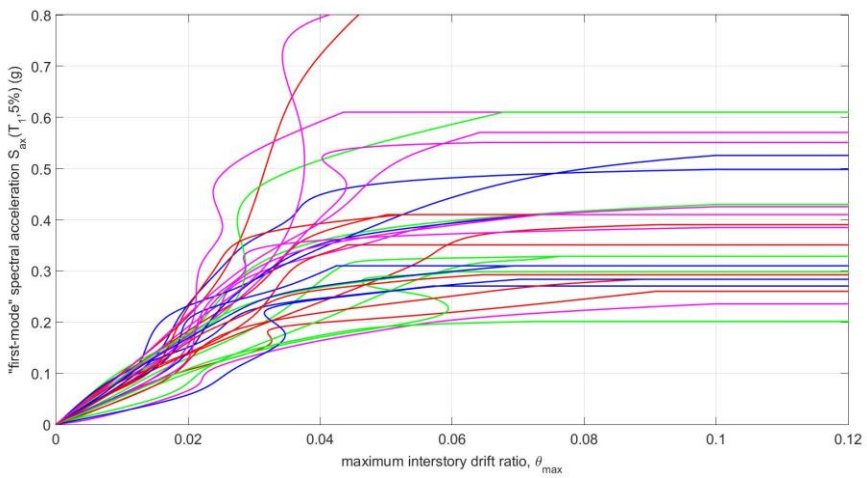
Σχήμα 5.11: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D 20 FRAME EP (2202).



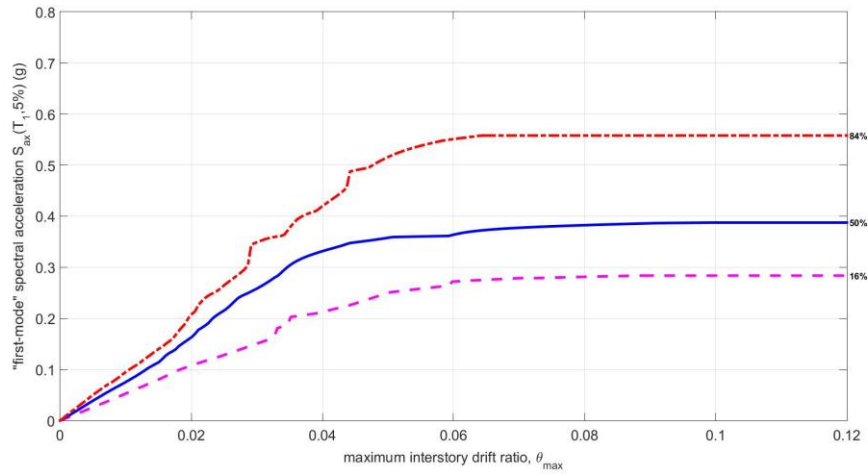
Σχήμα 5.12: Καμπύλες IDA στο LA20 2D 20 FRAME EHNH (2203).



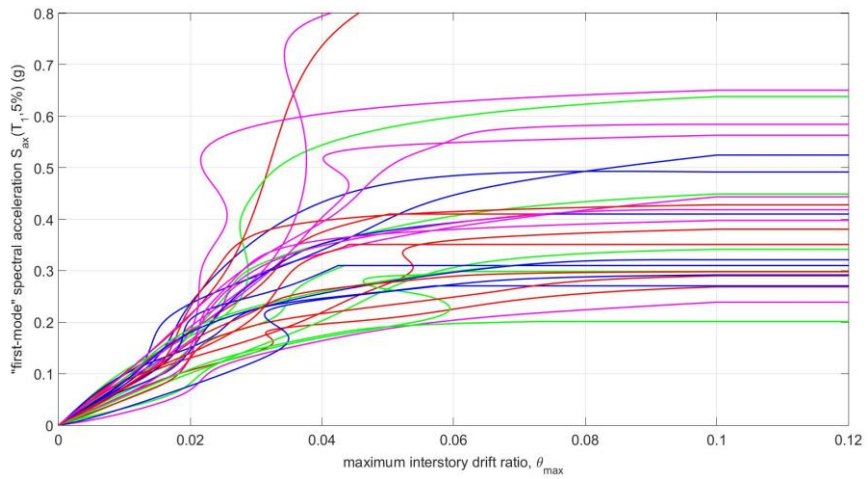
Σχήμα 5.13: Ποσοτημ6ρια 16%,50%,84% καμπ6λων IDA στο LA20 2D 20 FRAME EHNH (2203).



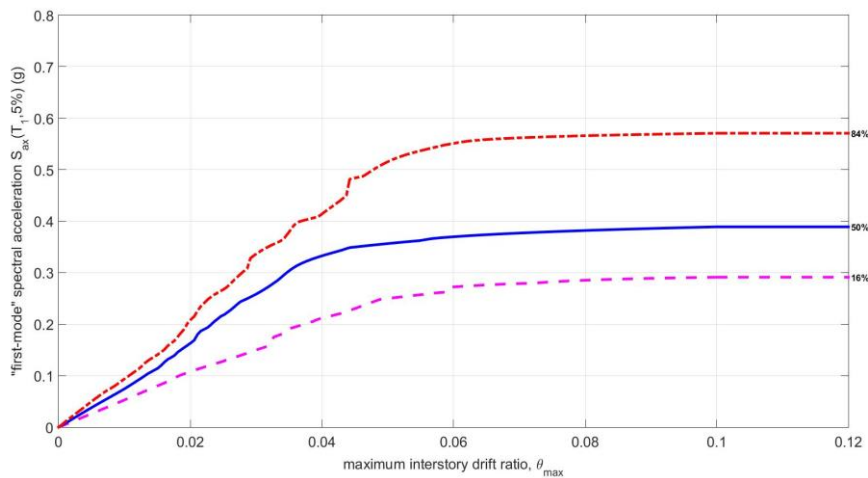
Σχήμα 5.14: Καμπ6λες IDA στο LA20 2D 20 FRAME EHNRL1 (2204).



Σχήμα 5.15: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D 20 FRAME EHNRL1 (2204).

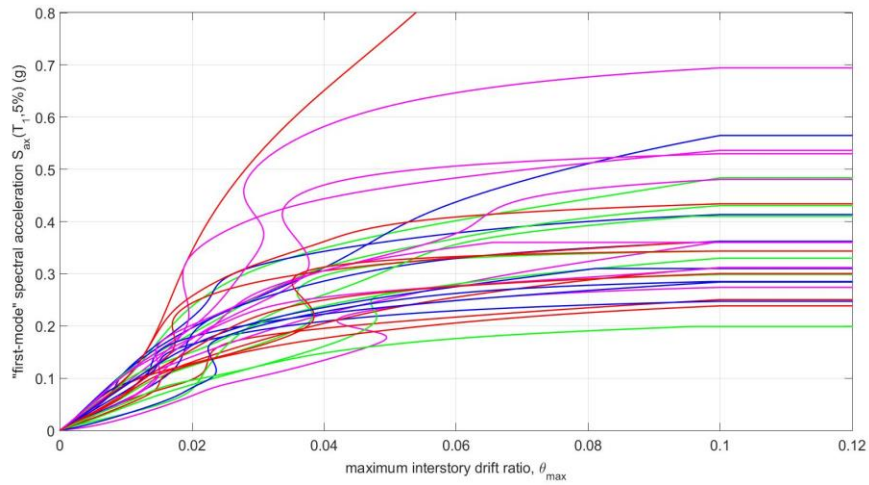


Σχήμα 5.16: Καμπύλες IDA στο LA20 2D 20 FRAME EHNRL2 (2205).

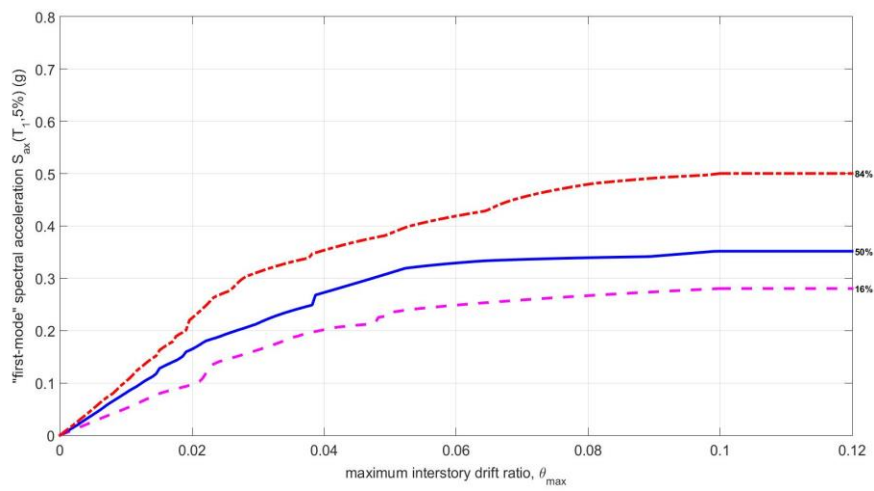


Σχήμα 5.17: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D 20 FRAME EHNRL2 (2205).





Σχήμα 5.18: Καμπύλες IDA στο LA20 2D 20 FRAME FBS (2206).



Σχήμα 5.19: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D 20 FRAME FBS (2206).



## **6 Δισδιάστατη προσομοίωση πλήρους πλαισίου**

### **6.1 Προσομοίωση**

#### **6.1.1 Γενικά**

Τα προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας προέρχονται από την άμεση απλοποίηση των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων. Με άλλα λόγια, η προσομοίωση των μελών των πλαισίων γίνεται με ακριβώς τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι μάζες σε κάθε όροφο, όμοια με την πρώτη κατηγορία των δισδιάστατων προσομοιωμάτων, δίνονται ίσες με τις μισές μάζες κάθε ορόφου. Όσον αφορά τα κατακόρυφα φορτία, το ποσοστό των φορτίων που πηγαίνουν στο πλαίσιο και αυτών που πηγαίνουν στο στύλο P-Δ σε κάθε όροφο, υπολογίζεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5, δηλαδή το 43% στο πλαίσιο και το υπόλοιπο 57% στο στύλο P-Δ.

Στη συγκεκριμένη κατηγορία, δεδομένου ότι σε κάθε όροφο τα στοιχεία προσομοιώνονται με τα ακριβή γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και όχι με το μέσο όρο των χαρακτηριστικών των στοιχείων του κάθε ορόφου, όπως στην πρώτη κατηγορία δισδιάστατων προσομοιωμάτων, τα κατακόρυφα φορτία στα υποστυλώματα δίνονται και αυτά σε κάθε στοιχείο με την ακριβή τιμή τους με βάση το είδος του υποστυλώματος από άποψη φορτίου ( $4c$  και  $2p$  υποστυλώματα), όπως αυτό παρουσιάστηκε στα προηγούμενα.

Στο σχήμα 6.1, παρουσιάζεται η αρίθμηση των μελών και κόμβων στα προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας.

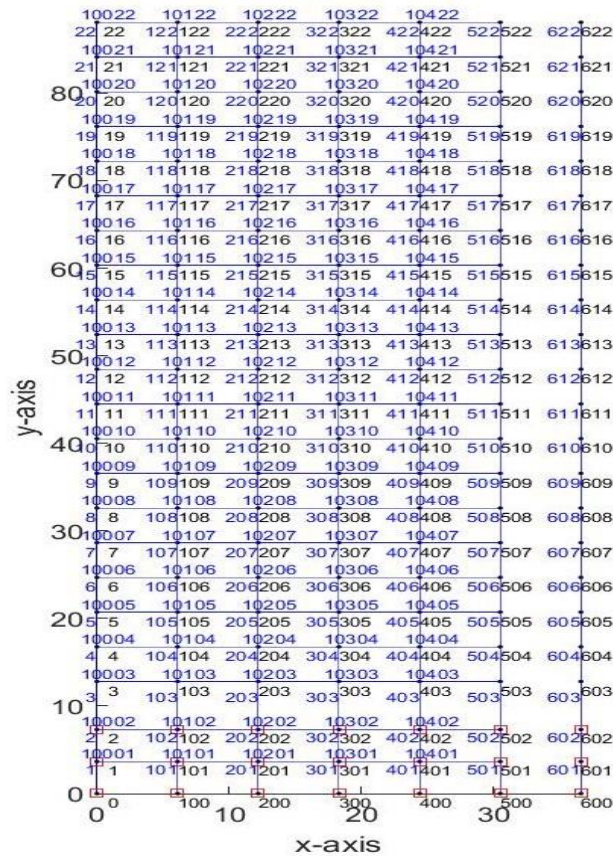
#### **6.1.2 Προσομοίωση με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα μέλη των προσομοιωμάτων αυτής της κατηγορίας προσομοιώνονται ακριβώς όπως τα μέλη των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων. Κατά συνέπεια, στο πρώτο προσομοίωμα, LA20 2D REAL FRAME ELC (201), έχουμε ελαστικά υποστυλώματα και ανελαστικούς δοκούς και στο δεύτερο, LA20 2D REAL FRAME UNELC (202), ανελαστικά υποστυλώματα και δοκούς.

Στη συγκεκριμένη κατηγορία, έχουμε ένα ακόμη προσομοίωμα με χρήση μελών συγκεντρωμένης πλαστικότητας το LA20 2D REAL FRAME MXED (204). Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα, σε κάθε μέλος η προσομοίωση των στροφικών ελατηρίων-πλαστικών αρθρώσεων γίνεται με χρήση διατομών ινών ανάλογα με τον τύπο της διατομής του κάθε μέλους, χρησιμοποιώντας τις διατομές ινών που χρησιμοποιήθηκαν και στις 2 προηγούμενες κατηγορίες προσομοίωσης. Ο συγκεκριμένος τρόπος προσομοίωσης, αποτελεί έναν αρκετά πιο σύντομο τρόπο ανάλυσης προσομοιώματος κτιρίου με χρήση διατομών ινών, για σχεδιασμένα κτίρια, όπου οι πλαστικοποιήσεις αναμένονται στα άκρα των στοιχείων.

### 6.1.3 Προσομοίωση με στοιχεία ινών

Για το προσομοίωμα με στοιχεία ινών, LA20 2D REAL FRAME FBS (203), τόσο στα υποστρώματα όσο και στις δοκούς, χρησιμοποιήθηκαν και εδώ ακριβώς τα ίδια στοιχεία ινών που χρησιμοποιήθηκαν στα αντίστοιχα μέλη του τρισδιάστατου προσομοιώματος με στοιχεία ινών και αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 6.1: Αρίθμηση κόμβων (μαύρο χρώμα) και μελών (μπλε χρώμα) στο LA20 2D REAL FRAME.

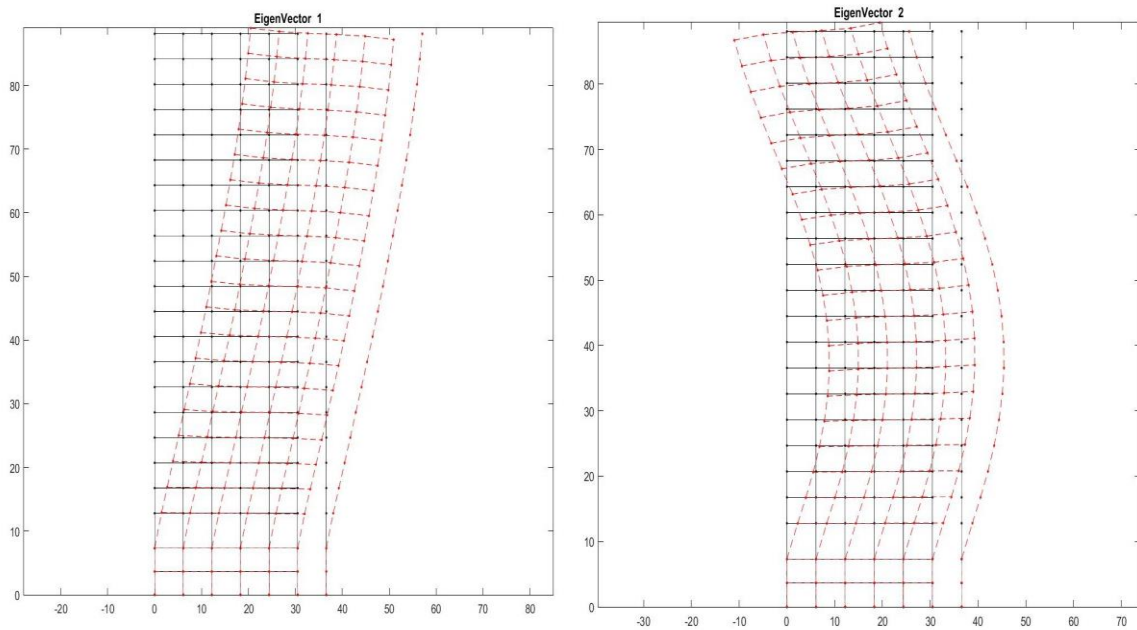
## 6.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων

### 6.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

Στον Πίνακα 6.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης στα 4 προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι ιδιοπερίοδοι των 2 πρώτων ιδιομορφών ταλάντωσης. Ομοίως με τα προηγούμενα, και εδώ το ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής είναι περίπου στο 80% και στα 4 προσομοιώματα. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6.2, παρουσιάζεται το σχήμα των 2 πρώτων ιδιομορφών.

Πίνακας 6.1: Ιδιοπερίοδοι 2 πρώτων ιδιομορφών των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D REAL FRAME.

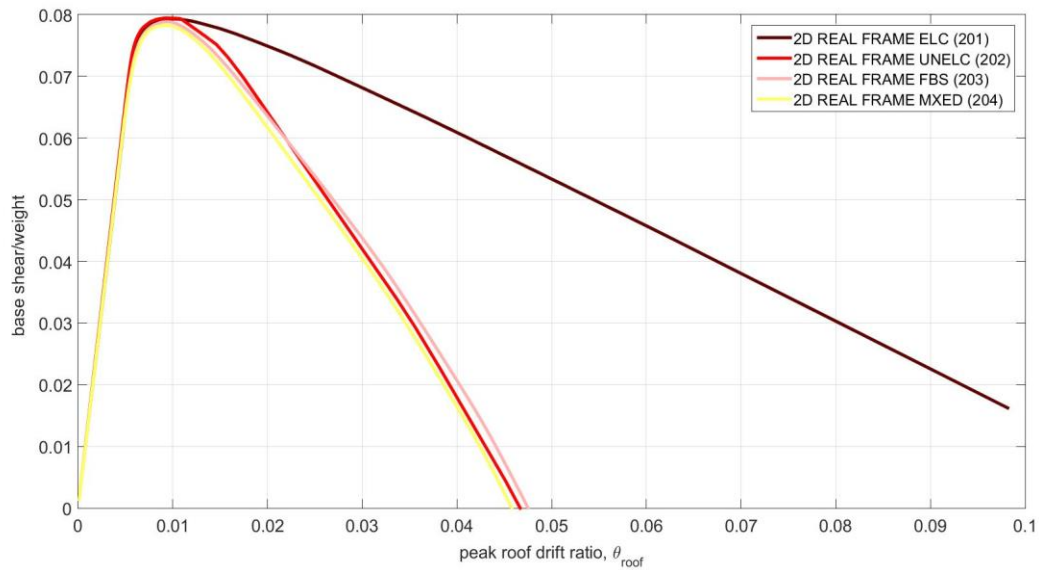
Προσομοίωμα (Κωδικός)	T1 (s)	T2 (s)
LA20 2D REAL FRAME ELC (201)	3.85	1.34
LA20 2D REAL FRAME UNELC (202)	3.82	1.33
LA20 2D REAL FRAME FBS (203)	3.86	1.33
LA20 2D REAL FRAME MXED (204)	3.85	1.33



Σχήμα 6.2: Σχήμα 2 πρώτων ιδιομορφών στα προσομοιώματα της κατηγορίας LA20 2D REAL FRAME.

## 6.2.2 Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis)

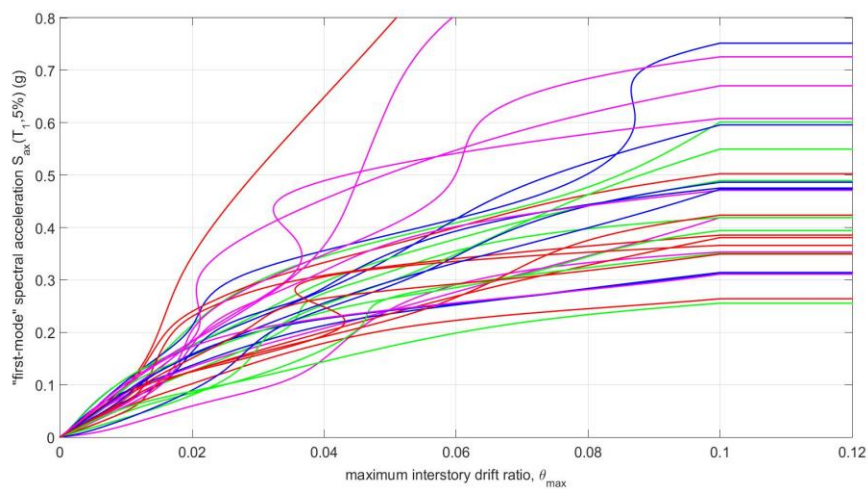
Στο Σχήμα 6.3, παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας των προσομοιωμάτων, όπως προέκυψαν από την ανάλυση Pushover. Η κατανομή των φορτίων καθ' ύψος σε κάθε διάφραγμα, δίνεται με βάση την πρώτη ιδιομορφή. Οι καμπύλες και εδώ σχεδιάζονται σε άξονες  $x, y$  ( $\theta_{roof} Vb/W$ ), όμοια με αυτές των προηγούμενων κατηγοριών, ενώ και εδώ ως βάρος λαμβάνεται το μισό βάρος του κτιρίου.



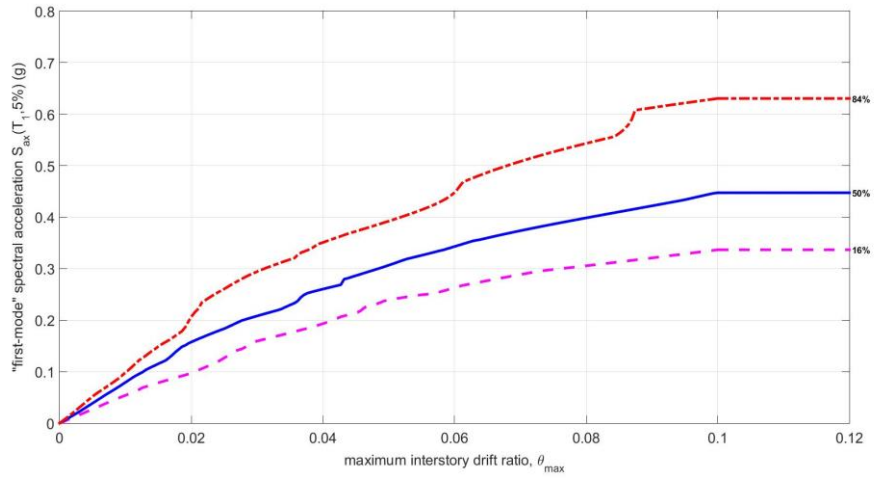
Σχήμα 6.3: Καμπύλες ικανότητας της ανάλυσης Pushover των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D REAL FRAME.

### 6.2.3 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA)

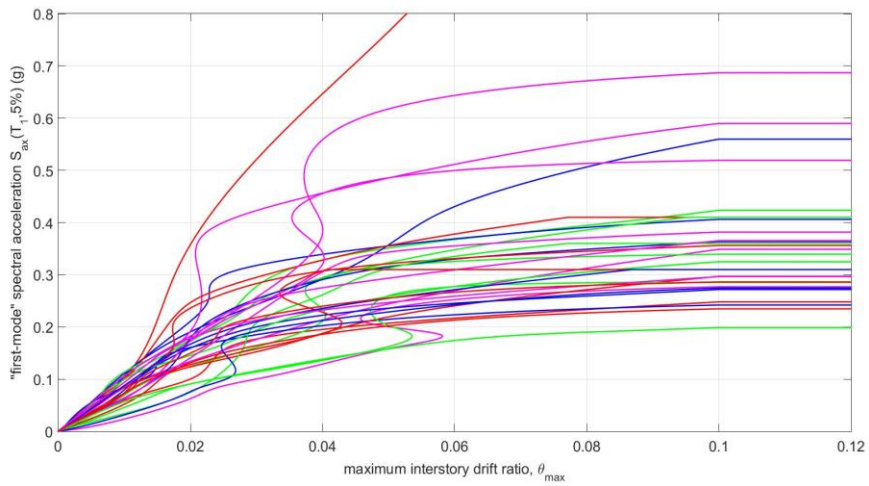
Στα σχήματα 6.4 έως 6.11 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τη μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, σύμφωνα με τη μέθοδο ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA). Από τα αποτελέσματα της IDA στα 4 προσομοιώματα, σχεδιάζονται οι καμπύλες IDA καθώς και αυτές των ποσοστημορίων 16%, 50% (διάμεση καμπύλη IDA), 84%, (fractile IDA curves), όπως και στις 2 προηγούμενες κατηγορίες.



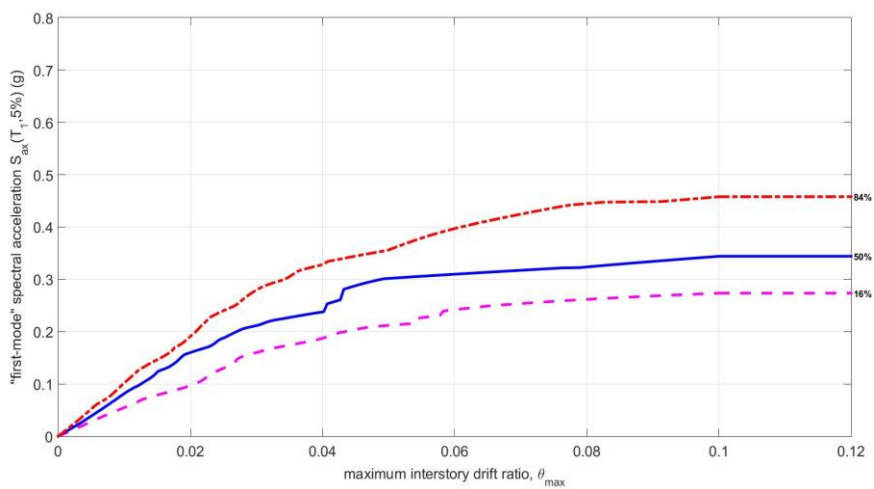
Σχήμα 6.4: Καμπύλες IDA στο LA20 2D REAL FRAME ELC (201).



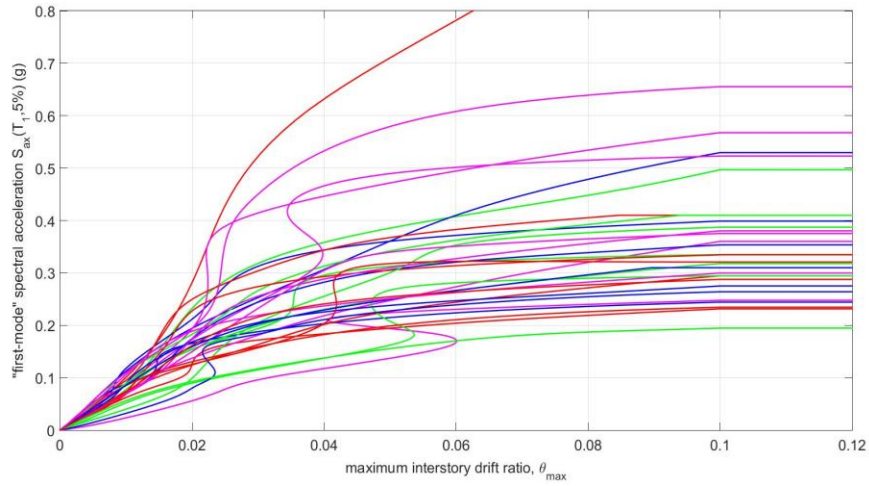
Σχήμα 6.5: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D REAL FRAME ELC (201).



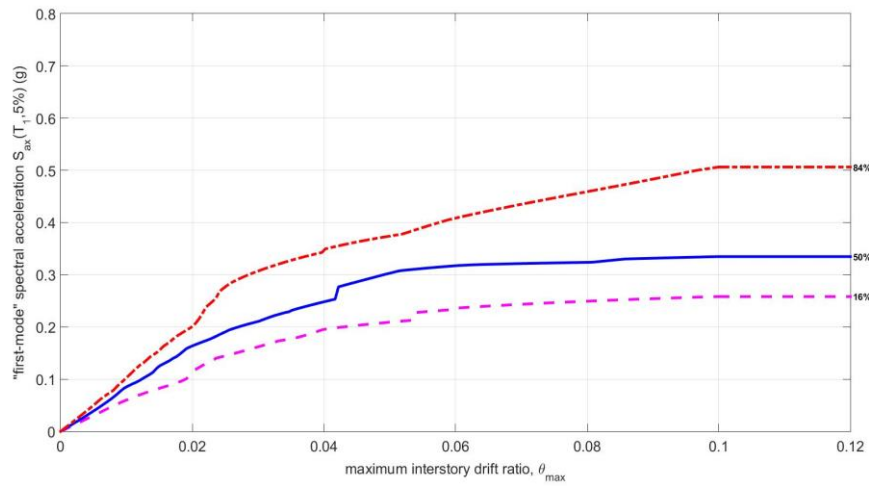
Σχήμα 6.6: Καμπύλες IDA στο LA20 2D REAL FRAME UNELC (202).



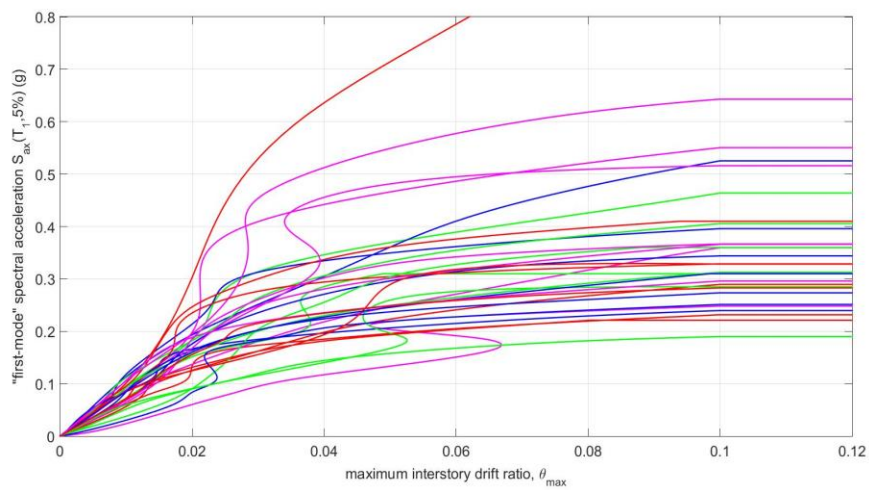
Σχήμα 6.7: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D REAL FRAME UNELC (202).



Σχήμα 6.8: Καμπύλες IDA στο LA20 2D REAL FRAME FBS (203).

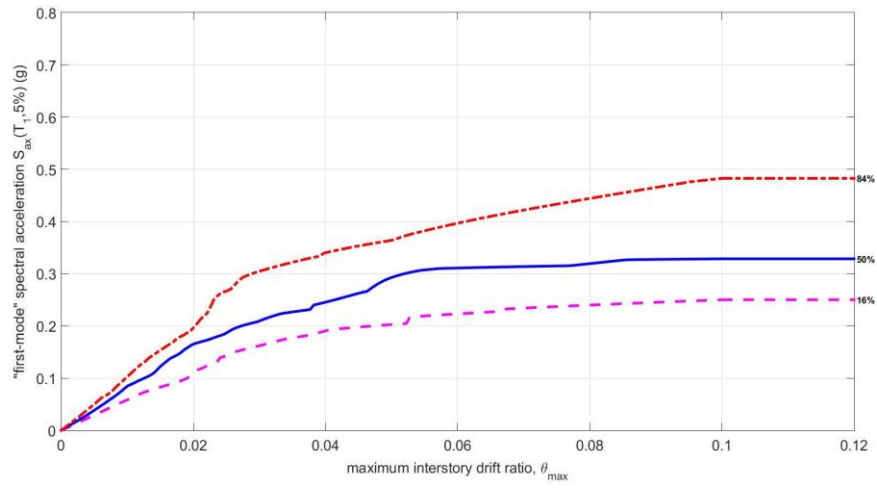


Σχήμα 6.9: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D REAL FRAME FBS (203).



Σχήμα 6.10: Καμπύλες IDA στο LA20 2D REAL FRAME MXED (204).





Σχήμα 6.11: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D REAL FRAME MIXED (204).





## 7 Δισδιάστατη προσομοίωση ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος

### 7.1 Προσομοίωση

Η τρίτη και τελευταία κατηγορία δισδιάστατων προσομοιωμάτων, αφορά την προσομοίωση του μισού κτιρίου συμπυκνωμένη σε ένα ισοδύναμο πλαίσιο ενός ανοίγματος μήκους 20ft στη διεύθυνση X. Το πλαίσιο που συνιστά το προσομοίωμα της συγκεκριμένης κατηγορίας, προκύπτει από τη συμπύκνωση του ενός εκ των δύο πλαισίων στη διεύθυνση X, που προσομοιώνεται στις προηγούμενες δύο κατηγορίες δισδιάστατων προσομοιωμάτων. Προσομοιώνονται τόσο οι 20 όροφοι όσο και τα 2 υπόγεια, ενώ στην εν λόγω κατηγορία έχουμε 5 διαφορετικά προσομοιώματα.

Στα προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας, η αρίθμηση των κόμβων και των μελών των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 7.1, η προσομοίωση των 2 υποστυλωμάτων και της δοκού κάθε ορόφου γίνεται, συμπυκνώνοντας τα προσομοιώματα της κατηγορίας LA20 2D 20 FRAME σε ένα πλαίσιο και επεκτείνοντας τα ώστε να προσομοιωθούν και τα 2 υπόγεια. Με άλλα λόγια, σε κάθε όροφο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθενός από τα 2 υποστυλώματα (A,I,W) είναι ίσα με το ημιάθροισμα των χαρακτηριστικών των υποστυλωμάτων του ορόφου, ενώ τα αντίστοιχα της δοκού είναι ίσα με το άθροισμα των χαρακτηριστικών των δοκών των 5 ανοιγμάτων κάθε ορόφου.

Η προσομοίωση των μελών γίνεται μόνο με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας (lumped plasticity), καθώς με βάση τα παραπάνω δε δύναται να δημιουργηθεί προσομοίωμα με στοιχεία ινών. Επομένως, για τα 5 διαφορετικά προσομοιώματα έχουμε τις αντίστοιχες εκδοχές με το LA20 2D 20 FRAME, την πρώτη όπου έχουμε ελαστικά υποστυλώματα και ανελαστικούς δοκούς (LA20 2D ONE BAY FRAME ELC (211)), τη δεύτερη όπου τόσο τα υποστυλώματα όσο και τα δοκάρια είναι ανελαστικά (LA20 ONE BAY FRAME EP (212)). Στις επόμενες τρεις εκδοχές, γίνεται κατ' αναλογία με το Κεφάλαιο 5, χρήση του τροποποιημένου μοντέλου Ibarra & Krawinkler και των σχέσεων Lignos & Krawinkler (2011) για τον υπολογισμό των στροφών οι οποίες είναι ίδιες σε κάθε όροφο με αυτές που δόθηκαν στα αντίστοιχα προσομοιώματα της κατηγορίας LA20 2D 20 FRAME. Έτσι, έχουμε το τρίτο προσομοίωμα LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL (213), το τέταρτο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (214) και το πέμπτο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL2 (215).

Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί η ιδιαιτερότητα που αφορά το συγκεκριμένο τρόπο προσομοίωσης. Με το συγκεκριμένο τρόπο προσομοίωσης, ενώ εξασφαλίζεται κατά προσομοίωση η αποτύπωση της διαμητικής δυσκαμψίας του κτιρίου (shear stiffness), δε συμβαίνει το ίδιο με την καμπτική δυσκαμψία (bending stiffness). Το συγκεκριμένο, αποτυπώνεται και από την ιδιομορφική ανάλυση, όπου αφήνοντας το εμβαδό των στύλων ίσο με το ημιάθροισμα του εμβαδού των στύλων σε επίπεδο ορόφου, παίρνουμε ιδιοπερίοδο  $T1$  περίπου 5s που είναι κατα πολύ μεγαλύτερη από την ιδιοπερίοδο της πρώτης ιδιομορφής των προσομοιωμάτων των προηγούμενων κατηγοριών (3.6-3.8s). Ως τρόπος διόρθωσης, επιχειρείται η αύξηση του εμβαδού των υποστυλωμάτων από  $A$  σε  $A_0$  όπου το  $A_0$  υπολογίζεται με βάση το Σχήμα 7.2 και τη σχέση:

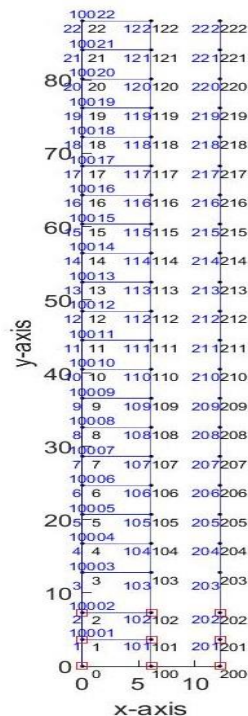
$$A_o \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 = A_H \cdot (2.5 \cdot L)^2 + A_w \cdot (1.5 \cdot L)^2 + A_w \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2, \quad (7.1)$$

$$A_o = 4 \cdot (6.25 \cdot A_H + 2.5 \cdot A_w)$$

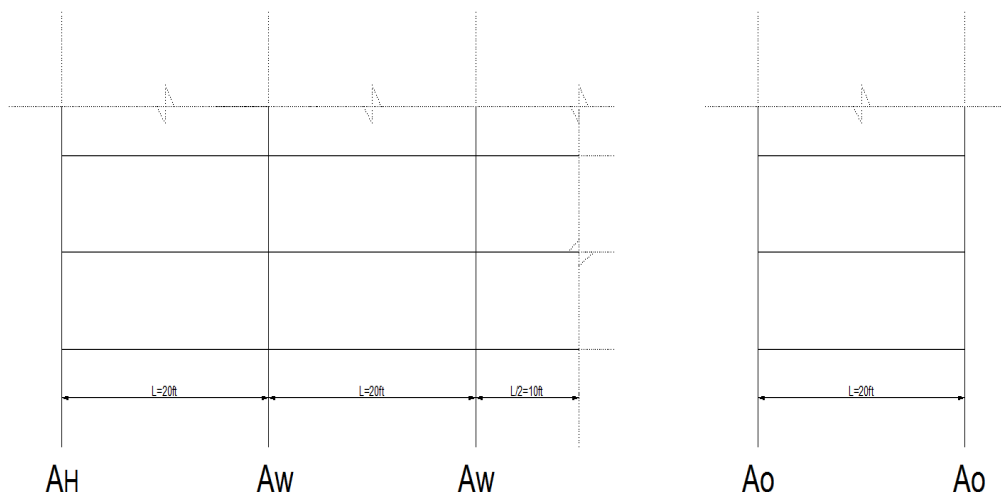
όπου  $A_H$ ,  $A_w$  τα εμβαδά διατομής των ακραίων κοιλοδοκών HSS και των εσωτερικών υποστυλωμάτων του πλαισίου ροπής  $W$  και  $L$  το μήκος του ανοίγματος του πλαισίου. Με τη συγκεκριμένη διόρθωση, όντως βελτιώνεται η απόκριση του κτιρίου ( $T1=3.7-3.8s$ ). Επομένως, και στα 5 προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας, το εμβαδόν των 2 ισοδύναμων υποστυλωμάτων δίνεται αυξημένο σε  $A_o$ .

Ο συγκεκριμένος τρόπος διόρθωσης της καμπτικής δυσκαμψίας, μέσω της αύξησης του εμβαδού των στύλων, αποτελεί πλεονέκτημα της κατηγορίας προσομοίωσης ισοδύναμου πλαισίου ενός ανοίγματος έναντι της προσομοίωσης τύπου «ψαροκόκαλο» (fishbone), που αποτελεί επίσης συνήθη τρόπο απλοποιητικής προσομοίωσης. Στη συγκεκριμένη κατηγορία, δεν προσομοιώνεται πλαίσιο, αλλά όλο το πλαίσιο ροπής συμπυκνώνεται σε ένα στύλο με ελατήρια στη στάθμη κάθε ορόφου. Γενικά προτείνεται, ότι για λόγο ύψους προς άνοιγμα (aspect ratio  $H/B$ ) μικρότερο του 2.5-3.0 το ισοδύναμο πλαίσιο ενός ανοίγματος δε χρειάζεται διορθώσεις για την καμπτική δυσκαμψία, γεγονός το οποίο δε συμβαίνει στο υπό μελέτη κτίριο. Αντίστοιχες αναφορές και μελέτες έχουμε από του Nakashima et all (2002), Mori et all (2004).

Τα κατακόρυφα φορτία μοιράζονται σε πλαίσιο και στύλο P-Δ όμοια με τις προηγούμενες κατηγορίες δισδιάστατων προσομοιωμάτων και οι γεωμετρικοί μετασχηματισμοί είναι επίσης ίδιοι με τις προηγούμενες κατηγορίες, γραμμικός για τις δοκούς και μετασχηματισμός P-Δ για τα υποστυλώματα.



Σχήμα 7.1: Αρίθμηση κόμβων (μαύρο χρώμα) και μελών (μπλε χρώμα) στο LA20 2D ONE BAY FRAME.



Σχήμα 7.2: Όψη μισού πλαισίου ροπής στη διεύθυνση X (αριστερά), και πλαισίου προσομοιώματος LA20 2D ONE BAY FRAME.

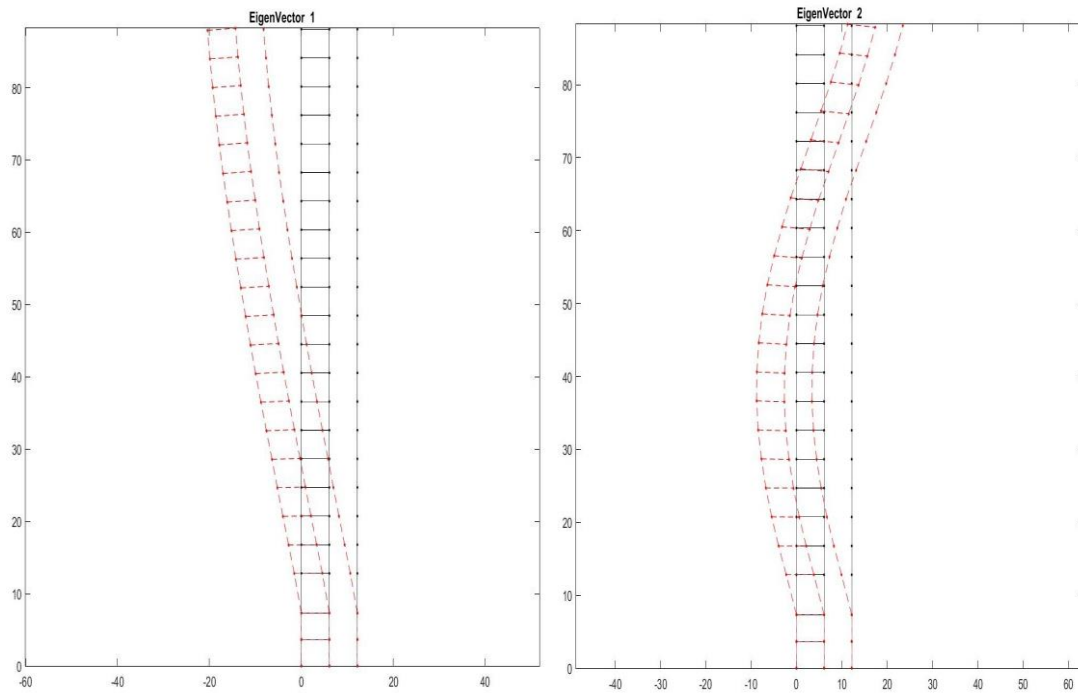
## 7.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων

### 7.2.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

Στον Πίνακα 7.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης στα 5 προσομοιώματα της συγκεκριμένης κατηγορίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι ιδιοπερίοδοι των 2 πρώτων ιδιομορφών ταλάντωσης. Και εδώ το ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής είναι περίπου στο 80% και στα 5 προσομοιώματα. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 7.3, παρουσιάζεται το σχήμα των 2 πρώτων ιδιομορφών.

Πίνακας 7.1: Ιδιοπερίοδοι 2 πρώτων ιδιομορφών των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D ONE BAY FRAME.

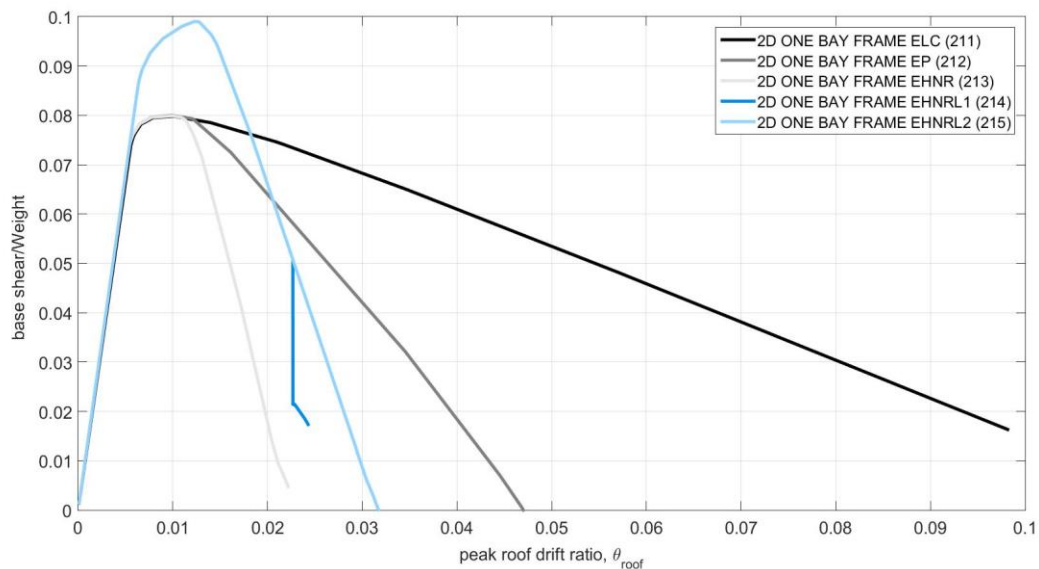
Προσομοίωμα	T1 (s)	T2 (s)
LA20 2D ONE BAY FRAME ELC (211)	3.79	1.32
LA20 2D ONE BAY FRAME EP (212)	3.76	1.32
LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL (213)	3.76	1.32
LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (214)	3.76	1.32
LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL2 (215)	3.76	1.32



Σχήμα 7.3: Σχήμα 2 πρώτων ιδιομορφών στα προσομοιώματα της κατηγορίας LA20 2D ONE BAY FRAME.

## 7.2.2 Ικανοτική στατική ανάλυση (Pushover Analysis)

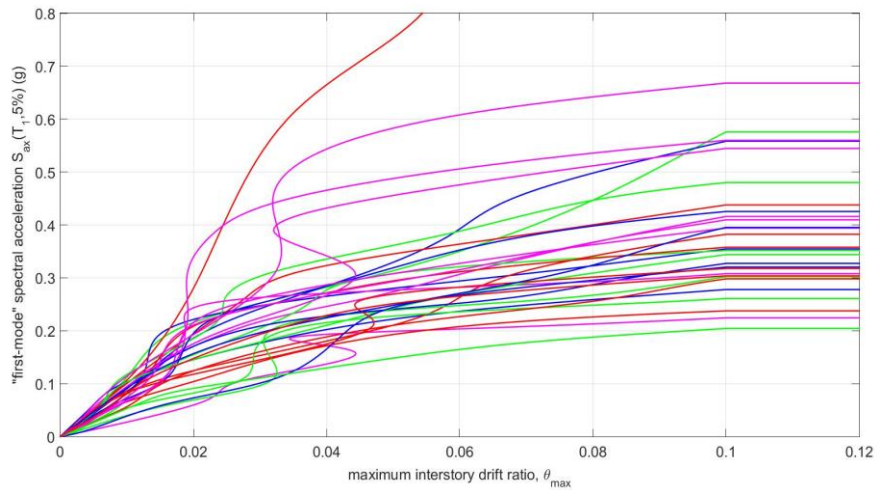
Στο Σχήμα 7.4, παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας των προσομοιωμάτων όπως προέκυψαν από την ανάλυση Pushover. Η κατανομή των φορτίων καθ' ύψος σε κάθε διάφραγμα δίνεται με βάση την πρώτη ιδιομορφή. Οι καμπύλες και εδώ σχεδιάζονται σε άξονες  $x, y$  ( $\theta_{roof} Vb/W$ ), όμοια με αυτές των προηγούμενων κατηγοριών, ενώ και εδώ ως βάρος λαμβάνεται το μισό βάρος του κτιρίου.



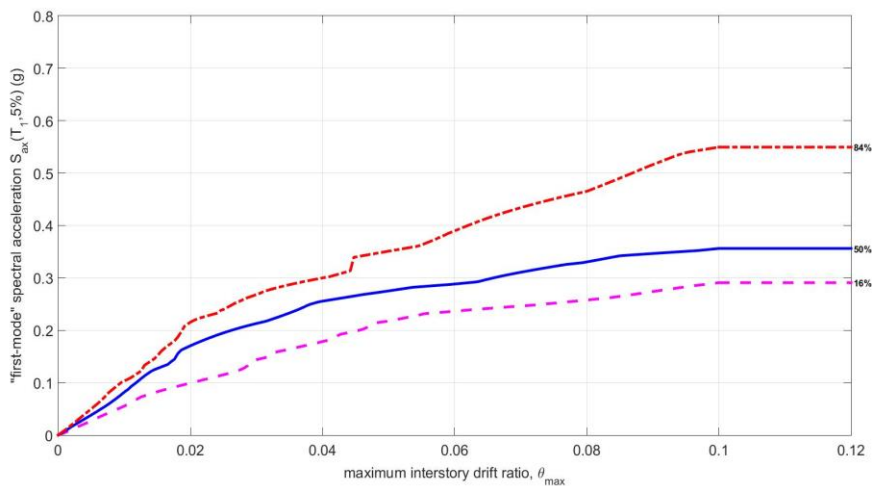
Σχήμα 7.4: Καμπύλες ικανότητας της ανάλυσης Pushover των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D ONE BAY FRAME.

### 7.2.3 Ικανοτική δυναμική ανάλυση (IDA)

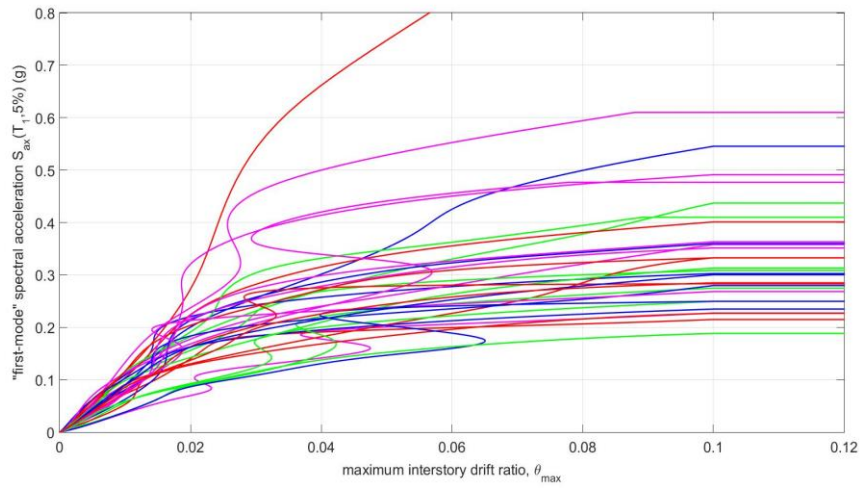
Στα σχήματα 7.5 έως 7.14 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τη μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, σύμφωνα με τη μέθοδο ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA). Από τα αποτελέσματα της IDA στα 5 προσομοιώματα, σχεδιάζονται οι καμπύλες IDA καθώς και αυτές των ποσοστημορίων 16% , 50%(διάμεση καμπύλη IDA), 84%, (fractile IDA curves), όπως και στις προηγούμενες κατηγορίες.



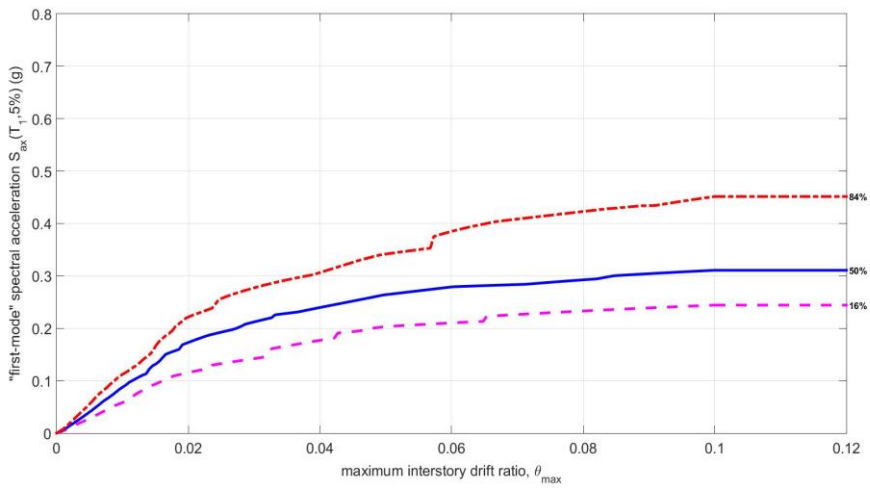
Σχήμα 7.5: Καμπύλες IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME ELC (211).



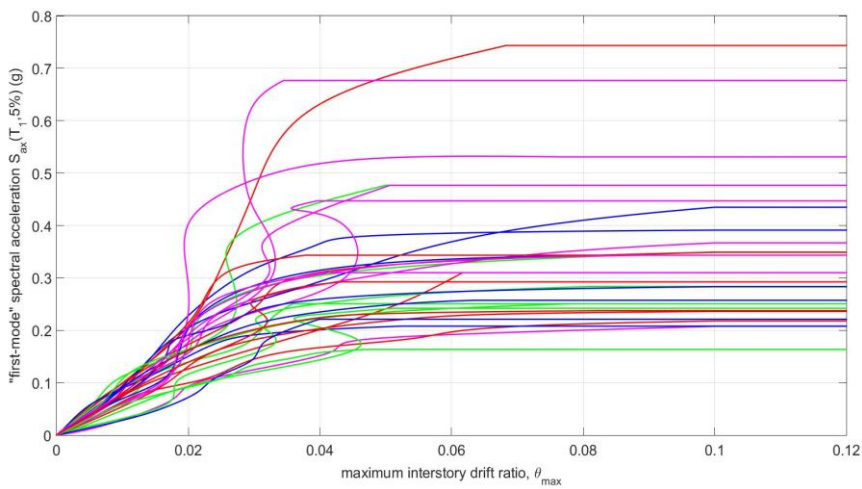
Σχήμα 7.6: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME ELC (211).



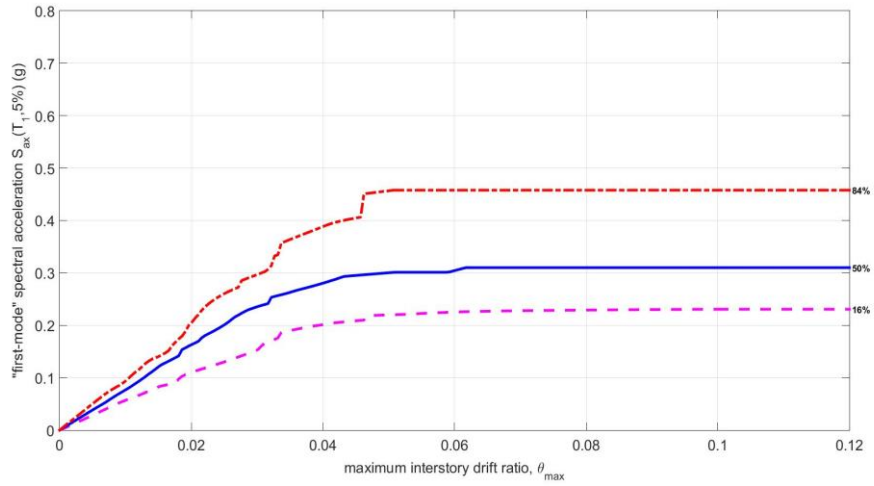
Σχήμα 7.7: Καμπύλες IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EP (212).



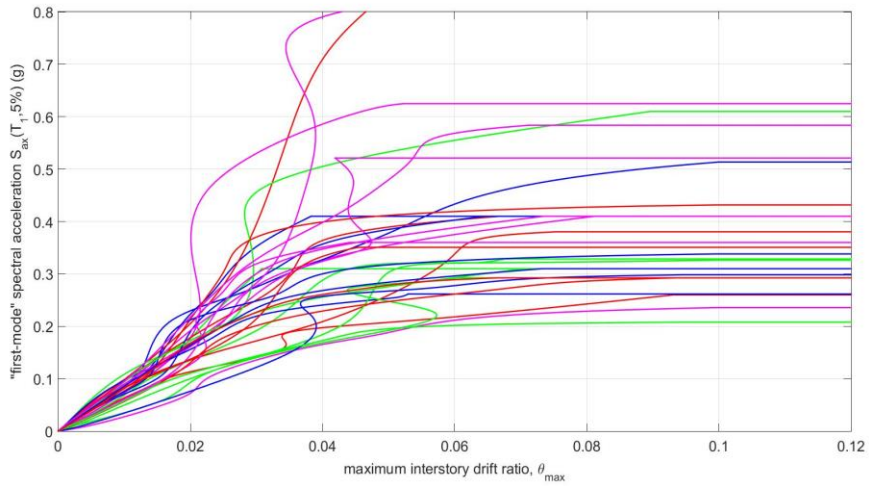
Σχήμα 7.8: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EP (212).



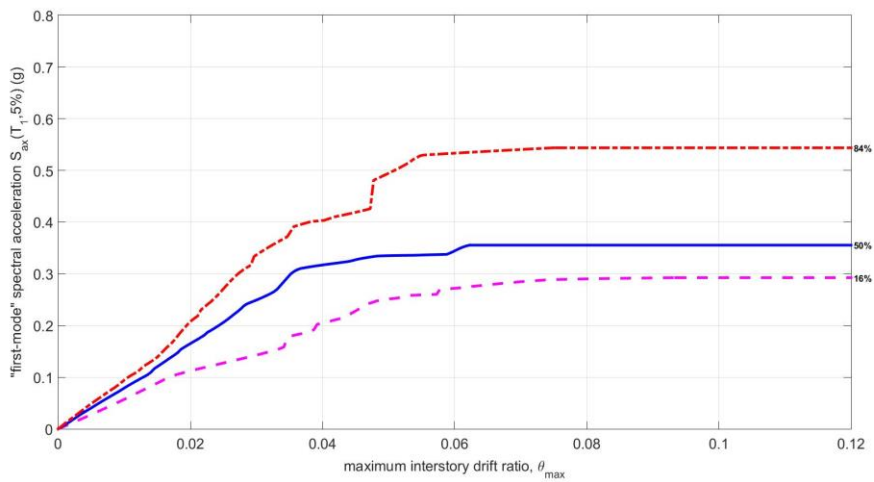
Σχήμα 7.9: Καμπύλες IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNR (213).



Σχήμα 7.10: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (214).

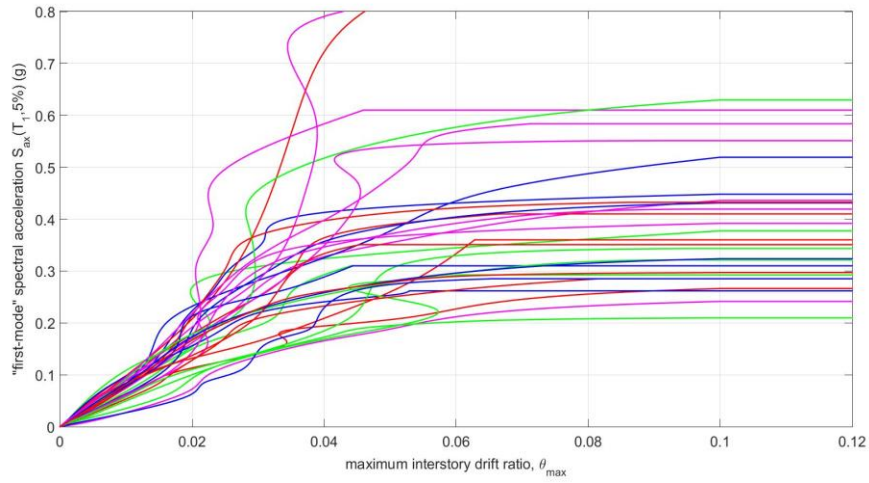


Σχήμα 7.11: Καμπύλες IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (214).

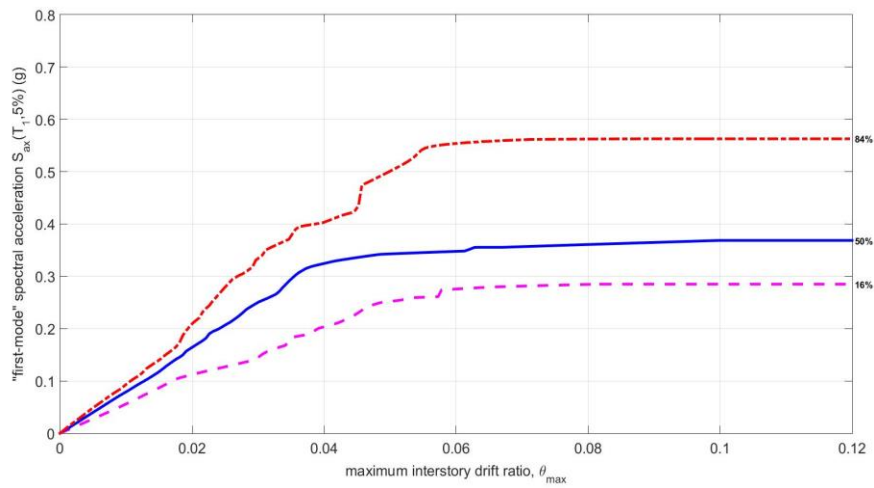


Σχήμα 7.12: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (214).





Σχήμα 7.13: Καμπύλες IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL2 (215).



Σχήμα 7.14: Ποσοστημόρια 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL2 (215).



## 8 Προσομοίωση ισοδύναμου μονοβάθμιου

Για κάθε ένα από τα 18 προσομοιώματα των 4 κατηγοριών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια παράγεται μέσω της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης (Pushover) το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα. Το γεγονός, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ότι το ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής ( $\alpha$ ) είναι σε όλα τα πολυβάθμια προσομοιώματα κάτω από 90%, καθιστά τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pushover επισφαλή το οποίο οφείλεται κυρίως στο μεγάλο ύψος του υπό μελέτη κτιρίου. Ωστόσο, η ευρεία χρήση των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων, κυρίως για λόγους συντομίας και ευκολίας, σε συνδυασμό με την προσπάθεια για όσο το δυνατόν πληρέστερη μελέτη των πιθανών κατηγοριών προσομοίωσης, οδηγούν στην προσομοίωση και ανάλυση των LA20 SDOFS.

Στα επόμενα, για λόγους συντομίας, παρουσιάζεται η προσομοίωση και τα αποτελέσματα της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (IDA) στα 4 από τα 18 συνολικά μονοβάθμια προσομοιώματα που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων όλων των προσομοιωμάτων αυτής της κατηγορίας όπως και των υπολοίπων, χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων στο επόμενο κεφάλαιο.

### 8.1 Προσομοίωση-Αποτελέσματα αναλύσεων

#### 8.1.1 Γενικά

Η προσομοίωση καθενός μονοβάθμιου συστήματος γίνεται με χρήση ενός μη γραμμικού ελατηρίου (spring), χρησιμοποιώντας το υλικό (Pinching4) που χρησιμοποιήθηκε και στην προσομοίωση των ελατηρίων-πλαστικών αρθρώσεων στο LA20 2D 20 FRAME και LA20 2D ONE BAY FRAME. Προκειμένου να υπολογιστούν τα σημεία της καμπύλης (F-δ) σε καθένα μονοβάθμιο σύστημα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Από την ιδιομορφική ανάλυση κάθε πολυβάθμιου προσομοιώματος, υπολογίζεται ο συντελεστής συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής  $\Gamma_1$  και το ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής  $\alpha$ , δηλαδή το ποσοστό της συνολικής μάζας το οποίο συμμετέχει στην απόκριση της κατασκευής για την αναμενόμενη μορφή παραμόρφωσης από την πρώτη ιδιομορφή. Οι δύο συντελεστές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \cdot \phi_i}{\sum m_i \cdot \phi_i^2}, \quad (8.1)$$

$$m^* = \sum m_i \cdot \phi_i, \quad (8.2)$$

$$a = \frac{[\sum m_i \cdot \phi_i]^2}{M \cdot \sum m_i \cdot \phi_i^2} = \Gamma \cdot \frac{m^*}{M}, \quad (8.3)$$

όπου  $\phi_i$  οι συντελεστές της πρώτης ιδιομορφής σε κάθε όροφο,  $m^*$  η μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου και  $M$  η ολική μάζα του αντίστοιχου πολυβάθμιου προσομοιώματος.

Σε κάθε πολυβάθμιο σύστημα, μετατρέπεται η καμπύλη ικανότητας που προκύπτει από την Pushover σε φάσμα ικανότητας ισοδύναμου μονοβάθμιου σε μορφή ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum) (Σχήμα 8.1), χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$S_a = \frac{V_b}{a \cdot M}, \quad (8.4)$$

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma_1}, \quad (8.5)$$

όπου  $V_b$  η τέμνουσα βάσης και  $\Delta$  η μετακίνηση κορυφής του πολυβάθμιου συστήματος.

Στη συνέχεια, μετατρέπουμε το φάσμα ικανότητας ισοδύναμου μονοβάθμιου σε καμπύλη ικανότητας ισοδύναμου μονοβάθμιου ( $F^*$ - $\delta^*$ ) (Σχήμα 8.1) όπου:

$$F^* = m^* \cdot S_a, \quad (8.6)$$

$$\delta^* = S_d, \quad (8.7)$$

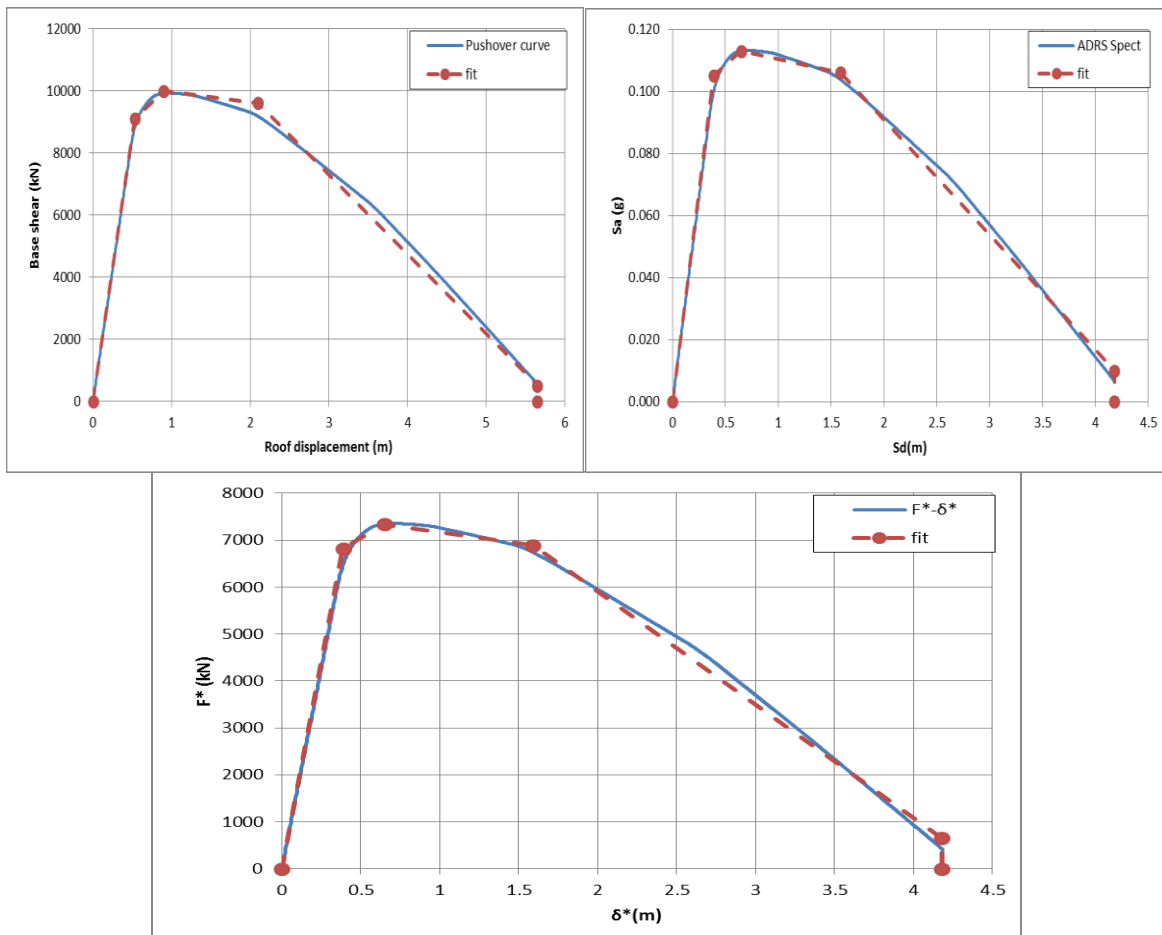
Η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος  $T^*$  υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$T^* = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{S_{dy}}{S_{ay}}}, \quad (8.8)$$

όπου  $S_{dy}$  και  $S_{ay}$  είναι η μετακίνηση και επιτάχυνση διαρροής, όπως προκύπτουν από τη γραμμική προσέγγιση (fitting) του φάσματος ικανότητας, που φαίνεται με κόκκινη γραμμή στο Σχήμα 8.1. Η τιμή της ιδιοπεριόδου είναι κοντά σε αυτή της πρώτης ιδιομορφής του αντίστοιχου πολυβάθμιου προσομοιώματος, ιδίως στα ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα που προέρχονται από τα δισδιάστατα προσομοιώματα.

Η γραμμικοποίηση των καμπυλών έγινε με χρήση του SPO2IDATool.xls, που βρίσκεται στην προσωπική ιστοσελίδα του κ. Βαμβάτσικου, και παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής τετραγραμμικού μοντέλου στα δεδομένα. Τα χαρακτηριστικά που δίνονται στο μη γραμμικό ελατήριο είναι τα σημεία της καμπύλης ( $F^*$ - $\delta^*$ ) με βάση τα οποία γίνεται η προσαρμογή του τετραγραμμικού μοντέλου (fitting) και η ιδιοπερίοδος  $T^*$ .

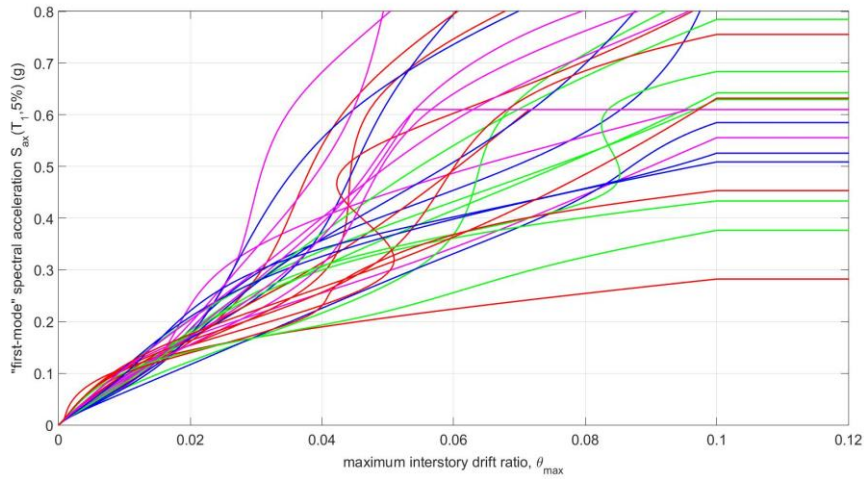
Στα επόμενα, παρουσιάζονται η προσομοίωση και τα αποτελέσματα της ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης (IDA) ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου από κάθε κατηγορία πολυβαθμίων προσομοιωμάτων, που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Προφανώς, η συμπεριφορά του κάθε μονοβάθμιου προσομοιώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προσαρμογή του τετραγραμμικού μοντέλου (fitting). Το Σχήμα 8.1 παρουσιάζει την πορεία δημιουργίας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος από το τρισδιάστατο προσομοίωμα με ανελαστικά υποστυλώματα (LA20 SDOF FROM 3D FRAME UNELC (1302)).



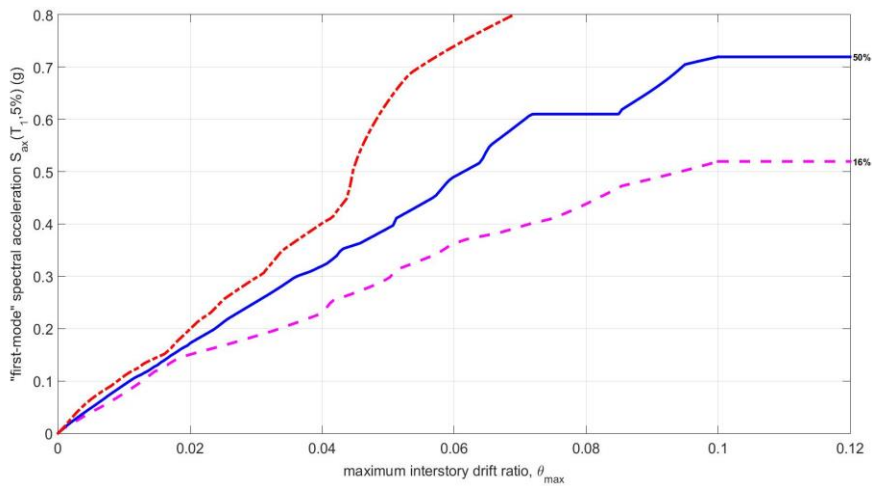
Σχήμα 8.1: Πορεία προσομοίωσης LA20 SDOF FROM LA20 3D FRAME UNELC (1302).

### 8.1.2 Μονοβάθμιο (1302)

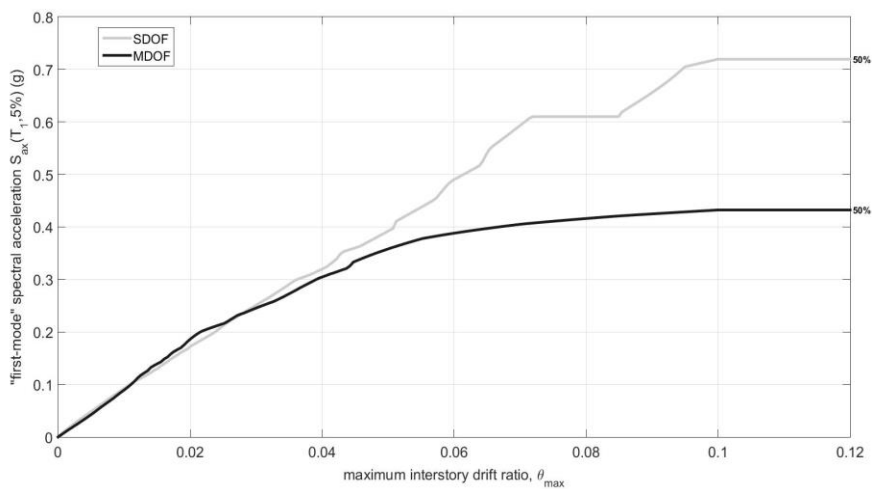
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πορεία για τη δημιουργία του συγκεκριμένου ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 8.1. Η ιδιοπερίοδος  $T^*$  είναι ίση με 3.87s, ενώ η  $T_I$  του αντίστοιχου πολυβαθμίου συστήματος είναι 3.61s. Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες IDA των 30 καταγραφών, ενώ στο Σχήμα 8.3 τα αντίστοιχα ποσοστημόρια 16%,50%,84%, όπως και στις προηγούμενες κατηγορίες. Τέλος, στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζεται συγκριτικά η διάμεσος (ποσοστημόριο 50%) των καμπύλων IDA του πολυβάθμιου (MDOF) LA20 3D FRAME UNELC (302) και του ισοδύναμου μονοβάθμιου (SDOF) (1302), προκειμένου να φανεί η διαφορά (MDOF-SDOF) στην εκτιμώμενη απόκριση.



Σχήμα 8.2: : Καμπύλες IDA στο LA20 SDOF FROM 3D FRAME UNELC (1302).



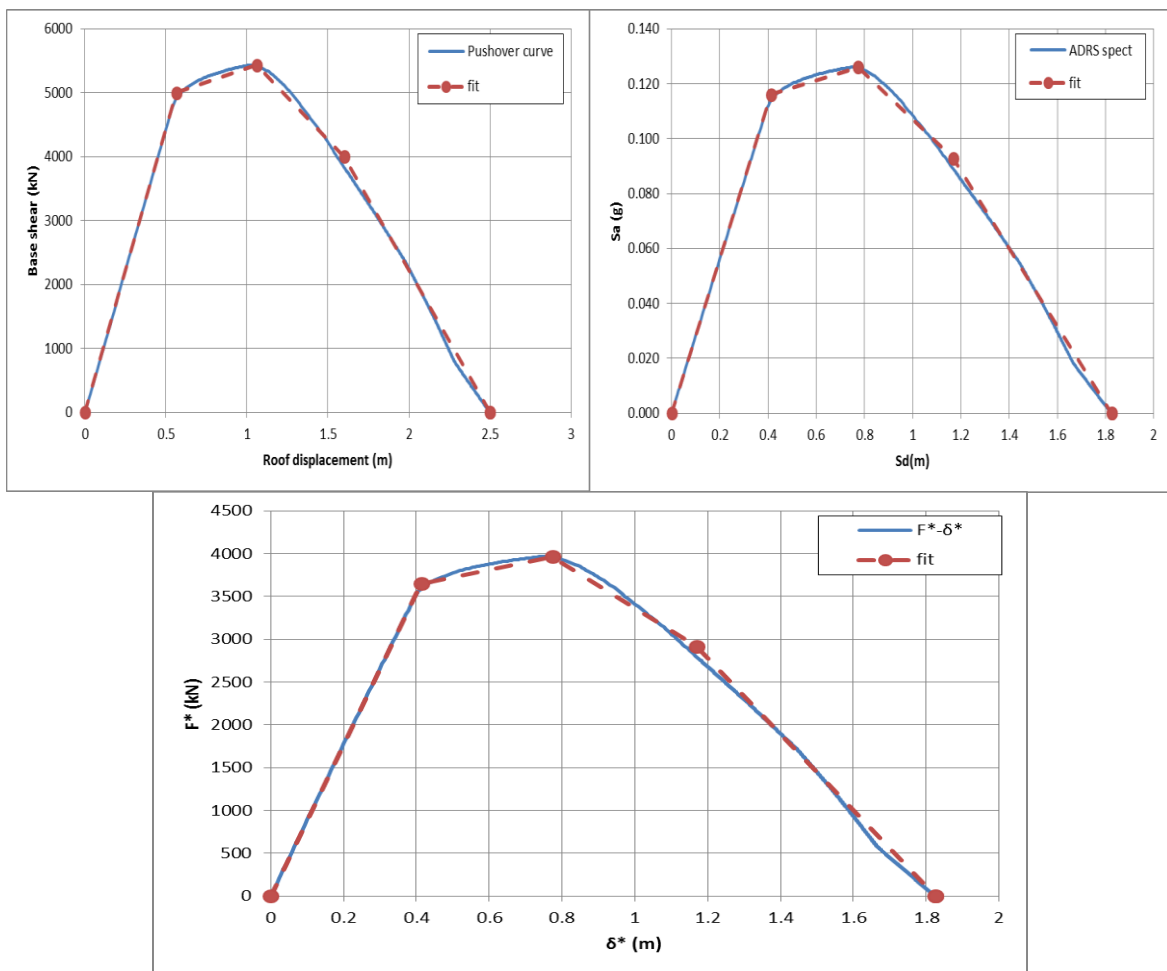
Σχήμα 8.3: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 SDOF FROM 3D FRAME UNELC (1302).



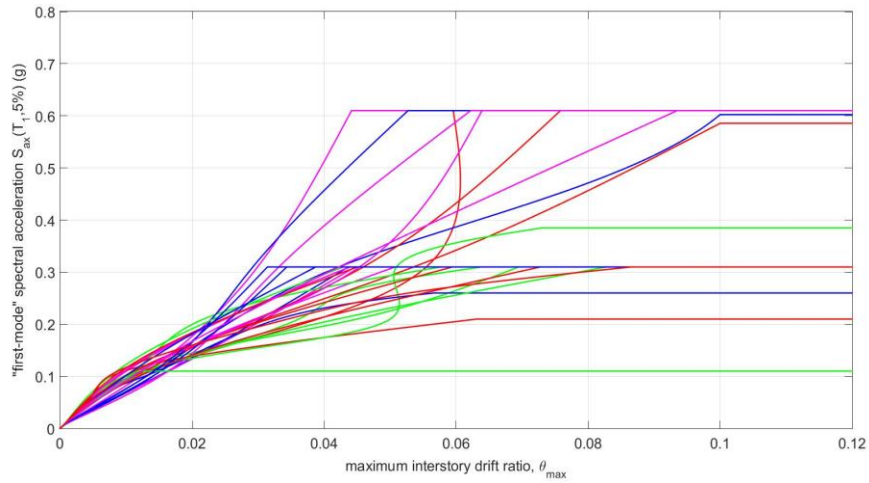
Σχήμα 8.4: Ποσοστημότητα 50% (διάμεση καμπύλη IDA) SDOF-MDOF στο LA20 SDOF FROM 3D FRAME UNELC (1302).

### 8.1.3 Μονοβάθμιο (12205)

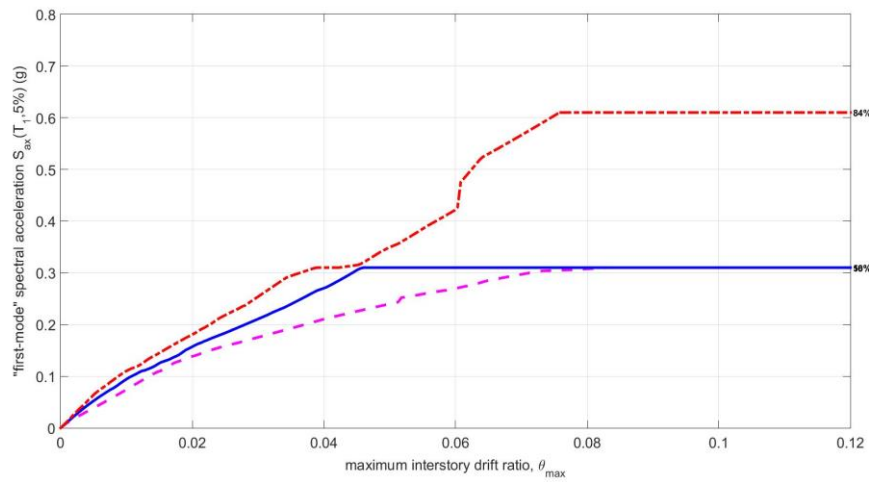
Στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζεται η πορεία για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μονοβάθμιου προσομοιώματος, το οποίο προέρχεται από τη δεύτερη κατηγορία προσομοιωμάτων και συγκεκριμένα από την ανάλυση Pushover του προσομοιώματος LA20 2D 20 FRAME EHNRL2 (2205). Η ιδιοπερίοδος  $T^*$  είναι ίση με 3.78s ενώ, η  $T_I$  του αντίστοιχου πολυβαθμίου συστήματος είναι 3.78s. Αντίστοιχα, στα Σχήματα 8.6-8.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της IDA και η σύγκριση των διάμεσων καμπύλων IDA μεταξύ μονοβάθμιου και πολυβάθμιου συστήματος.



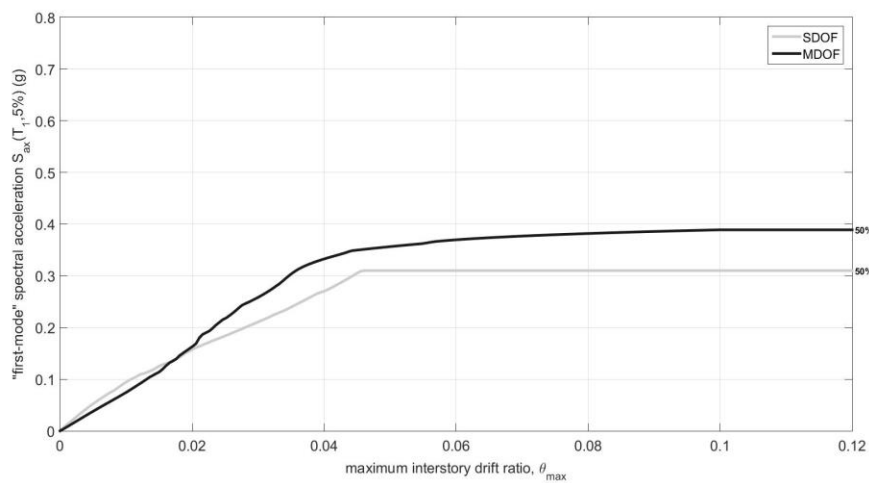
Σχήμα 8.5: Πορεία προσομοίωσης LA20 SDOF FROM LA20 2D 20 FRAME EHNRL2 (12205).



Σχήμα 8.6: : Καμπύλες IDA στο LA20 SDOF FROM 2D 20 FRAME EHNRL2 (12205).



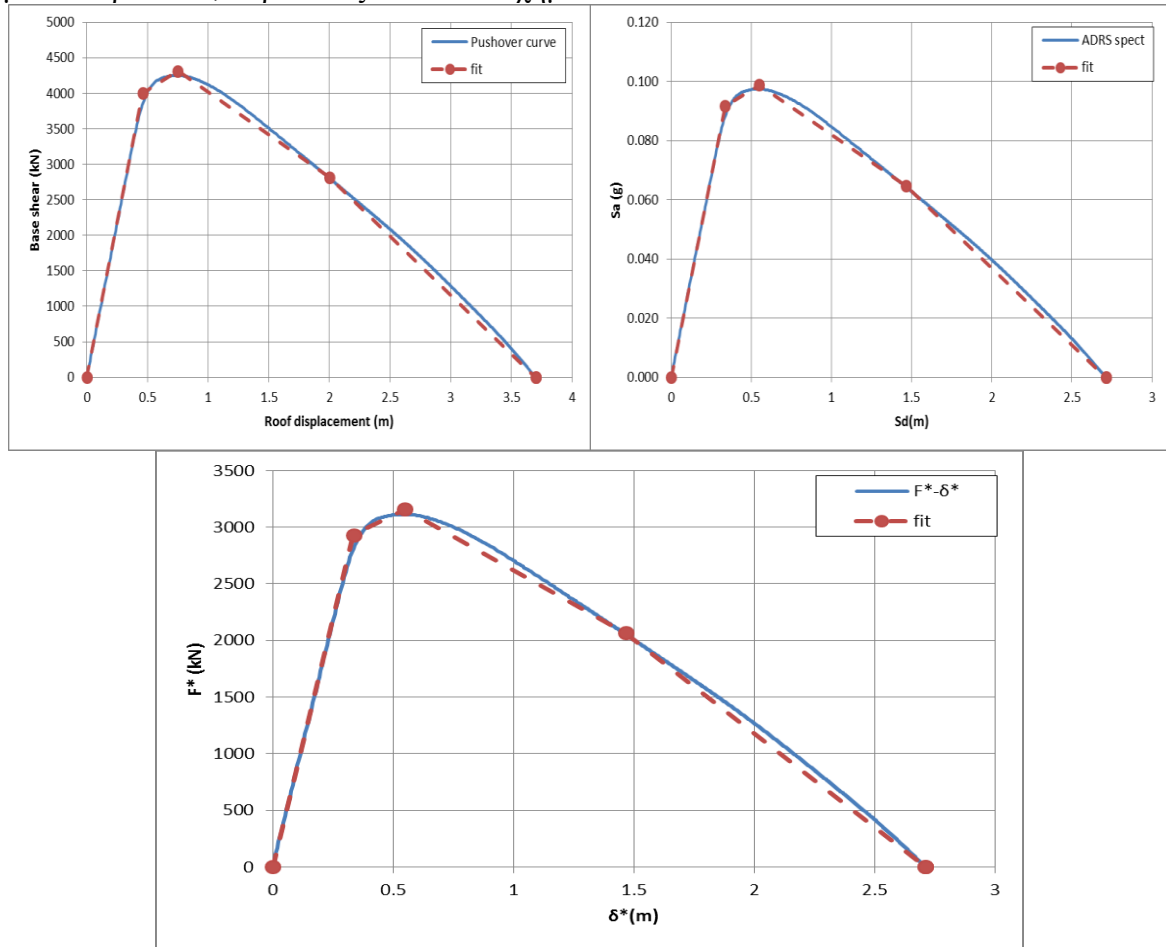
Σχήμα 8.7: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 SDOF FROM 2D 20 FRAME EHNRL2 (12205).



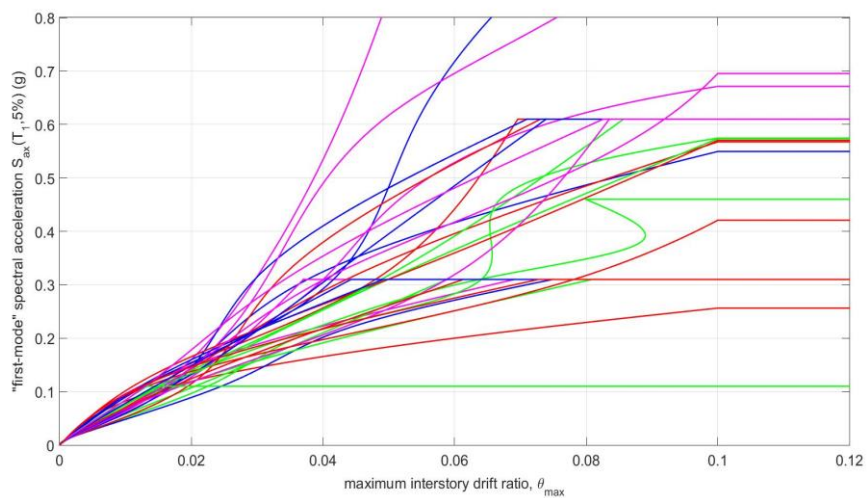
Σχήμα 8.8: Ποσοστημότητα 50% (διάμεση καμπύλη IDA) SDOF-MDOF στο LA20 SDOF FROM 2D 20 FRAME UNELC (12205).

### 8.1.4 Μονοβάθμιο (1204)

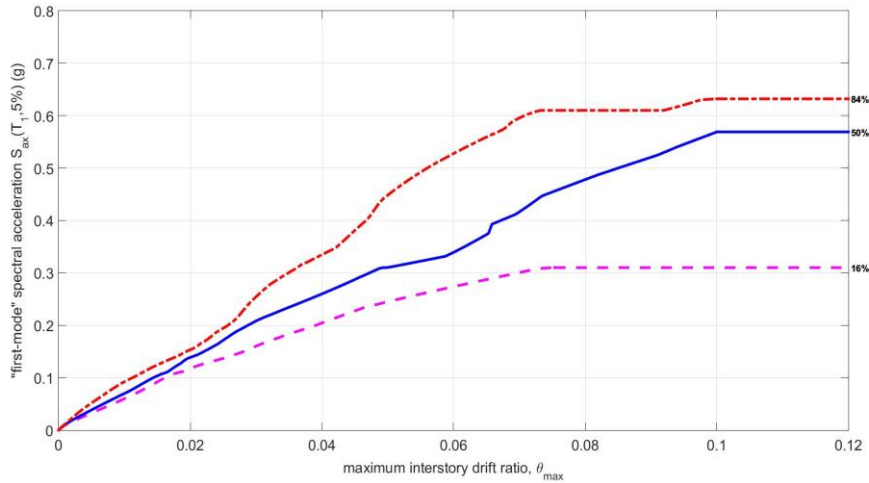
Το συγκεκριμένο μονοβάθμιο προέρχεται από την τρίτη κατηγορία προσομοιωμάτων και συγκεκριμένα από το LA20 2D REAL FRAME MIXED (204). Στο συγκεκριμένο μονοβάθμιο έχουμε  $T^*=T1=3.85s$ . Η πορεία προσομοίωσης και τα αποτελέσματα, όμοια με τα παραπάνω, παρουσιάζονται στα Σχήματα 8.9-8.12.



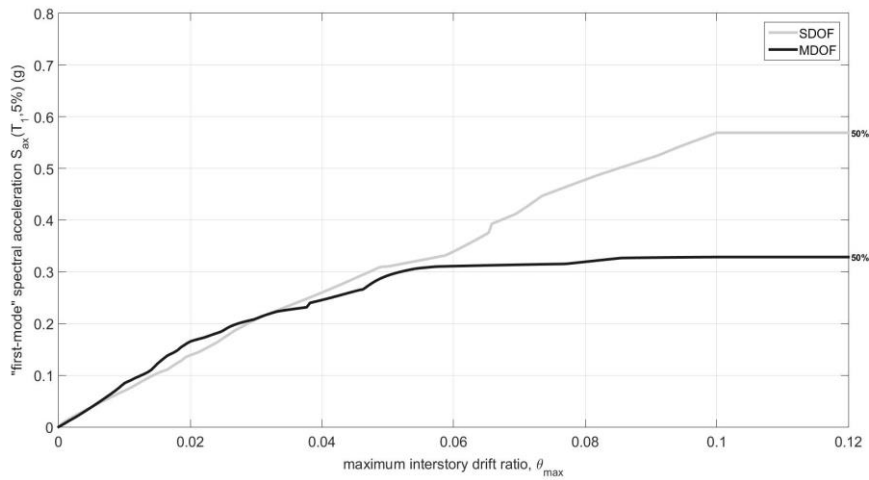
Σχήμα 8.9: Πορεία προσομοίωσης LA20 SDOF FROM LA20 2D REAL FRAME MIXED (1204).



Σχήμα 8.10: : Καμπύλες IDA στο LA20 SDOF FROM 2D REAL FRAME MIXED (1204).



Σχήμα 8.11: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 SDOF FROM 2D REAL FRAME MXED (1204).

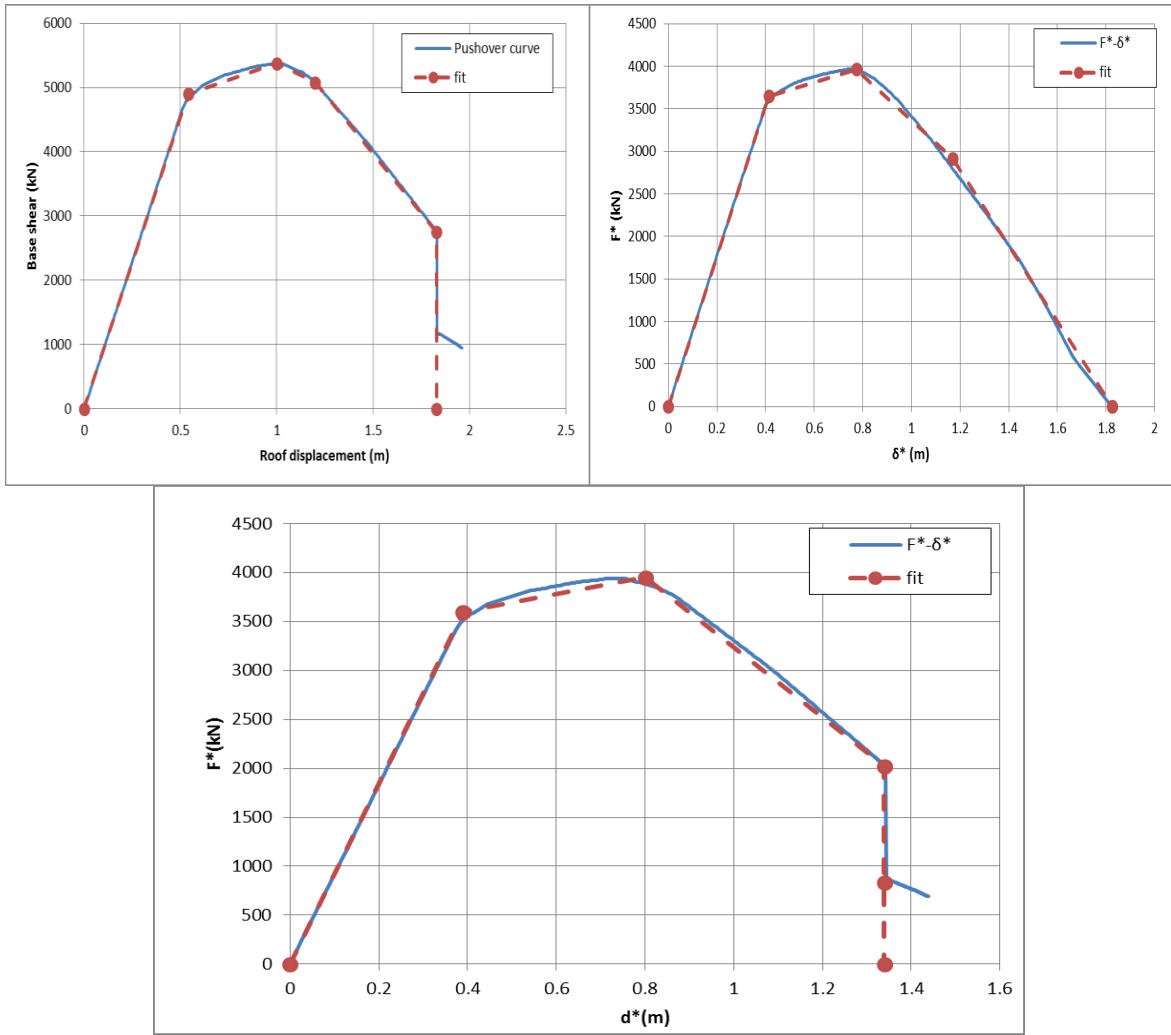


Σχήμα 8.12: Ποσοστημότητα 50% (διάμεση καμπύλη IDA) SDOF-MDOF στο LA20 SDOF FROM 2D REAL FRAME MXED (1204).

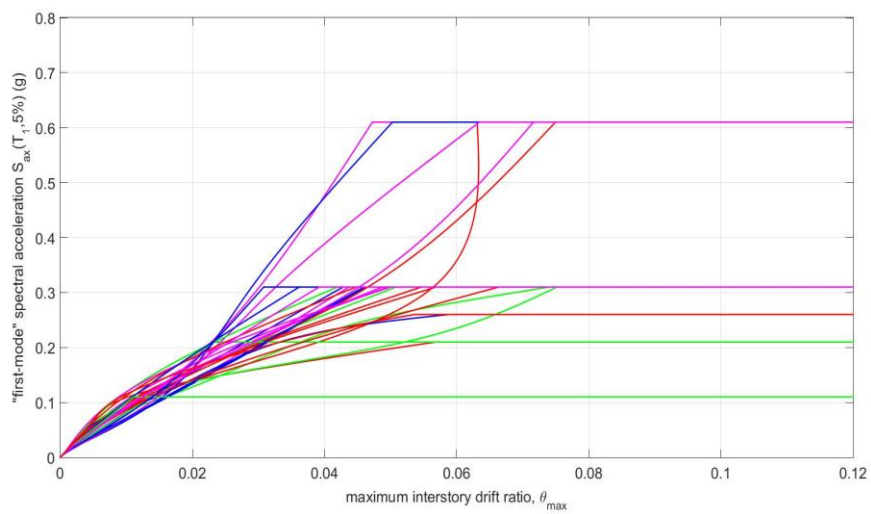
### 8.1.5 Μονοβάθμιο (1214)

Στο συγκεκριμένο μονοβάθμιο, το οποίο προέρχεται από την τέταρτη κατηγορία προσομοίωσης και συγκεκριμένα από το προσομοίωμα LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (214), η ιδιοπερίοδος υπολογίζεται  $T^* = 3.74s$  περίπου ίση με την  $T_I = 3.76s$ . Στα Σχήματα 8.13-8.17 παρουσιάζεται η προσομοίωση και τα αποτελέσματα της IDA όμοια με τα παραπάνω μονοβάθμια προσομοιώματα.

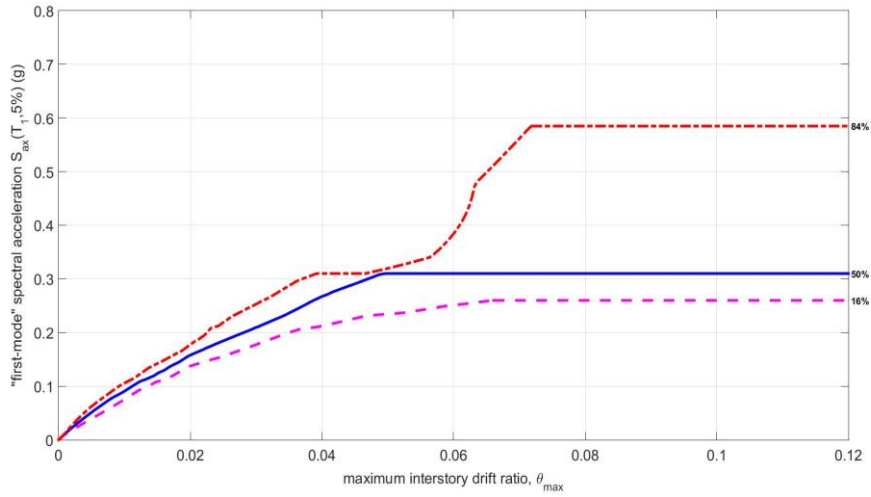




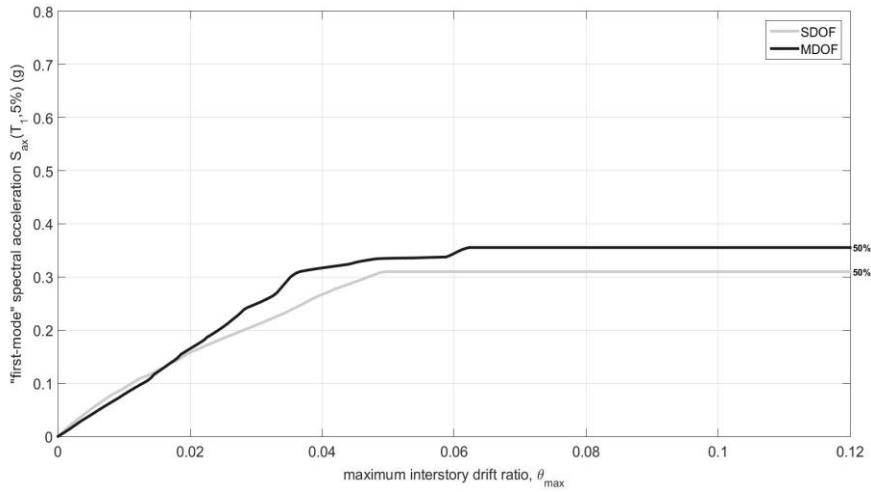
Σχήμα 8.13: Πορεία προσομοίωσης LA20 SDOF FROM LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (1214).



Σχήμα 8.14: : Καμπύλες IDA στο LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (1214).



Σχήμα 8.15: Ποσοστημότητα 16%,50%,84% καμπύλων IDA στο LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (1214).



Σχήμα 8.16: Ποσοστημότητα 50% (διάμεση καμπύλη IDA) SDOF-MDOF στο LA20 SDOF FROM 2D ONE BAY FRAME EHNRL1 (1214).

## 9 Σύγκριση της απόκρισης βάσει προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και αφορούν τη σεισμική απόκριση του 20-όροφου κτιρίου το οποίο μελετάται. Η σύγκριση γίνεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τόσο μεταξύ των 5 διαφορετικών κατηγοριών προσομοίωσης όσο και εντός της κάθε κατηγορίας μεταξύ των διαφορετικών προσομοιωμάτων. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ της καμπύλης IDA που αντιστοιχεί σε ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των αποτελεσμάτων των διαφόρων προσομοιωμάτων.

Στα επόμενα, παρουσιάζονται για τις τιμές της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης στη διεύθυνση X ( $\theta_{max}$ ) η διασπορά των αποτελεσμάτων εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης, η διασπορά και η μεροληψία (bias) στα αποτελέσματα διαφόρων συνδυασμών προσομοιωμάτων μεταξύ των κατηγοριών και η μεροληψία μεταξύ της μέσης απόκρισης κάθε κατηγορίας, εκ των οποίων εξάγεται η τελική πρόταση στο τέλος του κεφαλαίου.

### 9.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Αρχικά, και προτού ξεκινήσει η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων, στον Πίνακα 9.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται για τα 36 προσομοιώματα συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα τα οποία αφορούν στις δύο πρώτους ιδιοπεριόδους για τα πολυβάθμια ( $T_1, T_2$ ) ή αντίστοιχα την  $T^*$  για τα μονοβάθμια προσομοιώματα, τη μέγιστη τέμνουσα βάση που προέκυψε κατά τη μη γραμμική στατική ανάλυση (Pushover Analysis)  $V_{max}$ , η οποία στα μονοβάθμια αφορά στη μέγιστη  $F^*$  κατά την προσαρμογή σε τετραγραμμικό μοντέλο της καμπύλης ικανότητας, καθώς και το χρόνο  $t_{po}$  που απαιτείται σε κάθε προσομοίωμα για την πραγματοποίηση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης (Pushover). Ο χρόνος αφορά την πραγματοποίηση των αναλύσεων με χρήση φορητού H/Y με κεντρικό επεξεργαστή intel Core i7 6500U @2.50GHz. Στα τρισδιάστατα προσομοιώματα, η ανάλυση Pushover γίνεται με 1000 βήματα με στόχο τη μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση κορυφής  $\theta_{roof} = 8\%$  στο προσομοίωμα με κωδικό 301, 7% στο 302 και 5% στο 303. Αντίστοιχα, στα δισδιάστατα προσομοιώματα η ανάλυση πραγματοποιείται με 200 βήματα έως  $\theta_{roof} = 2\%$  και με 7000 βήματα για  $\theta_{roof}$  μεταξύ 2% και 9%, ενώ η ανάλυση σταματά όταν ο φορτικός συντελεστής γίνει μικρότερος του 0. Στα μονοβάθμια προσομοιώματα, δεν καταγράφεται χρόνος, καθώς πρόκειται ουσιαστικά για το χρόνο  $t_{po}$  του αντίστοιχου πολυβαθμίου, διότι προηγείται η ανάλυση Pushover του πολυβαθμίου προκειμένου να εξαχθεί το αντίστοιχο μονοβάθμιο προσομοίωμα.

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι δεν καταγράφεται ο χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (IDA) για 1 καταγραφή, καθώς ποικίλει από καταγραφή σε καταγραφή. Για το σύνολο των 30 καταγραφών σε όλες τις κατηγορίες τα προσομοιώματα με στοιχεία ιών απαιτούν αρκετά περισσότερο υπολογιστικό χρόνο από αυτά με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας. Το τρισδιάστατο προσομοίωμα με στοιχεία ιών (303) χρειάζεται υπολογιστικό χρόνο περίπου 55 ωρών, το 302 περίπου 25 ώρες και το 301 περίπου 20ώρες. Στα δισδιάστατα προσομοιώματα ο απαιτούμενος χρόνος κυμαίνεται μεταξύ 2-4 ωρών, ενώ στα μονοβάθμια απαιτούνται περίπου 0,10 ώρες. Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό το

υπολογιστικό κόστος της χρήσης χωρικών προσομοιωμάτων, γεγονός το οποίο δικαιολογεί, εν μέρει, τη χρήση των απλουστευτικών προσομοιωμάτων.

Πίνακας 9.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

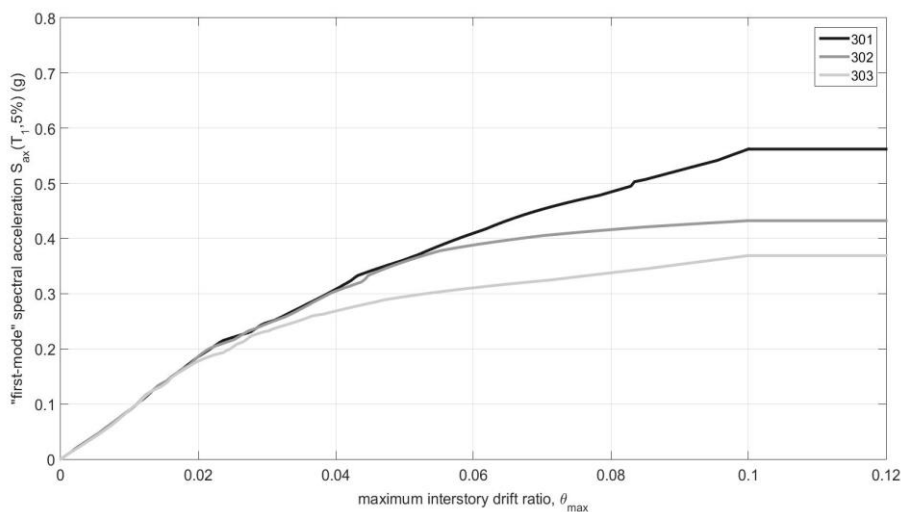
A/A	Κωδικός	T1 (s) T* (s)	T2 (s)	V <sub>max</sub> (kN) F* (kN)	t <sub>po</sub> (s)
1	301	3.64	3.31	9901.43	83
2	302	3.61	3.29	9928.20	95
3	303	3.68	3.34	8956.44	315
4	2201	3.81	1.33	4397.97	30
5	2202	3.78	1.32	4398.11	24
6	2203	3.78	1.32	4385.25	9
7	2204	3.78	1.32	5431.24	6
8	2205	3.78	1.32	5431.24	6
9	2206	3.83	1.33	4339.21	160
10	201	3.85	1.34	4307.82	35
11	202	3.82	1.33	4313.75	35
12	203	3.86	1.33	4281.13	129
13	204	3.85	1.33	4248.12	68
14	211	3.79	1.32	4331.89	11
15	212	3.76	1.32	4361.64	9
16	213	3.76	1.32	4336.61	6
17	214	3.76	1.32	5375.40	6
18	215	3.76	1.32	5375.40	6
19	1301	3.86	-	7311.57	-
20	1302	3.87	-	7338.71	-
21	1303	3.98	-	6636.68	-
22	12201	3.81	-	3172.76	-
23	12202	3.80	-	3172.99	-
24	12203	3.78	-	3182.95	-
25	12204	3.80	-	4015.18	-
26	12205	3.78	-	3964.08	-
27	12206	3.83	-	3179.46	-
28	1201	3.85	-	3160.58	-
29	1202	3.81	-	3202.47	-
30	1203	3.86	-	3179.82	-
31	1204	3.85	-	3160.72	-
32	1211	3.79	-	3141.90	-
33	1212	3.76	-	3153.19	-
34	1213	3.77	-	3175.19	-
35	1214	3.74	-	3950.92	-
36	1215	3.76	-	3981.81	-

## 9.2 Σύγκριση εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης

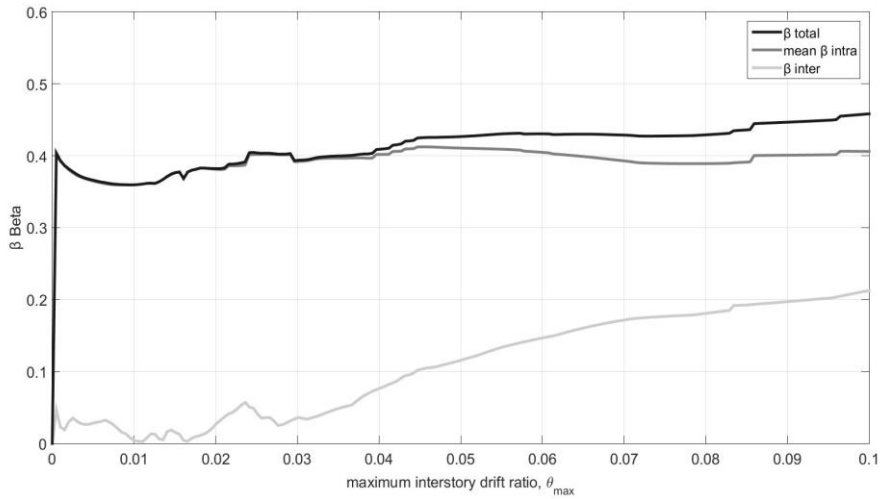
Η σύγκριση εντός της κάθε κατηγορίας από τις 5 συνολικά κατηγορίες προσομοιωμάτων γίνεται, υπολογίζοντας για κάθε μια από τιμές γωνιακής παραμόρφωσης  $\theta_{max}$  τη διασπορά ως προς τη μέση απόκριση της κατηγορίας. Η διασπορά περιλαμβάνει δύο συνιστώσες. Η πρώτη αφορά τη διασπορά των καταγραφών εντός του καθενός προσομοιώματος ( $\beta_{intra}$ ) θεωρώντας τη μέση απόκριση του κάθε προσομοιώματος-κτιρίου λογαριθμοκανονικά κατανεμημένη. Η ( $\beta_{intra}$ ) είναι σχεδόν ίδια στα προσομοιώματα εντός της κάθε κατηγορίας, όποτε λαμβάνεται ο μέσος όρος (mean) της ( $\beta_{intra}$ ) των προσομοιωμάτων κάθε κατηγορίας. Η δεύτερη είναι η διασπορά μεταξύ των διάμεσων καμπυλών IDA των προσομοιωμάτων της κάθε κατηγορίας επίσης θεωρώντας τη μέση απόκριση της κατηγορίας λογαριθμοκανονικά κατανεμημένη. Έτσι, κάνοντας χρήση του θεωρήματος της ολικής διασποράς (total variability theorem), για κάθε τιμή  $\theta_{max}$  υπολογίζεται η συνολική διασπορά  $\beta_{total}$  από τη σχέση:

$$\beta^2_{total} = \left[ \text{mean}(\beta^{j_{intra}}) \right]^2 + \beta^2_{inter}, \quad (9.1)$$

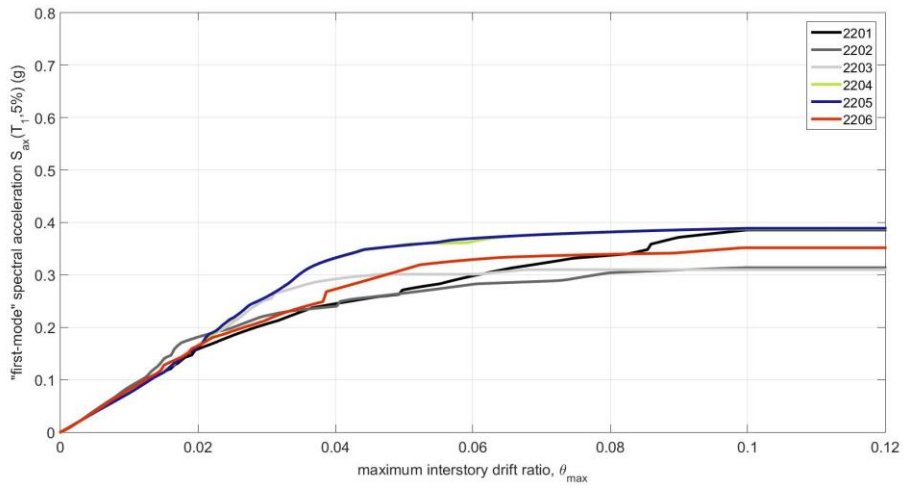
όπου  $j$  ο αριθμός των μοντέλων εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης. Στα Σχήματα 9.1 έως 9.10 παρουσιάζονται ανά κατηγορία οι διάμεσοι των καμπυλών IDA των προσομοιωμάτων της κάθε κατηγορίας, και οι τιμές της διασποράς για τις τιμές  $\theta_{max}$ . Επίσης, στον Πίνακα 9.2 παρουσιάζονται οι τιμές της διασποράς, για τις τιμές  $\theta_{max}=0.75\%, 2\%, 4\%$ , οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές που προσεγγίζουν τις στάθμες επιτελεστικότητας άμεση χρήση (immediate occupancy), προστασία ζωής (life safety) και οιονεί κατάρρευση (near collapse), έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρείται ότι στα πολυβάθμια προσομοιώματα η ολική διασπορά  $\beta_{total}$  οφείλεται κυρίως στη μέση διασπορά λόγω των καταγραφών (record to record variability)  $\beta_{intra}$  και λιγότερο στην διασπορά της μέσης απόκρισης κάθε κατηγορίας. Αντιθέτως, στα μονοβάθμια προσομοιώματα οι τιμές της διασποράς  $\beta_{inter}$  είναι εφάμιλλες με αυτές της  $\beta_{intra}$ .



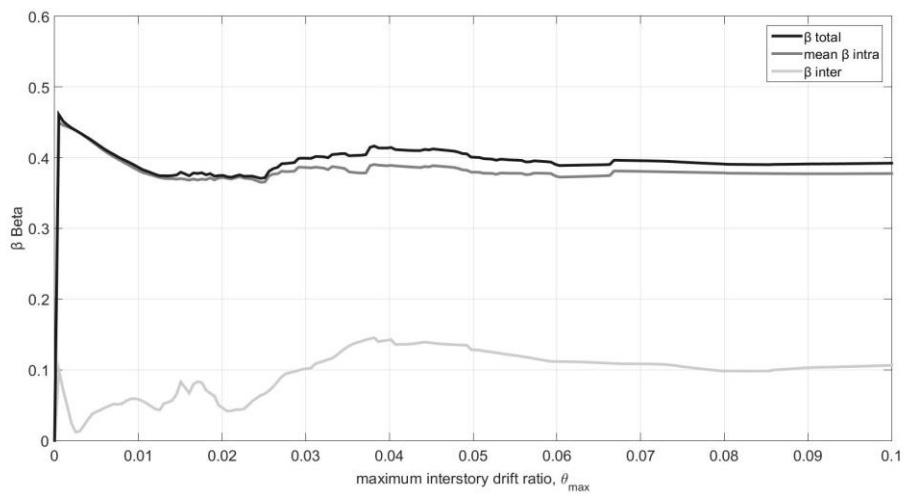
Σχήμα 9.1: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 3D FRAME.



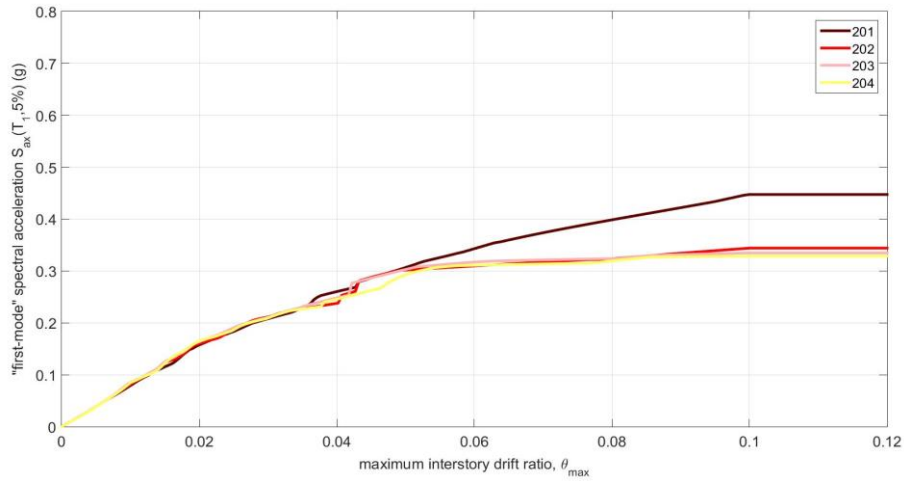
Σχήμα 9.2: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο LA20 3D FRAME.



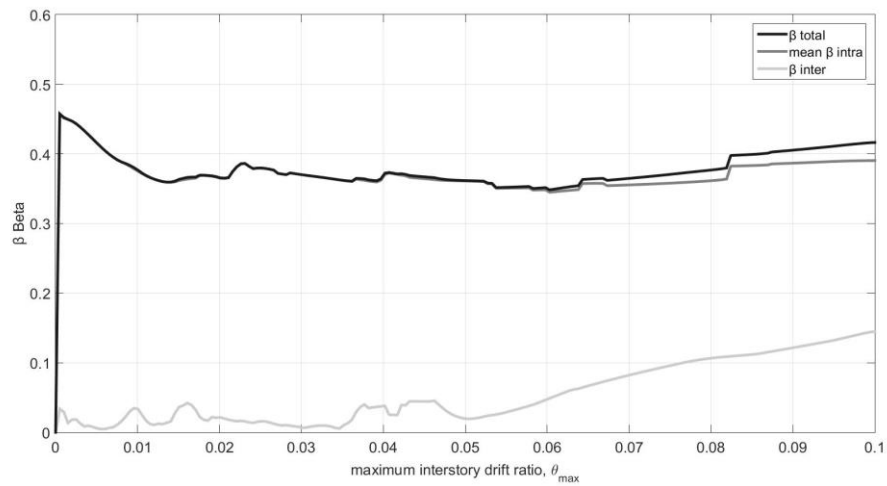
Σχήμα 9.3: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D 20 FRAME.



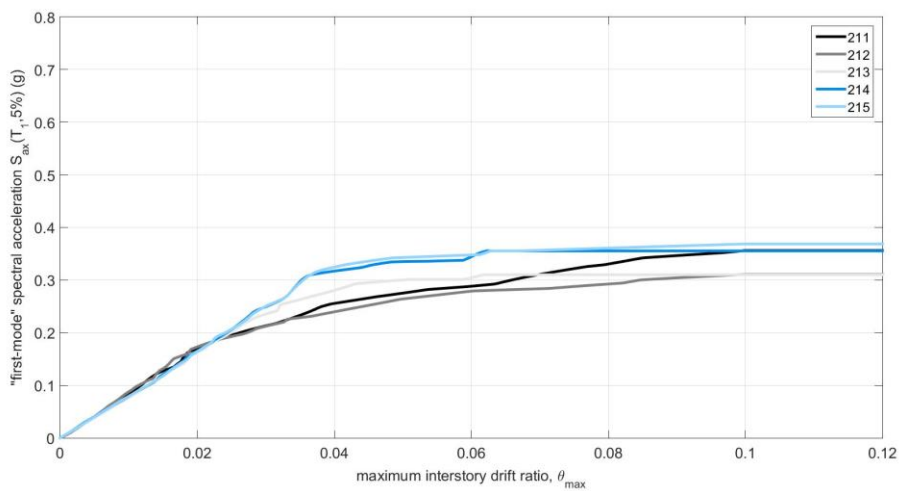
Σχήμα 9.4: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο LA20 2D 20 FRAME.



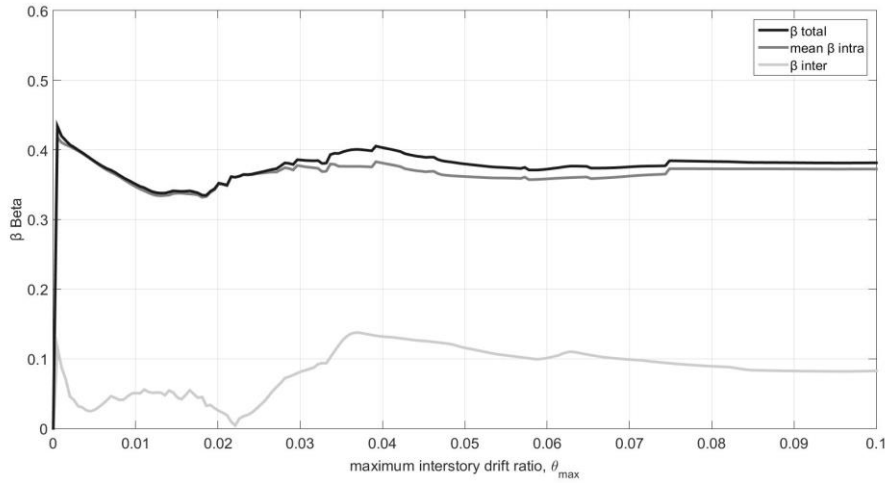
Σχήμα 9.5: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D REAL FRAME.



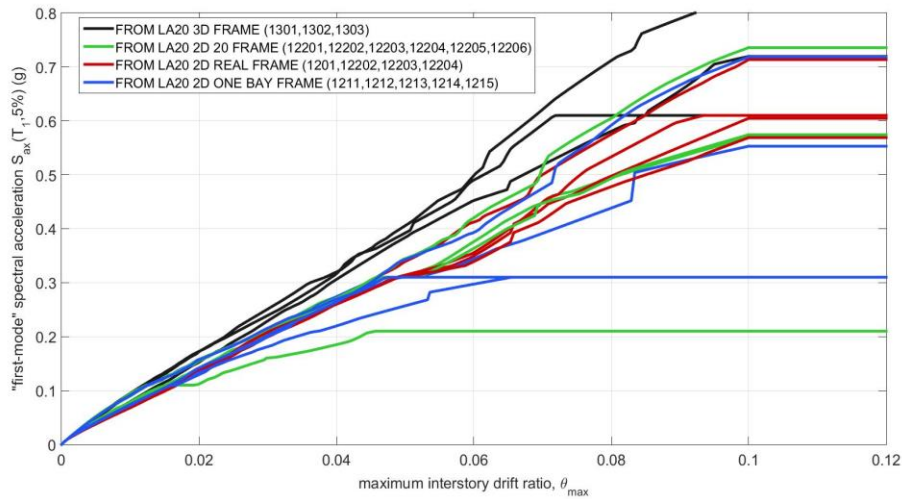
Σχήμα 9.6: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο LA20 2D REAL FRAME.



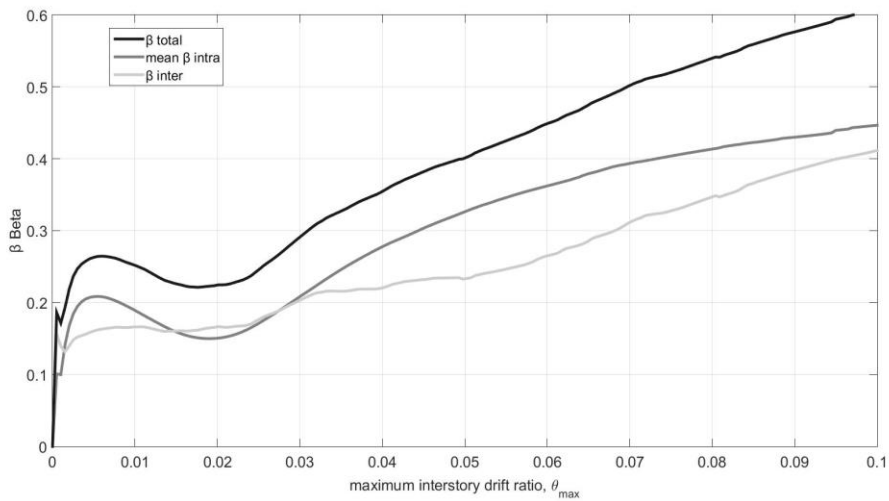
Σχήμα 9.7: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 2D ONE BAY FRAME.



Σχήμα 9.8: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο LA20 2D ONE BAY FRAME.



Σχήμα 9.9: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων της κατηγορίας LA20 SDOF.



Σχήμα 9.10: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο LA20 SDOF.



Πίνακας 9.2: Τιμές διασποράς εντός της κάθε κατηγορίας για  $\theta_{max}=0.75\%,2\%,4\%$ .

Κατηγορία	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
LA20 3D FRAME	0.3598	0.0255	0.3607	0.3812	0.0275	0.3822	0.4019	0.0711	0.4092
LA20 2D 20 FRAME	0.3981	0.0510	0.4013	0.3722	0.0458	0.3750	0.3891	0.1426	0.4144
LA20 2D REAL FRAME	0.3912	0.0111	0.3914	0.3649	0.0216	0.3656	0.3704	0.0380	0.3723
LA20 2D ONE BAY FRAME	0.3648	0.0435	0.3674	0.3513	0.0253	0.3522	0.3806	0.1317	0.4028
LA20 SDOF	0.2030	0.1656	0.2620	0.1506	0.1668	0.2247	0.2789	0.2212	0.3559

### 9.3 Σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών προσομοίωσης

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση μεταξύ των προσομοιωμάτων των διαφόρων κατηγοριών ακολουθούνται δύο διαφορετικές θεωρήσεις. Η πρώτη θεώρηση αφορά στον υπολογισμό της διασποράς και εδώ με βάση το θεώρημα ολικής διασποράς όπως στην προηγούμενη παράγραφο, ως προς τη μέση απόκριση των προσομοιωμάτων κάθε συνδυασμού από αυτούς που θα ελεγχθούν. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρείται ότι το κάθε μοντέλο παρέχει σωστή μέση ή διάμεση απόκριση ως προς το «τέλειο» κτίριο-μοντέλο. Αποτελεί αρκετά συνήθης θεώρηση των μηχανικών και είναι λογική θεώρηση όταν έχουμε χαμηλή μεροληψία.

Στη δεύτερη θεώρηση, δεν αγνοείται η μεροληψία (bias), αλλά υπολογίζεται ως προς το τέλειο μοντέλο κάθε συνδυασμού από αυτούς που ακολουθούν. Προκειμένου να προσδιοριστεί το «τέλειο» μοντέλο, σε κάθε συνδυασμό, όπου υφίσταται ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα λαμβάνεται αυτό έναντι των υπολοίπων, ενώ μεταξύ των προσομοιωμάτων με στοιχεία ινών (κατανεμημένης πλαστικότητας) και στοιχεία σημειακής πλαστιμότητας (συγκεντρωμένης πλαστικότητας) λαμβάνονται τα δεύτερα (lumped plasticity models). Αυτό συμβαίνει, διότι για μεταλλικό κτίριο, τα προσομοιώματα με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας θεωρούνται πιο αξιόπιστα, γιατί δουλεύουν καλύτερα κοντά στην κατάρρευση (collapse), δηλαδή για  $\theta_{max}>2\%$ . Προκειμένου να υπολογιστεί η μεροληψία κάθε κτιρίου ως προς το «τέλειο», υπολογίζεται συγκρίνοντας για κάθε τιμή  $\theta_{max}$  την απόκριση του κτιρίου που μελετάται ως προς το «τέλειο» από τη σχέση:

$$bias = \frac{Sa_{50\%}(T_1, 5\%)_{\text{κτιρίου}}}{Sa_{50\%}(T_1, 5\%)_{\text{τέλειου}}}, \quad (9.2)$$

Το οποίο για να οριστεί ως ποσοστό επι του «τέλειου» προσομοιώματος γίνεται:

$$bias = \left( \frac{Sa_{50\%}(T_1, 5\%)_{\text{κτιρίου}}}{Sa_{50\%}(T_1, 5\%)_{\text{τέλειου}}} - 1 \right), \quad (9.3)$$

Επίσης, υπολογίζεται η μέση απόλυτη μεροληψία (average absolute bias) των  $n$  προσομοιωμάτων κάθε συνδυασμού από τη σχέση:

$$avgbias = \frac{\sum_{i=1}^n |bias_i|}{n}, \quad (9.4)$$

Ακόμα, υπολογίζεται το η μέση απόλυτη μεροληψία όλων των μοντέλων για τιμές  $\theta_{max}$  από 0% μέχρι 8% με βάση τη σχέση:

$$avgball = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \int_{\theta_{max}=0}^{\theta_{max}=0.08} \frac{|bias_i|}{0.08} \cdot d\theta_{max}, \quad (9.5)$$

$$avgball = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{|bias_i(\theta_{max}^j)|}{m}, \quad (9.6)$$

όπου  $m$  ο αριθμός των τιμών  $\theta_{max}$  από 0%-8%.

Από τις δύο θεωρήσεις, η δεύτερη με τον υπολογισμό της μεροληψίας είναι πιο επικίνδυνη από άποψη αξιοπιστίας. Και τούτο διότι, η μεροληψία υπολογίζεται και αναφέρεται σε ένα μόνο κτίριο-προσομοίωμα και υπολογίζεται με βάση το πιο αξιόπιστο προσομοίωμα όπως επιλέγεται από το μελετητή. Αντιθέτως, κατά τον υπολογισμό της διασποράς η μέση απόκριση κάθε συνδυασμού επιλέγεται από τη μέθοδο αυτόματα. Με άλλα λόγια, στον υπολογισμό της διασποράς συμμετέχουν όλα τα προσομοιώματα του κάθε συνδυασμού και όχι το κάθε προσομοίωμα ξεχωριστά.

Στα επόμενα, ακολουθούν 7 συνδυασμοί στους οποίους γίνεται υπολογισμός των παραπάνω. Οι συνδυασμοί, ξεκινώντας από τη σύγκριση όμοιων μοντέλων από άποψη στοιχείων μελών μεταξύ των κατηγοριών, καταλήγουν στον τελευταίο συνδυασμό που περιλαμβάνει όλα τα προσομοιώματα. Ωστόσο, η χαμηλή αξιοπιστία της κατηγορίας των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, και προκειμένου να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα, στον υπολογισμό της διασποράς στους συνδυασμούς που περιλαμβάνονται μονοβάθμια προσομοιώματα έχουμε τιμές με και χωρίς αυτά, όπως επίσης τιμές με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα δίνονται και κατά τον υπολογισμό των τιμών  $avgbias$ ,  $avgball$  που αναφέρονται παραπάνω. Αντίστοιχα, και εδώ υπολογίζονται οι τιμές που αντιστοιχούν στις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας (Damage States) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Στον Πίνακα 9.3 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι 7 συνδυασμοί όσον αφορά την περιγραφή του κάθε συνδυασμού, τους κωδικούς των μοντέλων του κάθε συνδυασμού, και το πιο αξιόπιστο-«τέλειο» μοντέλο του κάθε συνδυασμού. Ακολούθως, για κάθε συνδυασμό παρουσιάζονται τα Ποσοστημόρια 50% των καμπύλων IDA των μοντέλων που τον απαρτίζουν, τα αποτελέσματα της διασποράς με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα και τα αποτελέσματα της μεροληψίας, ενώ καταγράφονται οι τιμές τις διασποράς, της μεροληψίας και των  $avgbias$ ,  $avgball$ , στις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας.

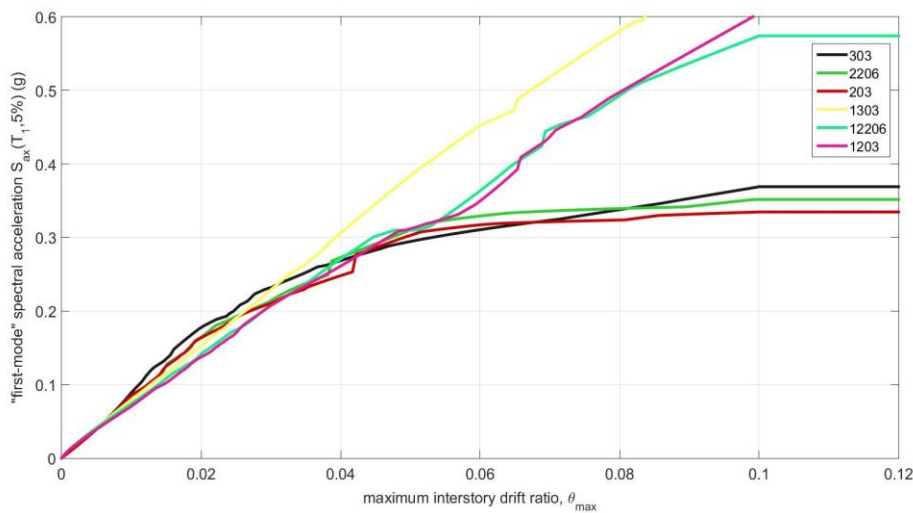
Πίνακας 9.3: Συνδυασμοί σύγκρισης προσομοιωμάτων.

A/A	Περιγραφή	Κωδικοί Προσομοιωμάτων	«Τέλειο» Προσομοίωμα
1	Όλα τα μοντέλα με στοιχεία ινών (fiber models)	303,2206,203,1303,12206,1203	303
2	Όλα τα μοντέλα με ελαστικά υποστυλώματα (lumped plasticity models)	301,2201,201,2111301,12201,1201,1211	301
3	Συνδυασμός μοντέλων με ανελαστικά υποστυλώματα (lumped plasticity models)	302,2202,202,204,2121302,12202,1202,1204,1212	302
4	Όλα τα δισδιάστατα μοντέλα εκτός από αυτά με ελαστικά υποστυλώματα (lumped plasticity + fiber models)	2202,2203,2204,2205,2206,202,203,204,212,213,214,215	204
5	Όλα τα προσομοιώματα των κατηγοριών 2D 20 και 2D ONE BAY με ανελαστικά υποστυλώματα (lumped plasticity models)	2202,2203,2204,2205212,213,214,215	215
6	Όλα τα μοντέλα όλων των κατηγοριών εκτός από αυτά με ελαστικά υποστυλώματα (lumped plasticity + fiber models)	302,303,2202,2203,2204,2205,2206,202,203,204,212,213,214,215,1302,1303,12202,12203,12204,12205,12206,1202,1203,1204,1212,1213,1214,1215	302
7	Όλα τα προσομοιώματα όλων των κατηγοριών (lumped plasticity + fiber models)	301,302,303,2202,2201,2203,2204,2205,2206,201,202,203,204,211,212,213,214,215,1301,1302,1303,12201,12202,12203,12204,12205,12206,1201,1202,1203,1204,1211,1212,1213,1214,1215	302

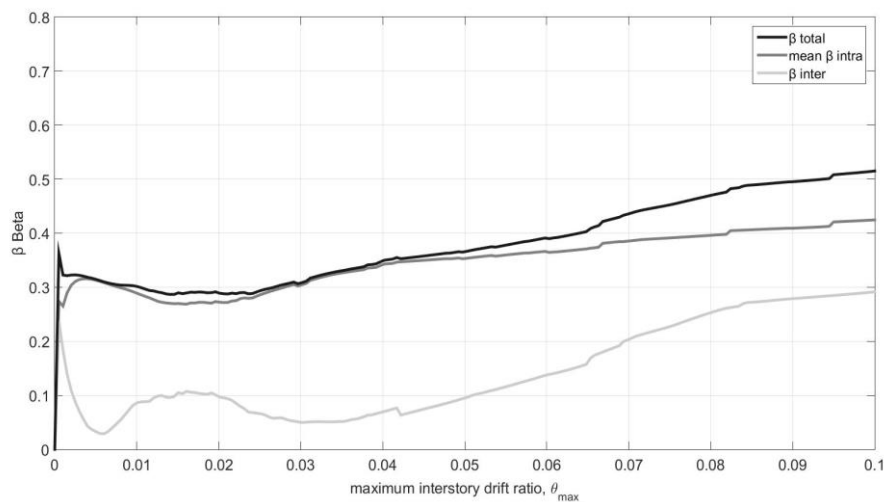
### 9.3.1 Συνδυασμός 1

Στο Σχήμα 9.11 παρουσιάζονται τα ποσοστημόρια 50% των καμπύλων IDA (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 1. Στο Σχήμα 9.12 παρουσιάζεται η διασπορά για τις τιμές  $\theta_{max}$  συμπεριλαμβανόμενων των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων της κατηγορίας, ενώ στο Σχήμα 9.13 παρουσιάζεται η διασπορά μόνο των πολυβαθμίων προσομοιωμάτων. Στον Πίνακα 9.4 καταγράφονται οι τιμές τις διασποράς με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας (Damage States).

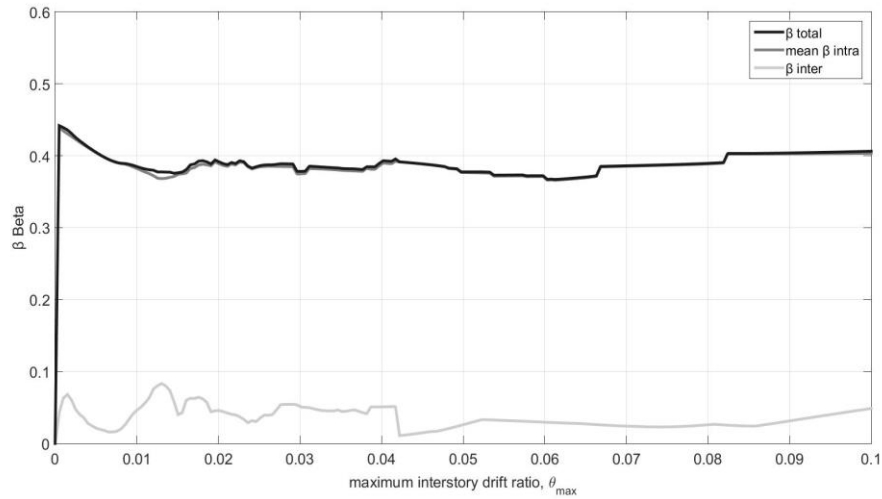
Στο Σχήμα 9.14 παρουσιάζεται η μεροληψία των προσομοιωμάτων του συνδυασμού ως προς το τέλειο προσομοίωμα (LA20 3D FRAME FBS 303), ενώ στον Πίνακα 9.5 καταγράφονται αντίστοιχα οι τιμές της μεροληψίας στις τιμές  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$  αντίστοιχα με τη διασπορά. Επίσης, καταγράφονται οι τιμές  $avgbias$ ,  $avgall$  με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα του συνδυασμού. Από τα αποτελέσματα της μεροληψίας, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.14, είναι εμφανής η μεγάλη διαφορά στην απόκριση πολυβάθμιων και μονοβάθμιων προσομοιωμάτων.



Σχήμα 9.11: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 1.



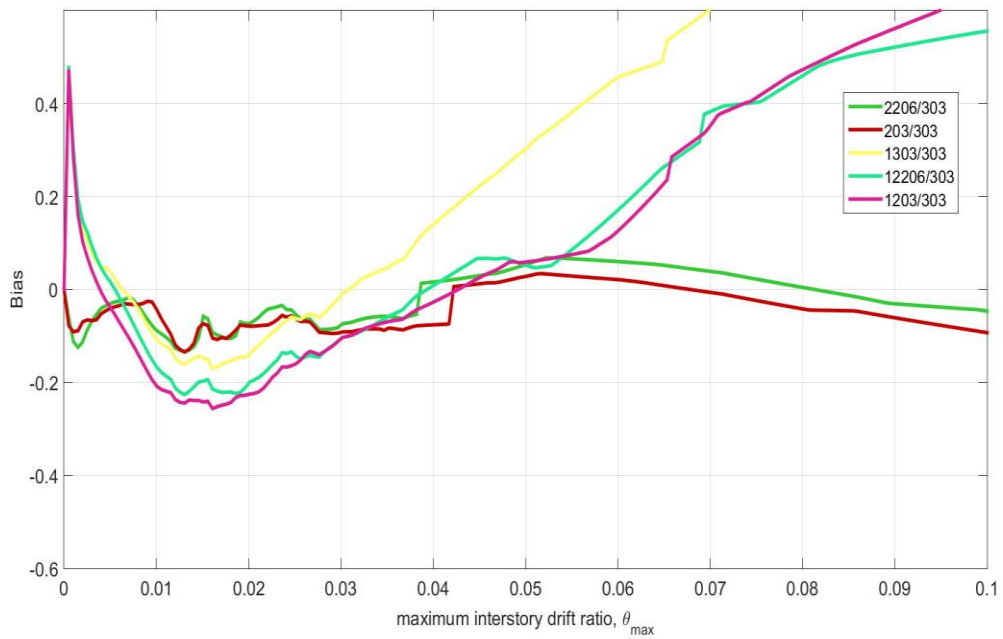
Σχήμα 9.12: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 1 με τα μονοβάθμια.



Σχήμα 9.13: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 1 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.4: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 1 για  $\theta_{max}=0.75\%$ ,  $2.00\%$ ,  $4.00\%$ .

Συνδυασμός 1	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Με τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.3011	0.0473	0.3062	0.2723	0.0966	0.2890	0.3429	0.0701	0.3500
Χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.3905	0.0168	0.3908	0.3889	0.0458	0.3916	0.3899	0.0509	0.3932



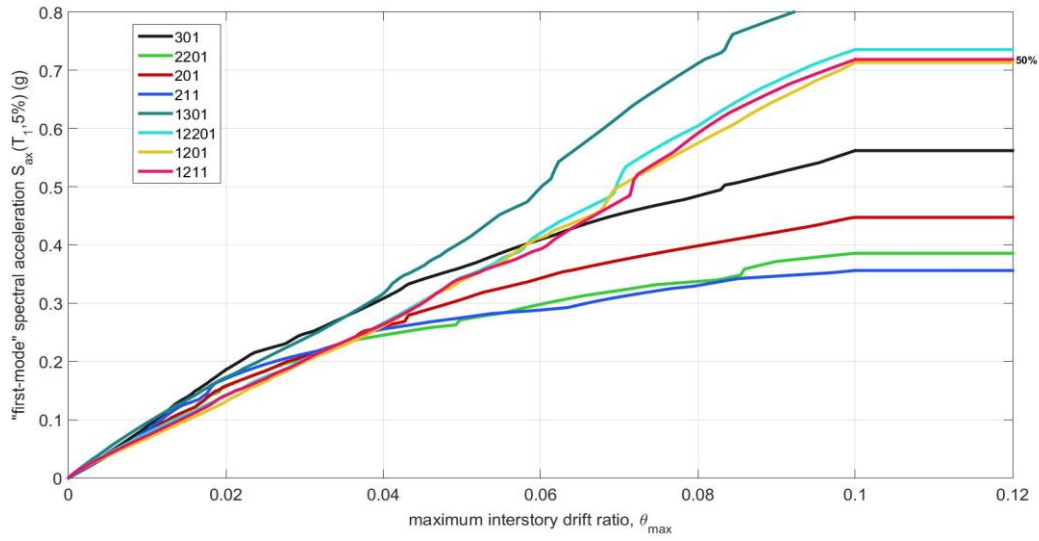
Σχήμα 9.14: Μεροληγία (bias) στο Συνδυασμό 1.

Πίνακας 9.5: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 1 (303) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές *avgbias*, *avgball* με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα.

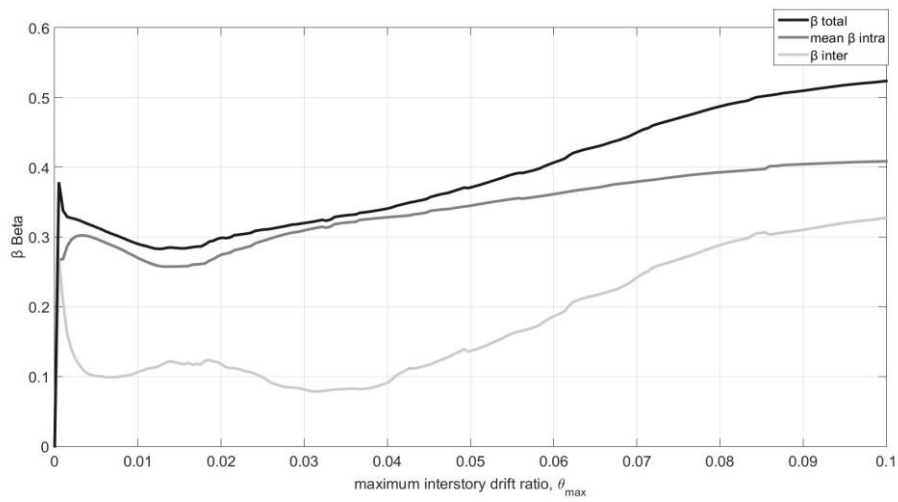
Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
2206	-0.0226	-0.0731	0.0165
203	-0.0323	-0.0790	-0.0758
1303	-0.0274	-0.1394	0.1430
12206	-0.0750	-0.1993	0.0108
1203	-0.1218	-0.2251	-0.0253
avgbias με τα μονοβάθμια	0.0558	0.1432	0.0543
avgbias χωρίς τα μονοβάθμια	0.0274	0.0760	0.0462
avgball με τα μονοβάθμια	0.1422		
avgball χωρίς τα μονοβάθμια	0.0518		

### 9.3.2 Συνδυασμός 2

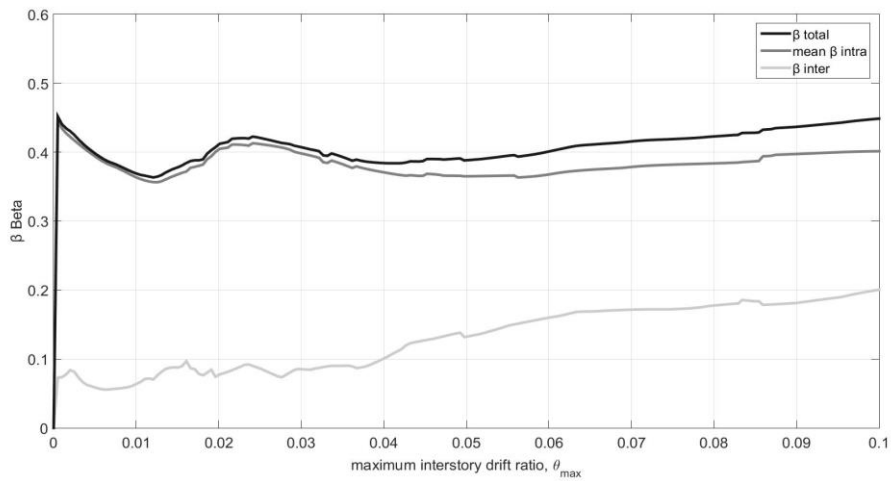
Όμοια με το συνδυασμό 1, στα Σχήματα 9.15 έως 9.18 και στους Πίνακες 9.6, 9.7 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στο Συνδυασμό 2, το «τέλειο» προσομοίωμα είναι το τρισδιάστατο προσομοίωμα με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας και ελαστικά υποστυλώματα (LA20 3D FRAME ELC 301). Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρείται ότι η ολική διασπορά εντός του συνδυασμού συμπεριλαμβανομένων των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 30% περίπου για χαμηλές τιμές  $\theta_{max}$ , όπου οφείλεται κυρίως στην διασπορά των καταγραφών εντός κάθε προσομοιώματος ( $\beta_{inter}$  περίπου 10%,  $mean\beta_{intra}$  περίπου 25-30%), και 40% για μεγαλύτερες τιμές, όπου αυξάνεται η διασπορά μεταξύ της μέσης απόκρισης των προσομοιωμάτων. ( $\beta_{inter}$  αυξανόμενη). Επίσης, στην περίπτωση κατά την οποία δε λαμβάνονται υπόψη τα μονοβάθμια προσομοιώματα, η ολική διασπορά κυμαίνεται μεταξύ του 35-45%, ενώ η διασπορά μεταξύ των μέσων αποκρίσεων ( $\beta_{inter}$ ) μεταξύ 5-15% αυξανόμενη για μεγάλες τιμές  $\theta_{max}>5\%$ . Ακόμα, όσον αφορά τη μεροληψία, κυμαίνεται για τα πολυβάθμια μεταξύ 0-20% για τιμές  $\theta_{max}<4\%$  και έπειτα αυξάνεται. Στα μονοβάθμια καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές μεροληψίας.



Σχήμα 9.15: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 2.



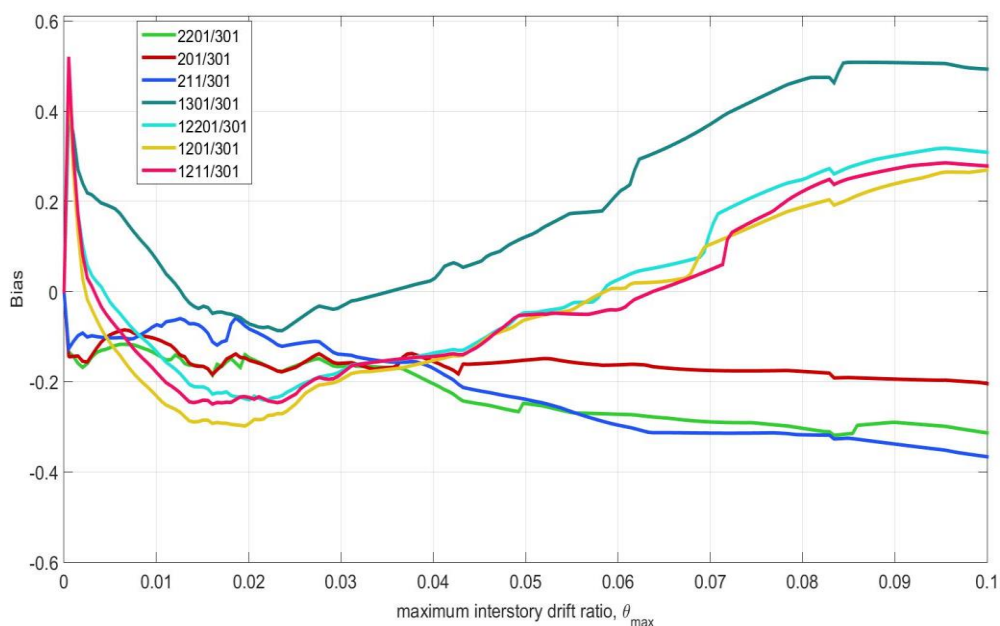
Σχήμα 9.16: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 2 με τα μονοβάθμια.



Σχήμα 9.17: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 2 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.6: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 2 για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Συνδυασμός 2	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Με τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.2848	0.0994	0.3017	0.2745	0.1174	0.2989	0.3285	0.0925	0.3413
Χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.3780	0.0567	0.3823	0.4048	0.0775	0.4121	0.3703	0.1017	0.3840



Σχήμα 9.18: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 2.

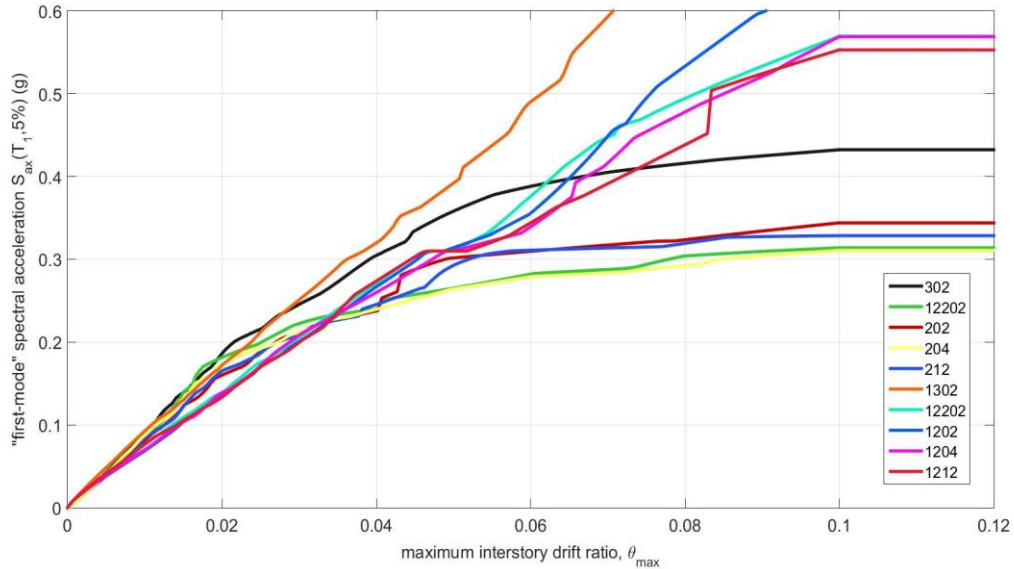
Πίνακας 9.7: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 2 (301) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές  $avgbias$ ,  $avgball$  με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα.

Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
2201	-0.1184	-0.1474	-0.2064
201	-0.0918	-0.1529	-0.1566
211	-0.1044	-0.0835	-0.1726
1301	0.1327	-0.0721	0.0301
12201	-0.0847	-0.2402	0.1357
1201	-0.1814	-0.2924	-0.1518
1211	-0.1270	-0.2353	-0.1436
$avgbias$ με τα μονοβάθμια	0.1200	0.1748	0.1424
$avgbias$ χωρίς τα μονοβάθμια	0.1049	0.1279	0.1785
$avgball$ με τα μονοβάθμια		0.1618	
$avgball$ χωρίς τα μονοβάθμια		0.1868	

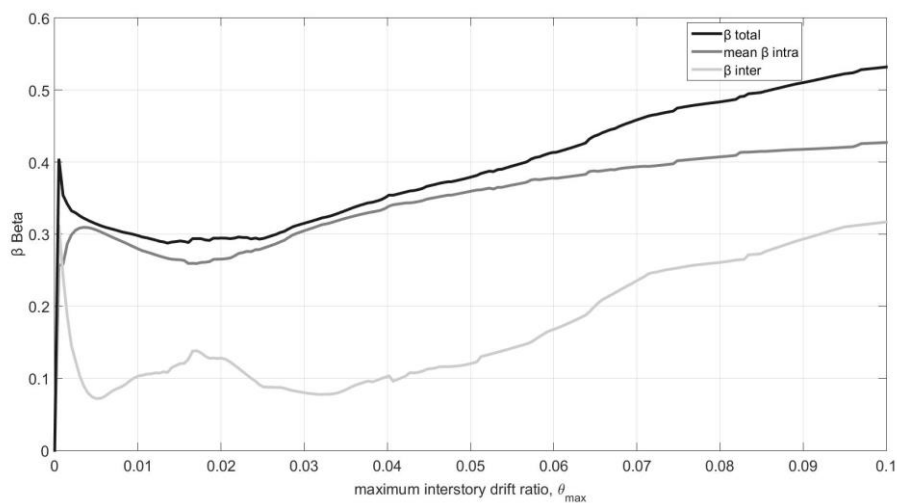


### 9.3.3 Συνδυασμός 3

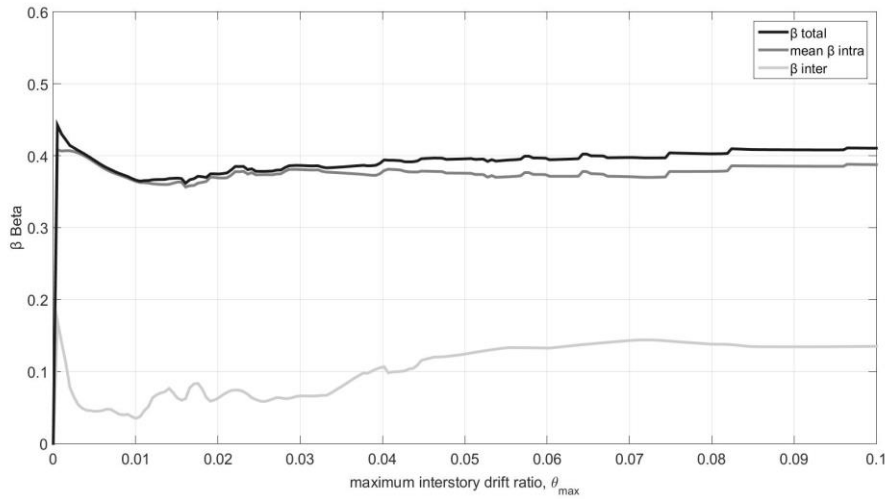
Στον τρίτο συνδυασμό, το τέλει προσομοίωμα είναι το τρισδιάστατο προσομοίωμα με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας και ανελαστικά υποστυλώματα (LA20 3D FRAME UNELC 302). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 9.19 έως 9.22 και τους Πίνακες 9.8 και 9.9 που ακολουθούν. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα επόμενα, ακολουθούν την ίδια λογική με τα αποτελέσματα των Συνδυασμών 1 και 2 ως προς την διασπορά και τη μεροληψία.



Σχήμα 9.19: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 3.



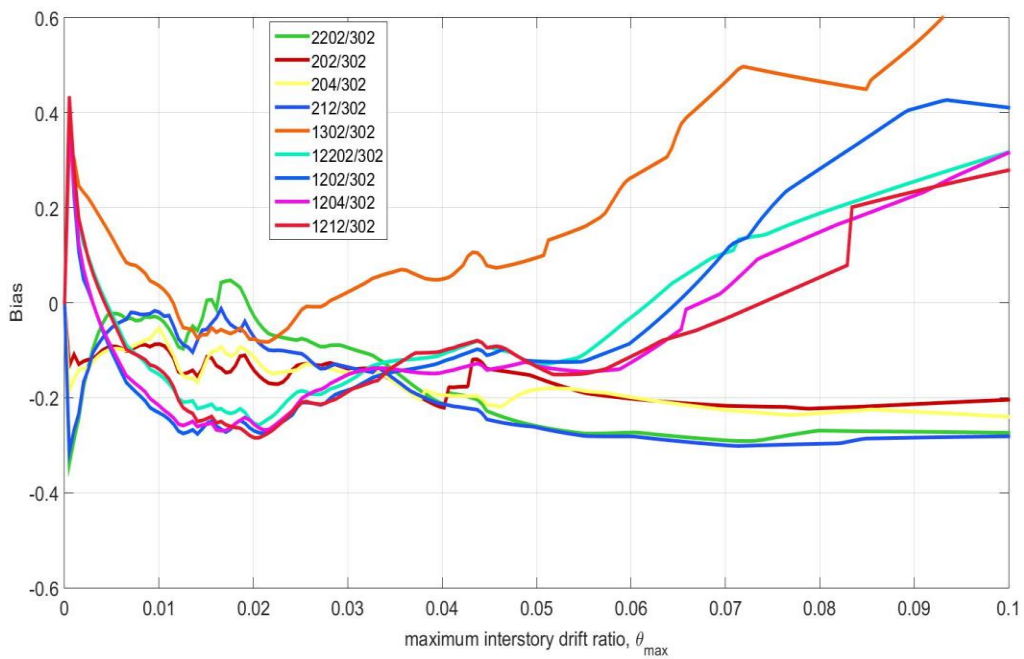
Σχήμα 9.20: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 3 με τα μονοβάθμια.



Σχήμα 9.21: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 3 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.8: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 3 για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Συνδυασμός 3	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Με τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.2927	0.0859	0.3051	0.2654	0.1279	0.2946	0.3389	0.1032	0.3543
Χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.3752	0.0436	0.3777	0.3692	0.0636	0.3747	0.3795	0.1067	0.3942



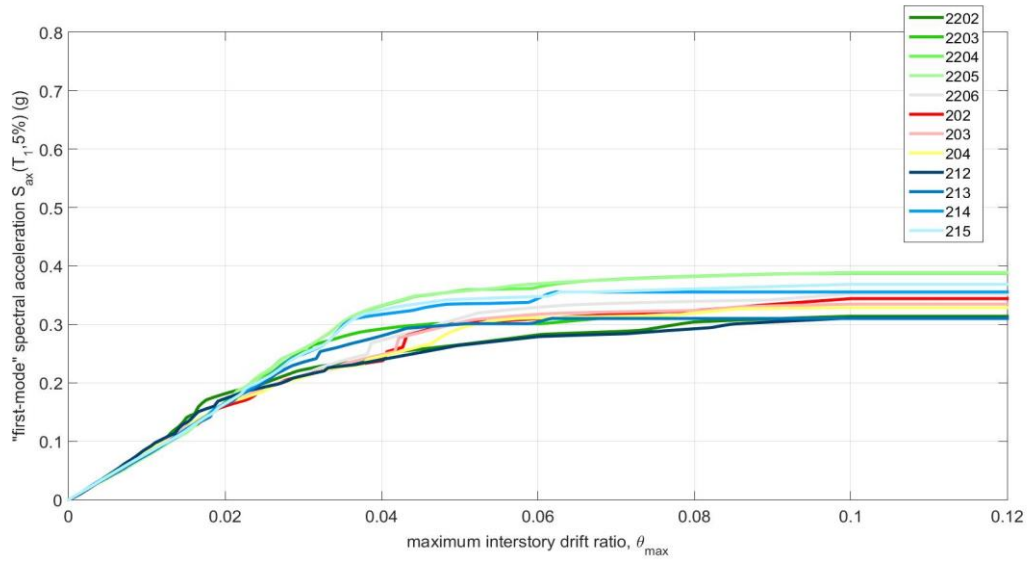
Σχήμα 9.22: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 3.

Πίνακας 9.9: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 3 (302) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές *avgbias*, *avgball* με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα.

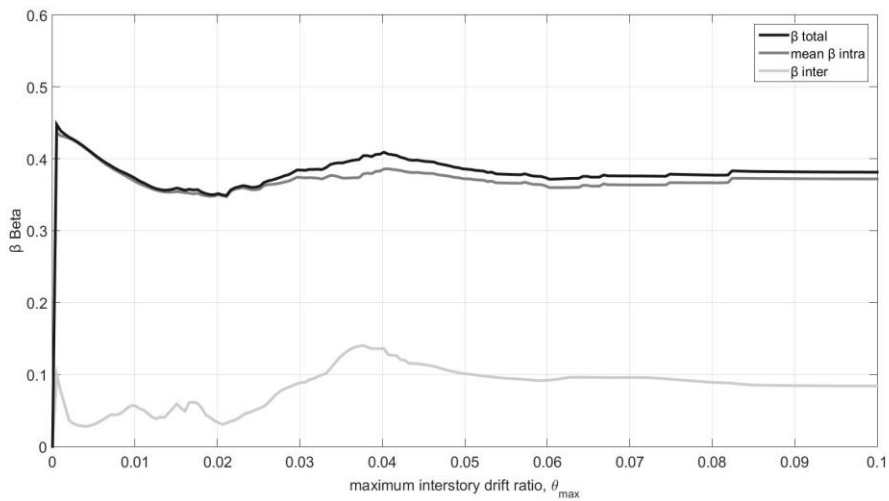
Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
2202	-0.0377	-0.0293	-0.2136
202	-0.0939	-0.1432	-0.2211
204	-0.0886	-0.1148	-0.1946
212	-0.0217	-0.0735	0.2141
1302	0.0784	-0.0764	0.0506
12202	-0.1081	-0.2538	-0.1072
1202	-0.1876	-0.2700	-0.1227
1204	-0.1709	-0.2566	-0.1460
1212	-0.1089	-0.2843	-0.1002
<i>avgbias</i> με τα μονοβάθμια	0.0995	0.1669	0.1522
<i>avgbias</i> χωρίς τα μονοβάθμια	0.0605	0.0902	0.2108
<i>avgball</i> με τα μονοβάθμια	0.1597		
<i>avgball</i> χωρίς τα μονοβάθμια	0.1752		

### 9.3.4 Συνδυασμός 4

Ο συγκεκριμένος συνδυασμός δεν περιλαμβάνει μονοβάθμια προσομοιώματα παρά μόνο διδιάστατα προσομοιώματα. Ως το τέλειο μοντέλο του συνδυασμού λαμβάνεται το διδιάστατο προσομοίωμα με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας LA20 2D REAL FRAME MXED (204). Στα Σχήματα 9.23 έως 9.25 και στους Πίνακες 9.10 και 9.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των προσομοιωμάτων του συγκεκριμένου συνδυασμού όμοια με τα προηγούμενα. Στα αποτελέσματα που παρατίθενται παρακάτω, άξια αναφοράς αποτελεί η μεγάλη μεροληψία που παρουσιάζουν τα προσομοιώματα των κατηγοριών LA20 2D 20 FRAME και LA20 2D ONE BAY FRAME στα οποία έγινε χρήση του τροποποιημένου μοντέλου των Ibarra & Krawinkler όπως αναφέρεται στα προηγούμενα. Αυτό παρατηρείται κυρίως στις μεγάλες τιμές της γωνιακής παραμόρφωσης  $\theta_{max}>3\%$ , όπου έχουμε τιμές μεροληψίας 20-40% μεταξύ της απόκρισης των συγκεκριμένων προσομοιωμάτων και του «τέλειου» προσομοιώματος, καθώς και αύξηση της διασποράς  $\beta_{inter}$  έως 15%. Αυτό οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην επαύξηση της αντοχής  $M_y$  κατά 17% στα συγκεκριμένα προσομοιώματα.



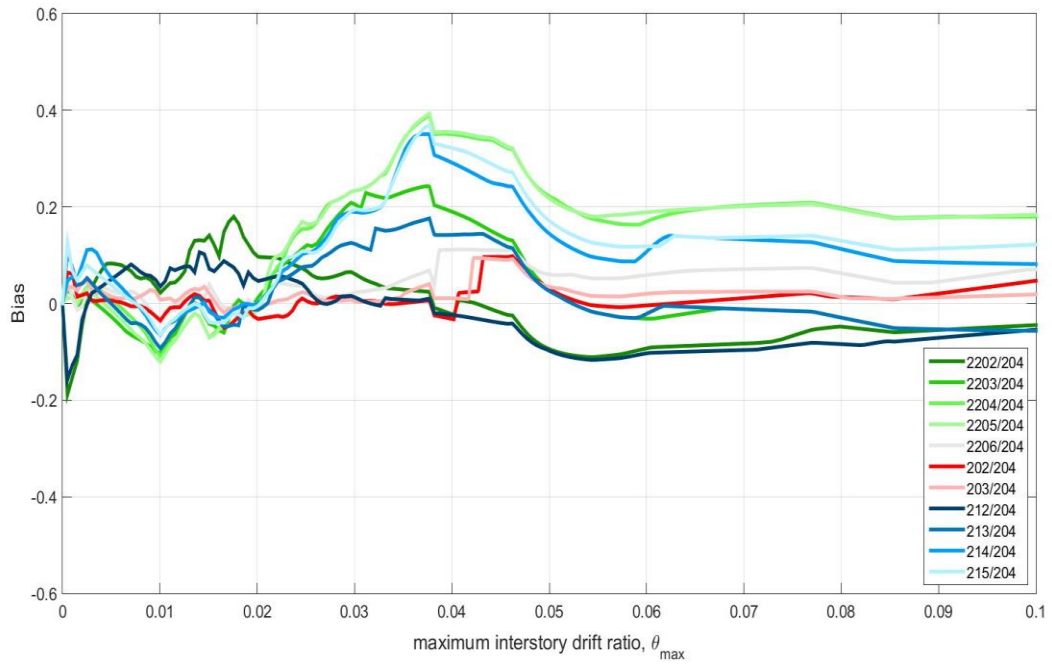
Σχήμα 9.23: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 4.



Σχήμα 9.24: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 4.

Πίνακας 9.10: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 4 για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Συνδυασμός 4	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Τιμές Διασποράς	0.3840	0.0438	0.3871	0.3500	0.0332	0.3516	0.3858	0.1361	0.4091



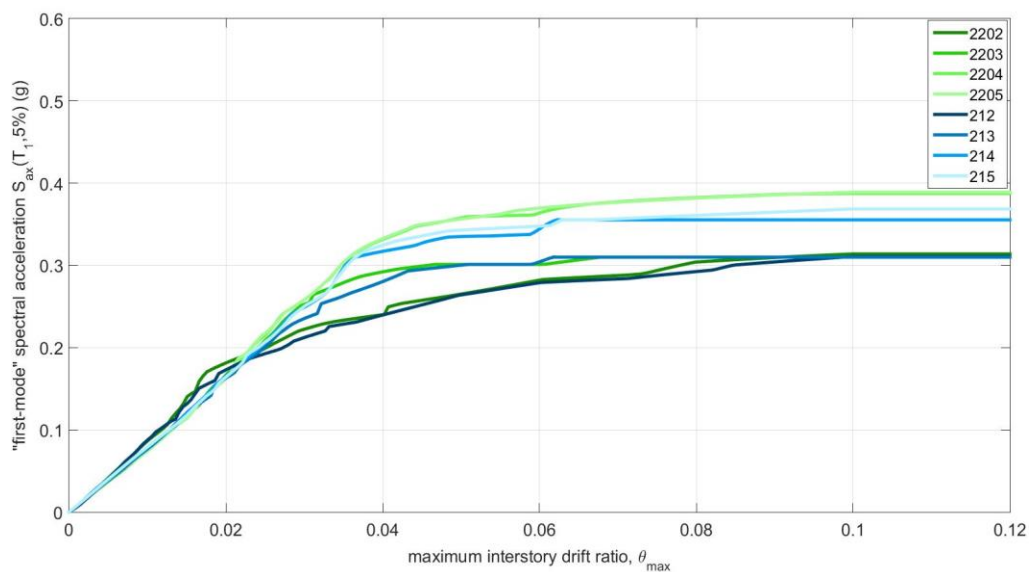
Σχήμα 9.25: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 4.

Πίνακας 9.11: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 4 (204) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές *avgbias*, *avgball*.

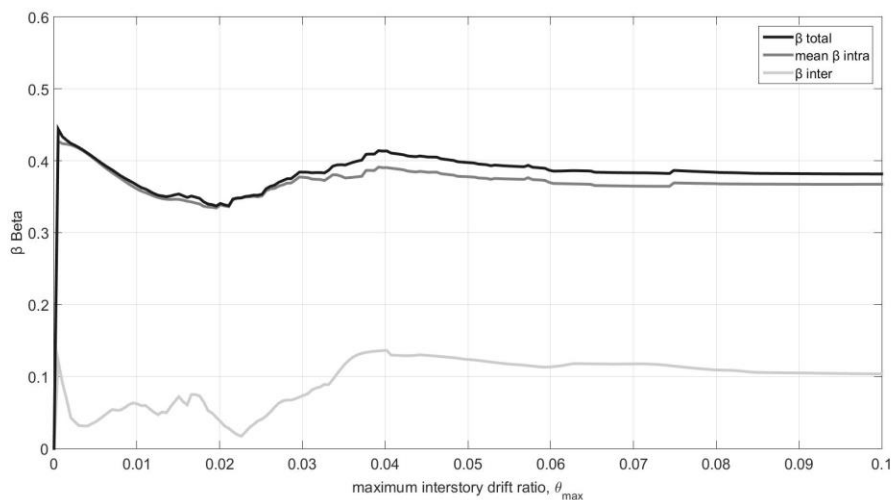
Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
2202	0.0558	0.0966	-0.0235
2203	-0.0705	0.0127	0.1886
2204	-0.0378	-0.0123	0.3502
2205	-0.0643	-0.0127	0.3545
2206	0.0212	-0.0033	0.1117
202	-0.0058	-0.0321	-0.0328
203	0.0111	-0.0097	0.0107
212	0.0734	0.0466	0.0242
213	-0.0402	-0.0131	0.1422
214	0.0004	0.0002	0.2898
215	-0.0003	-0.0050	0.2898
avgbias	0.0346	0.0222	0.1681
avgball	0.0897		

### 9.3.5 Συνδυασμός 5

Ο συνδυασμός 5 περιλαμβάνει τα προσομοιώματα των κατηγοριών LA20 2D 20 FRAME και LA20 2D ONE BAY FRAME, με χρήση στοιχείων συγκεντρωμένης πλαστικότητας στα οποία τόσο οι δοκοί όσο και τα υποστυλώματα προσομοιώνονται ανελαστικά. Ως το «τέλειο» μοντέλο στο συγκεκριμένο συνδυασμό λαμβάνεται το προσομοίωμα LA20 2D ONE BAY FRAME EHNRL2 (215), λόγω της προσομοίωσης τόσο των 20 ορόφων όσο και των 2 υπογείων στο συγκεκριμένο προσομοίωμα. Στα Σχήματα 9.26 έως 9.28 καθώς και στους Πίνακες 9.12 και 9.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των προσομοιωμάτων της συγκεκριμένης κατηγορίας. Όμοια με το Συνδυασμό 4, και σε αυτή την περίπτωση, αξιοσημείωτη είναι η μεροληψία που παράγεται μεταξύ των προσομοιωμάτων με χρήση του τροποποιημένου μοντέλου των Ibarra & Krawinkler έναντι των υπολοίπων.



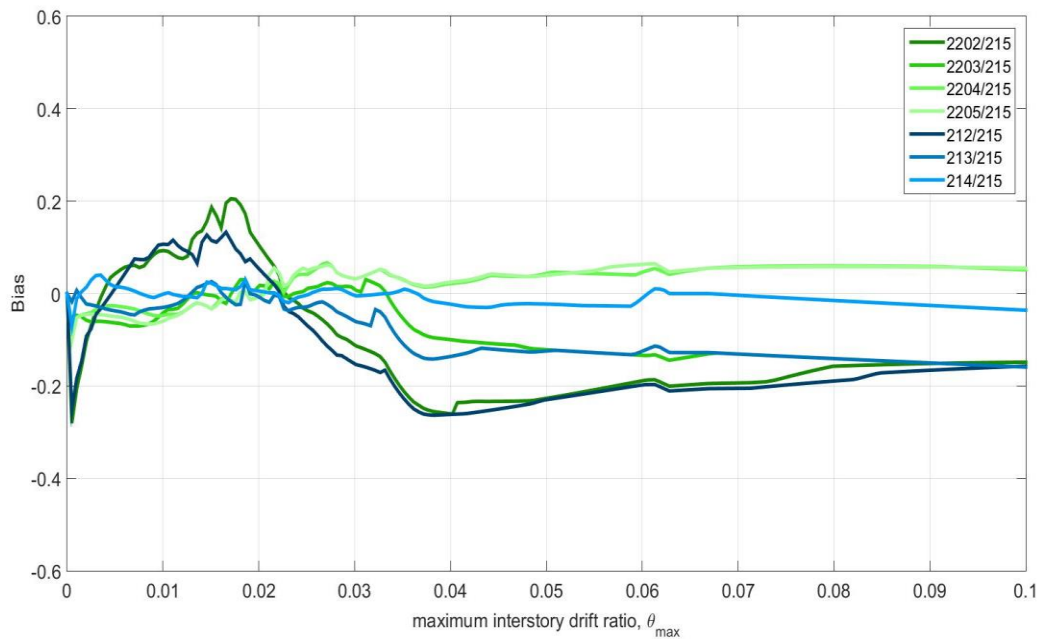
Σχήμα 9.26: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 5.



Σχήμα 9.27: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 5.

Πίνακας 9.12: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 5 για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Συνδυασμός 5	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Τιμές Διασποράς	0.3794	0.0532	0.3831	0.3387	0.0374	0.3407	0.3905	0.1364	0.4135



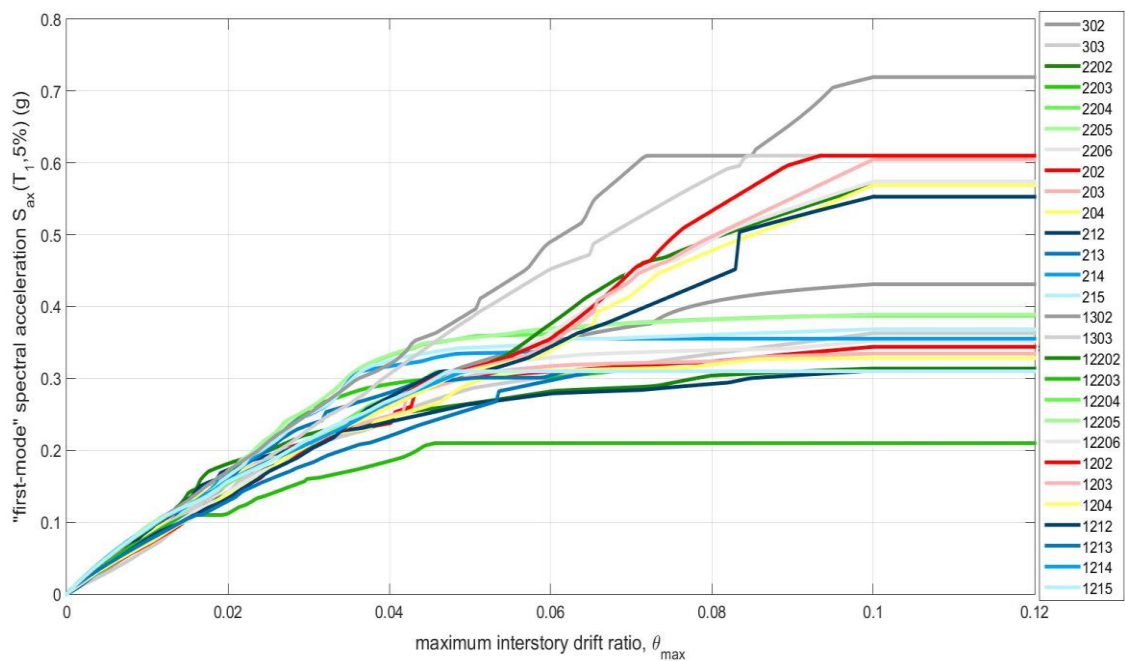
Σχήμα 9.28: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 5.

Πίνακας 9.13: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 5 (215) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές  $avgbias$ ,  $avgball$ .

Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
2202	0.0562	0.1020	-0.2608
2203	-0.0701	0.0178	-0.1003
2204	-0.0375	-0.0074	0.0221
2205	-0.0640	-0.0078	0.0254
212	0.0738	0.0518	-0.2613
213	-0.0398	-0.0082	-0.1354
214	0.0007	0.0016	-0.0237
avgbias	0.0489	0.0280	0.1184
avgball	0.0843		

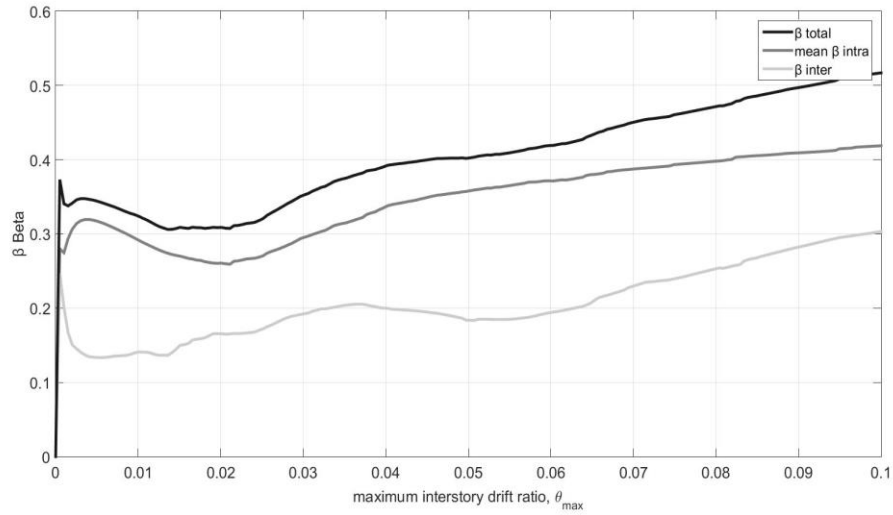
### 9.3.6 Συνδυασμός 6

Στο συνδυασμό 6 περιλαμβάνονται όλα τα προσομοιώματα των 5 κατηγοριών εξαιρουμένων αυτών στα οποία τα υποστυλώματα προσομοιώνονται ελαστικά, καθώς και των αντίστοιχων μονοβάθμιων προσομοιωμάτων αυτών. Ως «τέλειο» προσομοίωμα του συνδυασμού λαμβάνεται το τρισδιάστατο προσομοίωμα με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας και ανελαστικά υποστυλώματα LA20 3D FRAME UNELC. Στα Σχήματα 9.29 έως 9.33 και στους Πίνακες 9.14 και 9.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σχεδιασμού. Στα αποτελέσματα του εν λόγω συνδυασμού που παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρούμε την έντονη διασπορά μεταξύ των μέσων αποκρίσεων των προσομοιωμάτων  $\beta_{inter}$ , η οποία στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνονται τα μονοβάθμια προσομοιώματα προσεγγίζει την τιμή του 20%, καθώς και το πώς αυτή μειώνεται στην περίπτωση που αφαιρούνται τα μονοβάθμια προσομοιώματα. Επίσης, παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στη μεροληψία μεταξύ πολυβαθμίων και μονοβάθμιων προσομοιωμάτων στα οποία παρατηρούνται τιμές μεροληψίας έως και πάνω από 50%. Αντιθέτως, στα πολυβάθμια προσομοιώματα η μεροληψία κυμαίνεται μεταξύ του -20% και 20%, αυξανόμενη σε κάποια προσομοιώματα για τιμές  $\theta_{max} > 4\%$ .

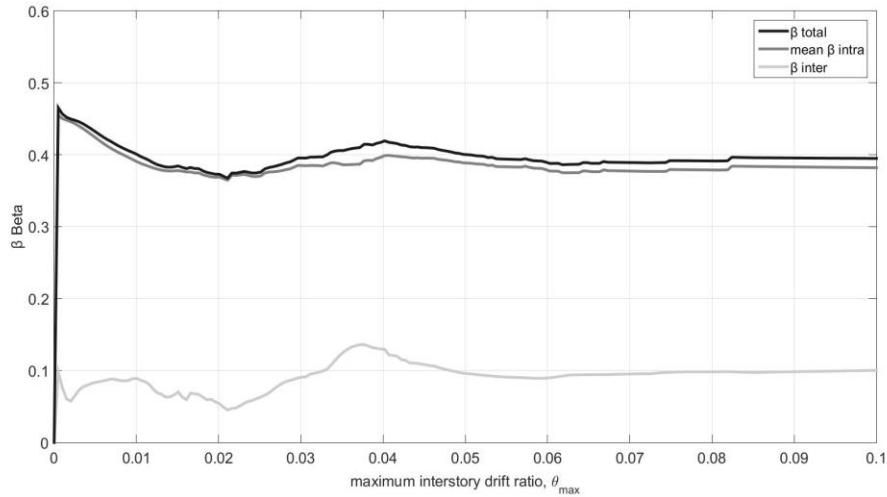


Σχήμα 9.29: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 6.





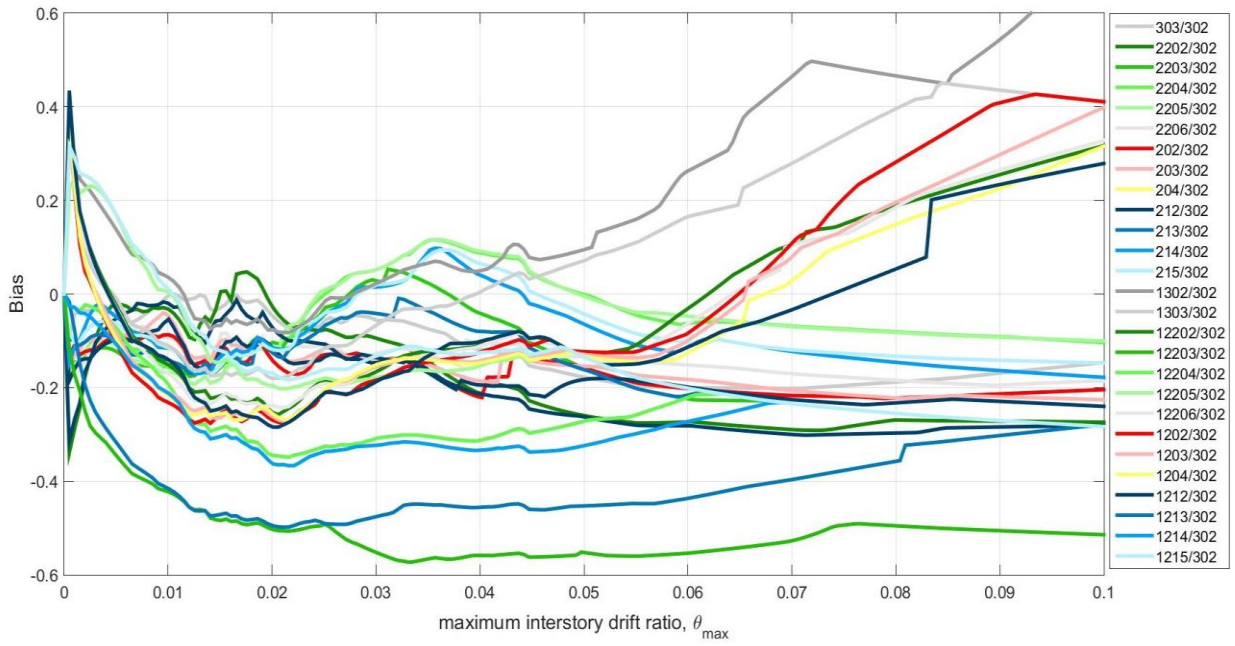
Σχήμα 9.30: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 6 με τα μονοβάθμια.



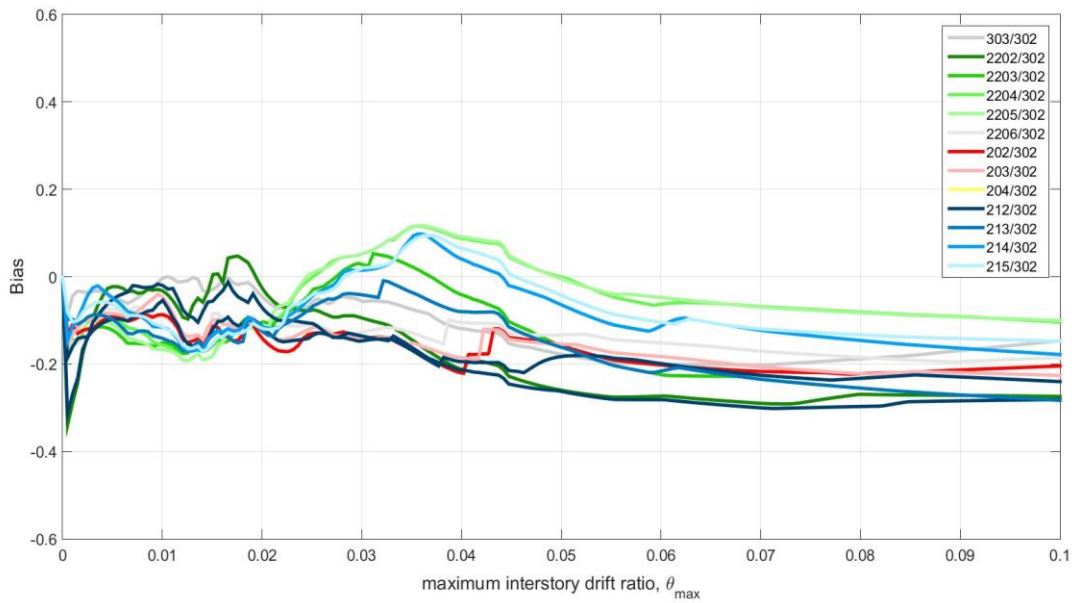
Σχήμα 9.31: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 6 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.14: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 6 για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Συνδυασμός 6	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Με τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.3056	0.1358	0.3344	0.2606	0.1656	0.3087	0.3378	0.1998	0.3924
Χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.4049	0.0874	0.4142	0.3869	0.0540	0.3729	0.3729	0.1294	0.4194



Σχήμα 9.32: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 6 με τα μονοβάθμια.



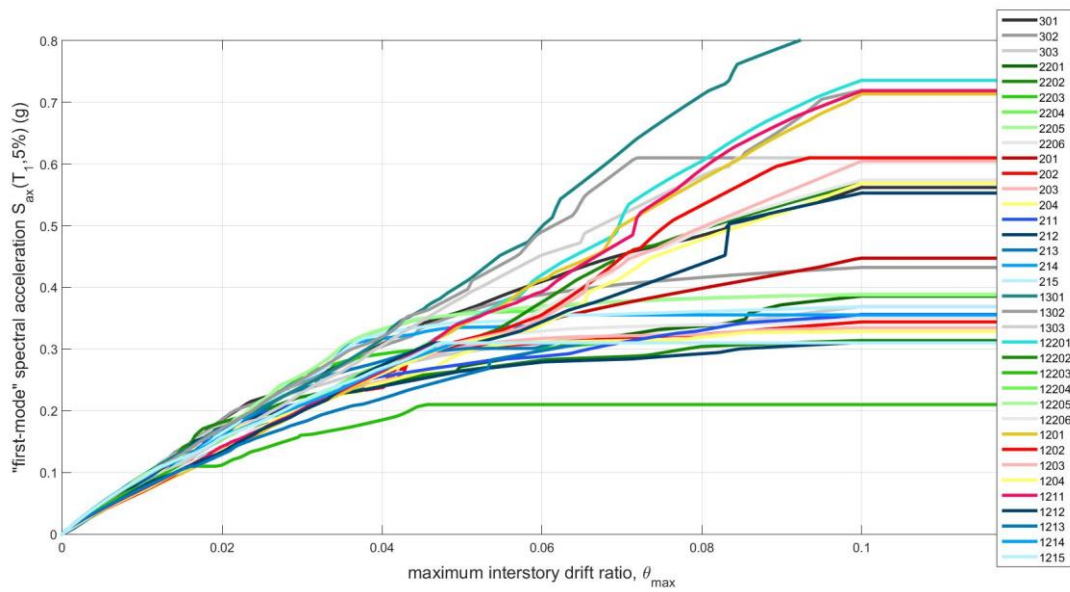
Σχήμα 9.33: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 6 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.15: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 6 (302) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές *avgbias*, *avgball* με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα.

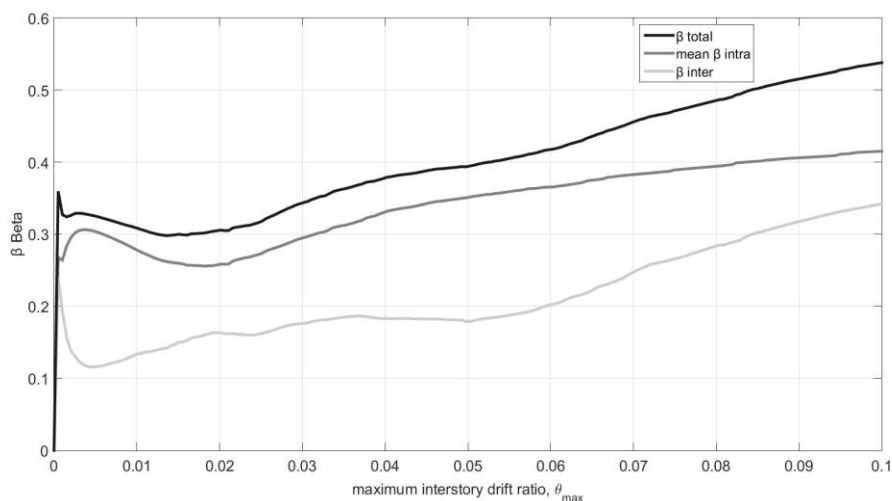
Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
303	-0.0478	-0.0481	-0.1192
2202	-0.0377	-0.0293	-0.2136
2203	-0.1528	-0.1035	-0.0428
2204	-0.1231	-0.1257	0.0874
2205	-0.1472	-0.1260	0.0909
2206	-0.0693	-0.1177	-0.1047
202	-0.0939	-0.1432	-0.2211
203	-0.0785	-0.1233	-0.1860
204	-0.0886	-0.1148	-0.1946
212	-0.0217	-0.0735	-0.2141
213	-0.1252	-0.1264	-0.0801
214	-0.0882	-0.1145	0.0387
215	-0.0889	-0.1191	0.0639
1302	0.0784	-0.0764	0.0506
1303	-0.0738	-0.1808	0.0067
12202	-0.1081	-0.2538	-0.1072
12203	-0.3950	-0.5034	-0.5585
12204	-0.1383	-0.3450	-0.3115
12205	0.0663	-0.1955	-0.1519
12206	-0.1192	-0.2378	-0.1097
1202	-0.1876	-0.2700	-0.1227
1203	-0.1637	-0.2624	-0.1415
1204	-0.1709	-0.2566	-0.1460
1212	0.1089	-0.2843	-0.1002
1213	-0.3779	-0.4952	-0.4554
1214	-0.1669	-0.3632	-0.3334
1215	0.0838	-0.1692	-0.1248
<i>avgbias</i> με τα μονοβάθμια	0.1260	0.1948	0.1621
<i>avgbias</i> χωρίς τα μονοβάθμια	0.089	0.1050	0.1275
<i>avgball</i> με τα μονοβάθμια	0.1725		
<i>avgball</i> χωρίς τα μονοβάθμια	0.1320		

### 9.3.7 Συνδυασμός 7

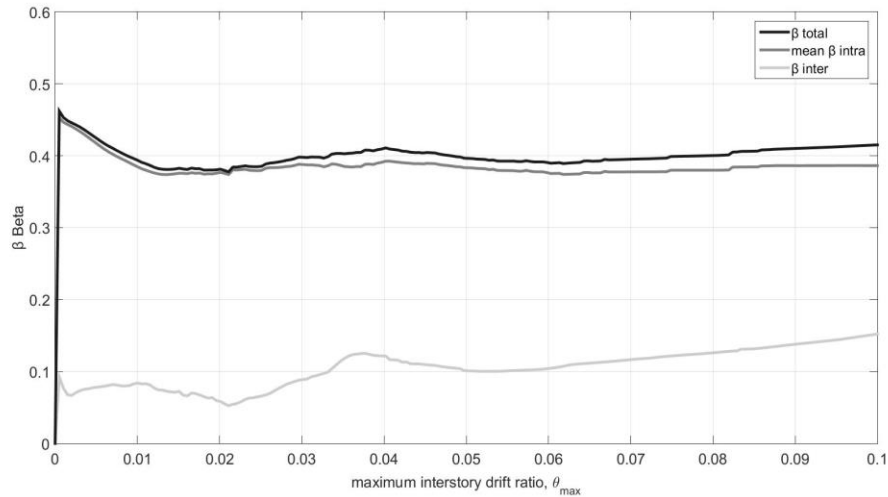
Ο συνδυασμός 7 περιλαμβάνει και τα 36 προσομοιώματα. Αποτελεί επέκταση του συνδυασμού 6 μέσω της προσθήκης των μοντέλων, πολυβαθμίων και αντίστοιχων μονοβαθμίων, στα οποία τα υποστρώματα προσομοιώνονται ελαστικά. Και εδώ «τέλειο» προσομοίωμα λαμβάνεται το προσομοίωμα LA20 3D FRAME UNELC (302). Στα Σχήματα 9.34 έως 9.38 και στους Πίνακες 9.16 και 9.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το συνδυασμό 7, όπου παρατηρούνται όμοια αποτελέσματα με το Συνδυασμό 6.



Σχήμα 9.34: Ποσοστημόριο 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των προσομοιωμάτων του Συνδυασμού 7.



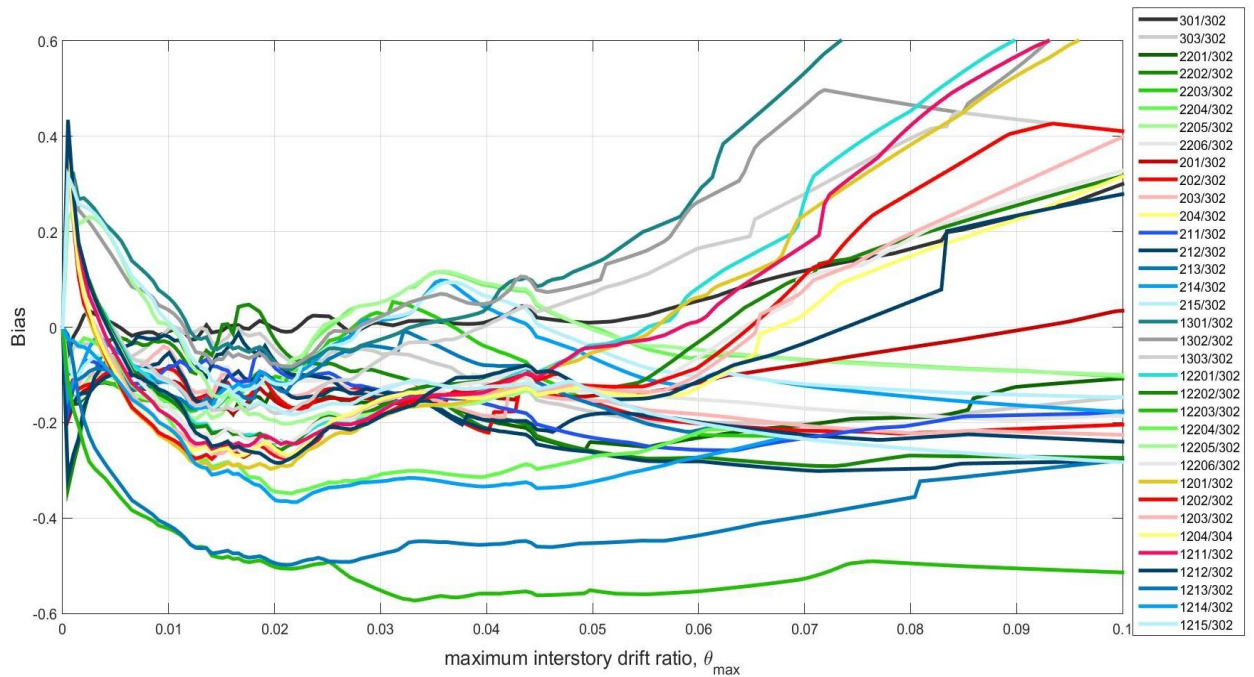
Σχήμα 9.35: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean \beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 7 με τα μονοβάθμια.



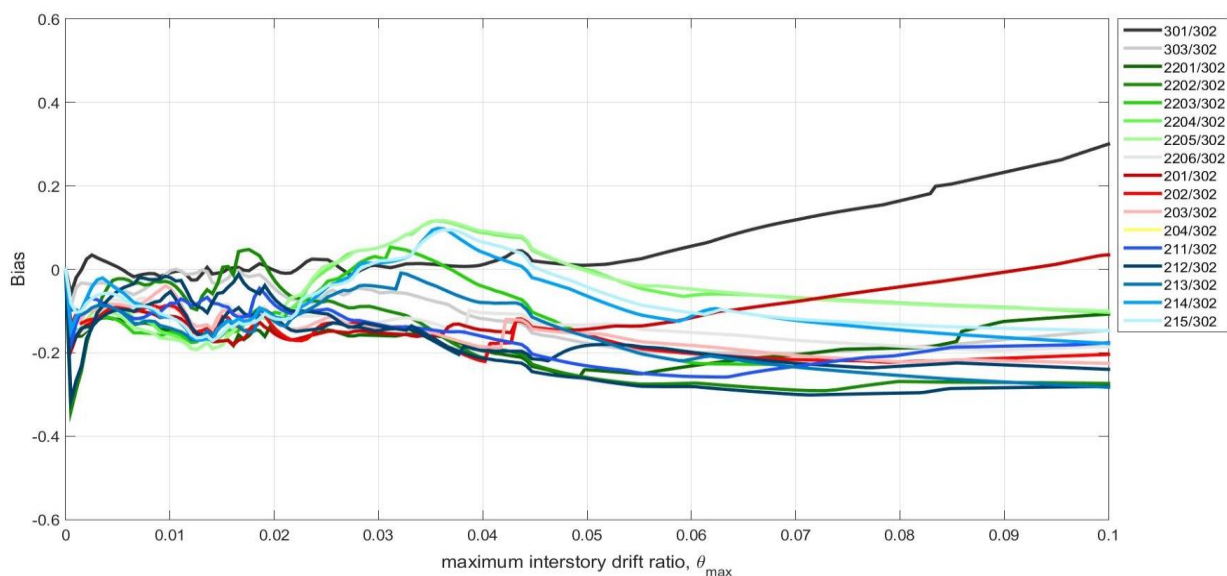
Σχήμα 9.36: Διασπορά  $\beta_{total}$ ,  $\beta_{inter}$ ,  $mean\beta_{intra}$  στο Συνδυασμό 7 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.16: Τιμές διασποράς του Συνδυασμού 7 για  $\theta_{max}=0.75\%$ ,  $2.00\%$ ,  $4.00\%$ .

Συνδυασμός 7	$\theta_{max}=0.75\%$			$\theta_{max}=2.00\%$			$\theta_{max}=4.00\%$		
	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$	Mean $\beta_{intra}$	$\beta_{inter}$	$\beta_{total}$
Με τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.2920	0.1227	0.3167	0.2584	0.1631	0.3056	0.3318	0.1832	0.3790
Χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα	0.3990	0.0812	0.4071	0.3769	0.0585	0.3814	0.3926	0.1217	0.4110



Σχήμα 9.37: Μεροληγία (bias) στο Συνδυασμό 7 με τα μονοβάθμια.



Σχήμα 9.38: Μεροληψία (bias) στο Συνδυασμό 7 χωρίς τα μονοβάθμια.

Πίνακας 9.17: Τιμές μεροληψίας ως προς το «τέλειο» προσομοίωμα του Συνδυασμού 6 (302) για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές  $avgbias$ ,  $avgball$  με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα.

Κωδικός προσομοιώματος	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
301	-0.0118	-0.0035	0.0125
303	-0.0478	-0.0481	-0.1192
2201	-0.1288	-0.1504	-0.1966
2202	-0.0377	-0.0293	-0.2136
2203	-0.1528	-0.1035	-0.0428
2204	-0.1231	-0.1257	0.0874
2205	-0.1472	-0.1260	0.0909
2206	-0.0693	-0.1177	-0.1047
201	-0.1026	-0.1559	-0.1461
202	-0.0939	-0.1432	-0.2211
203	-0.0785	-0.1233	-0.1860
204	-0.0886	-0.1148	-0.1946
211	-0.1150	-0.0867	-0.1623
212	-0.0217	-0.0735	-0.2141
213	-0.1252	-0.1264	-0.0801
214	-0.0882	-0.1145	0.0387
215	-0.0889	-0.1191	0.0639
1301	0.1194	-0.0754	0.0429
1302	0.0784	-0.0764	0.0506
1303	-0.0738	-0.1808	0.0067
12201	-0.0955	-0.2428	-0.1250
12202	-0.1081	-0.2538	-0.1072
12203	-0.3950	-0.5034	-0.5585
12204	-0.1383	-0.3450	-0.3115
12205	0.0663	-0.1955	-0.1519
12206	-0.1192	-0.2378	-0.1097
1201	-0.1911	-0.2948	-0.1412
1202	-0.1876	-0.2700	-0.1227
1203	-0.1637	-0.2624	-0.1415
1204	-0.1709	-0.2566	-0.1460
1211	-0.1373	-0.2380	-0.1330

1212	0.1089	-0.2843	-0.1002
1213	-0.3779	-0.4952	-0.4554
1214	-0.1669	-0.3632	-0.3334
1215	0.0838	-0.1692	-0.1248
avgbias με τα μονοβάθμια	0.1260	0.1816	0.1525
avgbias χωρίς τα μονοβάθμια	0.096	0.1055	0.1279
avgball με τα μονοβάθμια		0.1680	
avgball χωρίς τα μονοβάθμια		0.1315	

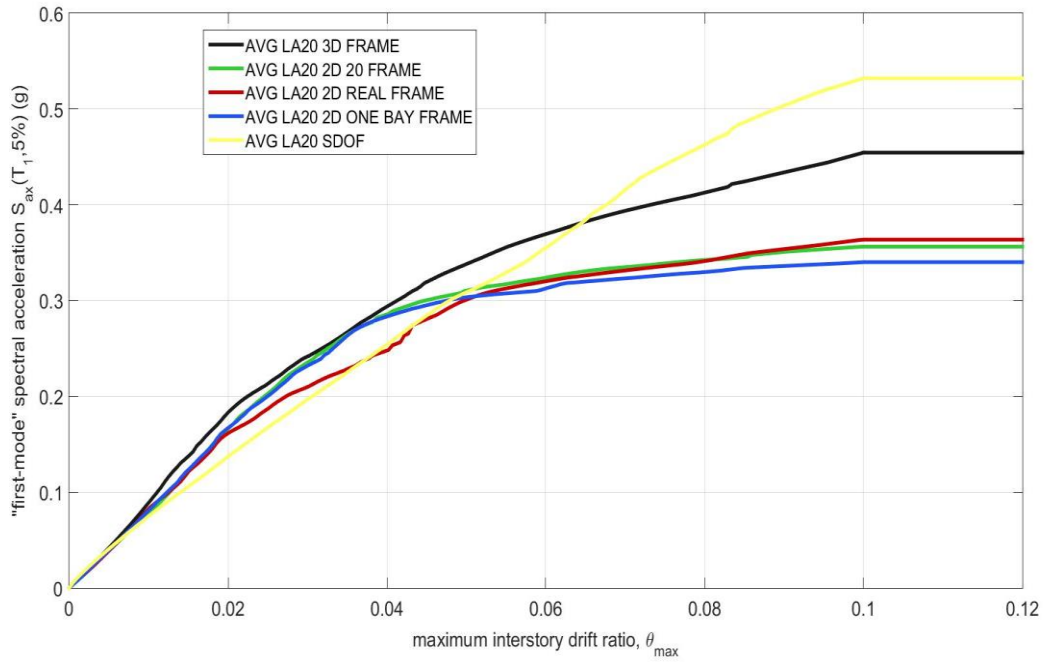
#### 9.4 Σύγκριση των μέσων αποκρίσεων των κατηγοριών

Η σύγκριση μεταξύ των μέσων αποκρίσεων των 5 κατηγοριών έγκειται στον υπολογισμό της μεροληψίας μεταξύ της μέσης απόκρισης ( $\mu$ ) των τεσσάρων κατηγοριών και της μέσης απόκρισης της κατηγορίας των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων (AVG LA20 3D FRAME), η οποία προφανώς θεωρείται η πλέον αξιόπιστη κατηγορία. Η μέση απόκριση ( $\mu$ ) κάθε κατηγορίας υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των διάμεσων καμπυλών IDA των προσομοιωμάτων της κατηγορίας.

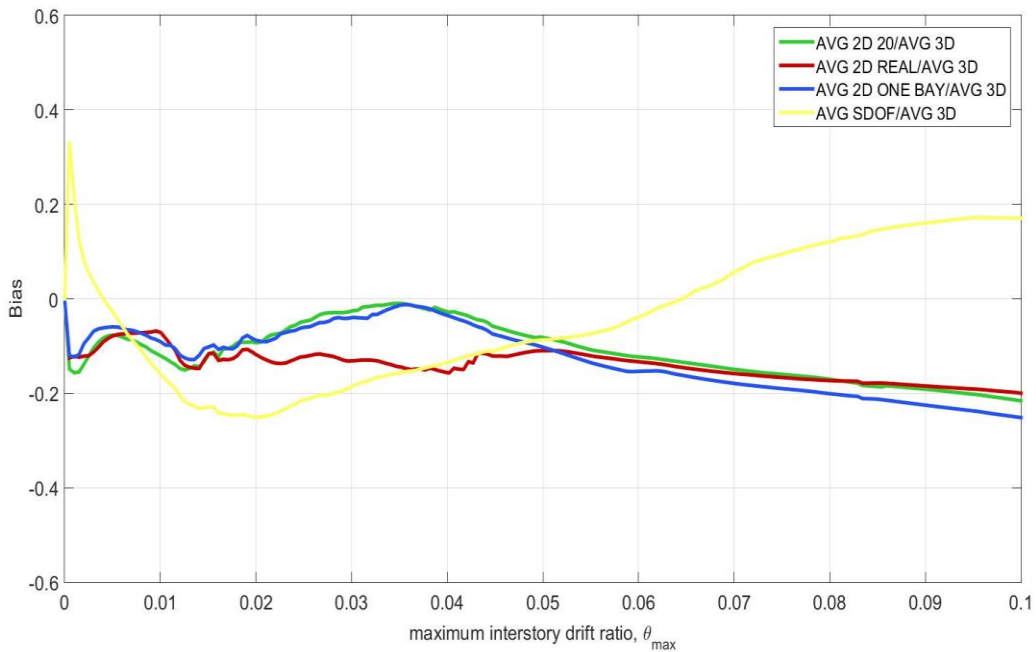
Επίσης, στην παρούσα παράγραφο υπολογίζεται η μεροληψία μεταξύ της μέσης διασποράς εντός των προσομοιωμάτων κάθε κατηγορίας (διασπορά λόγω καταγραφών mean  $\beta_{intra}$ ) των τεσσάρων κατηγοριών έναντι της κατηγορίας των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων (mean  $\beta_{intra}$  LA20 3D FRAME).

Αρχικώς, στο Σχήμα 9.39 παρουσιάζεται η μέση απόκριση (average) των 5 κατηγοριών προσομοίωσης σε όρους ποσοστημορίου 50%. Ακολούθως, στο Σχήμα 9.40 παρουσιάζεται η μεροληψία της μέσης απόκρισης των τεσσάρων κατηγοριών, έναντι της «τέλειας» κατηγορίας των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων (LA20 3D FRAME), ενώ στον Πίνακα 9.18 καταγράφονται οι τιμές της μεροληψίας στις τιμές  $\theta_{max}=0.75\%,2.00\%,4.00\%$  που αντιστοιχούν στις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας, καθώς και οι τιμές των avgbias και avgball όμοια με την προηγούμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 9.41 παρουσιάζονται οι μέσες διασπορές mean  $\beta_{intra}$  και στο Σχήμα 9.42 η μεροληψία στο mean  $\beta_{intra}$  των τεσσάρων κατηγοριών ως προς την κατηγορία τρισδιάστατων προσομοιωμάτων, ενώ στον Πίνακα 9.18 καταγράφεται η μεροληψία στις τρεις τιμές  $\theta_{max}$  όμοια με τα προηγούμενα.

Προκειμένου να δοθεί μια πιο πλήρη εικόνα των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 9.43, δίνεται η μέση απόκριση των 5 κατηγοριών, θεωρώντας όμως ξεχωριστά τα προσομοιώματα της κατηγορίας των μονοβαθμίων, αναλόγως της κατηγορίας πολυβαθμίων εκ της οποίας προέρχονται. Αυτό γίνεται προκειμένου να υπολογιστεί η μεροληψία μεταξύ της μέσης απόκρισης των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων και της μέσης απόκρισης της κατηγορίας εκ της οποίας προέρχονται (bias SDOF/MDOF), η οποία για τις τιμές  $\theta_{max}$  αποτυπώνεται στο Σχήμα 9.44. Τέλος, στον Πίνακα 9.19 καταγράφονται οι τιμές της μεροληψίας μεταξύ της μέσης απόκρισης κάθε κατηγορίας πολυβαθμίων προσομοιωμάτων και των αντίστοιχων μονοβάθμιων προσομοιωμάτων προερχόμενων εξ' αυτής στις τιμές μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου που αντιστοιχούν στις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας ( $\theta_{max}=0.75\%,2.00\%,4.00\%$ ).

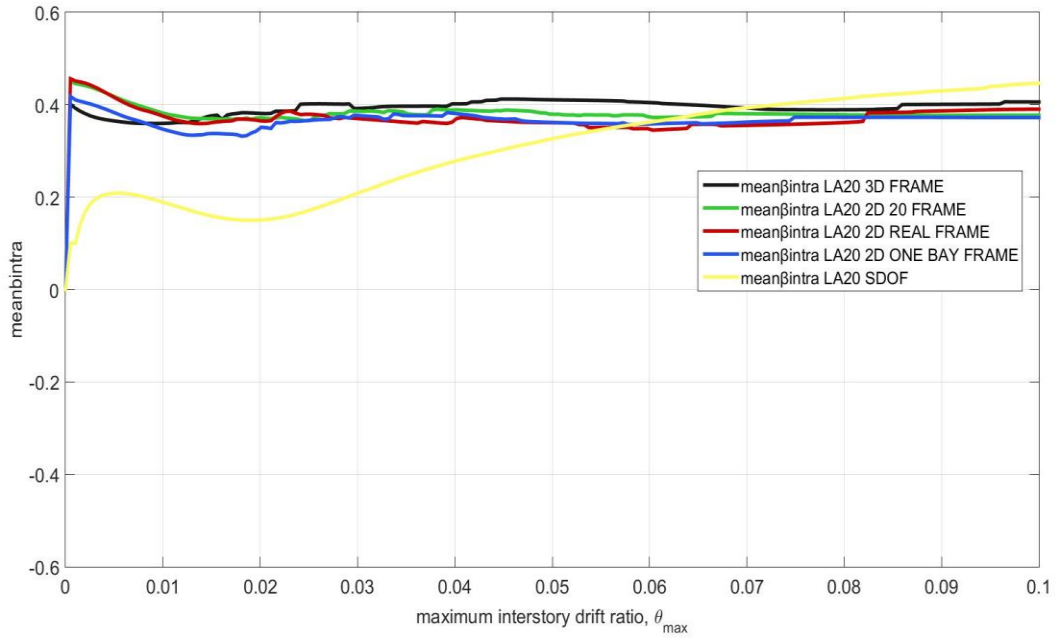


Σχήμα 9.39: Μέση απόκριση  $\mu$  σε όρους ποσοστημορίου 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των 5 κατηγοριών.

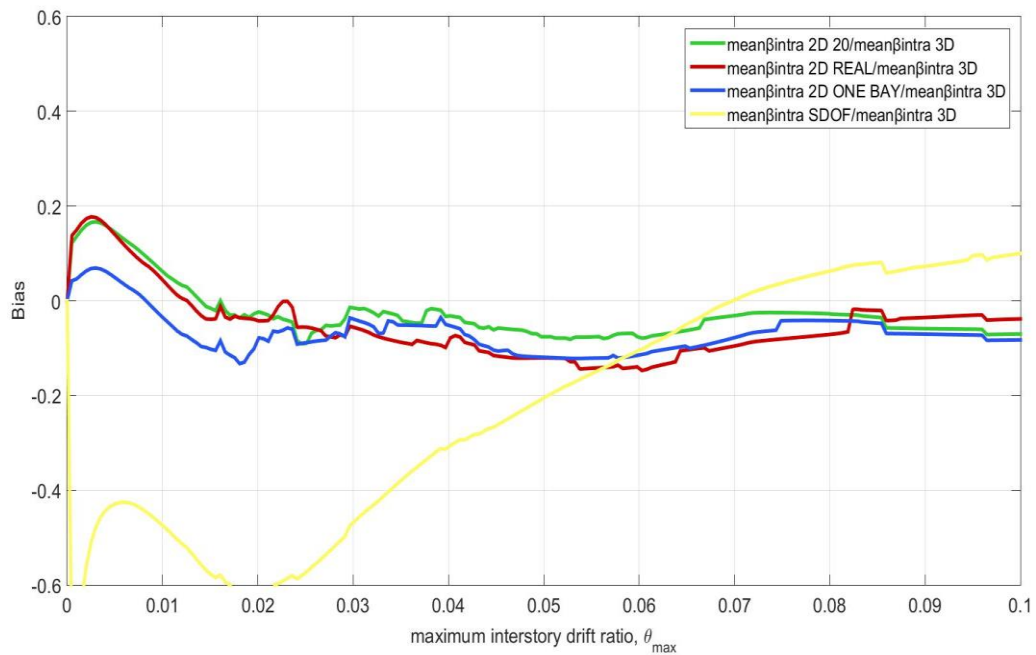


Σχήμα 9.40: Μεροληψία (bias) των μέσων αποκρίσεων  $\mu$  των τεσσάρων κατηγοριών ως προς την «τέλεια» κατηγορία LA20 3D FRAME.





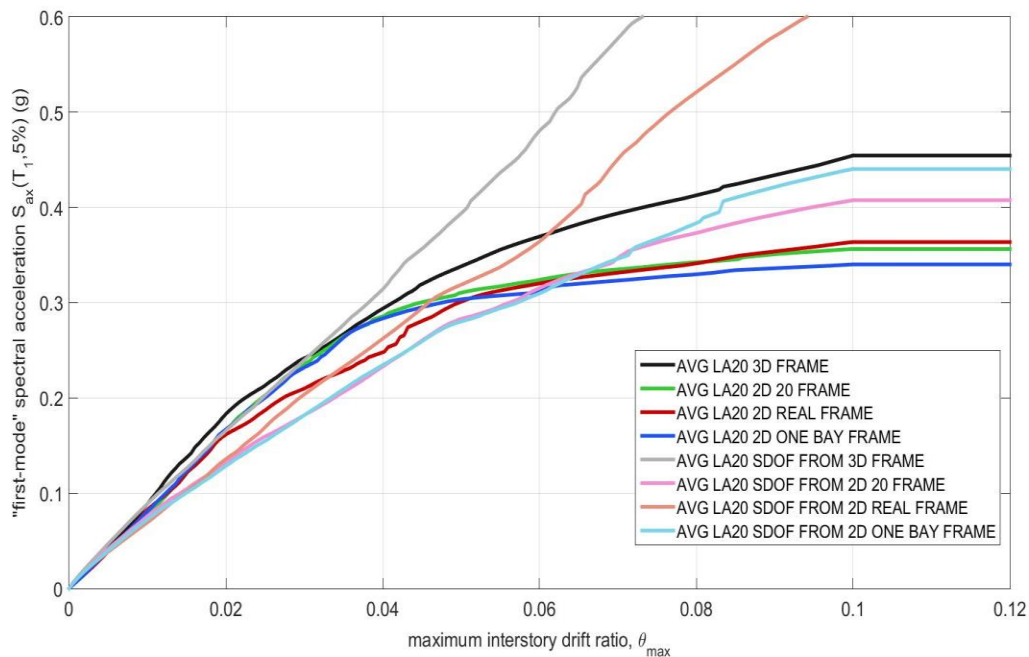
Σχήμα 9.41: Μέση διασπορά  $\beta_{intra}$  στις 5 κατηγορίες.



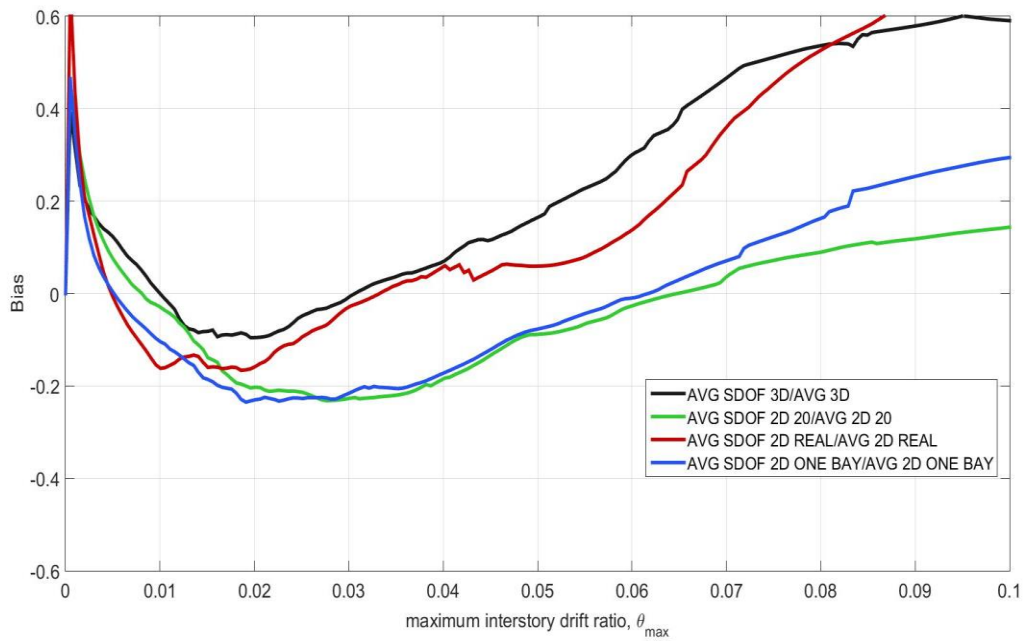
Σχήμα 9.42: Μεροληψία (bias) στη μέση διασπορά  $\beta_{intra}$ .

Πίνακας 9.18: Τιμές μεροληψίας της μέσης απόκρισης  $\mu$  και διασποράς  $\text{mean}\beta_{\text{intra}}$  των τεσσάρων κατηγοριών, ως προς την «τέλεια» κατηγορία LA20 3D FRAME, για  $\theta_{\text{max}}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ , και τιμές  $\text{avgbias}$ ,  $\text{avgball}$  με και χωρίς τα μονοβάθμια προσομοιώματα.

Κατηγορία	Μεροληψία στη μέση απόκριση $\mu$			Μεροληψία στη διασπορά $\text{mean}\beta_{\text{intra}}$		
	$\theta_{\text{max}}=0.75\%$	$\theta_{\text{max}}=2.00\%$	$\theta_{\text{max}}=4.00\%$	$\theta_{\text{max}}=0.75\%$	$\theta_{\text{max}}=2.00\%$	$\theta_{\text{max}}=4.00\%$
LA20 2D 20 FRAME	-0.918	-0.0931	-0.0286	0.1064	-0.0236	-0.0319
LA20 2D REAL FRAME	-0.0725	-0.1191	-0.1570	0.0873	-0.0426	-0.0783
LA20 2D ONE BAY FRAME	-0.0693	-0.0884	-0.0365	0.0140	-0.0784	-0.0529
LA20 SDOF	-0.0980	-0.2507	-0.1337	-0.4357	-0.6048	-0.3061
$\text{avgbias}$ με τα μονοβάθμια	0.0829	0.1378	0.0890	0.1608	0.1873	0.1173
$\text{avgbias}$ χωρίς τα μονοβάθμια	0.0779	0.1002	0.0740	0.0692	0.0482	0.0544
$\text{avgball}$ με τα μονοβάθμια	0.1123			0.1329		
$\text{avgball}$ χωρίς τα μονοβάθμια	0.1087			0.0742		



Σχήμα 9.43: Μέση απόκριση  $\mu$  σε όρους ποσοστημορίου 50% (διάμεση καμπύλη IDA) των κατηγοριών, θεωρώντας υποκατηγορίες μονοβαθμίων αναλόγως της κατηγορίας πολυβαθμίων εκ της οποίας προέρχονται.



Σχήμα 9.44: Μεροληψία (bias) στη μέση απόκριση  $\mu$  μεταξύ μονοβαθμίων και πολυβαθμίων της κατηγορίας εκ της οποίας προέρχονται.

Πίνακας 9.19: Τιμές μεροληψίας της μέσης απόκρισης  $\mu$  μεταξύ μονοβαθμίων και αντίστοιχων πολυβαθμίων της κατηγορίας εκ της οποίας προέρχονται για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%..$

Κατηγορία	Μεροληψία (SDOF/MDOF) στη μέση απόκριση $\mu$		
	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
LA20 3D FRAME	0.0624	-0.0953	0.0715
LA20 2D 20 FRAME	0.0102	-0.2026	-0.1827
LA20 2D REAL FRAME	-0.0962	-0.1579	0.0604
LA20 2D ONE BAY FRAME	-0.0588	-0.2298	-0.1707

## 9.5 Τελική Πρόταση

Προκειμένου να καταλήξουμε στην τελική πρόταση, δίνοντας κάποια ποσοτικά αποτελέσματα συνολικά για κάθε μία κατηγορία προσομοίωσης, μέσα από την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων της σύγκρισης που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, ενώ και εδώ γίνεται χρήση του θεωρήματος ολικής διασποράς. Επιχειρείται η κλιμακωτή συνάρτηση κάθε κατηγορίας με την τέλεια, ώστε να υπολογιστεί η διασπορά των προσομοιωμάτων της κατηγορίας αυτής.

Στα προηγούμενα, έχει υπολογιστεί η διασπορά  $\beta_{total}$  εντός της κάθε κατηγορίας, καθώς επίσης και η μεροληψία μεταξύ των μέσων αποκρίσεων  $\mu$ , κάθε κατηγορίας ως προς την «τέλεια» κατηγορία των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα αποτελέσματα της μεροληψίας είναι επισφαλής, καθώς αναφέρονται σε ένα μόνο κτίριο-προσομοίωμα ενώ επίσης συναρτώνται από την επιλογή του τέλει προσομοιώματος σε κάθε συνδυασμό. Ως εκ τούτου, ξεκινώντας από την κατηγορία των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων (LA20 3D FRAME), η οποία αποτελεί την πλέον αξιόπιστη κατηγορία από άποψη ακρίβειας, επιλέγεται στην τελική πρόταση για τη συγκεκριμένη κατηγορία η τιμή της διασποράς εντός της κατηγορίας αυτής  $\beta_{total3D}$ .

Όσον αφορά την κατηγορία των δισδιάστατων προσομοιωμάτων πολλών ανοιγμάτων (full bay frame), οι δύο κατηγορίες LA20 2D 20 FRAME και LA20 2D REAL FRAME θα μπορούσαν να ομαδοποιηθούν στην τελική πρόταση. Ωστόσο, προκειμένου να έχει ίδιο βάρος η κάθε κλάση, θεωρούνται δύο ξεχωριστές κλάσεις. Έτσι, προκειμένου να υπολογιστεί η διασπορά σε κάθε μία από τις δύο κλάσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση απόκριση  $\mu$  κάθε κατηγορίας και την υπολογισμένη διασπορά  $\beta_{total}$  εντός αυτής, χρησιμοποιείται το θεώρημα ολικής διασποράς και έχουμε για τις δύο κατηγορίες στην τελική πρόταση:

$$\beta_{total2D20F}^2 = mean(\beta_{total3D}, \beta_{total2D20})^2 + var(\mu_{3D}, \mu_{2D20})^2 \Rightarrow$$

$$\beta_{total2D20F}^2 = \left( \frac{\beta_{total3D} + \beta_{total2D20}}{2} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left[ \left( \mu_{3D} - \frac{\mu_{2D20} + \mu_{3D}}{2} \right)^2 + \left( \mu_{2D20} - \frac{\mu_{2D20} + \mu_{3D}}{2} \right)^2 \right]^2, \quad (9.7)$$

$$\beta_{total2DRF}^2 = mean(\beta_{total3D}, \beta_{total2DR})^2 + var(\mu_{3D}, \mu_{2DR})^2 \Rightarrow$$

$$\beta_{total2DRF}^2 = \left( \frac{\beta_{total3D} + \beta_{total2DR}}{2} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left[ \left( \mu_{3D} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D}}{2} \right)^2 + \left( \mu_{2DR} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D}}{2} \right)^2 \right]^2, \quad (9.8)$$

όπου ο πρώτος όρος αναφέρεται στη διασπορά  $mean\beta_{ntra}$  και ο δεύτερος στον όρο  $\beta_{inter}$ , του θεωρήματος ολικής διασποράς, όπως αναφέρεται στη Σχέση 9.1. Λαμβάνοντας ενιαία την κατηγορία των δισδιάστατων προσομοιωμάτων ως LA20 2D FULL BAY FRAME με τις δύο κλάσεις των δύο κατηγοριών εντός αυτής, εφαρμόζοντας το θεώρημα ολικής διασποράς, παίρνουμε:

$$\beta^2_{total2DFULLF} = mean(\beta_{total3D}, \beta_{total2D20}, \beta_{total2DR})^2 + var(\mu_{3D}, \mu_{2DR}, \mu_{2D20})^2 \Rightarrow$$

$$\beta^2_{total2DFULLF} = \left( \frac{\beta_{total3D} + \beta_{total2D20} + \beta_{total2DR}}{3} \right)^2 + \frac{1}{9} \cdot \left[ \left( \mu_{3D} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20}}{3} \right)^2, (9.9) \right.$$

$$\left. + \left( \mu_{2D20} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20}}{3} \right)^2 + \left( \mu_{2DR} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20}}{3} \right)^2 \right]^2$$

Στην κατηγορία των δισδιάστατων προσομοιωμάτων ενός ανοίγματος που αντιστοιχεί στην κατηγορία LA20 ONE BAY FRAME, όμοια με τα παραπάνω, στην τελική πρόταση η διασπορά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\beta^2_{total2DONEF} = mean(\beta_{total3D}, \beta_{total2D20}, \beta_{total2DR}, \beta_{total2DONE})^2 + var(\mu_{3D}, \mu_{2DR}, \mu_{2D20}, \mu_{2DONE})^2 \Rightarrow$$

$$\beta^2_{total2DONEF} = \left( \frac{\beta_{total3D} + \beta_{total2D20} + \beta_{total2DR} + \beta_{total2DONE}}{4} \right)^2 + \frac{1}{16} \cdot \left[ \left( \mu_{3D} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE}}{4} \right)^2, (9.10) \right.$$

$$\left. + \left( \mu_{2D20} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE}}{4} \right)^2 + \left( \mu_{2DR} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE}}{4} \right)^2 \right.$$

$$\left. + \left( \mu_{2DONE} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE}}{4} \right)^2 \right]^2$$

Στην κατηγορία των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων, LA20 SDOF, της οποίας η αξιοπιστία κρίνεται χαμηλή όπως έχει ήδη προαναφερθεί, υπολογίζεται όμοια με τα παραπάνω η διασπορά στην τελική πρόταση από τη σχέση:

$$\beta^2_{total1DF} = mean(\beta_{total3D}, \beta_{total2D20}, \beta_{total2DR}, \beta_{total2DONE}, \beta_{total1D})^2 + var(\mu_{3D}, \mu_{2DR}, \mu_{2D20}, \mu_{2DONE}, \mu_{1D})^2 \Rightarrow$$

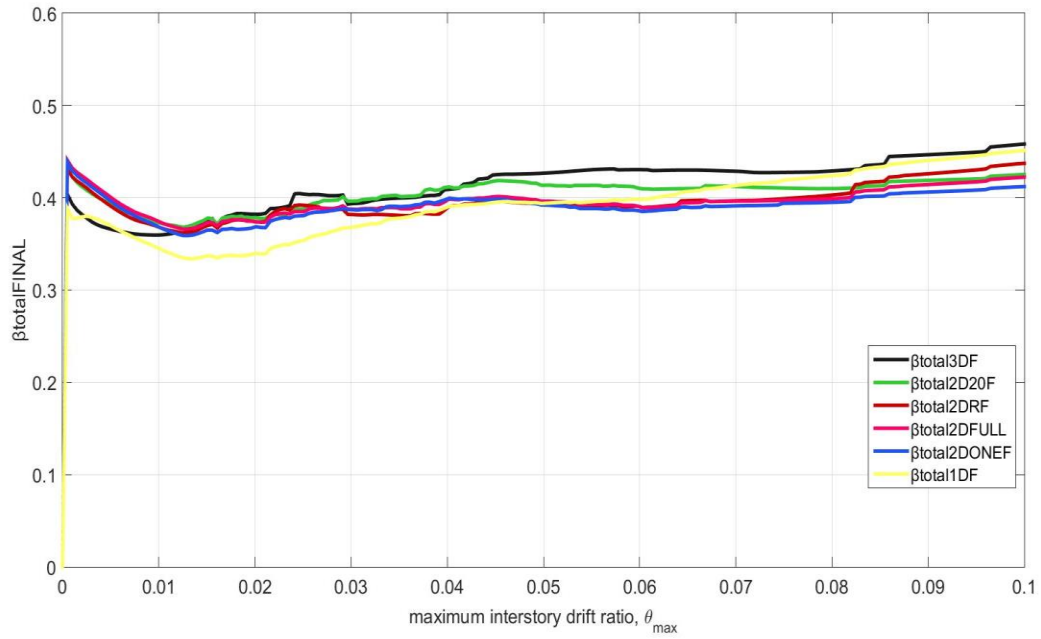
$$\beta^2_{total1DF} = \left( \frac{\beta_{total3D} + \beta_{total2D20} + \beta_{total2DR} + \beta_{total2DONE} + \beta_{total1D}}{5} \right)^2 + \frac{1}{25} \cdot$$

$$\left[ \left( \mu_{3D} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE} + \mu_{1D}}{5} \right)^2 + \left( \mu_{2D20} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE} + \mu_{1D}}{5} \right)^2, (9.11) \right.$$

$$\left. + \left( \mu_{2DR} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE} + \mu_{1D}}{5} \right)^2 + \left( \mu_{2DONE} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE} + \mu_{1D}}{5} \right)^2 \right.$$

$$\left. + \left( \mu_{1D} - \frac{\mu_{2DR} + \mu_{3D} + \mu_{2D20} + \mu_{2DONE} + \mu_{1D}}{5} \right)^2 \right]^2$$

Στο Σχήμα 9.45 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα  $\beta_{total}$  της τελικής πρότασης για τις τιμές μέγιστη γωνιακής παραμόρφωσης ορόφων  $\theta_{max}$ . Στον Πίνακα 9.20 παρουσιάζονται οι τιμές της διασποράς στις τιμές  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$  που όπως έχει αναφερθεί αντιστοιχούν στις στάθμες επιτελεστικότητας (damage states) άμεση χρήση, προστασία ζωής, οιονεί κατάρρευση, θεωρώντας ενιαία κατηγορία με δύο κλάσεις την κατηγορίας δισδιάστατων προσομοιωμάτων πλαισίων πολλαπλών ανοιγμάτων. Στον Πίνακα 9.21 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα με τον Πίνακα 9.20 με τη διαφορά ότι οι δύο κατηγορίες LA20 2D 20 FRAME και LA20 2D REAL FRAME, λαμβάνονται ξεχωριστά. Και στους δύο πίνακες, οι τιμές της διασποράς για την κατηγορία των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων δίνονται σε γκριζαρισμένα κελιά, λόγω της χαμηλής αξιοπιστίας αυτών.



Σχήμα 9.45: Διασπορά  $\beta_{totalF}$  των κατηγοριών.

Πίνακας 9.20: Τιμές διασποράς στην τελική πρόταση για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Κατηγορία	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
Τρισδιάστατη προσομοίωση (LA20 3D FRAME)	0.3607	0.3822	0.4092
Δισδιάστατη προσομοίωση πλαisiού πολλών ανοιγμάτων (LA20 2D 20 FRAME &LA20 2D REAL FRAME)	0.3845	0.3742	0.3986
Δισδιάστατη προσομοίωση πλαisiού ενός ανοίγματος (LA20 2D ONE BAY FRAME )	0.3802	0.3687	0.3997
Προσομοίωση ισοδύναμου μονοβαθμίου (LA20 SDOF )	0.3566	0.3399	0.3909

Πίνακας 9.21: Τιμές διασποράς στην τελική πρόταση για  $\theta_{max}=0.75\%, 2.00\%, 4.00\%$ .

Κατηγορία	$\theta_{max}=0.75\%$	$\theta_{max}=2.00\%$	$\theta_{max}=4.00\%$
Τρισδιάστατη προσομοίωση (LA20 3D FRAME)	0.3607	0.3822	0.4092
Δισδιάστατη προσομοίωση πλαisiού πολλών ανοιγμάτων (LA20 2D 20 FRAME)	0.3810	0.3788	0.4118
Δισδιάστατη προσομοίωση πλαisiού πολλών ανοιγμάτων (LA20 2D REAL FRAME)	0.3760	0.3739	0.3908
Δισδιάστατη προσομοίωση πλαisiού ενός ανοίγματος (LA20 2D ONE BAY FRAME )	0.3802	0.3687	0.3997
Προσομοίωση ισοδύναμου μονοβαθμίου (LA20 SDOF )	0.3566	0.3399	0.3909





## 10 Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στο παρόν, τελευταίο, κεφάλαιο της εργασίας καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας, τόσο κατά τη φάση της δημιουργίας των προσομοιωμάτων και της εκτέλεσης των αναλύσεων, όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τα οποία παρουσιάζονται στα προηγούμενα κεφάλαια.

Επιβεβαιώθηκε, κατά τη δημιουργία των προσομοιωμάτων και τη διενέργεια των αναλύσεων, η σημαντική διαφορά από άποψη υπολογιστικού χρόνου-κόστους μεταξύ των χωρικών προσομοιωμάτων με τα υπόλοιπα. Το γεγονός εντοπίζεται και κατά τη στατική μη γραμμική ανάλυση (Pushover Analysis), αλλά κυρίως κατά την εκτέλεση των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, ενώ θα ήταν ακόμα εντονότερο σε περίπτωση κτιρίου με συνδέσμους δυσκαμψίας, όπου η σύγκλιση κατά την ανάλυση των προσομοιωμάτων, ιδίως των χωρικών, είναι δυσκολότερη έως αδύνατη ορισμένες φορές.

Τα προσομοιώματα στα οποία έγινε χρήση του τροποποιημένου μοντέλου των Ibarra & Krawinkler (2005) με βάση τις σχέσεις των Lignos & Krawinkler (2011), όπως αναμενόταν είχαν μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα των αντίστοιχων κατηγοριών. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στην επαύξηση της διαπιστωμένης αντοχής, που προτείνεται σε σχέση με τα υπόλοιπα προσομοιώματα. Από την άλλη το γεγονός, ότι στα εν λόγω προσομοιώματα, υπήρχε πεπερασμένη στρωφική ικανότητα των μελών οδηγούσε κατά την ανάλυση σε κατάρρευση-αστοχία νωρίτερα. Το παραπάνω, οδηγεί και σε σημαντική μεροληψία (bias) της απόκρισης των συγκεκριμένων προσομοιωμάτων έναντι των υπολοίπων δισδιάστατων προσομοιωμάτων ιδίως για τιμές γωνιακής παραμόρφωσης (drift)  $\theta_{max} > 3.00\%$ .

Τα προσομοιώματα με στοιχεία κατανεμημένης πλαστικότητας, στα οποία χρησιμοποιούνται διατομές ινών (fiber sections), απαιτούσαν περισσότερο υπολογιστικό χρόνο λόγω δυσκολίας σύγκλισης κατά την ανάλυση, έναντι των προσομοιωμάτων της αντίστοιχης κατηγορίας με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας. Ο εν λόγω χρόνος, μειώνεται με τη χρήση στοιχείων συγκεντρωμένης πλαστικότητας, κατά τα οποία η προσομοίωση των στρωφικών ελατηρίων-πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα του στοιχείου γίνεται με διατομές ινών. Η εν λόγω προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια «οικονομικότερη», από άποψη υπολογιστικού χρόνου, προσομοίωση με χρήση διατομών ινών, δεδομένου ότι οι όποιες πλαστικοποιήσεις αναμένονται στα άκρα των στοιχείων.

Η διασπορά  $\beta_{total}$ , εντός της κάθε κατηγορίας, είναι σταθερή και κυμαίνεται περίπου μεταξύ 30-40%. Κατά τον υπολογισμό αυτής, με το θεώρημα ολικής διασποράς, η μεγαλύτερη συνεισφορά οφείλεται στη μέση διασπορά λόγω των καταγραφών στα προσομοιώματα της κάθε κατηγορίας  $mean\beta_{intra}$  περίπου στο 35%, ενώ μικρότερη είναι η διασπορά μεταξύ των μέσων αποκρίσεων  $\beta_{inter}$  μεταξύ 5-15%. Εξάιρεση αποτελεί η κατηγορία των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων, όπου η συνολική διασπορά ξεκινά χαμηλότερα αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης των ορόφων  $\theta_{max}$ . Επίσης, στη συγκεκριμένη κατηγορία, η διασπορά λόγω καταγραφών κυμαίνεται μεταξύ 15-28% για τιμές  $\theta_{max}$  έως 4.00%, που είναι μικρότερη από τις υπόλοιπες κατηγορίες, ενώ έχει εφάμιλλη συνεισφορά στη συνολική διασπορά της κατηγορίας με τη διασπορά της μέσης απόκρισης των προσομοιωμάτων της κατηγορίας που κυμαίνεται μεταξύ 15-22%. Ακόμα, στους συνδυασμούς της σύγκρισης μεταξύ των κατηγοριών προσομοίωσης, η διασπορά  $\beta_{inter}$  έχει μεγαλύτερη τιμή (τιμές έως και 20%)

όταν συμπεριλαμβάνονται κατά τον υπολογισμό αυτής τα μονοβάθμια προσομοιώματα, ενώ έχει μικρότερη τιμή (5-15%) όταν αυτά αμελούνται.

Οι τιμές της μεροληψίας οι οποίες καταγράφονται μεταξύ των προσομοιωμάτων, καθώς και μεταξύ της μέσης απόκρισης των κατηγοριών τρισδιάστατων και δισδιάστατων προσομοιωμάτων, στις τιμές γωνιακής παραμόρφωσης ορόφων (maximum interstorey drift)  $\theta_{max}=0.75\%,2.00\%,4.00\%$ , οι οποίες αντιστοιχούν στις στάθμες επιτελεστικότητας «άμεση χρήση», «προστασία ζωής» και «οιονεί κατάρρευση» κυμαίνονται μεταξύ των τιμών -20% και 20%, τιμές που δε θεωρούνται ιδιαίτερα μεγάλες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, ενώ έχουμε σημαντική συνεισφορά των υψηλότερων ιδιομορφών (higher mode effects) στη σεισμική απόκριση του κτιρίου, τα καθολικά φαινόμενα δευτέρας τάξεως (P-Δ), τα οποία κρίνονται ιδιαίτερος σημαντικά για το εν λόγω 20-όροφο κτίριο, έχουν πρωτεύοντα ρόλο «εξομαλύνοντας» την κατάσταση σε μεγάλες μετακινήσεις. Με άλλα λόγια, ανεξάρτητα από τη συμπεριφορά των διάφορων σημείων πλαστικοποίησης (plastic hinges), σε μεγάλες μετακινήσεις, τα φαινόμενα P-Δ οδηγούν σε κατάρρευση το κτίριο. Τα παραπάνω, οφείλονται στο γεγονός ότι το κτίριο, το οποίο μελετάται είναι κανονικό σε κάτοψη και έχει μεγάλο ύψος. Εάν η μελέτη αφορούσε κτίριο με εκκεντρότητα ως προς το κέντρο μάζας-κέντρο στροφής, είτε με ασυμμετρίες (μη κανονικότητα σε κάτοψη), είτε χαμηλότερου ύψους (π.χ 6-όροφο κτίριο), θα είχαμε σημαντικότερες αποκλίσεις μεταξύ της απόκρισης τρισδιάστατων και δισδιάστατων προσομοιωμάτων. Επιπροσθέτως, οι τιμές της μεροληψίας είναι χαμηλές (<10%) για μικρές τιμές γωνιακής παραμόρφωσης και συγκεκριμένα, για την τιμή που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας άμεση χρήση. Ακόμα, στα χαμηλής αξιοπιστίας μονοβάθμια προσομοιώματα, οι τιμές της μεροληψίας έναντι των πολυβαθμίων είναι ιδιαίτερα μεγάλες, κυρίως για μεγάλες τιμές της γωνιακής παραμόρφωσης  $\theta_{max}>4.00\%$ , όπου υπάρχει και μεγάλη μεροληψία μεταξύ της διαμέσου καμπύλης της ικανοτικής δυναμικής ανάλυσης μεταξύ πολυβάθμιου και αντίστοιχου μονοβάθμιου προσομοιώματος (bias SDOF/MDOF).

Κατά την τελική πρόταση, στο Κεφάλαιο 9 προκύπτουν ολικές διασπορές  $\beta_{totalF}$  της τάξεως 30-40%. Οι εν λόγω τιμές προέρχονται από την διασπορά εντός της κάθε κατηγορίας προσομοίωσης, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί οφείλεται κυρίως στην διασπορά των καταγραφών εντός του κάθε προσομοιώματος (mean  $\beta_{intra}$ ), και τη μέση απόκριση  $\mu$  κάθε κατηγορίας. Οι έως σήμερα βιβλιογραφικές αναφορές, που όπως έχει ήδη αναφερθεί αφορούν κυρίως τη διερεύνηση των παραμέτρων του μοντέλου (model parameters uncertainty) δίνουν τιμές διασποράς της τάξεως 5-15%. Γίνεται, λοιπόν κατανοητό, ότι εάν θεωρηθεί ότι οι δύο παράμετροι αβεβαιότητας συνδυάζονται με επαλληλία SRSS προκειμένου να προσδιοριστεί η συνολική αβεβαιότητα προσομοιώματος, για το συγκεκριμένο κτίριο, η συνολική αβεβαιότητα επηρεάζεται κυρίως από την διασπορά των καταγραφών (record to record variability). Επιπροσθέτως, το γεγονός ότι η τελική διασπορά κυμαίνεται μεταξύ 36-38% για χαμηλές τιμές  $\theta_{max}$  και 38-42% για μεγαλύτερες, τόσο στα τρισδιάστατά όσο και στα δισδιάστατα προσομοιώματα, αποδεικνύει, ότι για κανονικό σε κάτοψη κτίριο, χωρίς προβλήματα στρέψης, η διαφορά μεταξύ της χρήσης τρισδιάστατου ή δισδιάστατου προσομοιώματος είναι μικρή. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός, ότι μόνο τα γωνιακά υποστοιχώματα (κοιλοδοκοί HSS) συμμετέχουν στη σεισμική απόκριση και κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις. Με άλλα λόγια, το υπο μελέτη κτίριο αποτελεί ιδανική περίπτωση για το διαχωρισμό της απόκρισης στη διεύθυνση X από τη διεύθυνση Y. Στα μονοβάθμια προσομοιώματα καταγράφεται μικρότερη διασπορά, αλλά υπάρχει όπως έχει ήδη αναφερθεί, σημαντική μεροληψία.

Προκειμένου να επεκταθεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας και να εξαχθούν πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα, τα οποία θα είναι σε θέση να καλύπτουν μια πιο ευρεία

γκάμα κτιρίων, είτε από άποψη ύψους, είτε από άποψη συστήματος ανάληψης σεισμικών δράσεων, θα πρέπει να μελετηθούν κάποιες επιμέρους περιπτώσεις κτιρίων. Αρχικώς, προτείνεται η μελέτη ενός κτιρίου με ίδιο ύψος αλλά μη κανονικό σε κάτοψη. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να μελετηθούν κτίρια μικρότερου ύψους, όπως για παράδειγμα ένα 6-όροφο και ένα 9-όροφο με περιπτώσεις κανονικότητας και μη κανονικότητας σε κάτοψη. Εάν μελετηθεί 3-όροφο κτίριο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής, καθώς η απόκριση του εν λόγω κτιρίου επηρεάζεται κατά πολύ από την ποιότητα και τη συμπεριφορά του εδάφους θεμελίωσης κατά τη διάρκεια του σεισμού. Ακόμη η διερεύνηση της αβεβαιότητας, λόγω προσομοιώματος, μπορεί να επεκταθεί σε διαφορετικούς τύπους συστήματος ανάληψης σεισμικών δράσεων, όπως για παράδειγμα κεντρικούς ή έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας.



## 11 Βιβλιογραφία

1. Γιάννης Ν. Ψυχάρης. (2015). «Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας τεύχος 2». Αθήνα 2015.
2. AISC Shapes Database V14.1 <http://www.aisc.org/content.aspx?id=2868>
3. Aslani H., Miranda E. (2005). “Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in buildings.” Report No. 157, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA.
4. Chi, W., El-Tawil, S., Deierlein, G. G., and Abel, J. F., (1998), "Inelastic Analyses of a 17 Story Framed Building Damaged During Northridge," *Engineering Structures*, 20(4), 481-495.
5. Chopra AK. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1995.
6. Cornell C.A., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch D.A. (2002). “The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines.” *ASCE Journal of Structural Engineering*, 128(4), 526–533.
7. D’Ayala D, Meslem A, Vamvatsikos D, Porter K, Rossetto T, Crowley H, Silva V. (2014). “Guidelines for analytical vulnerability assessment of low/mid-rise buildings – Methodology”. Vulnerability Global Component project, 2014.
8. Dolsek M. (2009). “Incremental dynamic analysis with consideration of modelling uncertainties.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(6), 805–825.
9. FEMA P695 (2009). “Quantification of building seismic performance factors.” Prepared for Federal Emergency Management Agency by Applied Technology Council, CA.
10. FEMA P-58 (2012). "Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 - Methodology". Federal Emergency Management Agency (FEMA).
11. Foutch DA, Yun SY (2001). Modeling of steel moment frames for seismic loads. *Journal of Constructional Steel Research* 2002, 58, 529–564.
12. Gupta, A., Krawinkler, H. (1999), "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures,". John A. Blume Earthquake Engineering Center Report No. 132, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California
13. Ibarra L.F. (2003) “Global collapse of frame structures under seismic excitations.” PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA
14. Ibarra L.F., and Krawinkler, H. (2005). “Global collapse of frame structures under seismic excitations”, Rep. No. TB 152, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA.
15. Jalayer F, Iervolino I and Manfredi G. (2010). “Structural modeling uncertainties and their influence on seismic assessment of existing RC structures”. *Structural Safety* 32(3), 220–228.
16. Kazantzi A.K., Vamvatsikos D., Lignos D.G. (2014). Seismic performance of a steel moment-resisting frame subject to strength and ductility uncertainty. *Engineering Structures*, 78, 69-77.

17. Kazantzi, A.K., Vamvatsikos, D. (2015). "Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(15), 2677-2694.
18. Krawinkler, H. (2000). "System Performance of Steel Moment Resisting Frame Structures", Paper 2545, 12WCEE, Auckland, New Zealand
19. Kwon OS and Elnashai A. (2006). "The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure". *Engineering Structures* **28**(2), 289–303.
20. Liel A.B., Haselton C.B., Deierlein G.G., Baker J.W. (2009). "Incorporating modeling uncertainties in the assessment of seismic collapse risk of buildings." *Structural Safety*, 31(2), 197–211.
21. Lignos, D. and Krawinkler, H. (2011). "Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake Loading." *J. Struct. Eng.*, 137(11), 1291–1302.
22. Lowes, L. N., N. Mitra and A. Altoontash (2004). A Beam-Column Joint Model for Simulating the Earthquake Response of Reinforced Concrete Frames, PEER.
23. Luco, N., Mori, Y., Funahashi, Y., Cornell, C.A., and Nakashima, M. (2003). "Evaluation of predictors of nonlinear seismic demands using "fishbone" models of SMRF buildings," to be published in *Earthquake Engrg. & Structural Dynamics*.
24. Fragiadakis M, Vamvatsikos D, Karlaftis MG, Lagaros ND, Papadrakakis M. Seismic assessment of structures and lifelines. *Journal of Sound and Vibration* 2015, 334, 29–56.
25. Nakashima, M., Ogawa, K., and Inoue, K. (2002) "Generic Frame model for Simulation of Earthquake Responses of Steel Moment Frames", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
26. OpenSees (2006). Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Available at <http://opensees.berkeley.edu/>.
27. PEER (2005). PEER NGA Database. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, <http://peer.berkeley.edu/nga/>.
28. Porter KA, Beck JL, Shaikhutdinov RV (2002). "Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables". *Earthq Spectra* 2002, 18(4), 719–743.
29. SAC Joint Venture (2000a). "Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings." Report No. FEMA-350, prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
30. SAC Joint Venture (2000b). "Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment-frame buildings." Report No. FEMA-351, prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
31. Scott, M. H. (2011). "Numerical integration options for force-based beam-column element in OpenSees". <http://opensees.berkeley.edu/>.
32. Vamvatsikos D., Cornell C.A. (2002). "Incremental Dynamic Analysis." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 491–514.
33. Vamvatsikos D., Cornell C.A. (2004). "Applied Incremental Dynamic Analysis." *Earthquake Spectra*, 20(2), 523–553.
34. Vamvatsikos D., Fragiadakis M. (2010). "Incremental Dynamic Analysis for seismic performance uncertainty estimation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(2), 141–163.
35. Vamvatsikos D., Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece <http://users.ntua.gr/divamva/software.html>

36. Wen YK, Ellingwood BR, Veneziano D and Bracci J. (2003). "Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering". MAE Center Project FD-2 Report.
37. Y. Mori, T. Yamanaka, M. Nakashima, N. Luco, and C. A. Cornell. (2004) "Inelastic Response of Multistory Frames Considering Post-elastic Mode Shape," accepted for presentation at the Third Asian-Pacific Symposium of Structural Reliability and its Applications, Korea.
38. Yun, S., Hamburger, R., Cornell, C., and Foutch, D. (2002). "Seismic Performance Evaluation for Steel Moment Frames." *J. Struct. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128, 4(534), 534-545.