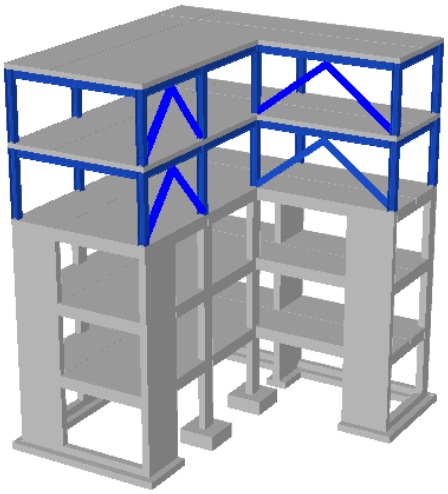
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΙΚΤΩΝ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ

Διδακτορική διατριβή

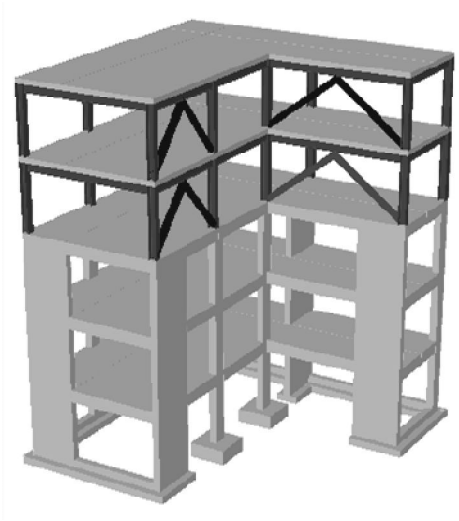
Αθανασίου Β. Παπαγεωργίου

Αθήνα, 2011

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΙΚΤΩΝ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ

Διδακτορική διατριβή

Αθανασίου Β. Παπαγεωργίου

Αθήνα, 2011

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΙΚΤΩΝ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ

Αθανάσιος Β. Παπαγεωργίου

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. (2002)

ΜΔΕ "Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών" Ε.Μ.Π. (2005)

Η διατριβή παρουσιάστηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου

προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου του

«Διδάκτορα Μηχανικού του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου»

Μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής:

Χ. Γαντές, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)

Ι. Ψυχάρης, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Ζέρης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Ε. Βιντζηλαίου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Ι. Ερμόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. Ιωαννίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Σπυράκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2011

Γ΄ ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Το έργο συγχρηματοδοτείται

- 80% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 20% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
- και από τον Ιδιωτικό Τομέα

στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ΄ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

This research project is co-financed by E.U.-European Social Fund (80%) and the Greek Ministry of Development-GSRT (20%).

Ευχαριστίες

Η διατριβή αυτή είναι το αποτέλεσμα μιας πολύχρονης προσπάθειας. Κατά τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής, πολλοί ήταν οι άνθρωποι που συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση της. Χωρίς τη συμβολή και τη στήριξή τους θα ήταν πολύ πιο δύσκολη η ολοκλήρωσή της, και οι ακόλουθες ευχαριστίες είναι μια ελάχιστη ένδειξη ευγνωμοσύνης για την προσφορά τους.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., κύριο Χάρη Γαντέ ο οποίος ήταν και ο επιβλέπων καθηγητής. Η ευρύτητα των γνώσεων του στον γενικότερο τομέα της ανάλυσης των κατασκευών, και ειδικότερα στη δυναμική ανάλυση, έχουν αποτυπωθεί στη διατριβή αυτή. Επιπλέον, η προσήλωσή του σε ερευνητικές κατευθύνσεις οι οποίες έχουν ορατές προεκτάσεις εφαρμογής συντέλεσε ώστε η διατριβή αυτή να έχει ως αφετηρία ένα υπαρκτό μελετητικό πρόβλημα και εν τέλει να επιχειρεί να προτείνει λύσεις που άπτονται τις μελετητικής πρακτικής. Κυρίως όμως, θέλω να τον ευχαριστήσω για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια, η οποία κατά τη γνώμη μου υπήρξε υποδειγματική.

Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης και στα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτική επιτροπής, Ιωάννη Ψυχάρη και Χρήστο Ζέρη, αναπληρωτή και επίκουρο καθηγητή αντίστοιχα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., οι οποίοι αφιέρωσαν χρόνο για την παρακολούθηση της πορείας της διατριβής και έκαναν συχνά υποδείξεις για προοπτικές μελέτης.

Στα μέλη του εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών της σχολής Πολιτικών Μηχανικών οφείλονται ευχαριστίες για την διαμόρφωση ενός άριστου εργασιακού κλίματος και για τις πολλές συζητήσεις που είχαμε πάνω σε ερευνητικά θέματα, από τις οποίες πάντα προέκυπτε κάτι προς αξιοποίηση στη διατριβή αυτή. Ειδικά η συμβολή του Νίκου Πνευματικού ξεχωρίζει και τον ευχαριστώ πολύ

Η οικονομική κάλυψη της διατριβής έγινε από το πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ 2003. Προκειμένου όμως να υλοποιηθεί η ενίσχυση αυτή, εργάστηκαν πολλοί άνθρωποι

από τους οποίους ξεχωρίζουν ο Γιώργος Κόμνος, η Φυλιώ Παπαγρηγορίου, η Κατερίνα Βαβυλώνη και η Δέσποινα Τσαουσίδου από τον ειδικό λογαριασμό έρευνας του Ε.Μ.Π., τους οποίους ευχαριστώ ιδιαιτέρως.

Αποφασιστική ήταν και η συμβολή της οικογένειάς μου από τη Ρόδο. Τόσο σε οικονομικό όσο και σε ψυχολογικό – ηθικό επίπεδο, η προσφορά τους ήταν μεγάλη και χωρίς αυτούς η ολοκλήρωση της διατριβής θα ήταν αδύνατη. Για τη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια τους ευγνωμονώ.

Περιεχόμενα

Περίληψη xiii
Abstract xv

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 1
1.1 Γενικά 1
1.2 Δομή διατριβής 5

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο – βιβλιογραφική επισκόπηση 7
2.1 Γενικά 7
2.2 Απόσβεση 7
2.3 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά 14
2.4 Παραδοχές - συμβολισμοί 20
2.5 Εφαρμογή των προβλέψεων των κανονισμών σε μικτές κατασκευές 22
2.6 Δυνατότητες ανάλυσης και προβλήματα στις μικτές κατασκευές 28
2.6.1 Συζευγμένη ανάλυση 29
2.6.2 Αποσυζευγμένη ανάλυση 33
2.7 Βιβλιογραφία 37
2.7.1 Αποσύζευξη και μέθοδοι ανάλυσης 37
2.7.2 Απόσβεση κατασκευών και ισοδύναμη απόσβεση μικτών συστημάτων . 48
2.8 Ισοδύναμοι διβάθμιοι ταλαντωτές 54
2.9 Σεισμικές διεγέρσεις 58

Κεφάλαιο 3: Διαδικασία αποσύζευξης μικτών κατασκευών 71
3.1 Γενικά 71
3.2 Διαδικασία αποσύζευξης 72
3.3 Προσδιορισμός του σφάλματος αποσύζευξης 75
3.4 Ισοδύναμα διβάθμια συστήματα 76

3.5 Τροποποίηση της αποσύζευξης 81
3.6 Υπολογιστική εφαρμογή ελαστικής διαδικασίας αποσύζευξης 85
3.7 Αξιολόγηση και επαλήθευση προτεινόμενης διαδικασίας 88
3.8 Αξιολόγηση της μορφής της απόσβεσης 97
3.9 Τροποποίηση της αποσύζευξης – αρμονική διέγερση.....102
3.10 Αποσύζευξη - σεισμικές διεγέρσεις.....105
3.11 Τροποποιημένη αποσύζευξη - σεισμικές διεγέρσεις.....108
3.12 Αποσύζευξη ελαστοπλαστικών μικτών κατασκευών 113
3.13 Υπολογιστική εφαρμογή ελαστοπλαστικής διαδικασίας αποσύζευξης.....115
3.14 Υλοποίηση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς 117
3.15 Αποσύζευξη ελαστοπλαστικών κατασκευών σε αρμονική διέγερση.....118
3.16 Αποσύζευξη τροποποιημένων ελαστοπλαστικών κατασκευών υπό αρμονική διέγερση 122
3.17 Αποσυζευγμένη ανάλυση ελαστοπλαστικών κατασκευών υπό σεισμικές διεγέρσεις 128
3.18 Αποσυζευγμένη ανάλυση τροποποιημένων ελαστοπλαστικών κατασκευών υπό σεισμικές διεγέρσεις 136
3.19 Εφαρμογές αποσύζευξης 144
3.20 Προσαρτήματα κατά ΕΑΚ [2] και EC8 [3] 164
3.21 Σύνοψη.....171

Κεφάλαιο 4: Ισοδύναμοι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης.....173
4.1 Γενικά 173
4.2 Μητρώο απόσβεσης μικτής κατασκευής.....174
4.3 Κλασσική ιδιομορφική ανάλυση.....177
4.4 Μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση.....181
4.5 Ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης μικτής κατασκευής στην βιβλιογραφία 185
4.6 Ισοδύναμοι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης μικτής κατασκευής από μιγαδικές ιδιομορφές.....188
4.7 Σύγκριση ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης.....191
4.8 Αξιοποίηση των μιγαδικών συντελεστών ιδιομορφικής απόσβεσης 195
4.9 Υπολογιστική εφαρμογή διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος.....197
4.10 Σφάλμα υπό αρμονικές διεγέρσεις.....200
4.11 Σφάλμα υπό σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις 212
4.12 Σφάλμα υπό σεισμικές διεγέρσεις.....220

4.13 Εφαρμογές ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης 230
4.14 Σύνοψη 268

Κεφάλαιο 5: Ισοδύναμοι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης 271
5.1 Γενικά 271
5.2 Προβλήματα κλασσικής διαδικασίας ανάλυσης 272
5.3 Υπολογισμός ενιαίων συντελεστών απόσβεσης.....274
5.4 Υπολογιστική εφαρμογή εύρεσης ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης.....281
5.5 Ενιαίος συντελεστής απόσβεσης από αρμονικές σε συντονισμό διεγέρσεις..284
5.6 Ενιαίος συντελεστής απόσβεσης από σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις 295
5.7 Σφάλμα υπό σεισμικές διεγέρσεις.....308
5.8 Εφαρμογές ισοδύναμων ενιαίων συντελεστών απόσβεσης.....316
5.9 Σύγκριση προτεινόμενων μεθόδων ανάλυσης με ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης 355
5.10 Σύνοψη.....373

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....375
6.1 Σύνοψη.....375
6.2 Πρωτοτυπία διατριβής.....378
6.3 Συμπεράσματα διατριβής 380
6.4 Προοπτικές μελλοντικής έρευνας.....383

Παράρτημα: Αρχεία εισαγωγής δεδομένων στο Opensees 387

Βιβλιογραφία.....393

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διδακτορική Διατριβή

Αθανάσιου Β. Παπαγεωργίου

Συμβολή στις μεθόδους ανάλυσης για τον αντισεισμικό σχεδιασμό μικτών καθ' ύψος κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα

Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μικτών καθ' ύψος κατασκευών που αποτελούνται από δύο τμήματα, ένα κατώτερο από σκυρόδεμα το οποίο εδράζεται στο έδαφος και ονομάζεται πρωτεύον σύστημα, και ένα ανώτερο από χάλυβα το οποίο εδράζεται επί του πρωτεύοντος και ονομάζεται δευτερεύον σύστημα. Εξαιτίας του διαφορετικού δομικού υλικού και του συνήθως διαφορετικού στατικού συστήματος, τα δύο τμήματα χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά την απόσβεση και την ελαστοπλαστική τους συμπεριφορά υπό σεισμικές και άλλες δυναμικές διεγέρσεις, που αποτυπώνονται σε διαφορετικούς συντελεστές ιξώδους απόσβεσης και συμπεριφοράς. Οι διαφορές αυτές συνεπάγονται δυσχέρεια τόσο καθορισμού των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς όσο και ανάλυσής τους υπό σεισμικές δράσεις. Για το λόγο αυτό είναι κοινή μελετητική πρακτική η υιοθέτηση ενιαίων συντηρητικών τιμών για τους συντελεστές απόσβεσης και συμπεριφοράς, κάτι που οδηγεί σε μη ορθολογικό και συνήθως αντιοικονομικό σχεδιασμό.

Η παρούσα διατριβή επιχειρεί να προτείνει λύσεις σε κάποια από τα προβλήματα ανάλυσης κατασκευών αυτού του τύπου και συγκεκριμένα στα προβλήματα (i) της αποσύζευξης των δύο τμημάτων κατά την ανάλυσή τους υπό σεισμικές δράσεις, και (ii) του καθορισμού συντελεστών απόσβεσης κατά την συζευγμένη ανάλυση. Για να γίνει αυτό η μικτή κατασκευή περιγράφεται απλουστευτικά μέσω ενός διβάθμιου ταλαντωτή, του οποίου ο ένας βαθμός ελευθερίας αντιπροσωπεύει το πρωτεύον σύστημα και ο άλλος το δευτερεύον. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του κάθε βαθμού ελευθερίας προκύπτουν από τη θεμελιώδη ιδιομορφή του αντίστοιχου τμήματος. Ευνόητο είναι ότι με τον τρόπο αυτό εισάγεται ένα σφάλμα κατά την αντικατάσταση του πραγματικού πολυβάθμιου φορέα από ένα «ισοδύναμο» διβάθμιο, και επομένως τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι καταλληλότερα για φορείς των οποίων κάθε τμήμα έχει σχετικά κανονική κατανομή δυσκαμψίας και μάζας, έτσι ώστε η δυναμική συμπεριφορά κάθε τμήματος να περιγράφεται ικανοποιητικά από την πρώτη ιδιομορφή του.

Το πρώτο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη διατριβή αφορά την ενδελεχή διερεύνηση του σφάλματος που προκύπτει κατά την πιθανή αποσύζευξη της κατασκευής για την ανάλυσή της υπό σεισμικές δράσεις. Κατά τη διαδικασία αυτή τα δύο ομοιογενή τμήματα της μικτής κατασκευής, το πρωτεύον από σκυρόδεμα και το δευτερεύον από χάλυβα, αναλύονται

ξεχωριστά. Αρχικά αναλύεται το πρωτεύον σύστημα υπό τη σεισμική διέγερση σχεδιασμού, και στη συνέχεια το δευτερεύον θεωρώντας ως σεισμική δράση την απόκριση εκείνης της στάθμης του πρωτεύοντος συστήματος, επί της οποίας εδράζεται το δευτερεύον. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται συχνά, μεταξύ άλλων διότι συνήθως με την μελέτη του τμήματος από σκυρόδεμα και εκείνη του τμήματος από χάλυβα ασχολούνται διαφορετικές μελετητικές ομάδες. Επιπλέον, έτσι αίρονται, τουλάχιστον επιφανειακά, οι περιορισμοί από τους διαφορετικούς συντελεστές απόσβεσης και συμπεριφοράς, εισάγεται όμως ένα σφάλμα αποσύζευξης, διότι αγνοούνται οι περισσότερες παράμετροι αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο συστημάτων.

Στην παρούσα εργασία η μελέτη του σφάλματος αποσύζευξης γίνεται συστηματικά για μεγάλο εύρος δυναμικών χαρακτηριστικών των δύο τμημάτων υπό αρμονικές και σεισμικές διεγέρσεις, λαμβάνοντας υπόψη είτε ελαστική είτε ελαστοπλαστική συμπεριφορά του πρωτεύοντος τμήματος. Επιπρόσθετα, προτείνεται και διερευνάται μια τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης, κατά την οποία τα αδρανειακά μεγέθη του χαλύβδινου τμήματος λαμβάνονται υπόψιν στην αποσυζευγμένη ανάλυση του τμήματος από σκυρόδεμα, με σκοπό τη μείωση του σφάλματος αποσύζευξης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή καμπυλών αποσύζευξης για διάφορα επίπεδα σφάλματος και συναρτήσει των λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών των δύο τμημάτων. Με τις καμπύλες αυτές μπορεί να γίνει πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης σε προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης μιας μικτής κατασκευής, ώστε να αποφασιστεί αν η ανάλυσή της είναι σκόπιμο να γίνει αποσυζευγμένα ή πρέπει υποχρεωτικά να γίνει συζευγμένα. Η ακρίβεια των καμπυλών αποσύζευξης δοκιμάζεται σε πολυβάθμια μικτά πλαίσια με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για τις περιπτώσεις των μικτών κατασκευών για τις οποίες η πρόβλεψη για το σφάλμα είναι αποτρεπτική ως προς την εκτέλεση αποσυζευγμένης ανάλυσης, η ενδεδειγμένη λύση είναι η συζευγμένη ανάλυση ολόκληρης της κατασκευής. Στην περίπτωση όμως αυτή οι διαφορετικοί συντελεστές απόσβεσης των δύο τμημάτων δημιουργούν δυσκολίες κατά την δυναμική ανάλυση, η οποία δεν μπορεί πλέον να εκτελεστεί με συνήθη λογισμικά. Προκειμένου να αποφευχθεί η υιοθέτηση ενιαίου συντηρητικού συντελεστή ιξώδους απόσβεσης για την κατασκευή, σε ένα επόμενο στάδιο της παρούσας διατριβής προτείνονται «ισοδύναμοι» συντελεστές απόσβεσης. Σκοπός των συντελεστών αυτών είναι να υποκαταστήσουν την ορθή ανάλυση της κατασκευής με προσεγγιστικές αναλύσεις, οι οποίες πλέον μπορούν να πραγματοποιηθούν με εμπορικά λογισμικά και σύμφωνα με την καθημερινή μελετητική πρακτική.

Οι προτεινόμενοι αυτοί συντελεστές εξάγονται με δύο εναλλακτικές μορφές, ως ιδιομορφικοί ή ενιαίοι, με τους πρώτους να διαφοροποιούνται για κάθε ιδιομορφή της κατασκευής και με τους δεύτερους να εφαρμόζονται σε ολόκληρη την κατασκευή. Προτείνεται η εφαρμογή των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης να γίνεται σε δύο στάδια, ένα προκειμένου να υπάρξει βέλτιστη προσέγγιση της απόκρισης του τμήματος από σκυρόδεμα, και ένα προκειμένου να υπάρξει βέλτιστη προσέγγιση του τμήματος από χάλυβα. Οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης εξάγονται για διβάθμιους ταλαντωτές υπό αρμονικές διεγέρσεις και στη συνέχεια η ακρίβειά τους ελέγχεται και για σεισμικές διεγέρσεις με πολύ καλά αποτελέσματα. Τελικά οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης εφαρμόζονται σε πολυβάθμια μικτά πλαίσια υπό σεισμικές διεγέρσεις, όπου καταφέρνουν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά την πραγματική απόκριση.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
STRUCTURAL DIVISION
STEEL STRUCTURES LABORATORY

PhD THESIS

Athanasios V. Papageorgiou

A contribution to the analysis methods for the seismic design of irregular in height concrete/steel structures

Supervisor: C. Gantes, Assoc. Professor N.T.U.A.

February 2011, Athens Greece

Abstract

Scope of the present work is to study the dynamic response of irregular in height structures consisted of two parts, a lower one made of concrete which is founded on the ground and denoted as primary structure, and an upper one made of steel, resting on the former one, and denoted as secondary structure. Because of the two different materials, usually also ending in different structural systems, the two parts have different characteristics regarding their damping and elastoplastic behaviour under seismic and generic dynamic excitation, leading to different viscous damping ratios and behaviour factors. The result of these differences is difficulties regarding the estimation of the seismic actions according to pertinent design codes, as well as difficulties regarding their seismic analysis. For this reason, it is a common design practice to adopt overall conservative values, leading thus to overestimation of the seismic actions.

The present thesis attempts to suggest solutions in some problems of the analysis of these structures and namely in the problems of (i) the decoupling of the two parts during their analysis under seismic excitation, and (ii) the estimation of damping ratios for the coupled analysis. To this end, the structure is simplistically taken into consideration as a 2-DoF oscillator, with one degree of freedom representing the primary structure and the other the secondary one. The dynamic characteristics of each degree of freedom arise from the fundamental eigenmode of the corresponding part of the complete structure. This representation of the MDOF structure with the “equivalent” 2-DoF one induces an error, and consequently the results of the suggested method are suitable for structures which have a regular mass and stiffness distribution in each part, so as to adequately represent its dynamic response with its first eigenmode.

The first issue dealt with in this thesis is a thorough investigation of the error arising from the possible decoupling of the structure during its analysis under seismic excitation. During the decoupling procedure, the two homogeneous parts of the irregular structure, the primary one made of concrete and the secondary one made of steel, are analyzed separately. The primary structure is analyzed first under the seismic excitation, and then the secondary one is analyzed, considering as excitation the response of the primary structure at the foundation

level of the secondary one. This procedure is frequently applied because usually different teams undertake the analysis of each part. Moreover, the decoupling raises the restrictions of the different damping ratios and behaviour factors, induces though a decoupling error since the interaction of the two parts is neglected.

In the present work, the study of the decoupling error is performed thoroughly for a variety of dynamic characteristics of the two parts under harmonic and seismic excitations, allowing for elastic and elastoplastic behaviour of the primary structure. Additionally, a modified decoupling procedure is suggested and investigated during which the inertial quantities of the steel part are taken into consideration in the decoupled analysis of the concrete part, aiming at reducing the decoupling error. The results are presented in the form of decoupling curves for different error levels and depending on the ratios of eigenfrequencies and masses of the two parts. These curves can be utilized in predicting the decoupling error in a preliminary analysis stage, and thus determine whether the analysis is advisable to be decoupled or necessarily coupled. The accuracy of the decoupling curves is tested on MDOF irregular frames with satisfactory results.

For the cases of structures for which the prediction of the decoupling error is prohibitively large in order to proceed with a decoupled analysis, the advisable solution is the coupled analysis of the complete structure. In this case though, due the different damping ratios of the two parts difficulties arise for the dynamic analysis that cannot be performed now with available commercial software. In order to avoid adopting a uniform conservative viscous damping ratio for the complete structure, in a next step of the present thesis, “equivalent” damping ratios are suggested. Their goal is to replace the exact analysis of the structure with approximate ones which can be implemented with readily available software and are in accordance with the design practice.

The suggested damping ratios come in two forms, modal or uniform, the former varying according to the eigenmodes of the structure and the latter applying to the complete structure. It is suggested that the application of the uniform damping ratios is performed twice, once in order to approximate the response of the concrete part, and once to approximate the response of the steel part. The equivalent damping ratios are extracted based on equivalent 2-DoF oscillators under harmonic excitations, and then their accuracy is tested for seismic excitations with very good results. Finally, the equivalent damping ratios are applied in MDOF irregular frames under seismic excitations, and manage to satisfactorily approximate their actual response

1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μικτών κατασκευών. Ως τέτοιες νοούνται εδώ κατασκευές οι οποίες, όταν υπόκεινται σε μία δυναμική καταπόνηση όπως ο σεισμός, μπορούν να διαχωριστούν σε περισσότερα του ενός τμήματα με βάση την απόκρισή τους. Ο λόγος για το διαχωρισμό αυτό είναι ότι το κάθε τμήμα λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του έχει και διαφορετική απόκριση στην επιβαλλόμενη κίνηση με αποτέλεσμα η πρόβλεψη της συνολικής απόκρισης της μικτής κατασκευής να είναι προβληματική.

Η ανομοιομορφία στην απόκριση σε μια κατασκευή μπορεί να πηγάζει από διάφορους παράγοντες. Μια πιθανή αιτία είναι η κατανομή των υλικών κατασκευής, καθώς η χρήση δύο ή περισσότερων υλικών στον φέροντα οργανισμό οδηγεί σε κατασκευή με ανομοιομορφία στην απόσβεση και στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Επίσης, συνήθης αιτία ανομοιομορφίας στις κατασκευές είναι και η επιλογή των στατικών συστημάτων που καλούνται να παραλάβουν τα οριζόντια φορτία λόγω σεισμού. Έτσι, η ύπαρξη δύο ή περισσότερων τέτοιων συστημάτων, π.χ. τοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας ή και απλά πλαισιακά συστήματα, εισάγει ανομοιομορφία στη δυναμική απόκριση καθώς συνεπάγεται απότομες αλλαγές δυσκαμψίας στις τρεις διαστάσεις της κατασκευής. Τέλος, η χρήση συσκευών πρόσθετης απόσβεσης όπως π.χ. ιξώδεις αποσβεστήρες ή αποσβεστήρες τριβής, ή και η χρήση συστημάτων σεισμικής μόνωσης εισάγουν συγκεντρωμένη απόσβεση ή βαθμούς ελευθερίας με πολύ μικρή δυσκαμψία, με αποτέλεσμα η κατασκευή να έχει μη κανονικά μητρώα δυσκαμψίας, μάζας και απόσβεσης.

Συγκεκριμένα, στη διατριβή αυτή μελετώνται κατασκευές οι οποίες αποτελούνται από δύο τμήματα καθ’ ύψος, ένα κατώτερο από σκυρόδεμα που εδράζεται στο έδαφος,

και ένα ανώτερο από χάλυβα που εδράζεται επί του σκυροδέματος. Η διαμόρφωση αυτή είναι πολύ συνήθης, και μάλιστα προτιμάται σε περίπτωση που το ανώτερο τμήμα της κατασκευής, το χαλύβδινο προστεθεί εκ των υστέρων. Ένα παράδειγμα αμιγώς κτιριακής κατασκευής με αυτήν τη διαμόρφωση φαίνεται στην Εικ. 1.1, στην οποία ένας όροφος από χάλυβα εδράζεται επάνω στο υπόβαθρο από σκυρόδεμα. Στην περίπτωση αυτή, η κατασκευή και των δύο τμημάτων γίνεται ταυτόχρονα, είναι όμως πολλές οι φορές στις οποίες το τμήμα από χάλυβα προστίθεται αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του υποβάθρου.

Εικ. 1.1: Μικτή καθ' ύψος κτιριακή κατασκευή

Σε περιπτώσεις όπως αυτές της Εικ. 1.1, η χαλύβδινη κατασκευή αποτελεί μια πολύ δελεαστική λύση γιατί μειώνει το προστιθέμενο βάρος στην κατασκευή και το χρόνο κατασκευής, άρα και την όχληση. Μάλιστα, ειδικά σε περιπτώσεις που το τμήμα από σκυρόδεμα είναι υφιστάμενη κατασκευή, η οποία σύμφωνα με τις σύγχρονες κανονιστικές απαιτήσεις είναι υποδιαστασιολογημένη, η επιλογή του χάλυβα για την υπερκατασκευή είναι μάλλον η μόνη λύση λόγω της συνεπαγόμενης μείωσης των πρόσθετων αδρανειακών μεγεθών. Πέρα όμως από τις πρόσθετες στατικές απαιτήσεις που έχει η περίπτωση της προσθήκης καθ' ύψος σε υφιστάμενο κτίριο, πολλές φορές και οι αρχιτεκτονικές απαιτήσεις είναι τέτοιες που υπαγορεύουν τη χρήση δομικού χάλυβα σε κάποιες στάθμες του κτιρίου.

Εκτός όμως από τις περιπτώσεις των καθαρά κτιριακών έργων, η υπό μελέτη διάταξη με το χαλύβδινο τμήμα να εδράζεται επί του τμήματος από σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται και στις περιπτώσεις που τηλεπικοινωνιακοί ιστοί εδράζονται σε κτίρια από σκυρόδεμα, είτε αυτά είναι οικίσκοι στέγασης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού όπως στην Εικ. 1.2, είτε πολυώροφα κτίρια σε αστικά κέντρα όπως στην Εικ. 1.3. Τέλος, οι κατασκευές αυτού του τύπου απαντώνται πολύ συχνά σε περιπτώσεις γηπέδων, στα οποία πλαίσια ή μικτά συστήματα πλαισίων – τοιχωμάτων από σκυρόδεμα αποτελούν τις κερκίδες και στεγάζουν τις βοηθητικές χρήσεις του γηπέδου, ενώ τα στέγαστρα κατασκευάζονται από χάλυβα και εδράζονται πάνω στις κερκίδες, όπως στην Εικ. 1.4.

Εικ. 1.2: Τηλεπικοινωνιακός ιστός εδραζόμενος σε οικίσκο από ΟΣ

Εν γένει, οι μικτές καθ' ύψος κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα, έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογής και αποτελούν σε αρκετές περιπτώσεις τη βέλτιστη λύση όχι μόνο από άποψη αρχιτεκτονικών απαιτήσεων. Πολλές φορές οι κανονιστικές ή και οι λειτουργικές απαιτήσεις είναι τέτοιες ώστε να οδηγείται ο μελετητής στην υιοθέτηση τέτοιων μικτών συστημάτων.

Εικ. 1.3: Τηλεπικοινωνιακός ιστός εδραζόμενος σε πολυώροφο κτίριο από ΟΣ

Εικ. 1.4: Γήπεδο με κερκίδες από ΟΣ και στέγαστρο από χάλυβα

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ότι υπάρχουν σημεία ή τμήματα της κατασκευής τα οποία αποσβαίνουν ενέργεια με διαφορετικό τρόπο ή έχουν εντελώς διαφορετική ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Δεδομένου ότι οι κανονιστικές διαδικασίες ανάλυσης και σχεδιασμού των κατασκευών, οι οποίες είναι αρκετά απλές ώστε να επιτραπεί η εφαρμογή τους σε ευρεία γκάμα κατασκευών, προϋποθέτουν ένα βαθμό ομοιομορφίας και κανονικότητας, είναι εμφανές ότι η ανάλυση σε πρώτη φάση και ο σχεδιασμός μετέπειτα κατασκευών αυτού του τύπου παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση δυνατοτήτων ανάλυσης των κατασκευών αυτών με μεθόδους παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε αμιγείς κατασκευές, μεθόδους δηλαδή με τις οποίες υπάρχει αρκετή εξοικείωση λόγω της καθημερινής μελετητικής πρακτικής. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι η ευρύτητα της εφαρμογής των μικτών κατασκευών, πράγμα που συνεπάγεται ανάγκη για μελετητικές προτάσεις οι οποίες να μπορούν να εφαρμοστούν από όλα τα μελετητικά σχήματα, με συνηθισμένο εμπορικό λογισμικό. Κατά συνέπεια, όλη η μελέτη στην παρούσα εργασία γίνεται στο πεδίο του χρόνου και όχι στο πεδίο των συχνοτήτων που συνεπάγεται διαδικασίες ανάλυσης οι οποίες απέχουν από τη μελετητική πρακτική και εφαρμόζονται σε πολύ μεγάλης κλίμακας έργα.

1.2 Δομή διατριβής

Η διατριβή αυτή αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο που ακολουθεί, αρχικά γίνεται μια παρουσίαση των προβλημάτων στην ανάλυση που συνεπάγεται η διαμόρφωση μιας κατασκευής με τον προαναφερθέντα μικτό τρόπο από σκυρόδεμα και χάλυβα, λόγω ακριβώς των διαφορών στην απόσβεση και στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά του κάθε τμήματος. Γίνεται μια παρουσίαση των δυνατοτήτων ανάλυσης και των προβλημάτων που παρουσιάζονται κάθε φορά. Ακολούθως, επιχειρείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ζητήματα που έχουν να κάνουν με την ανάλυση μικτών και μη κανονικών κατασκευών, κατασκευών οι οποίες δεν είναι κατ’ ανάγκη του τύπου που μελετώνται στην διατριβή αυτή, οι μέθοδοι όμως που δοκιμάζονται μπορούν να προσαρμοστούν και να εφαρμοστούν και στις μικτές

κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα. Επίσης, παρουσιάζονται βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες έχουν να κάνουν κυρίως με την απόσβεση των κατασκευών και πιο συγκεκριμένα με την αντικατάσταση ανώμαλων κατανομών απόσβεσης, που απαντώνται συχνά σε κατασκευές με αποσβεστήρες, με κανονική απόσβεση η οποία όμως δίνει παρόμοια μεγέθη απόκρισης. Ακολουθεί η περιγραφή μιας μεθόδου αντικατάστασης της πολυβάθμιας μικτής κατασκευής με μια ισοδύναμη διβάθμια με βάση τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των τμημάτων της. Η αντικατάσταση αυτή γίνεται προκειμένου η μελέτη να γίνει βασικά στην ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή και όχι στην αρχική πολυβάθμια, τόσο για λόγους υπολογιστικής απλότητας αλλά και για να προκύψουν συμπεράσματα με ευρύτερη δυνατότητα εφαρμογής. Τέλος, γίνεται παρουσίαση 10 σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία προκειμένου τα αποτελέσματα να ελεγχθούν σε ρεαλιστικές συνθήκες φόρτισης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μια απόπειρα διερεύνησης του σφάλματος που προκύπτει κατά την αποσύζευξη, μια διαδικασία κατά την οποία η μικτή κατασκευή χωρίζεται σε δύο κανονικά τμήματα, και το κάθε ένα μελετάται χωριστά, αγνοώντας την ύπαρξη του άλλου και εισάγοντας έτσι ένα σφάλμα στην ανάλυση. Ακολουθούν δύο κεφάλαια στα οποία σε μια άλλη προσέγγιση, η μικτή κατασκευή δε διασπάται αλλά μελετάται ολόκληρη, και γίνεται μια προσπάθεια η κατανομή της απόσβεσης που προκαλεί την ανομοιομορφία στην κατασκευή να αντικατασταθεί με μια ισοδύναμη η οποία όμως να δίνει κατά το δυνατόν παρόμοια απόκριση. Στο πρώτο από τα δύο αναζητώνται ιδιομορφικοί ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης για την πλήρη κατασκευή, και στο δεύτερο η μελέτη γίνεται με σκοπό να προκύψουν ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης για την μικτή κατασκευή. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση, συνοψίζονται τα συμπεράσματα και η πρωτοτυπία της διατριβής, και γίνονται αναφορές σε προοπτικές συνέχειας της παρούσας εργασίας.

2

Θεωρητικό υπόβαθρο - βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Γενικά

Παρά τη συχνότητα με την οποία οι μικτές κατασκευές υλοποιούνται στην πράξη, δεν υπάρχει αυστηρά ορισμένο κανονιστικό πλαίσιο το οποίο να ρυθμίζει τη διαδικασία ανάλυσης και διαστασιολόγησής τους. Αντίθετα τα κανονιστικά κείμενα συνήθως αφορούν αμιγείς από άποψη υλικού κατασκευές, με εξαίρεση την περίπτωση των σύμμικτων διατομών, για τις οποίες υπάρχουν σχετικοί κανονισμοί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ανάλυσης των μικτών κατασκευών, οι οποίες είναι επέκταση και τροποποίηση των αντίστοιχων μεθόδων που εφαρμόζονται στην περίπτωση των συνηθισμένων κατασκευών, οπότε είτε εμφανίζονται δυσχέρειες στην εφαρμογή τους, είτε προκύπτουν εσφαλμένα αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται αναφορά στις κανονιστικές διατάξεις περί απόσβεσης και ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς που αφορούν μικτές καθ' ύψος κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα. Ακολούθως, γίνεται παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης, και των προβλημάτων που προκύπτουν όταν επιχειρείται να εφαρμοστούν σε κατασκευές αυτού του τύπου, και παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφία. Τέλος, περιγράφεται μια μέθοδος αντιστοίχισης μικτών πολυβάθμιων κατασκευών με ισοδύναμες διβάθμιες, και δίνονται τα επιταχυνσιογραφήματα και τα φάσματα απόκρισης σε όρους απολύτων επιταχύνσεων των 10 σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

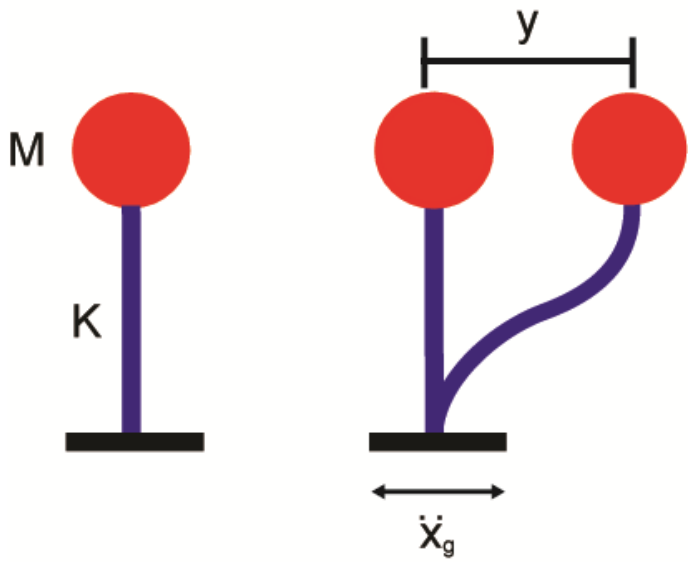
2.2 Απόσβεση

Η απόσβεση είναι εγγενής ιδιότητα των δομικών υλικών αλλά και των κατασκευών εν γένει. Χάρις στην απόσβεση, οι κατασκευές έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν το

πλάτος της ταλάντωσής τους όταν βρίσκονται σε συνθήκες ελεύθερης ταλάντωσης. Η απόσβεση, προκύπτει κυρίως από τα θερμικά φαινόμενα που δημιουργούνται από την επαναλαμβανόμενη ελαστική παραμόρφωση και την εσωτερική τριβή στα δομικά στοιχεία. Πέραν όμως των μηχανισμών που δρουν σε επίπεδο μικροκλίμακας στην κατασκευή, άλλοι παράγοντες όπως η τριβή στις μεταλλικές συνδέσεις, άνοιγμα και κλείσιμο ρωγμών στο σκυρόδεμα και η τριβή των φερόντων στοιχείων με μη φέροντα, όπως τοίχοι και διαχωριστικά, καταλήγουν σε απόσβεση της δυναμικής ενέργειας της ταλάντωσης της κατασκευής. Τέλος, ακόμα και η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του αέρα και της ίδιας της κατασκευής κατά την κίνησή της, συντελεί και αυτή στη μείωση του πλάτους της ταλάντωσής της.

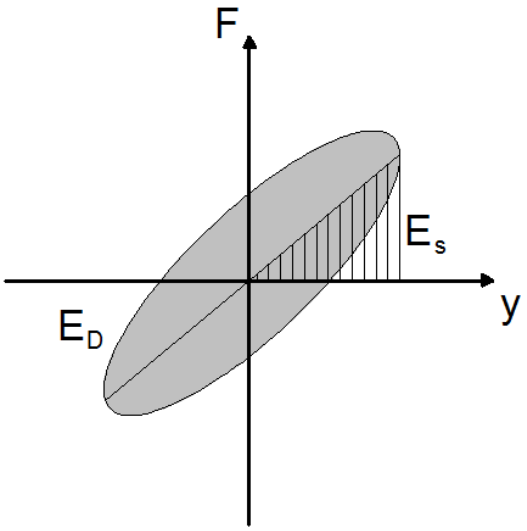
Η δράση όλων των παραπάνω παραγόντων είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια της ιξώδους απόσβεσης, η οποία περιλαμβάνει με ένα γενικό τρόπο όλες τις προαναφερθείσες πηγές απόσβεσης, και η οποία εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό μέσω του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης. Συγκεκριμένα, για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή, ο οποίος έχει μάζα M και δυσκαμψία K και υποβάλλεται σε εδαφική διέγερση $\ddot{x}_g$, όπως αυτός που φαίνεται στην Εικ. 2.1, κίνησή του περιγράφεται από την εξίσωση (2.1). Ο όρος $C\dot{y}$ αποδίδει τις δυνάμεις που προκύπτουν από την απόσβεση και ο όρος Ky τις δυνάμεις από τη δυσκαμψία του φορέα.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -M\ddot{x}_g \tag{2.1}$$



Εικ. 2.1: Μονοβάθμιος ταλαντωτής

Η εδαφική διέγερση $\ddot{x}_g$ προκαλεί δυνάμεις από απόσβεση και δυσκαμψία οι οποίες συνολικά δίνουν μια δύναμη F, η οποία σε μια εξιδανικευμένη θεώρηση έχει ελαστικούς βρόχους υστέρησης που φαίνονται στην Εικ. 2.2.



Εικ. 2.2: Ελαστικός βρόχος υστέρησης μονοβάθμιου ταλαντωτή

Η πραγματική μορφή του ελαστικού βρόχου υστέρησης δεν είναι γραμμική, αλλά έχει μορφή που μπορεί να αποδοθεί απλοποιητικά όπως στην Εικ. 2.2, στην οποία με E_D συμβολίζεται το συνολικό εμβαδό ενός κύκλου φόρτισης, άρα και το συνολικό πραγματοποιούμενο έργο, και με E_s το εμβαδό του ορθογωνίου τριγώνου που προκύπτει από το σημείο του κύκλου με τη μέγιστη μετατόπιση. Ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi}\frac{E_D}{E_s} \tag{2.2}$$

Με δεδομένο τον συντελεστή ιξώδους απόσβεσης ζ, ο όρος C της εξίσωσης (2.1) γίνεται:

$$C = 2M\omega\zeta \tag{2.3}$$

Όπου με ω συμβολίζεται η ιδιοσυχνότητα του μονοβάθμιου ταλαντωτή και η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{2.4}$$

Πλέον, η εξίσωση (2.1) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$M\ddot{y} + 2M\omega\zeta\dot{y} + Ky = -M\ddot{x}_g \tag{2.5}$$

Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης ίση με τη μονάδα, στην οποία ο μονοβάθμιος ταλαντωτής της Εικ. 2.1 δεν εκτελεί ταλαντώσεις εφ' όσον εκτραπεί από τη θέση ισορροπίας και αφεθεί ελεύθερος, αλλά απλά επιστρέφει στην αρχική του θέση. Όταν ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης παίρνει τιμές μικρότερες από 1, τότε ο μονοβάθμιος ταλαντωτής μπορεί να εκτελέσει ελεύθερες ταλαντώσεις. Τιμές του συντελεστή ζ μεγαλύτερες της μονάδας έχουν αποτέλεσμα ανάλογο με αυτό της κρίσιμης απόσβεσης, αποτρέπουν δηλαδή τις ελεύθερες ταλαντώσεις.

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή απόσβεσης μέσω των εμβαδών των βρόχων της Εικ. 2.2, είναι πρακτικά αδύνατο να επαναλαμβάνεται κάθε φορά που γίνεται μελέτη μιας κατασκευής. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει στο παρελθόν πειράματα και μετρήσεις σε πολυβάθμιες κατασκευές από διάφορα υλικά, και από την απόκρισή τους έχουν υπολογιστεί τυπικοί συντελεστές απόσβεσης ζ. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα αυτά, καταλήγουν σε συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται και από το υλικό, αλλά και από τη μορφή της διέγερσης και την έντασή της, κάτι που προκύπτει και από την εξιδανικευμένη διαδικασία υπολογισμού μέσω της εξίσωσης (2.2). Προτεινόμενοι συντελεστές απόσβεσης υπάρχουν στη βιβλιογραφία, και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το υλικό και τον τρόπο κατασκευής αλλά και ανάλογα με το μέγεθος των παραμορφώσεων οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κίνησης της κατασκευής, όπως φαίνεται στον Πιν. 2.1 που δίνει ο Chopra [1].

Αντίστοιχες προτάσεις γίνονται και από τα κανονιστικά κείμενα, όπως για παράδειγμα οι συντελεστές απόσβεσης που προβλέπει ο ΕΑΚ [2] όπως φαίνονται στον Πιν. 2.2. Η κατηγοριοποίηση δεν είναι τόσο λεπτομερής όσο στον Πιν. 2.1, αλλά είναι επαρκής για σκοπούς ανάλυσης στα πλαίσια της μελετητικής πρακτικής. Αντίθετα με τον ΕΑΚ [2], ο EC8 [3] δεν προτείνει συγκεκριμένες τιμές για το συντελεστή ιξώδους απόσβεσης, αλλά αφήνει ελεύθερο το μελετητή να επιλέξει ο ίδιος από τη βιβλιογραφία.

Επίπεδο τάσεων	Τύπος κατασκευής	Συντελεστής ιξώδους απόσβεσης %
Τάσεις λειτουργίας	Χαλύβδινη με συγκολλήσεις, προεντεταμένο σκυρόδεμα, καλά οπλισμένο σκυρόδεμα (μικρές ρωγμές)	2-3
	Οπλισμένο σκυρόδεμα με έντονες ρωγμές	3-5
	Χαλύβδινη κατασκευή με κοχλιώσεις, ξύλινες κατασκευές με ηλώσεις ή κοχλιώσεις	5-7
Ακριβώς πριν τη διαρροή	Χαλύβδινη με συγκολλήσεις, προεντεταμένο σκυρόδεμα (χωρίς πλήρη απώλεια προέντασης)	5-7
	Προεντεταμένο σκυρόδεμα με πλήρη απώλεια προέντασης	7-10
	Οπλισμένο σκυρόδεμα	7-10
	Χαλύβδινη με κοχλιώσεις, ξύλινη με κοχλιώσεις	10-15
	Ξύλινη με ηλώσεις	15-20

Πιν. 2.1: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών απόσβεσης από Chopra [1]

Είδος Κατασκευής		ζ%
Μεταλλική	με συγκολλήσεις	2
	με κοχλιώσεις	4
Σκυρόδεμα	άοπλο	3
	οπλισμένο	5
	προεντεταμένο	4
Τοιχοποιία	οπλισμένη	6
	διαζωματική	5
Ξύλινη	κολλητή	4
	κοχλιωτή	4
	ηλωτή	5

Πιν. 2.2: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών απόσβεσης από ΕΑΚ [2]

Στην περίπτωση πολυβάθμιων κατασκευών, η εξίσωση (2.1) που περιγράφει την κίνηση του μονοβάθμιου ταλαντωτή γίνεται πλέον μητρωική, και παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (2.6), όπου με **M**, **C** και **K** συμβολίζονται τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας της κατασκευής. Το διάνυσμα $\{y\}$ αντιπροσωπεύει τις μετακινήσεις της

κάθε στάθμης σε σχέση με τη βάση της κατασκευής, και το $\{r\}$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα με αριθμό όρων όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας της κατασκευής.

$$\mathbf{M}\{\ddot{y}\} + \mathbf{C}\{\dot{y}\} + \mathbf{K}\{y\} = -\mathbf{M}\{r\}\ddot{x}_g \tag{2.6}$$

Αφού γίνει ο προσδιορισμός των συντελεστών ιξώδους απόσβεσης η δημιουργία του μητρώου απόσβεσης **C** είναι εφικτή με δεδομένα τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας. Όπως περιγράφεται στον Chopra [1], κατά τη θεώρηση Rayleigh του μητρώου απόσβεσης, γίνεται η παραδοχή ότι το μητρώο αυτό αποτελείται από δύο μέρη, ένα ανάλογο με το μητρώο μάζας και ένα ανάλογο με το μητρώο δυσκαμψίας, με συντελεστές αναλογίας a_0 και a_1 αντίστοιχα. Το πρώτο τμήμα του μητρώου απόσβεσης έχει σκοπό να αναπαραστήσει όλους τους μηχανισμούς απόσβεσης που προέρχονται από το περιβάλλον της κατασκευής, π.χ. τριβή με τον αέρα, και το δεύτερο τμήμα αναπαριστά τους εσωτερικούς μηχανισμούς κατανάλωσης ενέργειας, π.χ. άνοιγμα και κλείσιμο ρωγμών.

Για μια κατασκευή η οποία έχει n βαθμούς ελευθερίας, και η οποία έχει μητρώα μάζας και δυσκαμψίας **M** και **K**, διαστάσεων $n \times n$ αμφότερα, πρώτα εκτελείται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.7), όπου με ω_i συμβολίζονται οι ιδιοσυχνότητες κάθε μιας από τις n ιδιομορφές.

$$\left|\mathbf{K} - \mathbf{M}\omega_i^2\right| = 0, i = 1,2...n \tag{2.7}$$

Προκειμένου να κατασκευαστεί το μητρώο απόσβεσης της κατασκευής, επιλέγονται δύο χαρακτηριστικές ιδιομορφές, i και j, επιλέγονται οι τιμές του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης ζ_i και ζ_j της κάθε μιας, και υπολογίζονται οι συντελεστές a_0 και a_1 οι οποίοι συνδέουν την απόσβεση με το μητρώο μάζας και το μητρώο δυσκαμψίας αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.8).

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \tag{2.8}$$

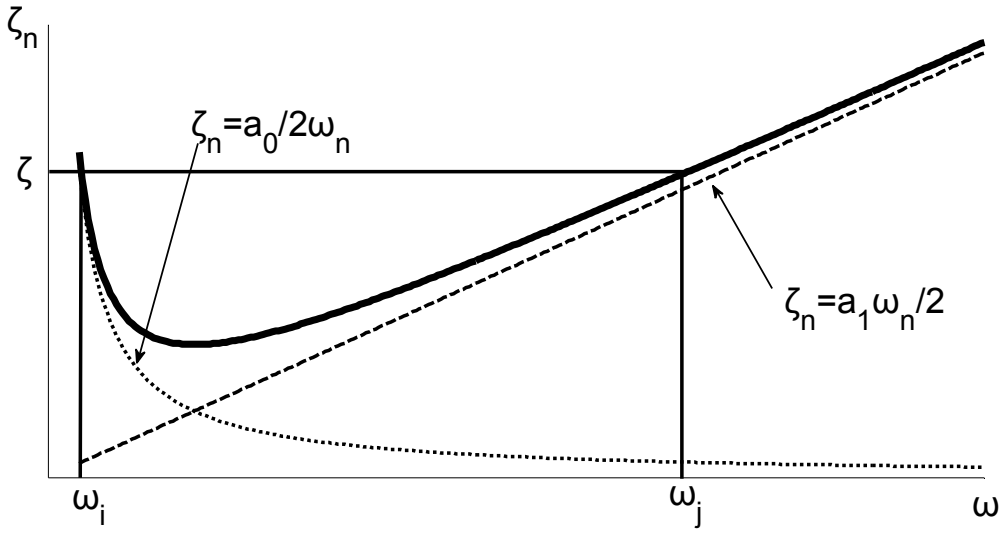
Στην ειδικότερη περίπτωση των κατασκευών οι οποίες έχουν ομοιόμορφή κατανομή απόσβεσης και αποτελούνται από ενιαίο στατικό σύστημα, αυτές δηλαδή που καλύπτονται από τις προβλέψεις των κανονισμών ή της βιβλιογραφίας, ο υπολογισμός των συντελεστών a_0 και a_1 είναι απλούστερη διαδικασία. Έτσι,

επιλέγονται δύο ιδιομορφές, i και j, στις οποίες αποδίδεται απόσβεση ζ ίση με το συντελεστή ιξώδους απόσβεσης που έχει αντιστοιχηθεί στην κατασκευή. Συνήθως, οι ιδιομορφές αυτές είναι είτε η πρώτη και η δεύτερη, είτε η πρώτη και αυτή στην οποία επιτυγχάνεται ποσοστό συμμετοχής των ιδιομορφικών μαζών μεγαλύτερο ή ίσο από 90%. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτός ο υπολογισμός των συντελεστών a_0 και a_1 όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.9), η οποία είναι απλούστευση της (2.8) όταν $\zeta_i = \zeta_j = \zeta$. Με δεδομένες τις τιμές των a_0 και a_1, είναι πλέον δυνατό να βρεθεί η τιμή του συντελεστή απόσβεσης που αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις n ιδιομορφές της κατασκευής, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.10), με το πρώτο κομμάτι του αθροίσματος να προκύπτει από την αναλογική με τη μάζα απόσβεση, και το δεύτερο από την αναλογική με τη δυσκαμψία απόσβεση. Όπως φαίνεται στην Εικ. 2.3, η τελική απόσβεση ζ_n περιβάλλεται ασυμπτωτικά από τις δύο αποσβέσεις, αυτήν που είναι ανάλογη με τη μάζα και αυτήν που είναι ανάλογη με τη δυσκαμψία.

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{2.9}$$

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n \tag{2.10}$$

Με δεδομένους τους συντελεστές a_0 και a_1 και τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός του μητρώου απόσβεσης για την υπό μελέτη κατασκευή όπως περιγράφεται στην εξίσωση (2.11).



Εικ. 2.3: Απόσβεση κατά Rayleigh

$$\mathbf{C} = a_0\mathbf{M} + a_1\mathbf{K} \tag{2.11}$$

Το μητρώο απόσβεσης μιας κατασκευής με αμιγή απόσβεση, όπως προκύπτει από την εξίσωση (2.11), όταν αδιαστατοποιηθεί από τον πίνακα των ιδιοδιανυσμάτων $\mathbf{\Phi}$ που προκύπτουν από την ιδιομορφική ανάλυση, γίνεται διαγώνιο όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.12), οπότε επιτρέπει απρόσκοπτα την ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής, είτε με τη μορφή χρονοϊστοριών είτε με τη μορφή της φασματικής ανάλυσης.

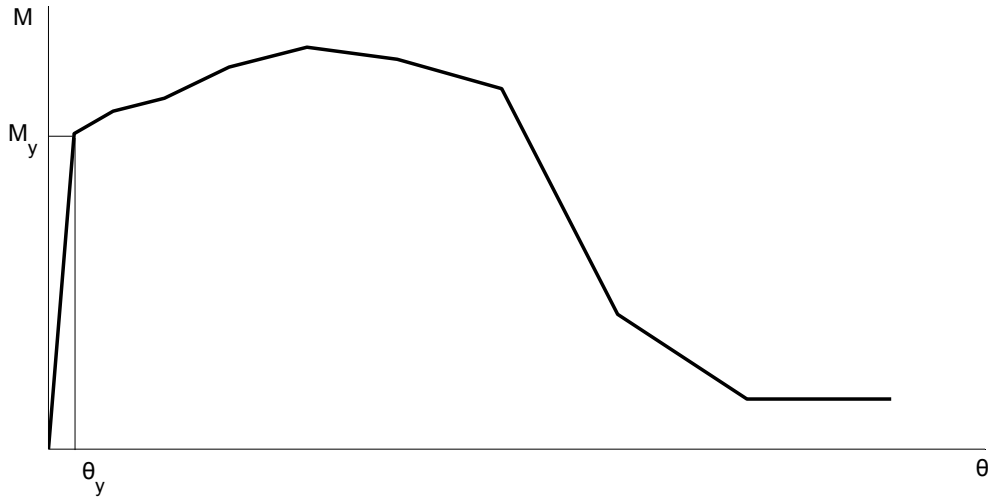
$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{C}\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{x} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Με τον τρόπο αυτό η δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής με ομοιόμορφη κατανομή απόσβεσης είναι πλήρως ορισμένη και είναι δυνατή η επίλυση των εξισώσεων κίνησης και η εξαγωγή των μεγεθών απόκρισης.

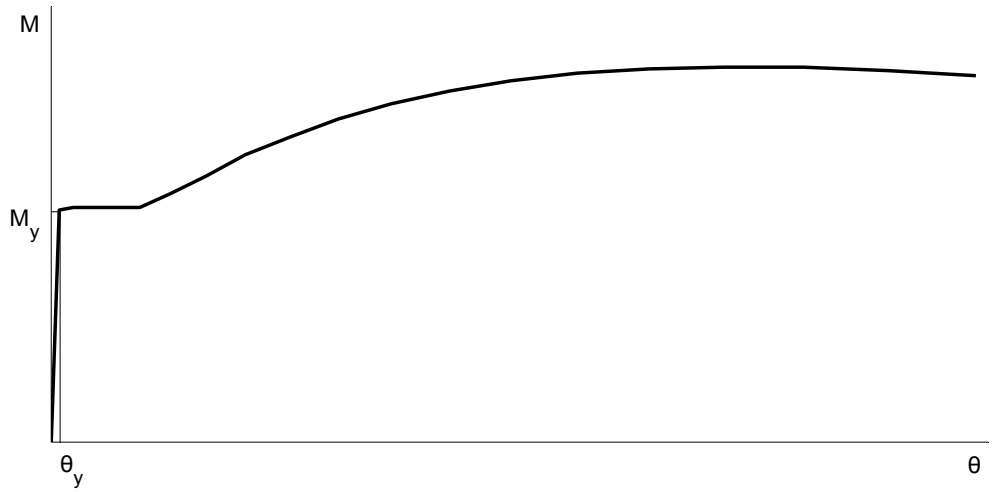
2.3 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά

Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν πεπερασμένη αντοχή, και κατά συνέπεια και τα δομικά μέλη που απαρτίζουν το φέροντα οργανισμό των κατασκευών δε μπορούν να παραμορφώνονται απεριόριστα και από ένα σημείο και μετά διαρρέουν. Αυτή η συμπεριφορά προκύπτει κυρίως από το άνοιγμα ρωγμών στο σκυρόδεμα και από την αναδιάταξη των κρυστάλλων στο χάλυβα. Αυτή η συμπεριφορά, σε επίπεδο διατομής, μεταφράζεται σε μη γραμμικές σχέσεις ροπών-καμπυλοτήτων, M-θ. Λόγω όμως της διαφοράς στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά των δύο υλικών, οπλισμένου σκυροδέματος και χάλυβα, τα διαγράμματα αυτά έχουν διαφορετική μορφή. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες ροπών καμπυλοτήτων, για διατομή οπλισμένου σκυροδέματος στην Εικ. 2.4 και για διατομή δομικού χάλυβα που δε διατρέχει κίνδυνο τοπικού λυγισμού στην Εικ. 2.5. Η συμπεριφορά των διατομών είναι γραμμική και στις δύο περιπτώσεις μέχρι του σημείου (M_y, θ_y), όπου εμφανίζεται η πρώτη πλαστικοποίηση. Πέραν αυτού του σημείου, ο μετελαστικός κλάδος των δύο διατομών είναι διαφορετικός, αφού το

εφελκυόμενο σκυρόδεμα αδυνατεί να παραλάβει οποιοδήποτε φορτίο ενώ ο χάλυβας συνεχίζει να λειτουργεί στην τάση διαρροής του.

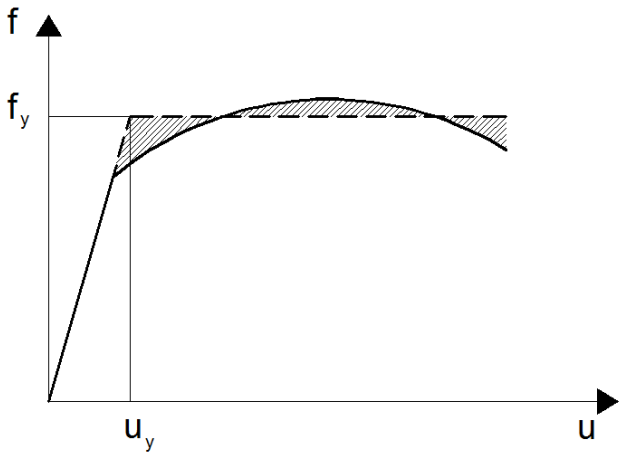


Εικ. 2.4: Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για διατομή οπλισμένου σκυροδέματος



Εικ. 2.5: Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για χαλύβδινη διατομή

Η παραπάνω μη γραμμική συμπεριφορά των διατομών, είτε εξετάζεται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων είτε σε όρους δυνάμεων μετατοπίσεων σε επίπεδο δομικού μέλους, έχει σαν αποτέλεσμα ολόκληρη η κατασκευή να έχει μη γραμμική απόκριση λόγω της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού από το οποίο αποτελείται. Συγκεκριμένα, αν μια κατασκευή φορτιστεί κατά την οριζόντια διεύθυνση, με μια οιονεί σεισμική φόρτιση δηλαδή, και γίνει καταγραφή της μετατόπισης της κορυφής της u και της τέμνουσας στη βάση της f, ένα τυπικό και παράλληλα απλουστευμένο διάγραμμα της συσχέτισης των δύο μεγεθών είναι αυτό που φαίνεται στην Εικ. 2.6 με τη συνεχή γραμμή, ενώ με τη διακεκομμένη παρουσιάζεται η εξιδανικευμένη συμπεριφορά που είναι πιο εξυπηρετική για μελετητικούς σκοπούς.

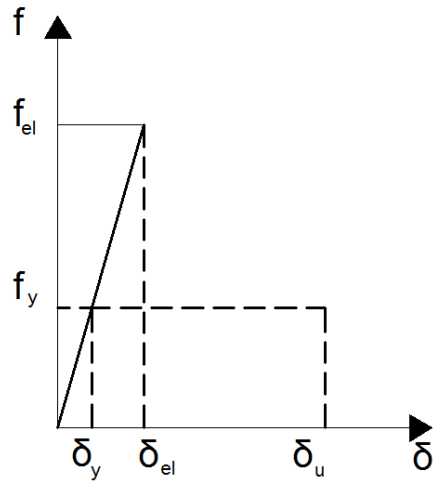


Εικ. 2.6: Πραγματική και εξιδανικευμένη μη γραμμική συμπεριφορά κατασκευής

Σε μια πραγματική σεισμική φόρτιση, η συμπεριφορά της κάθε διατομής, άρα και ολόκληρου του φορέα είναι πολύ διαφορετική. Όταν η φύση της φόρτισης είναι δυναμική, τότε υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες στη συμπεριφορά των δομικών υλικών, όπως ο κανόνας υστέρησης, η απομείωση της αντοχής καθώς αυξάνονται οι κύκλοι φόρτισης, και αυξομειώσεις της δυσκαμψίας λόγω ανοίγματος και κλεισίματος ρωγμών. Όλα αυτά καταλήγουν σε καμπύλες δύναμης-μετατόπισης λόγω ανακυκλικής συμπεριφοράς οι οποίες είναι κατά πολύ διαφορετικές συγκρινόμενες με τις απλές μονοτονικές καμπύλες φόρτισης, τόσο για την κάθε μια μεμονωμένη διατομή, όσο και για ολόκληρη την κατασκευή. Παρ' όλα αυτά, για την περιγραφή της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής χρησιμοποιούνται οι εξιδανικευμένες διγραμμικές καμπύλες γιατί είναι πολύ πιο απλές στη χρήση τους και μπορούν να συνδυαστούν με τη χρήση των φασμάτων απόκρισης.

Οι αντισεισμικοί κανονισμοί επιτρέπουν μια κατασκευή να πραγματοποιήσει μετατοπίσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε μη γραμμική, και συγκεκριμένα ελαστοπλαστική, συμπεριφορά των δομικών τους στοιχείων, όταν η σεισμική διέγερση είναι έντονη. Η μη γραμμική αυτή συμπεριφορά εκδηλώνεται με το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα δομικά μέλη, οι οποίες εμφανίζονται όταν οι διατομές φτάνουν στο σημείο (M_y, θ_y) των Εικ. 2.4 και 2.5. Για πρακτικούς όμως λόγους, η πρόβλεψη της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς γίνεται σε επίπεδο κατασκευής και όχι σε επίπεδο δομικού μέλους, και ακολούθως ο μελετητής καλείται να ικανοποιήσει συγκεκριμένες απαιτήσεις για το κάθε μέλος ξεχωριστά. Η μελέτη της κατασκευής εξακολουθεί να είναι ελαστική, η διέγερση που επιβάλλεται όμως διαιρείται με έναν συντελεστή συμπεριφοράς μεγαλύτερο της μονάδας. Με τον τρόπο

αυτό, προκύπτουν απομειωμένα εντατικά μεγέθη στα δομικά μέλη, σε σύγκριση με την περίπτωση της ελαστικής ανάλυσης με την αρχική διέγερση. Γίνεται δηλαδή αρχικά η υπόθεση ότι η κατασκευή είναι ένα ιδεατό απεριόριστα ελαστικό σύστημα, το οποίο έχει απόκριση αυτήν που φαίνεται στον ανιόντα κλάδο στην Εικ. 2.7, απόκριση που αντιστοιχεί στην πλήρη διέγερση πριν από τη διαίρεση με το συντελεστή συμπεριφοράς.



Εικ. 2.7: Παραδοχή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς από κανονιστικά κείμενα

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά έχει σαν αποτέλεσμα η κατασκευή να μην αναπτύσσει τελικά ένταση ίση με f_{el}, αλλά την μικρότερη f_y, η οποία είναι αποτέλεσμα της μικρότερης διέγερσης, και για την οποία και διαστασιολογείται. Η τελική ένταση συνδέεται με την ελαστική μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς R:

$$R = \frac{f_{el}}{f_y} \tag{2.13}$$

Προφανώς ο συντελεστής συμπεριφοράς έχει στην πραγματικότητα διαφορετική τιμή για την κάθε κατασκευή, αφού εξαρτάται από τη συμπεριφορά όλων των πλαστικών αρθρώσεων που ανοίγουν στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Είναι όμως εφικτή η ομαδοποίηση της συμπεριφοράς των κατασκευών ανάλογα με το υλικό και το δομικό σύστημα, και η τελική υιοθέτηση τιμών του συντελεστή συμπεριφοράς οι οποίες να είναι γενικότερης εφαρμογής. Ο ΕΑΚ [2] έχει προβλέψεις για την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, τον οποίο τον ονομάζει q, ανάλογα με το υλικό και το στατικό σύστημα οι μέγιστες τιμές του οποίου δίνονται στον Πιν. 2.3.

Υλικό	Δομικό σύστημα	q
Οπλισμένο σκυρόδεμα	Πλαίσια ή μικτά συστήματα	3.50
	Τοιχώματα που λειτουργούν σαν πρόβολοι	3.00
	Συστήματα στα οποία τουλάχιστον το 50% της συνολικής μάζας βρίσκεται στο ανώτερο 1/3 του ύψους	2.00
Χάλυβας	Πλαίσια	4.00
	Δικτυωτοί σύνδεσμοι με εκκεντρότητα	4.00
	Δικτυωτοί σύνδεσμοι χωρίς εκκεντρότητα:	
	• Διαγώνιοι σύνδεσμοι	3.00
	• Σύνδεσμοι τύπου V ή L	1.50
	• Σύνδεσμοι τύπου K	1.00
Τοιχοποιία	Με οριζόντια διαζώματα	1.50
	Με οριζόντια και κατακόρυφα διαζώματα	2.00
	Οπλισμένη (κατακόρυφα και οριζόντια)	2.50
Ξύλο	Πρόβολοι	1.00
	Δοκοί – Τόξα – Κολλητά πετάσματα	1.50
	Πλαίσια με κοχλιώσεις	2.00
	Πετάσματα με ηλώσεις	3.00

Πιν. 2.3: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών συμπεριφοράς από ΕΑΚ [2]

Αντίθετα με τον ΕΑΚ [2], ο EC8 [3] δε δίνει πινακοποιημένες τις προτεινόμενες τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q, αλλά ο μελετητής καλείται να κάνει συμπληρωματικούς υπολογισμούς προκειμένου να καταλήξει στην τελική τιμή του. Στους υπολογισμούς αυτούς υπεισέρχεται ο λόγος a_u/a_1, όπου a_1 είναι ο συντελεστής με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η σεισμική δράση ώστε να προκύψει η πρώτη πλαστική άρθρωση, και a_u ο συντελεστής με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η σεισμική δράση ώστε ο φορέας να γίνει μηχανισμός.

Οι κατασκευές πλέον, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις απαιτήσεις πλαστιμότητας, σε κατασκευές με χαμηλή, μέση και υψηλή απαίτηση πλαστιμότητας. Πρακτικά, οι δύο τελευταίες κατηγορίες είναι αυτές στις οποίες εφαρμόζονται οι διατάξεις του EC8 [3] που αφορούν το συντελεστή συμπεριφοράς, αφού για κατασκευή χαμηλών απαιτήσεων πλαστιμότητας, εφόσον πρόκειται για σκυρόδεμα γίνεται παραπομπή στον EC2 [4], ενώ εφόσον πρόκειται για χάλυβα οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς που προκύπτουν είναι πολύ χαμηλές και δε συνιστούν αξιόλογη ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Για κατασκευές από σκυρόδεμα, οι τιμές του βασικού συντελεστή συμπεριφοράς q_0 δίνονται στον Πιν. 2.4. Ο τελικός συντελεστής συμπεριφοράς προκύπτει από την

εξίσωση (2.14) όπου ο συντελεστής k_w εκφράζει την κυρίαρχη μορφή αστοχίας των τοιχωμάτων, διατμητική ή καμπτική, και προκύπτει από το λόγο του μήκους των τοιχωμάτων προ το ύψος τους, ενώ για πλαισιωτά συστήματα είναι ίσος με τη μονάδα.

$$q = q_0 k_w \tag{2.14}$$

Στατικό σύστημα	Μέτρια πλαστιμότητα	Υψηλή πλαστιμότητα
Πλαισιωτό σύστημα, διπλό σύστημα, σύστημα συζευγμένων τοιχωμάτων	$3\,a_u/a_1$	$4.5\,a_u/a_1$
Σύστημα ασύζευκτων τοιχωμάτων	3.0	$4\,a_u/a_1$
Στρεπτικά εύκαμπτο σύστημα	2.0	3.0
Σύστημα ανεστραμμένου εκκρεμούς	1.5	2.0

Πιν. 2.4: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών συμπεριφοράς από τον EC8 [3] για κατασκευές από σκυρόδεμα

Οι τιμές του λόγου a_u/a_1 δίνονται ενδεικτικά για κάθε τύπο κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα σε περίπτωση που ο μελετητής δεν προχωρήσει σε αναλυτικότερη εκτίμησή τους μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης. Τέλος, οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q που προκύπτουν απομειώνονται κατά 20% σε περίπτωση μη κανονικών κτιρίων.

Ο τρόπος που προκύπτει ο συντελεστής συμπεριφοράς για κατασκευές από χάλυβα είναι παρόμοιος. Πάλι, οι κατασκευές χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την πλαστιμότητά τους, και για κάθε κατηγορία και ανάλογα με το στατικό σύστημα δίνονται για κανονικές κατασκευές οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q όπως φαίνεται στον Πιν. 2.5. Πάλι οι τιμές του λόγου a_u/a_1 δίνονται για κάθε τύπο μεταλλικής κατασκευής εφ' όσον δε γίνεται αναλυτικότερη εκτίμησή τους, και σε περιπτώσεις κατασκευών οι οποίες είναι μη κανονικές προβλέπεται μείωση των συντελεστών κατά 20%.

Με τον τρόπο αυτό, τα κανονιστικά κείμενα δίνουν τις ανώτερες επιτρεπόμενες τιμές για τους συντελεστές συμπεριφοράς q, τους οποίους ο μελετητής χρησιμοποιεί για να απομειώσει τις εντάσεις άρα και τις αντοχές των μελών. Και οι δύο κανονισμοί ακολούθως έχουν προβλέψεις για την αποφυγή δημιουργίας μηχανισμών

κατάρρευσης των κατασκευών κατά τις οποίες ο μελετητής κάνει ικανοτικό σχεδιασμό των μελών ώστε οι πλαστικές αρθρώσεις να σχηματιστούν σε επιλεγμένα σημεία.

Στατικός τύπος	Κατηγορία πλαστιμότητας	
	Μέτρια	Υψηλή
Πλαίσια παραλαβής ροπών	4	$5\,a_u/a_1$
Πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα:		
Διαγώνιοι σύνδεσμοι	4	4
Σύνδεσμοι V	2	2.5
Πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους	4	$5\,a_u/a_1$
Ανεστραμμένο εκκρεμές	2	$2\,a_u/a_1$
Συστήματα με πυρήνες από σκυρόδεμα ή τοιχώματα από σκυρόδεμα	Παραπομπή σε ειδική παράγραφο	
Πλαίσιο παραλαβής ροπών με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα	4	$4\,a_u/a_1$
Πλαίσια παραλαβής ροπών με τοιχοπληρώσεις:		
• Ασύνδετες τοιχοπληρώσεις από σκυρόδεμα ή τοιχοποιία σε επαφή με το πλαίσιο	2	2
• Συνδεδεμένες τοιχοπληρώσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα	Παραπομπή σε ειδική παράγραφο	
• Τοιχοπληρώσεις μονωμένες έναντι του πλαισίου	4	$5\,a_u/a_1$

Πιν. 2.5: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών συμπεριφοράς από EC8 [3] για κατασκευές από χάλυβα

2.4 Παραδοχές - συμβολισμοί

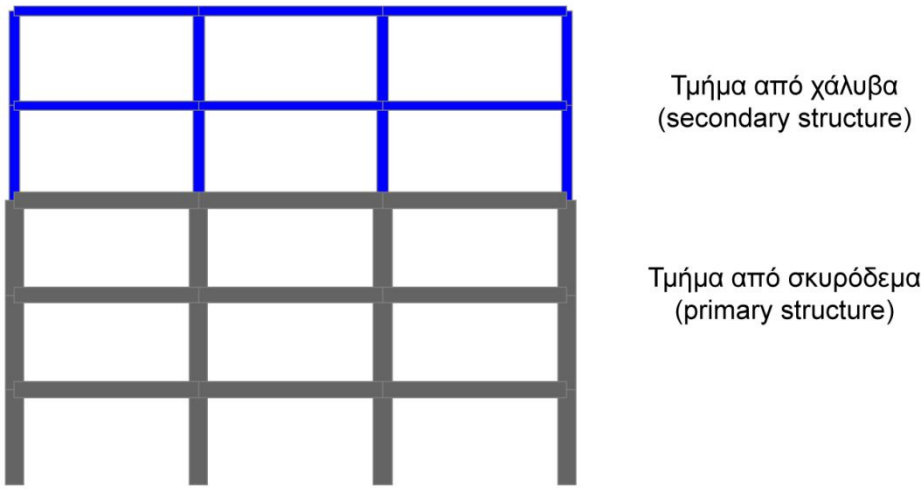
Στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή ότι η κατασκευή από σκυρόδεμα έχει συντελεστή απόσβεσης ίσο με 5% τόσο στις ελαστικές όσο και στις ελαστοπλαστικές αναλύσεις. Μια τέτοια παραδοχή είναι σύμφωνη με τις προβλέψεις του ΕΑΚ [2] για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα όπως φαίνεται από τον Πιν. 2.2, αλλά και με τις συστάσεις που γίνονται στη βιβλιογραφία όπως φαίνεται από τον Πιν. 2.1 για την περίπτωση που οι τάσεις είναι σε επίπεδο λειτουργίας και όχι διαρροής. Η παραδοχή για συντελεστή απόσβεσης ίσο με 5% υιοθετείται και στις ελαστοπλαστικές αναλύσεις παρά τις υψηλότερες προτεινόμενες τιμές. Αυτό γίνεται γιατί σκοπός της παρούσας διατριβής δεν είναι να μελετηθούν και να αξιολογηθούν οι προτεινόμενες τιμές

απόσβεσης αλλά να μελετηθεί το πρόβλημα της μη κανονικής κατανομής της απόσβεσης σε μικτές κατασκευές και οι δυνατότητες ανάλυσης που υπάρχουν.

Αντίστοιχα, για τις κατασκευές από χάλυβα, γίνεται η παραδοχή ότι έχουν συντελεστή απόσβεσης ίσο με 2%. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε κατασκευές οι οποίες έχουν συγκολλήσεις, όπως φαίνεται στους Πιν. 2.1 και 2.2. Πρακτικά στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν οι περισσότερες κατασκευές από χάλυβα, αφού για κατασκευαστικούς και οικονομικούς λόγους οι συνδέσεις γίνονται μερικώς συγκολλητές.

Όσον αφορά την ελαστοπλαστική συμπεριφορά, αυτή θεωρείται ότι έχει διγραμμική μορφή, αντίστοιχη με την εξιδανικευμένη της Εικ. 2.6 και την παραδοχή των κανονισμών της Εικ. 2.7. Κάτι τέτοιο απέχει από την πραγματική απόκριση σε ανακυκλική δυναμική καταπόνηση τόσο σε επίπεδο διατομής όσο και σε επίπεδο κατασκευής, αφού ανάλογα με το υλικό και τη διαμόρφωση των δομικών στοιχείων, τον οπλισμό, την προένταση, το σχήμα διατομής, και τον τρόπο σύνδεσης, η πραγματική απόκριση είναι πολύ διαφορετική. Η διγραμμική όμως συμπεριφορά καταφέρνει σε μακροσκοπικό επίπεδο να αποδώσει αρκετά καλά την αλλαγή στην απόκριση της κατασκευής σε σχέση με την ελαστική περίπτωση, τουλάχιστον για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, δεν απαιτεί ιδιαίτερο υπολογιστικό κόστος, ενώ πιστότερη αναπαράσταση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των μελών ξεφεύγει από το σκοπό της διατριβής αυτής.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται μικτές καθ' ύψος κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα, όπως αυτή της Εικ. 2.8, στην οποία το τμήμα από σκυρόδεμα απεικονίζεται με γκρι, και το τμήμα από χάλυβα με μπλε. Το υπόβαθρο από σκυρόδεμα της κατασκευής ονομάζεται πρωτεύον σύστημα ενώ η υπερκατασκευή από χάλυβα ονομάζεται δευτερεύον σύστημα. Ο λόγος είναι ότι το πρώτο αναλαμβάνει το ρόλο τόσο της στήριξης όσο και της μετάδοσης των σεισμικών δυνάμεων στο δεύτερο. Αντίστοιχα δομικά συστήματα αναφέρονται και στη βιβλιογραφία σαν primary και secondary structures. Ακολουθώντας και στην παρούσα διατριβή την ονοματολογία αυτή, το τμήμα της μικτής κατασκευής από σκυρόδεμα αναφέρεται και ως primary structure, και συμβολίζεται με το γράμμα p, ενώ το τμήμα της κατασκευής που είναι από χάλυβα αναφέρεται και ως secondary structure και συμβολίζεται με το γράμμα s.



Εικ. 2.8: Πολυώροφη πλαισιωτή μικτή κατασκευή από σκυρόδεμα και χάλυβα

2.5 Εφαρμογή των προβλέψεων των κανονισμών σε μικτές κατασκευές

Η επικρατέστερη μέθοδος προσδιορισμού των εντατικών μεγεθών μιας κατασκευής όταν αυτή υπόκειται σε σεισμικές δράσεις είναι η δυναμική φασματική μέθοδος. Η κατασκευή μετατρέπεται σε πλήθος μονοβάθμιων ταλαντωτών, κάθε ένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μια ιδιομορφή της κατασκευής. Το μέγιστο της απόκρισης του κάθε ενός από τους ταλαντωτές, της κάθε ιδιομορφής δηλαδή, προκύπτει από τη φασματική ενίσχυση για την συγκεκριμένη ιδιοπερίοδο του κάθε ενός. Η φασματική ενίσχυση προκύπτει από τα φάσματα σχεδιασμού που δίνουν τα κανονιστικά κείμενα, και η τελική απόκριση της κατασκευής συντίθεται από τις επιμέρους αποκρίσεις των ιδιομορφών της με τη χρήση ενός κανόνα συνδυασμού, συνήθως του SRSS ή του CQC. Τα φάσματα σχεδιασμού κατασκευάζονται με βάση σχέσεις που δίνει ο κάθε κανονισμός, στις οποίες υπεισέρχονται και η απόσβεση μέσω του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης ζ, και η ελαστοπλαστική συμπεριφορά μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς.

Ο ΕΑΚ [2] δεν κάνει διάκριση μεταξύ ελαστικού φάσματος και φάσματος σχεδιασμού, αλλά δίνει σχέσεις υπολογισμού της φασματικής ενίσχυσης Φ_d από ελαστοπλαστικά φάσματα οριζόντιας εδαφικής κίνησης, στα οποία υπεισέρχεται και ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης και ο συντελεστής συμπεριφοράς όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.15). Η φασματική ενίσχυση ποικίλει ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους, η

οποία καθορίζει τις χαρακτηριστικές περιόδους T_1 και T_2, καθώς και τη μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση A. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και μια σειρά από άλλες παραμέτρους όπως ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου γ_1, ο συντελεστής επιρροής της θεμελίωσης και ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης $\beta_0 = 2.5$. Ο συντελεστής συμπεριφοράς q του Πιν. 2.3 υπεισέρχεται απ' ευθείας στην εξίσωση (2.15), ενώ ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης ζ του Πιν. 2.1, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή η, όπως στην εξίσωση (2.16).

$$\Phi_d(T) = \begin{cases} \gamma_1 A\left[1+\dfrac{T}{T_1}\left(\dfrac{\eta\theta\beta_0}{q}-1\right)\right], & 0 \le T < T_1 \\ \gamma_1 A\dfrac{\eta\theta\beta_0}{q}, & T_1 \le T \le T_2 \\ \gamma_1 A\dfrac{\eta\theta\beta_0}{q}\left(\dfrac{T_2}{T}\right)^{2/3}, & T_2 < T \end{cases} \tag{2.15}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} \tag{2.16}$$

Αντίθετα με τον ΕΑΚ [2], ο EC8 [3] κάνει διάκριση μεταξύ ελαστικού φάσματος και φάσματος σχεδιασμού στο οποίο υπεισέρχεται και ο συντελεστής συμπεριφοράς. Συγκεκριμένα, το ελαστικό φάσμα για οριζόντια σεισμική διέγερση δίνεται από την εξίσωση (2.17), με τις ιδιοπεριόδους T_B, T_C και T_D καθώς και το συντελεστή εδάφους S να εξαρτώνται από την κατηγορία εδάφους. Η εδαφική επιτάχυνση a_g είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε βραχώδη σχηματισμό, και ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης δίνεται από την εξίσωση (2.18).

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S\left[1+\dfrac{T}{T_B}(2.5\eta-1)\right], & 0 \le T < T_B \\ 2.5 a_g S\eta, & T_B \le T \le T_C \\ 2.5 a_g S\eta\dfrac{T_C}{T}, & T_C \le T \le T_D \\ 2.5 a_g S\eta\dfrac{T_C T_D}{T^2}, & T_C \le T \le 4s \end{cases} \tag{2.17}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\zeta}} \geq 0.55 \tag{2.18}$$

Στο φάσμα σχεδιασμού του EC8 [3] γίνεται η παραδοχή ότι η κατασκευή μπορεί να έχει ελαστοπλαστική συμπεριφορά προκειμένου να αναγκαστεί να παραλάβει δυνάμεις μικρότερες από αυτές που αντιστοιχούν στη γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς q των Πιν. 2.4 και 2.5, και η φασματική ενίσχυση S_d προκύπτει όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.19)

$$S_d(T) = \begin{cases} a_g S\left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B}\left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3}\right)\right], & 0 \leq T \leq T_B \\ \frac{2.5 a_g S}{q}, & T_B \leq T \leq T_C \\ \begin{cases} \frac{2.5 a_g S}{q}\frac{T_C}{T}, \\ \geq 0.2 a_g \end{cases} & T_C \leq T \leq T_D \\ \begin{cases} \frac{2.5 a_g S}{q}\frac{T_C T_D}{T^2}, \\ \geq 0.2 a_g \end{cases} & T_D \leq T \end{cases} \tag{2.19}$$

Τα κανονιστικά κείμενα, όπως ο ΕΑΚ [2] και ο EC8 [3], προτείνουν διαφορετικές τιμές για την απόσβεση και το συντελεστή συμπεριφοράς των δύο υλικών που απαρτίζουν τις μικτές καθ' ύψος κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα όπως φαίνεται και στους Πιν. 2.2 ως 2.5. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μια δυσχέρεια στη δημιουργία του φάσματος σχεδιασμού, αφού στις κανονιστικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της φασματικής ενίσχυσης, η οποία δίνει το μέγιστο της απόκρισης της κάθε ιδιομορφής, υπεισέρχονται ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης και ο συντελεστής συμπεριφοράς. Για παράδειγμα, για την πολυώροφη πλαισιωτή κατασκευή της Εικ. 2.8, ο μελετητής βρίσκεται σε δίλημμα ως προς τις τιμές των παραμέτρων που θα επιλέξει κατά τη δημιουργία του φάσματος σχεδιασμού με δεδομένες τις διαφορετικές προβλέψεις για τα δύο υλικά.

Για την απόσβεση συγκεκριμένα, ο ΕΑΚ αναφέρει ότι σε περίπτωση που μια κατασκευή δεν αποτελείται από ένα μόνο υλικό, οπότε επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής απόσβεσης ζ για όλες τις ιδιομορφές, τότε θα

πρέπει να γίνει χρήση της μεθόδου ενέργειας των ιδιομορφικών παραμορφώσεων (modal strain energy method), προκειμένου να υπολογιστεί ένας συντελεστής απόσβεσης για κάθε ιδιομορφή, όπως στην ακόλουθη εξίσωση:

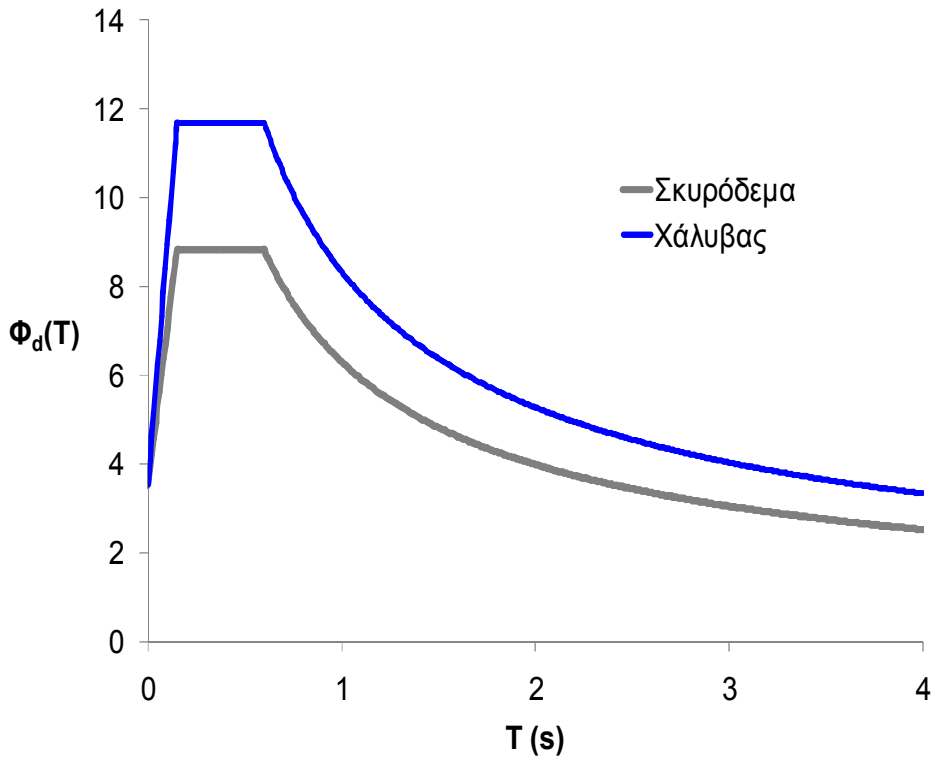
$$\zeta = \frac{1}{E}\sum_i \zeta_i E_i \tag{2.20}$$

όπου ζ είναι το ποσοστό απόσβεσης της υπό μελέτη ιδιομορφής, ζ_i το ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης του υλικού i, E_i το μέρος της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στο υλικό i κατά τη θεωρούμενη ιδιομορφή, και E η συνολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης της κατασκευής κατά τη θεωρούμενη ιδιομορφή, η οποία δίνεται από την εξίσωση (2.21). Η διάταξη όμως αυτή για την ανάλυση των μικτών κατασκευών δεν προσφέρεται για χρήση σε συνήθεις κατασκευές καθώς προϋποθέτει περίπλοκους υπολογισμούς οι οποίοι είναι πρακτικά αδύνατον να εκτελεστούν σε μια μελέτη.

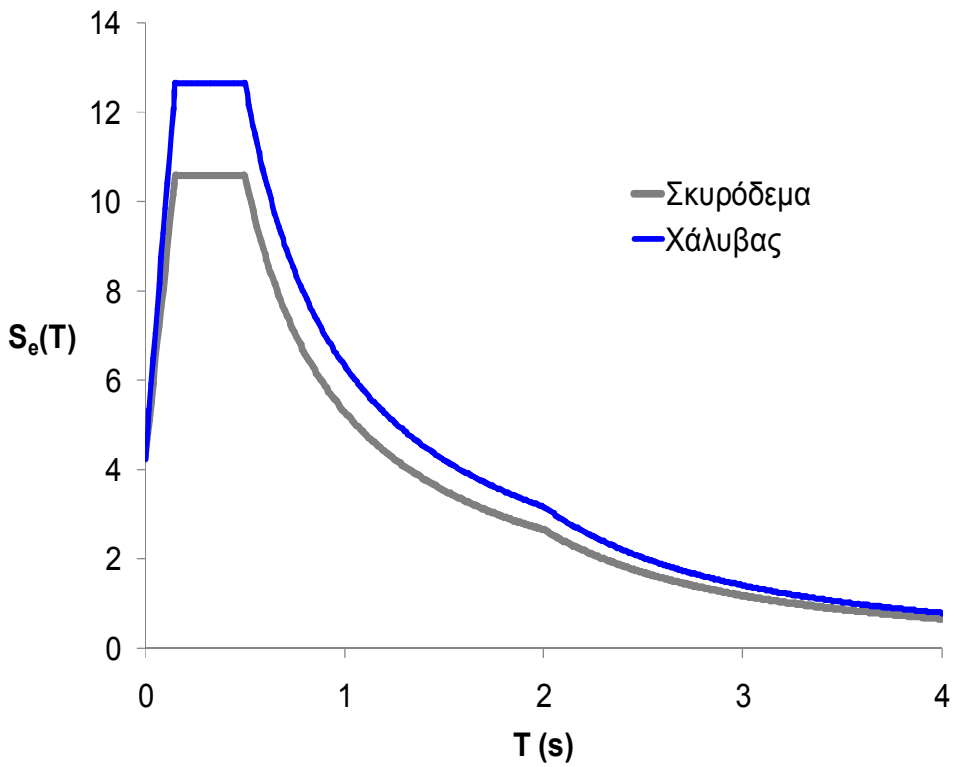
$$E = \sum_i E_i \tag{2.21}$$

Οι διαφορές στη φασματική ενίσχυση, Φ_d για τον ΕΑΚ [2] και S_e ή S_d για τον EC8 [3], που προκύπτουν στις τιμές των φασμάτων ενδέχεται να είναι αρκετά μεγάλες, ανάλογα βέβαια και με τις τιμές που υιοθετούνται. Έτσι, αν για παράδειγμα υποτεθεί ότι η κατασκευή είναι ελαστική και η απόσβεση για το σκυρόδεμα είναι $\zeta = 5\%$ και για το χάλυβα $\zeta = 2\%$, και κατασκευαστούν τα ελαστικά φάσματα υποθέτοντας ότι η κατασκευή αποτελείται από ένα και μόνο υλικό, τότε όπως φαίνεται στη σύγκριση των ελαστικών φασμάτων που προκύπτουν, στην Εικ. 2.9 για τον ΕΑΚ [2] και στην Εικ. 2.10 για τον EC8 [3], η διαφορά στην φασματική ενίσχυση είναι σημαντική, ιδίως στην περιοχή του πλατώ του φάσματος. Αν υποτεθεί ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά, τότε πάλι ενδέχεται η διαφορά στις προβλέψεις των φασμάτων σχεδιασμού, ανάλογα με τον συντελεστή συμπεριφοράς να είναι μεγάλες. Για την ίδια κατασκευή, κατασκευάζονται τα φάσματα σχεδιασμού του ΕΑΚ [2], λαμβάνοντας $\zeta = 5\%$ και $q = 3.5$ για το σκυρόδεμα και $\zeta = 2\%$ και $q = 4$ για το χάλυβα, και γίνεται η σύγκρισή τους στην Εικ. 2.11. Αντίστοιχα, για τον EC8 [3], ο οποίος στο ελαστοπλαστικό φάσμα αγνοεί την απόσβεση, λαμβάνεται για το σκυρόδεμα $q = 3.9$, με το λόγο a_u/a_1 να παίρνει την τιμή 1.3, και κατασκευάζεται το φάσμα σχεδιασμού,

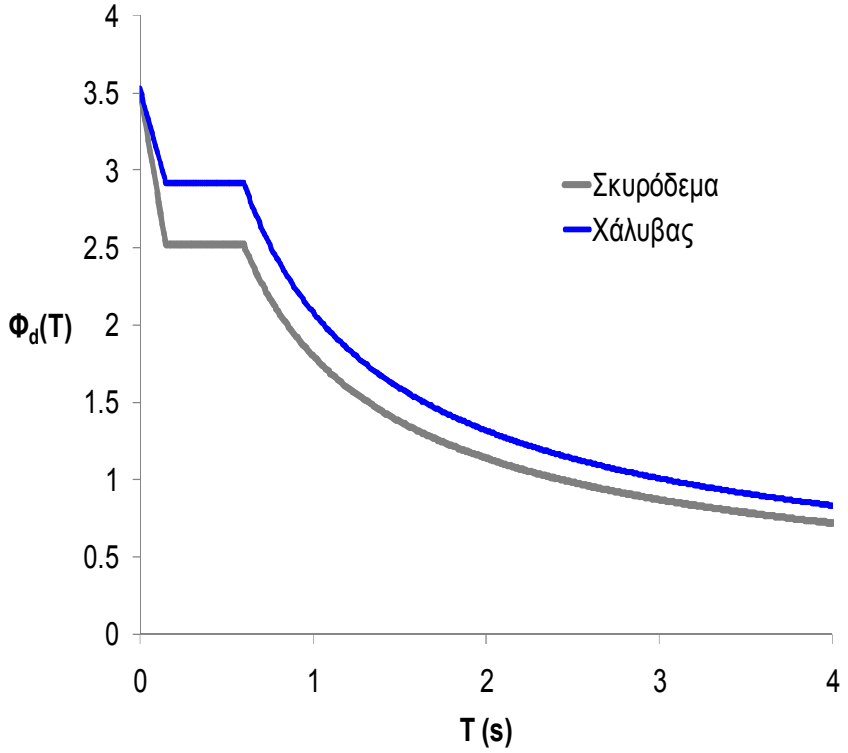
και για το χάλυβα λαμβάνεται $q = 4$ και κατασκευάζεται το αντίστοιχο φάσμα, και συγκρίνονται μεταξύ τους στην Εικ. 2.12.



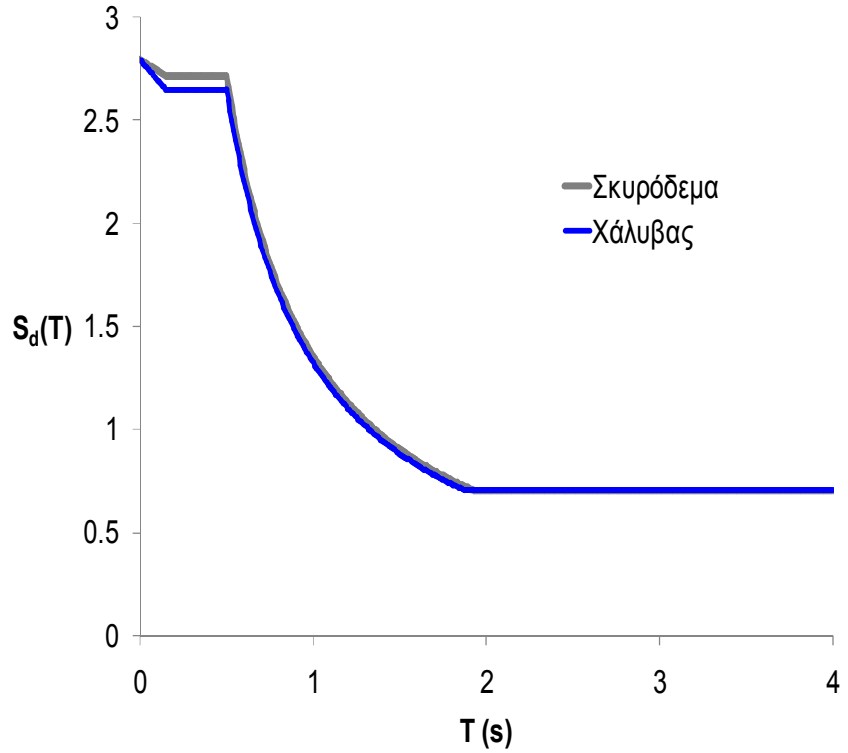
Εικ. 2.9: Σύγκριση ελαστικών φασμάτων κατά ΕΑΚ



Εικ. 2.10: Σύγκριση ελαστικών φασμάτων κατά EC8



Εικ. 2.11: Σύγκριση φασμάτων σχεδιασμού κατά ΕΑΚ



Εικ. 2.12: Σύγκριση φασμάτων σχεδιασμού κατά EC8

Οι διαφορές στην πρόβλεψη της φασματικής ενίσχυσης είναι λιγότερο έντονες στην περίπτωση των ελαστοπλαστικών φασμάτων λόγω του ότι για το συγκεκριμένο φορέα οι συντελεστές συμπεριφοράς για κατασκευή από σκυρόδεμα και χάλυβα είναι πολύ κοντά. Εν γένει όμως, αυτό δε συμβαίνει πάντα και ενδέχεται να προκύψουν σημαντικές διαφορές και στα ελαστοπλαστικά φάσματα, ανάλογα αν ο μελετητής αποφασίσει να θεωρήσει ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται ως αμιγώς χαλύβδινη ή ως αμιγώς από σκυρόδεμα.

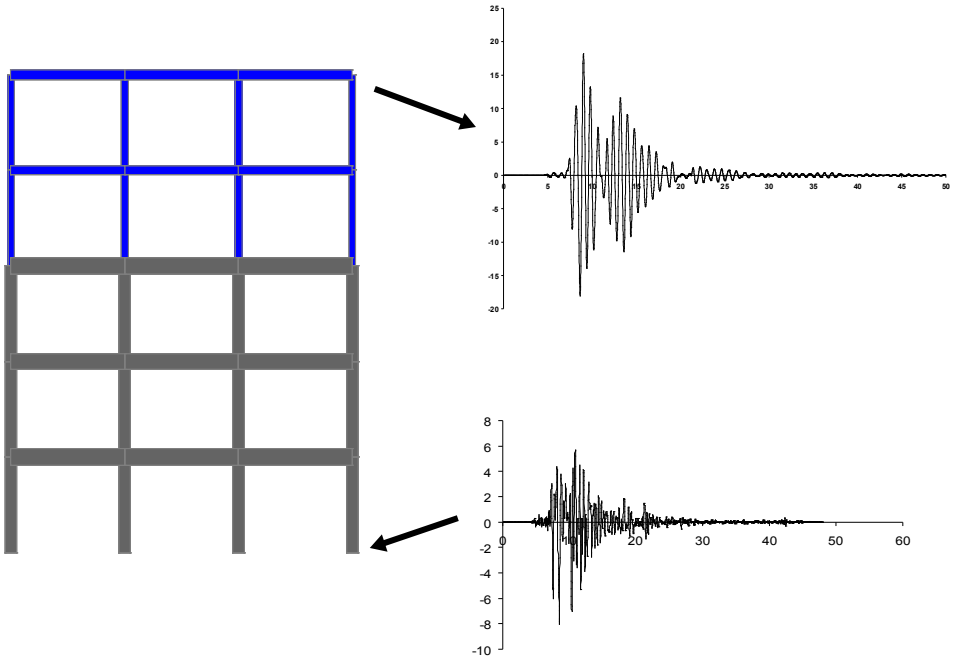
Η έλλειψη διατάξεων στους κανονισμούς που να αφορούν την απόσβεση και το συντελεστή συμπεριφοράς για τις μικτές καθ' ύψος κατασκευές σκυροδέματος – χάλυβα, και η μεγάλη διαφορά που ενδέχεται να προκύψει στα εντατικά μεγέθη από την υιοθέτηση της μιας συμπεριφοράς έναντι της άλλης, αντιμετωπίζεται συνήθως από τους μελετητές με την υιοθέτηση των συντηρητικότερων τιμών, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό σε υπερεκτίμηση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής και σε αντιοικονομικό σχεδιασμό.

2.6 Δυνατότητες ανάλυσης και προβλήματα στις μικτές κατασκευές

Οι δυνατότητες ανάλυσης των μικτών καθ' ύψος κατασκευών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, τις συζευγμένες και τις αποσυζευγμένες. Στα πλαίσια κάθε μιας από τις κατηγορίες αυτές μπορεί να εφαρμοστούν όλες οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης των κατασκευών, δηλαδή η απ' ευθείας χρονική ολοκλήρωση του συνόλου της κατασκευής, η διάσπασή της σε ιδιομορφές και η χρονική ολοκλήρωση κάθε μιας από αυτές και τέλος η φασματική ανάλυση η οποία είναι αυτή που κυρίως χρησιμοποιείται σε συνήθεις συνθήκες μελέτης κατασκευών από μια μελετητική ομάδα. Λόγω όμως της ανομοιομορφίας που έχουν αυτές οι κατασκευές στην κατανομή της απόσβεσής τους και στην ελαστοπλαστική τους συμπεριφορά, κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους ανάλυσης, είτε συζευγμένη είτε αποσυζευγμένη, καταλήγει σε εσφαλμένη εκτίμηση της απόκρισης ή σε υπερβολικά σύνθετες διαδικασίες ανάλυσης σε βαθμό που να είναι αποτρεπτικός για την εφαρμογή του σε μελέτες συνήθων μικτών κατασκευών.

2.6.1 Συζευγμένη ανάλυση

Η συζευγμένη ανάλυση είναι η πλέον διαδεδομένη διαδικασία δυναμικής ανάλυσης των κατασκευών. Περιλαμβάνει την ανάλυση ολόκληρης της κατασκευής, ανεξάρτητα από τη ομοιομορφία της ή την ανομοιογένειά της ως προς έναν ή περισσότερους παράγοντες. Ειδικότερα, στην περίπτωση του πολυώροφου μικτού πλαισίου της Εικ. 2.13, όπου με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι στάθμες από σκυρόδεμα και με μπλε χρώμα οι στάθμες από χάλυβα, η εδαφική διέγερση εισάγεται στη βάση της κατασκευής, ακολουθεί η ανάλυσή της και λαμβάνεται η απόκρισή της σε κάθε στάθμη. Η διαδικασία αυτή είναι η πλέον συνηθισμένη και αντιστοιχεί και στις πραγματικές συνθήκες δυναμικής φόρτισης μιας κατασκευής από σεισμικά φορτία.



Εικ. 2.13: Συζευγμένη ανάλυση μικτής κατασκευής

Σε περίπτωση που η συζευγμένη ανάλυση της κατασκευής γίνει με απ' ευθείας ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης, προσέγγιση που δίνει τα πλέον ορθά μεγέθη απόκρισης, τότε η δυσκολία είναι να δημιουργηθεί ένα μητρώο απόσβεσης το οποίο να λαμβάνει υπόψη του την ανομοιογένεια της κατασκευής. Ως προς την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της μικτής κατασκευής δεν υπάρχει πρόβλημα, αφού ούτως ή άλλως πρέπει ο μελετητής να αποδώσει σε κάθε μέλος ξεχωριστά μη γραμμική συμπεριφορά, οπότε υπεισέρχονται οι ιδιότητες του υλικού στην πλαστική άρθρωση ή στις ίνες της κάθε διατομής.

Η διαδικασία δημιουργίας του μητρώου απόσβεσης, ενώ για κατασκευές με αμιγή απόσβεση είναι αρκετά απλή, για την περίπτωση των μικτών κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα πρέπει να τροποποιηθεί, ώστε να ληφθούν υπόψη και οι δύο παρόντες συντελεστές ιξώδους απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, το μητρώο απόσβεσης μιας κατασκευής του τύπου της Εικ. 2.8, n βαθμών ελευθερίας και με ανομοιογενή κατανομή απόσβεσης, όπως περιγράφεται από τους Chopra [1] και Clough and Penzien [5] συντίθεται από τα υπομητρώα απόσβεσης των δύο τμημάτων που την αποτελούν. Προκειμένου να γίνει αυτό, η κατασκευή χωρίζεται σε δύο τμήματα, ένα εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα και ένα εξ ολοκλήρου από χάλυβα. Το κάθε τμήμα αποτυπώνεται στο συνολικό μητρώο μάζας και δυσκαμψίας όπως ενδεικτικά φαίνεται στην εξίσωση (2.22), όπου με $\mathbf{X}$ συμβολίζεται το τμήμα του κάθε μητρώου που αντιστοιχεί στους κοινούς βαθμούς ελευθερίας των δύο τμημάτων.

$$\mathbf{K} = \left[\begin{array}{c|c|c} \mathbf{K}_{\text{conc}} & & \\ \hline & \mathbf{X}_{\text{stiff}} & \\ \hline & & \mathbf{K}_{\text{steel}} \end{array}\right], \quad \mathbf{M} = \left[\begin{array}{c|c|c} \mathbf{M}_{\text{conc}} & & \\ \hline & \mathbf{X}_{\text{mass}} & \\ \hline & & \mathbf{M}_{\text{steel}} \end{array}\right] \tag{2.22}$$

Τα παραπάνω μητρώα χωρίζονται σε δύο υπομητρώα έκαστο, το κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί στο αντίστοιχο τμήμα. Και τα δύο υπομητρώα έχουν διαστάσεις ίδιες με αυτές του αρχικού, και περιέχουν στοιχεία διάφορα του μηδενός μόνο στους βαθμούς ελευθερίας του αντίστοιχου τμήματος της κατασκευής, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες θέσεις έχουν μηδενικά, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (2.23) και (2.24). Τέλος, στις θέσεις των αρχικών μητρώων με τα στοιχεία $\mathbf{X}$, τώρα υπάρχουν $\mathbf{X}_{\text{conc}}$ και $\mathbf{X}_{\text{steel}}$, με τα οποία απεικονίζεται η συμβολή του κάθε τμήματος της κατασκευής στα μεγέθη των κοινών βαθμών ελευθερίας. Το άθροισμα των δύο υπομητρώων, είτε μάζας είτε δυσκαμψίας, δίνει το αντίστοιχο συνολικό μητρώο, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.25).

$$\mathbf{M}^{\text{p}} = \left[\begin{array}{c|c|c} \mathbf{M}_{\text{conc}} & & \\ \hline & \mathbf{X}_{\text{mass}}^{\text{conc}} & \\ \hline & & \mathbf{0} \end{array}\right], \quad \mathbf{M}^{\text{s}} = \left[\begin{array}{c|c|c} \mathbf{0} & & \\ \hline & \mathbf{X}_{\text{mass}}^{\text{steel}} & \\ \hline & & \mathbf{M}_{\text{steel}} \end{array}\right] \tag{2.23}$$

$$\mathbf{K}^{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{conc} & & \\ & \mathbf{X}_{stiff}^{conc} & \\ & & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^{s} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{X}_{stiff}^{steel} & \\ & & \mathbf{K}_{steel} \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

$$\mathbf{K}^{p} + \mathbf{K}^{s} = \mathbf{K}, \quad \mathbf{M}^{p} + \mathbf{M}^{s} = \mathbf{M} \tag{2.25}$$

Μέσω μιας κλασσικής ιδιομορφικής ανάλυσης, όπως αυτή που περιγράφεται στην εξίσωση (2.7), προκύπτουν οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, και εκλέγονται πάλι οι δύο χαρακτηριστικές ιδιομορφές i και j, με τα κριτήρια που περιγράφονται παραπάνω. Για κάθε ξεχωριστό τμήμα της κατασκευής υπολογίζονται οι επιμέρους συντελεστές Rayleigh χρησιμοποιώντας τις ιδιοσυχνότητες ω_i και ω_j της συνολικής κατασκευής και το συντελεστή ιξώδους απόσβεσης του συγκεκριμένου τμήματος, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.26).

$$\begin{Bmatrix} a_{0,k} \\ a_{1,k} \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta_k}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix}, k = s,p \tag{2.26}$$

Με τρόπο αντίστοιχο με τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, και το συνολικό μητρώο απόσβεσης **C** της κατασκευής χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά μητρώα, κάθε ένα από τα οποία είναι διαστάσεων $n \times n$. Τα δύο αυτά υπομητρώα, $\mathbf{C}^{p}$ και $\mathbf{C}^{s}$, όπως και τα προηγούμενα υπομητρώα έχουν και αυτά αντίστοιχη μορφή όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.27), αποτυπώνει δηλαδή το κάθε ένα τη συμβολή του τμήματος του σκυροδέματος ή του χάλυβα στο συνολικό μητρώο απόσβεσης της κατασκευής.

$$\mathbf{C}^{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{conc} & & \\ & \mathbf{X}_{damp}^{conc} & \\ & & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^{s} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{X}_{damp}^{steel} & \\ & & \mathbf{C}_{steel} \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

Τα υπομητρώα απόσβεσης, προκύπτουν πάλι αναλογικά, όπως το μητρώο απόσβεσης μιας τυπικής κατασκευής. Πολλαπλασιάζονται δηλαδή οι συντελεστές Rayleigh της εξίσωσης (2.26) με τα υπομητρώα μάζας και δυσκαμψίας των εξισώσεων (2.23) και (2.24) όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{C}^{p} = a_{0,p}\mathbf{M}^{p} + a_{1,p}\mathbf{K}^{p}, \mathbf{C}^{s} = a_{0,s}\mathbf{M}^{s} + a_{1,s}\mathbf{K}^{s} \tag{2.28}$$

Εν τέλει, το τελικό μητρώο απόσβεσης προκύπτει από το άθροισμα των δύο υπομητρώων:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}^{p} + \mathbf{C}^{s} \tag{2.29}$$

Το πρόβλημα είναι ότι η διαδικασία της δημιουργίας του σύνθετου μητρώου απόσβεσης δεν υποστηρίζεται από τα εμπορικά πακέτα λογισμικού και κατά συνέπεια δεν είναι δυνατή η εκτέλεση αναλύσεων χρονοϊστορίας μικτών κατασκευών. Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω πρακτικά μπορεί να εφαρμοστεί μόνο με προγραμματισμό της σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού, οπότε και περιορίζεται σε ερευνητικούς σκοπούς μόνο.

Πέρα από τη διαδικασία της απ' ευθείας χρονικής ολοκλήρωσης των μικτών κατασκευών μπορεί να εκτελεστούν μια σειρά από ιδιομορφικές αναλύσεις χρονοϊστορίας προκειμένου να εξαχθεί η απόκριση της κατασκευής όταν υπόκειται σε σεισμική διέγερση. Σε μια κατασκευή με ενιαία απόσβεση, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (2.12) οι ιδιομορφές που προκύπτουν από την κλασσική ιδιομορφική ανάλυση καταλήγουν σε διαγώνιο κανονικοποιημένο μητρώο απόσβεσης. Δεδομένου ότι τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας γίνονται διαγώνια με την κανονικοποίηση από τα ιδιοδιανύσματα, η εξίσωση κίνησης μιας κατασκευής n βαθμών ελευθερίας μετατρέπεται σε n ασύζευκτες εξισώσεις κίνησης μονοβάθμιων ταλαντωτών, οι οποίες είναι εύκολο να επιλυθούν.

Αντίθετα, στις κατασκευές με μικτή απόσβεση, το μητρώο απόσβεσης που δημιουργείται με την ακολουθία των εξισώσεων (2.22) ως (2.29), δεν γίνεται διαγώνιο όταν αδιαστατοποιηθεί με τα ιδιοδιανύσματα που προκύπτουν από μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση όπως περιγράφεται από την εξίσωση (2.7), στην οποία υπεισέρχονται μόνο τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ιδιομορφικές εξισώσεις κίνησης να είναι συζευγμένες και τα αποτελέσματα της ανάλυσης με βάση αυτές να είναι εσφαλμένα.

Προκειμένου να προκύψουν διαγώνια κανονικοποιημένα μητρώα μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης για μια μικτή καθ' ύψος κατασκευή, η ιδιομορφική ανάλυση πρέπει να γίνει με μιγαδικούς όρους, και όχι με τον κλασσικό τρόπο. Η διαδικασία αυτή όταν εφαρμόζεται για μια κατασκευή n βαθμών ελευθερίας καταλήγει σε $2\times n$ μιγαδικές ιδιομορφές, οι οποίες είναι ανά δύο συζυγείς μεταξύ τους. Ο πίνακας των μιγαδικών πλέον ιδιοδιανυσμάτων όντως κάνει τα μητρώα διαγώνια όταν κανονικοποιηθούν, τα ακόλουθα όμως βήματα της ανάλυσης εξακολουθούν να είναι σε μιγαδική μορφή.

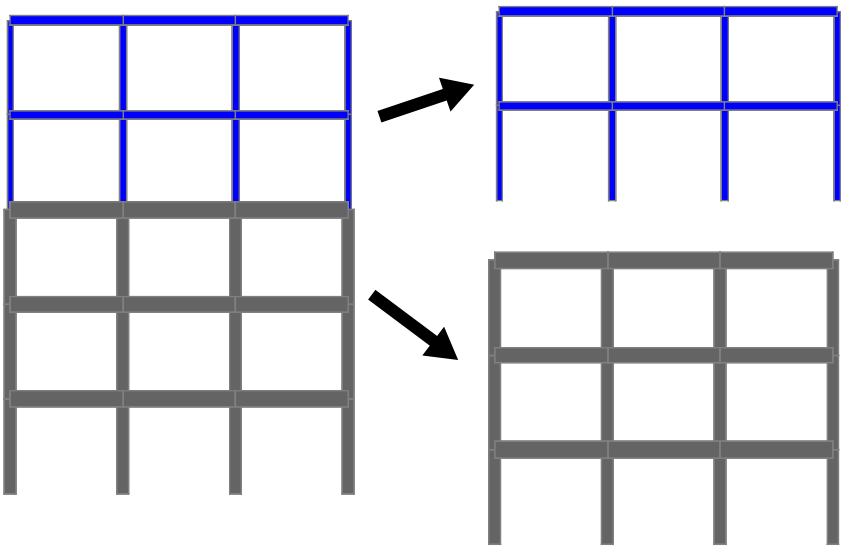
Η διαδικασία της ανάλυσης μιας κατασκευής με μιγαδικές ιδιομορφές δεν καλύπτεται από εμπορικά πακέτα λογισμικού, ούτε και είναι τετριμμένη διαδικασία ο προγραμματισμός της. Παράλληλα, η μελετητική πρακτική μέχρι σήμερα δεν έχει ενσωματώσει την μιγαδική ανάλυση των κατασκευών πολιτικού μηχανικού, και μια τέτοια προοπτική αποθαρρύνει τις μελετητικές ομάδες από το να αναλύσουν με τέτοιο τρόπο τις μικτές κατασκευές.

Τέλος, η πλέον διαδεδομένη μέθοδος ανάλυσης είναι η φασματική ανάλυση της συζευγμένης μικτής κατασκευής. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την αντιστοίχιση της απόκρισης της πλήρους κατασκευής σε άθροισμα των αποκρίσεων των ιδιομορφών της, μέσω της διαδικασίας της κλασσικής ιδιομορφικής ανάλυσης της εξίσωσης (2.7), και ακολούθως υπολογισμό του μεγίστου της απόκρισης μέσω των φασμάτων σχεδιασμού, τα οποία υπολογίζονται για συγκεκριμένες τιμές συντελεστή απόσβεσης και συμπεριφοράς. Όπως όμως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ιδιομορφές που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο δεν διαγωνιοποιούν τα μητρώα της κατασκευής, άρα η όλη διαδικασία εμπεριέχει σφάλμα. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από τις Εικ. 2.9 ως 2.12, ανάλογα με τις παραδοχές για την απόσβεση και την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της κατασκευής τα κανονιστικά, αλλά και τα σεισμικά, φάσματα μεταβάλλονται, οπότε τίθεται το ζήτημα της επιλογής του φάσματος σχεδιασμού με το οποίο θα γίνει η ανάλυση της κατασκευής.

2.6.2 Αποσυζευγμένη ανάλυση

Εναλλακτικά προς την συζευγμένη προσέγγιση της ανάλυσης των μικτών καθ' ύψος κατασκευών, η ανάλυσή τους μπορεί να γίνει με την αποσύζευξή τους. Συγκεκριμένα, η κατασκευή χωρίζεται σε δύο τμήματα αμιγή, το κάθε ένα, ως προς το υλικό. Στη γενικότερη περίπτωση, προκύπτουν δύο νέες πολυβάθμιες κατασκευές, μία από σκυρόδεμα και μία από χάλυβα, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.14. Η ανάλυση γίνεται σε αυτές τις δύο κατασκευές και όχι στην αρχική. Το υπολογιστικό κόστος είναι μάλλον μεγαλύτερο, παρ' όλα αυτά είναι μια διαδικασία που πολλές φορές προτιμάται από μελετητική άποψη. Ο λόγος είναι ότι πλέον δεν υπάρχει ανάγκη για προσδιορισμό της απόσβεσης και του συντελεστή συμπεριφοράς μια μικτής κατασκευής, της οποίας κάθε τμήμα συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο. Αντ' αυτού, αναλύονται δύο μικρότερες κατασκευές, εξ' ου και το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, οι οποίες

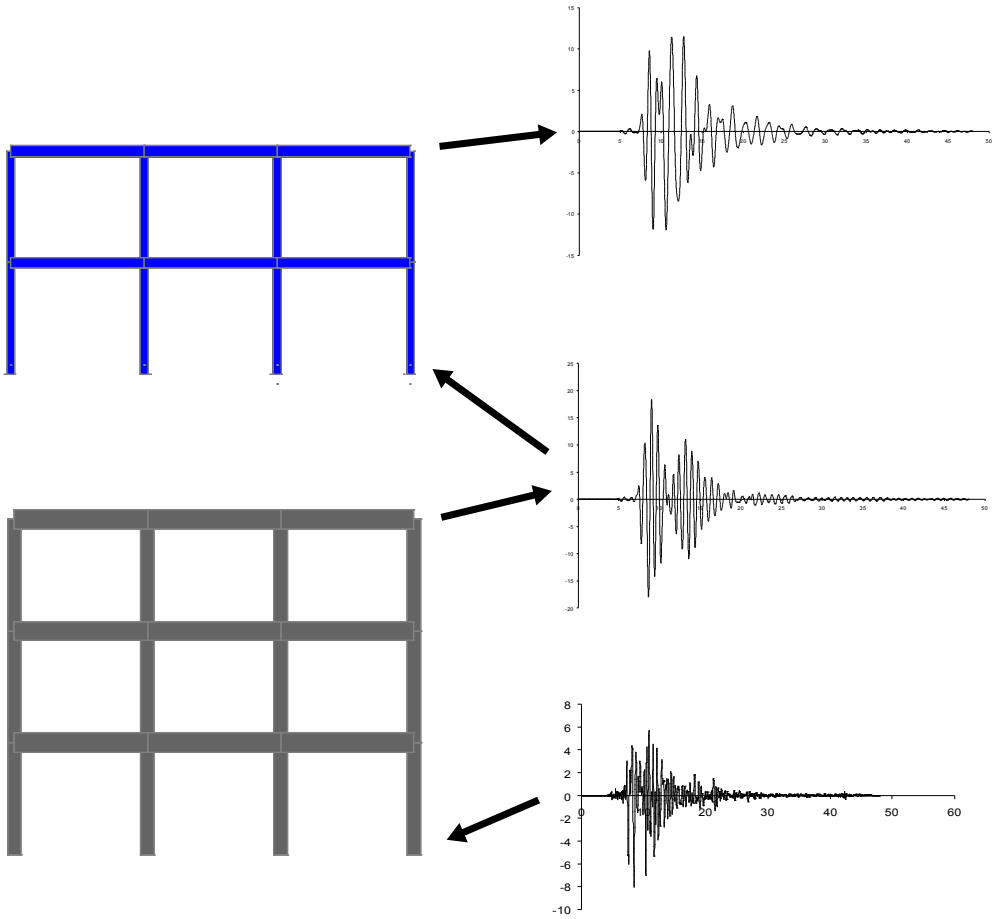
όμως δεν έχουν καμία ιδιαιτερότητα ως προς την απόσβεση και την ελαστοπλαστική τους συμπεριφορά. Επιπλέον, η αποσύζευξη στη διαδικασία ανάλυσης της μικτής κατασκευής πολλές φορές έχει και πρόσθετα οφέλη αφού εξυπηρετεί το διαχωρισμό της μελέτης σε δύο ομάδες, μία που αναλαμβάνει το τμήμα από σκυρόδεμα και μία που αναλαμβάνει το τμήμα από χάλυβα. Τέλος, κάθε επιμέρους τμήμα της αποσυζευγμένης ανάλυσης υποστηρίζεται από τα υφιστάμενα εμπορικά πακέτα λογισμικού, μιας και καμία από τις δύο αναλύσεις δεν περιλαμβάνει κατασκευή με μη κανονική κατανομή απόσβεσης.



Εικ. 2.14: Πολυβάθμια μικτή κατασκευή και πολυβάθμιες κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα

Η αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης απεικονίζεται γραφικά στην Εικ. 2.15. Αναλυτικότερα, η εδαφική διέγερση εισάγεται στη βάση του υποβάθρου από σκυρόδεμα το οποίο και αναλύεται μόνο του, αγνοώντας την υπερκατασκευή. Από το πρώτο αυτό στάδιο της ανάλυσης προκύπτει η απόκριση σε όλες τις στάθμες του υποβάθρου, μεταξύ αυτών και στη στάθμη έδρασης της υπερκατασκευής από χάλυβα. Στο δεύτερο στάδιο της αποσυζευγμένης ανάλυσης, η απόκριση της στάθμης έδρασης εισάγεται ως διέγερση στην υπερκατασκευή, η οποία πάλι αναλύεται μόνη της, διατηρώντας τις συνθήκες στήριξης που ισχύουν και στην περίπτωση της πλήρους κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι αν το χαλύβδινο τμήμα εδράζεται μέσω αρθρώσεων στο τμήμα από σκυρόδεμα τότε και στην αποσυζευγμένη προσέγγιση, η ανάλυσή του θα γίνει με θεώρηση αρθρώσεων στη βάση του, και αντίστοιχα στην περίπτωση των πακτώσεων. Πάλι, από την ανάλυση του χαλύβδινου τμήματος προκύπτει η απόκριση σε κάθε μια από τις στάθμες του, οπότε στο σύνολο υπάρχουν μεγέθη απόκρισης για όλη την κατασκευή.

Η αποσυζευγμένη προσέγγιση στην ανάλυση των μικτών κατασκευών είναι πολύ ελκυστική παρά το αυξημένο υπολογιστικό κόστος της. Το μεγάλο της μειονέκτημα όμως είναι ότι συνεπάγεται σφάλμα στην εκτίμηση της απόκρισης της κάθε στάθμης, είτε αυτή ανήκει στο υπόβαθρο είτε στην υπερκατασκευή, και μάλιστα αυτό το σφάλμα μπορεί να είναι και αρκετά μεγάλο. Ο λόγος είναι ότι σε κάθε ένα από τα δύο στάδια της αποσυζευγμένης διαδικασίας δεν αναλύεται η πραγματική κατασκευή, αλλά μία πλασματική. Έτσι, όταν αναλύεται το υπόβαθρο η υπερκατασκευή αγνοείται εντελώς και αντίστοιχα στο δεύτερο στάδιο της αποσυζευγμένης ανάλυσης αγνοείται το υπόβαθρο από σκυρόδεμα.



Εικ. 2.15: Αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης

Οι τρεις τρόποι ανάλυσης της πλήρους κατασκευής στη συζευγμένη προσέγγιση, μπορούν να εφαρμοστούν και στην αποσυζευγμένη, σε κάθε τμήμα της κατασκευής ξεχωριστά. Έτσι, τόσο το υπόβαθρο όσο και η υπερκατασκευή μπορούν να αναλυθούν με απ' ευθείας χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης τους και να αποκτηθούν τα μεγέθη της απόκρισης σε κάθε στάθμη. Στην κατασκευή του μητρώου απόσβεσης του κάθε τμήματος δεν υπάρχει πλέον κανένα πρόβλημα, αφού το κάθε

τμήμα αποτελείται από ένα υλικό, άρα έχει και ενιαίο συντελεστή απόσβεσης. Συγκεκριμένα, για το υπόβαθρο και για την υπερκατασκευή, το μητρώο απόσβεσης δημιουργείται όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (2.7) ως (2.11) κατά τα γνωστά των συνηθισμένων κατασκευών με ενιαία απόσβεση.

Επίσης, και στην περίπτωση της ιδιομορφικής ανάλυσης με χρονοϊστορία, η επιλογή των συντελεστών απόσβεσης της κάθε ιδιομορφής δεν παρουσιάζει προβλήματα, αφού το κάθε τμήμα έχει ενιαία απόσβεση και είναι εύκολος ο υπολογισμός των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.10). Συγκεκριμένα, αφού δημιουργηθεί το μητρώο απόσβεσης του κάθε τμήματος, άρα αφού υπολογιστούν και οι αναλογικοί συντελεστές a_0 και a_1, στην κάθε ιδιομορφή αποδίδεται και η αντίστοιχη απόσβεση χρησιμοποιώντας τους συντελεστές και την ιδιοσυχνότητά της.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τόσο η απ' ευθείας χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης όσο και η επίλυση των ιδιομορφικών εξισώσεων, καταλήγουν σε σφάλμα στην εκτίμηση της απόκρισης των δύο τμημάτων, s και p. Έτσι, παρά την ελκυστικότητά τους, η οποία σχετίζεται με την επίλυση των πρακτικών προβλημάτων της συζευγμένης ανάλυσης των αντίστοιχων μεθόδων, η απόκλιση στην πρόβλεψη της απόκρισης σε σχέση με την πραγματική μπορεί να είναι τόσο μεγάλη, ώστε η αποσύζευξη να είναι απαγορευτική.

Στην τελευταία μέθοδο ανάλυσης της κατασκευής, τη φασματική μέθοδο, ισχύουν πάλι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχουν οι προηγούμενες δύο μέθοδοι όσον αφορά την αποσυζευγμένη ανάλυση. Κατ' αντιστοιχία, είναι πάλι εύκολο να δημιουργηθούν τα φάσματα απόκρισης για το κάθε επιμέρους τμήμα, αφού αυτά πλέον έχουν ενιαία απόσβεση και ενιαία ελαστοπλαστική συμπεριφορά, ενώ πάλι υπάρχει το σφάλμα της αποσύζευξης το οποίο ενδέχεται να είναι πολύ μεγάλο. Επιπλέον όμως, η φασματική ανάλυση της υπερκατασκευής προϋποθέτει τη δημιουργία ενός φάσματος, το οποίο πέρα από την απόσβεση και την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της κατασκευής θα λαμβάνει υπόψη του και την επιβαλλόμενη κίνηση, και αυτή είναι η κίνηση του υποβάθρου στη στάθμη έδρασης της υπερκατασκευής. Με άλλα λόγια, αυτό που πρέπει να δημιουργηθεί είναι ένα φάσμα απόκρισης ορόφου, floor response spectrum όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Το πρόβλημα είναι ότι η δημιουργία των φασμάτων ορόφου είναι πολύ

δύσκολη διαδικασία, η οποία έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο όταν γίνεται στοχευμένα για συγκεκριμένες κατασκευές, αφού πρακτικά είναι αδύνατον να δημιουργηθούν αξιόπιστα φάσματα ορόφου γενικής εφαρμογής.

2.7 Βιβλιογραφία

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται συνοπτικά η βιβλιογραφία η οποία σχετίζεται με την παρούσα διδακτορική διατριβή. Κατά τρόπο αντίστοιχο με την διατριβή, και η παρουσίαση της βιβλιογραφίας χωρίζεται σε ενότητες, ανάλογα με το αντικείμενο που πραγματεύεται. Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζονται δημοσιεύσεις οι οποίες άπτονται του αντικειμένου της αποσύζευξης των κατασκευών. Οι εργασίες αυτές δεν αναφέρονται κατ' ανάγκη σε αποσύζευξη και υπολογισμό του αντίστοιχου σφάλματος που είναι ένας από τους στόχους της παρούσας διατριβής, αλλά πραγματεύονται ευρύτερα το αντικείμενο των μικτών κατασκευών και των δυνατοτήτων ανάλυσής τους. Ακολούθως παρουσιάζονται εργασίες οι οποίες σχετίζονται με την απόσβεση των κατασκευών. Πάλι, δεν υπάρχει περιορισμός σε εργασίες που έχουν να κάνουν με ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης όπως επιχειρείται στη συνέχεια της διατριβής, αλλά παρουσιάζονται εργασίες που άπτονται γενικότερα του αντικειμένου της αντιμετώπισης του ζητήματος της απόσβεσης κατασκευών με μη κανονική κατανομή απόσβεσης. Στα πλαίσια αυτά, παρουσιάζονται και εργασίες οι οποίες σχετίζονται με κατασκευές στις οποίες προστίθενται αποσβεστήρες, καθώς η αντιμετώπισή τους, με κατάλληλες τροποποιήσεις, μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των μικτών κατασκευών.

2.7.1 Αποσύζευξη και μέθοδοι ανάλυσης

Οι μικτές κατασκευές οι οποίες περιλαμβάνουν πρωτεύοντα και δευτερεύοντα συστήματα, primary-secondary structures, έχουν αποτελέσει εκτεταμένα αντικείμενο έρευνας. Ο λόγος είναι ότι έχουν ευρεία εφαρμογή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, στις οποίες το ρόλο του πρωτεύοντος συστήματος αναλαμβάνει ο φέρων οργανισμός της κατασκευής, και το ρόλο του δευτερεύοντος συστήματος ο ηλεκτρομηχανολογικός

εξοπλισμός. Σε μια βιβλιογραφική εργασία, ο Villaverde [6] αρχικά κάνει μια περιγραφή του τι αποτελεί δευτερεύον σύστημα, και εξηγεί τους λόγους για τους οποίους οι κατασκευές αυτού του τύπου παρουσιάζουν δυσκολίες στην ανάλυσή τους. Επιπλέον αναφέρει τις μεθόδους ανάλυσης των κατασκευών αυτού του τύπου, τις προτάσεις για απλουστευμένη ανάλυσή τους και τέλος παρουσιάζει πειραματικές μελέτες και τις προβλέψεις των κανονιστικών κειμένων που τις αφορούν.

Λόγω της ανομοιομορφίας των δυναμικών χαρακτηριστικών των μικτών κατασκευών, πολλές φορές προτείνεται η ανάλυσή τους στο πεδίο συχνοτήτων αντί για το πεδίο του χρόνου. Στην κατεύθυνση αυτή, ο Gupta [7] προτείνει αλγορίθμους με σκοπό την πρόβλεψη των ιδιομορφών και των ιδιοσυχνοτήτων ενός μικτού συστήματος με δεδομένα τα χαρακτηριστικά των δύο τμημάτων. Ακολούθως, οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες του πλήρους συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια συχνοτική ανάλυση προκειμένου να εξαχθεί η απόκριση της κατασκευής. Σε μια παρόμοια προσέγγιση, οι Dey και Gupta [8] προτείνουν νέους τρόπους υπολογισμού των συναρτήσεων μεταφοράς (transfer functions), οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν το λόγο του μεγίστου της απόκρισης προς το μέγιστο της εισαγόμενης διέγερσης. Σκοπός τους είναι να γίνει η ανάλυση στον τομέα των συχνοτήτων δευτερευόντων συστημάτων τα οποία έχουν παραπάνω από μια στηρίξεις, πράγμα που σημαίνει ότι η διέγερσή τους από το πρωτεύον σύστημα δεν είναι ομοιόμορφη.

Η μικτή διαμόρφωση των κατασκευών αποτελεί πολύ συχνή επιλογή σε βιομηχανικές και ενεργειακές εγκαταστάσεις, όπου ο φέρων οργανισμός αποτελεί το πρωτεύον σύστημα και οι εγκαταστάσεις και οι σωληνώσεις το δευτερεύον. Οι Yang et al. [9] πραγματοποιούν μια εκτίμηση της ικανότητας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων να παραλαμβάνουν σεισμικά φορτία, με έμφαση στην απόκριση όχι μόνο του κυρίως φορέα αλλά και του εξοπλισμού, και χρησιμοποιώντας τεχνικές σχεδίασης με στάθμες επιτελεστικότητας καταλήγουν σε εκτιμήσεις κινδύνου και κόστους επισκευής για βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Οι Meskouris et al. [10] παρουσιάζουν μια διαδικασία σχεδιασμού βιομηχανικών εγκαταστάσεων βασισμένη στις στάθμες επιτελεστικότητας, η οποία λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση του φέροντος οργανισμού και των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων. Μάλιστα, με χρήση μη γραμμικής στατικής ανάλυσης και τεχνικής push over καταλήγουν σε ρεαλιστική εκτίμηση των απαιτήσεων σε όρους μετατοπίσεων των βιομηχανικών κατασκευών. Επίσης, στα πλαίσια των μελετών για βιομηχανικές κατασκευές, οι

Holler και Meskouris [11] αναλύουν αριθμητικά και πειραματικά την απόκριση σιλό σιτηρών, τα οποία είναι μικτές κατασκευές υπό την έννοια ότι το σιλό ως φορέας και τα περιεχόμενα σιτηρά έχουν διαφορετική απόκριση σε δυναμικές φορτίσεις. Τέλος, οι Xu et al. [12], με αφορμή τη μελέτη που έχουν κάνει για την απόκριση εγκαταστάσεων πυρηνικών αντιδραστήρων, πραγματοποιούν μιγαδικές φασματικές αναλύσεις σε βιομηχανικές κατασκευές με μη κανονική κατανομή απόσβεσης και συγκρίνουν τα αποτελέσματα με προτεινόμενες μεθόδους στη βιβλιογραφία.

Μια άλλη κατηγορία από ερευνητικές προτάσεις, είναι αυτές οι οποίες προσπαθούν να καταλήξουν σε μια πρόβλεψη των μεγεθών της απόκρισης σε πολυβάθμιες κατασκευές, χωρίς να κάνουν διαχωρισμό σε υπόβαθρο και υπερκατασκευή. Οι Rodriguez et al. [13], κάνουν μια επισκόπηση των κανονιστικών προβλέψεων για την κατανομή των αναπτυσσόμενων επιταχύνσεων από μια σεισμική διέγερση καθ' ύψος μια πολυβάθμιας κατασκευής, και προτείνουν μια νέα μέθοδο πρόβλεψης με βάση το συνδυασμό των ιδιομορφικών αποκρίσεων, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της κατασκευής. Οι Gupta και Jaw [14], προκειμένου να αναλύσουν μικτές πολυβάθμιες κατασκευές, αντικαθιστούν τα μιγαδικά ιδιοδιανύσματα με πραγματικά, και χρησιμοποιούν χρονική ολοκλήρωση των ιδιομορφικών εξισώσεων. Η ολοκλήρωση γίνεται κατά τα συνηθισμένα, όπως και στις κανονικές κατασκευές, μόνο που τώρα χρησιμοποιούνται και οι ιδιομορφικές ταχύτητες σε συνδυασμό με τις ιδιομορφικές μετατοπίσεις προκειμένου να εξαχθούν τα μεγέθη απόκρισης. Η δε ιδιομορφική απόκριση των κατασκευών, αναλύεται από τον Chopra [15], σε ότι έχει να κάνει με τη συνεισφορά της κάθε ιδιομορφής στη συνολική απόκριση και στον απαιτούμενο αριθμό ιδιομορφών.

Στα πλαίσια της ιδιομορφικής ανάλυσης και φασματικής ανάλυσης που συχνά ακολουθεί, οι Singh και Maldonado [16] και [17], παρουσιάζουν μια μέθοδο ιδιομορφικής ανάλυσης η οποία λαμβάνει υπόψη της και τις ανώτερες ιδιομορφές, παρά το γεγονός ότι αργότερα στην διαδικασία της ανάλυσης μπορεί να αγνοηθούν. Η μέθοδος που προτείνουν αναγνωρίζει τη διασύνδεση μεταξύ τους, τόσο των ιδιομορφών που τελικά χρησιμοποιούνται όσο και των ανώτερων, αυτών δηλαδή που τελικά απορρίπτονται. Επίσης, σε ότι έχει να κάνει με τις ιδιομορφές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των κατασκευών, οι Sinha και Igusa [18], προτείνουν δύο κανόνες συνδυασμού των ιδιομορφικών αποκρίσεων για μη κανονικές κατασκευές. Με μια μελέτη μιας κατασκευής με σεισμική μόνωση, δείχνουν

ότι οι κλασσικές μέθοδοι SRSS και CQC δεν είναι επαρκείς, και προτείνουν νέες, οι οποίες όμως είναι το ίδιο εύκολες στην εφαρμογή. Σε μια διαφορετική προσέγγιση στη μελέτη κατασκευών με μη κανονική απόσβεση, οι Choi και Lee [19] προτείνουν μεθόδους ώστε να προκύψουν διεγέρσεις συμβατές με φάσματα σε περισσότερες από μια τιμές απόσβεσης, ώστε να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση μικτών κατασκευών όπως πυρηνικοί σταθμοί.

Οι Malangone και Ferraioli [20] προτείνουν μια διαδικασία ιδιομορφικής ανάλυσης πολυβάθμιων κατασκευών με σεισμική μόνωση η οποία έχει υψηλή απόσβεση, ένα σύστημα το οποίο ταιριάζει με την διαμόρφωση των καθ' ύψος μικτών κατασκευών σκυροδέματος – χάλυβα. Τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά που εξάγουν λαμβάνουν υπόψη την κατανομή της απόσβεσης και με μια επαναληπτική διαδικασία, προκειμένου να συμπεριληφθεί σωστά η μη γραμμική απόκριση της συσκευής της μόνωσης, προκύπτουν αποτελέσματα πολύ κοντά στην ορθή ανάλυση της κατασκευής με την απ' ευθείας ολοκλήρωσης των εξισώσεων κίνησης. Οι Jangid και Datta [21] χρησιμοποιώντας και αυτοί μια επαναληπτική διαδικασία, προτείνουν μια φασματική διαδικασία ανάλυσης για την ανάλυση κατασκευών με μη κανονική απόσβεση. Η μέθοδος που προτείνουν περιλαμβάνει και αυτή ανάλυση στον τομέα των συχνοτήτων και καταλήγει σε διαδικασία για την οποία αποδεικνύουν ότι συγκλίνει.

Στο πλαίσιο της φασματικής ανάλυσης μικτών κατασκευών λαμβανομένης υπόψη και της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, οι Igusa et al. [22] ξεκινώντας από την ανάγκη ανάλυσης των σωληνώσεων σε πυρηνικούς σταθμούς όταν οι στηρίξεις τους διαρρέουν, προτείνουν μια φασματική ανάλυση των κατασκευών βασισμένη σε μιγαδικές ιδιομορφές και έναν τροποποιημένο κανόνα CQC ο οποίος λαμβάνει υπόψη και την πλαστικοποίηση στις στηρίξεις. Προκειμένου να πάρουν μεγέθη απόκρισης, οι Basu και Gupta [23], καταλήγουν σε αναλυτική λύση για την απόκριση πολυβάθμιων κατασκευών, προσομοιώνοντας τη σεισμική διέγερση με κυματοπαλμούς (wavelets). Αντίστοιχα, για να μελετηθεί η επίδραση των ελαφρών υπερκατασκευών σε πλαισιακά υπόβαθρα τα οποία συμπεριφέρονται μη γραμμικά, οι Adam et al. [24] εκτελούν πειράματα σε διώροφα πλαίσια υπό κλίμακα. Η ιδιοσυχνότητα και η απόσβεση της υπερκατασκευής ποικίλουν προκειμένου να μελετηθεί μια ποικιλία χαρακτηριστικών και η αλληλεπίδραση των δύο τμημάτων όταν η υπερκατασκευή είναι σε συντονισμό με το υπόβαθρο.

Όσον αφορά την ανάλυση και το σχεδιασμό των πολυβάθμιων κατασκευών, η προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις στάθμες επιτελεστικότητας αποτελεί την εναλλακτική σε σχέση με την κλασσική ανάλυση με τη μέθοδο των δυνάμεων. Μάλιστα, έχει την ικανότητα να λαμβάνει υπόψη την ανομοιόμορφη κατανομή της πλαστιμότητας στα δομικά στοιχεία, δυνατότητα η οποία είναι πολύ χρήσιμη στις μικτές κατασκευές σκυροδέματος-χάλυβα. Ο Bazeos [25], επικεντρώνεται σε επίπεδα μεταλλικά πλαίσια και κάνει σύγκριση τριών μεθόδων ανάλυσης, της μεθόδου των δυνάμεων, της προσέγγισης με βάση τις στάθμες επιτελεστικότητας και μιας υβριδικής μεθόδου η οποία παίρνει στοιχεία και από τις δύο προηγούμενες. Οι Xue και Chen [26] εισάγουν μια μέθοδο ανάλυσης με βάση τις στάθμες επιτελεστικότητας η οποία βασίζεται είτε σε ελαστικά είτε σε ελαστοπλαστικά φάσματα απόκρισης και χρησιμοποιώντας μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας δείχνουν ότι η μέθοδος που προτείνουν επιτρέπει τον έλεγχο της μετακίνησης στόχου σε σχέση με την επιθυμητή στάθμη επιτελεστικότητας. Ο Xue [27] παρουσιάζει μια μέθοδο προκαταρκτικής ανάλυσης κατασκευών βασισμένη στις μετατοπίσεις με την οποία καταφέρνει να ικανοποιήσει απαιτήσεις επιτελεστικότητας και να την επεκτείνει σε πολυβάθμιες κατασκευές με βάση μια αντιστοιχία πολυβάθμιας κατασκευής και ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή. Τέλος, όσον αφορά την ανάλυση κατασκευών με τις στάθμες επιτελεστικότητας, οι Chopra και Goel [28], εξετάζουν την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών που προβλέπει ο ATC-40 [29] για την ανάλυση των κατασκευών με βάση τις μετατοπίσεις, και προτείνουν μια τροποποιημένη μέθοδο η οποία κάνει χρήση ελαστοπλαστικών φασμάτων απόκρισης.

Πέρα από την ελαστική ανάλυση των μικτών και μη κατασκευών και τις προοπτικές σχεδιασμού τους, ένα μεγάλο ζήτημα είναι η ελαστοπλαστική τους ανάλυση αφού έτσι προκύπτει μια ρεαλιστικότερη εκτίμηση της απόκρισής τους, σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Οι Nayfeh και Mook [30] κάνουν μια εκτενή παρουσίαση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, τόσο μονοβάθμιων όσο και πολυβάθμιων ταλαντωτών. Οι Chopra και Chintanapakdee [31] κάνουν μια παραμετρική μελέτη με έμφαση στις μέγιστες μετατοπίσεις, σε μονοβάθμιους ταλαντωτές οι οποίοι υποβάλλονται σε μια ποικιλία από σεισμικές διεγέρσεις. Αντίστοιχα, οι Farrow και Kurama [32] επικεντρώνουν τη μελέτη τους σε μονοβάθμιους πάλι ταλαντωτές, μόνο που τώρα η απαίτηση σε όρους πλαστιμότητας είναι το ζητούμενο. Σε μια άλλη περίπτωση μη γραμμικότητας, ο Psycharis [33] εξετάζει την επίδραση της ανύψωσης

του θεμελίου από το έδαφος στην απόκριση των μονοβάθμιων ταλαντωτών, και σε μια επέκταση της μη γραμμικής απόκρισης των μονοβάθμιων μη γραμμικών ταλαντωτών, ο Villaverde [34] προτείνει μια μέθοδο φασματικής ανάλυσης πολυβάθμιων κατασκευών βασιζόμενος στην απόκριση των ιδιομορφών, μόνο που χρησιμοποιεί ελαστοπλαστικά φάσματα απόκρισης.

Όσον αφορά τη μελέτη των μικτών συστημάτων που μπορούν να χαρακτηριστούν σαν συνδυασμός υποβάθρου-υπερκατασκευής, ο Igusa [35] εκτελεί αναλύσεις διβάθμιων ελαστοπλαστικών ταλαντωτών. Κάνει την παραδοχή ότι τα διβάθμια συστήματα μπορούν επαρκώς να αντιπροσωπεύσουν γενικότερες πολυβάθμιες κατασκευές, και επεκτείνει μελέτες που έχουν γίνει πάνω στην ελαστική τους συμπεριφορά σε ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Σε μια παραμετρική μελέτη, οι Chaudhuri και Villaverde [36] εκτελούν ελαστοπλαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας πολυβάθμιων πλαισίων. Στα πλαίσια αυτά στηρίζονται μονοβάθμιοι ελαστοπλαστικοί ταλαντωτές και σκοπός της μελέτης είναι να διερευνηθεί το πώς η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του υποβάθρου επιδρά στην απόκριση της μονοβάθμιας υπερκατασκευής. Τέλος, ο Adam [37] εκτελεί πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις διατμητικών ελαστοπλαστικών πλαισίων στα οποία στηρίζεται μονοβάθμια υπερκατασκευή, και καταδεικνύουν την επίδραση της μη γραμμικής συμπεριφοράς στην αλληλεπίδραση των δύο τμημάτων.

Πέρα όμως από την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των συστημάτων υποβάθρου – υπερκατασκευής, και η μελέτη της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς ομοιογενών κατασκευών, δίνει αξιόλογες πληροφορίες για την απόκρισή τους, άσχετα με το αν θεωρούνται ως ενιαία συστήματα ή διακρίνονται σε περισσότερα από ένα τμήματα. Οι Chopra και Goel [38] και [39] αναπτύσσουν την τεχνική της ιδιομορφικής push over ανάλυσης για πολυβάθμιες κατασκευές και προτείνουν το συνδυασμό των ιδιομορφικών αποκρίσεων ώστε να προκύψει η συνολική συμπεριφορά της κατασκευής. Αντίστοιχα, ο Fajfar [40] προτείνει μια μέθοδο ώστε να προκύψει η μη γραμμική συμπεριφορά ενός κτιρίου υπό σεισμική καταπόνηση, η οποία δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν η πρώτη ιδιομορφή είναι δεσπόζουσα. Οι Vamvatsikos και Cornell [41] και [42] εισάγουν μια επαυξητική δυναμική μέθοδο ώστε να αξιολογηθεί η πραγματική ελαστοπλαστική συμπεριφορά ενός κτιρίου σε σεισμό, ενώ οι Krawinkler και Zareian [43] και Lignos [44] μέσω προσομοιωμάτων που λαμβάνουν υπόψη την

απομείωση της αντοχής των διατομών μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης, καταφέρνουν να προβλέψουν την κατάρρευση πολυβάθμιων πλαισίων.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των κατασκευών, ο Panagiotou [45] εκτελεί δοκιμές σε πολυώροφα κτίρια από σκυρόδεμα και αξιοποιεί το σχεδιασμό με βάση τις στάθμες επιτελεστικότητας ώστε να ληφθούν υπόψη οι ανώτερες ιδιομορφές και η υπεραντοχή της κατασκευής. Οι Karavasilis et al. [46] κάνουν μια παραμετρική μελέτη σχετικά με τις απαιτήσεις πλαστιμότητας και τις οριζόντιες μετατοπίσεις πλαισίων με κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας, ενώ οι Sanchez-Ricart και Plumier [47] πάλι σε μια παραμετρική μελέτη, αξιολογούν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά μεταλλικών πλαισίων ροπής σχεδιασμένων με τους EC8 [3] και EC3 [48], βασιζόμενοι στη μέθοδο N2 του Fajfar [40].

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται κατά τη σεισμική διέγερση, ο Paulay [49] εισάγει μια μέθοδο ώστε να υπολογίζονται οι παραμορφώσεις των μελών και οι μετατοπίσεις της κατασκευής, ώστε να γίνει ο σχεδιασμός με βάση τις στάθμες επιτελεστικότητας. Τόσο η εφαρμογή των σταθμών επιτελεστικότητας όσο και η μέθοδος των δυνάμεων, προϋποθέτουν τη χρήση συντελεστών συμπεριφοράς και πλαστιμότητας, και οι Tiwary και Gupta [50] συσχετίζουν τους συντελεστές αυτούς με τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης. Σε μια άλλη προσέγγιση του σχεδιασμού των κατασκευών, αυτή που βασίζεται στην ενέργεια που επιβάλλεται στην κατασκευή κατά τη σεισμική διέγερση, ο Surahman [51] προτείνει μια μέθοδο σχεδιασμού που χρησιμοποιεί ιδιομορφικές αποκρίσεις και την κατανομή της ενέργειας στα δομικά στοιχεία, ενώ οι Chou και Uang [52] προτείνουν μια μέθοδο ώστε να προσδιοριστεί η ενέργεια που απορροφάται σε μια κατασκευή κατά τη σεισμική της διέγερση. Τέλος, οι Zeris και Mahin αναλύουν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά τόσο σε επίπεδο μελών [53], όσο και σε επίπεδο κατασκευής [54,55].

Η διαμόρφωση των μικτών κατασκευών με την καθ' ύψος ανομοιομορφία, όπως αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία, έχει πολλές ομοιότητες με τα προβλήματα αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής, αφού και σε αυτήν την κατηγορία, υπάρχουν δύο διακριτά συστήματα ως προς τα χαρακτηριστικά της δυναμικής συμπεριφοράς και τα οποία έχουν παρόμοια γεωμετρική διαμόρφωση. Οι Aviles και Perez-Rocha [56] μελετούν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής, αντικαθιστώντας την κατασκευή με έναν ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή και καταφέρνουν επαρκώς

να αποτυπώσουν τη μη γραμμικότητα και της κατασκευής αλλά και της αλληλεπίδρασης με το υποκείμενο έδαφος. Την ανάλυση της πολυβάθμιας κατασκευής με πολλούς μονοβάθμιους ταλαντωτές μέσω μιας ιδιομορφικής ανάλυσης, επιχειρούν και οι Wu και Smith [57], οι οποίοι προχωρούν στην ανάλυση της κατασκευής στον τομέα των συχνοτήτων, αφού τροποποιήσουν την διέγερση με τρόπο ώστε να ληφθεί υπόψη και η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής.

Η αλληλεπίδραση με το έδαφος, τροποποιεί τη συνολική απόσβεση του συστήματος έδαφος – κατασκευή. Την αλλαγή αυτή, οι Novak και Hifnawy [58] επιχειρούν να τη μελετήσουν με μια προσεγγιστική μέθοδο βασισμένη στην ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα, και με μια ακριβή μέθοδο βασισμένη στις μιγαδικές ιδιομορφές. Η επίδραση της αλληλεπίδρασης με το έδαφος στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά κτιρίων, μελετάται από τους Nakhaei και Ghannad [59]. Η κατασκευή αντικαθιστάται από έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή, και τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης στην ελαστοπλαστική της συμπεριφορά αποτυπώνονται μέσω ενός δείκτη βλάβης. Τέλος, ο Takewaki [60] προτείνει μια μέθοδο σχεδιασμού κτιρίων που συμπεριφέρονται διατμητικά. Το κτίριο αντικαθίσταται με έναν μονοβάθμιο ελαστικό ταλαντωτή, και η μέθοδος λαμβάνει υπόψη και την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του κτιρίου και την αλληλεπίδραση με το έδαφος.

Λόγω του μεγέθους των προσομοιωμάτων αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής και του αντίστοιχου υπολογιστικού κόστους, έχουν προταθεί μέθοδοι οι οποίες αντικαθιστούν τα αρχικά προσομοιώματα με μικρότερα. Ένα πρώτο βήμα προς τη μείωση του υπολογιστικού κόστους γίνεται με την αντικατάσταση της γραμμικής ή μη γραμμικής κατασκευής με ισοδύναμους μονοβάθμιους ταλαντωτές, όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες εργασίες στον τομέα της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής. Οι Yang και Lin [61] προχωρούν σε διαχωρισμό του συστήματος έδαφος – κατασκευή και εκτελούν αναλύσεις στο χρονικό τομέα, κάνοντας παράλληλα και διερεύνηση των συνοριακών συνθηκών στο ελεύθερο πεδίο με έμφαση στην προσομοίωση της απόσβεσης. Αντίστοιχα, οι Gutierrez και Chopra [62] εκτελούν και αυτοί ανάλυση συστημάτων αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία και προβαίνοντας στο διαχωρισμό τους, και αναγνωρίζοντας ότι η επίδραση του σεισμού ουσιαστικά περιορίζεται στις κατώτερες ιδιομορφές της κατασκευής. Τέλος, οι Bode et al. [63] επεκτείνουν το διαχωρισμό του συστήματος έδαφος – κατασκευή σε μεγάλα τρισδιάστατα προβλήματα, και οι Yerli et

al. [64] προτείνουν κατάλληλη διαμόρφωση του προβλήματος και του διαχωρισμού του εδάφους από την κατασκευή ώστε να επιλυθεί σε δίκτυα υπολογιστών.

Πολλές μελέτες έχουν γίνει στον τομέα της αποσυζευγμένης ανάλυσης των μικτών κατασκευών λόγω της ευκολίας που συνεπάγεται η ανάλυση αυτή στην αντιμετώπιση τους. Οι Chen και Wu [65] αναπτύσσουν κριτήρια αποσύζευξης μικτών κατασκευών, στις οποίες η ανομοιογένεια είναι κατά την κατακόρυφη έννοια, όπως στις μικτές καθ' ύψος κατασκευές που αντιμετωπίζονται στην παρούσα εργασία. Η μελέτη τους επικεντρώνεται σε διβάθμια συστήματα υποβάθρου-υπερκατασκευής, και καταλήγουν σε αναλυτική έκφραση του σφάλματος που προκύπτει από την αποσύζευξη στην ανάλυσή τους. Προκειμένου να πετύχουν την αναλυτική έκφραση του σφάλματος, η μελέτη περιορίζεται στο σταθερό κομμάτι της απόκρισης (steady state), και οι διεγέρσεις είναι αρμονικές, πράγμα που σημαίνει ότι η ενίσχυση της διέγερσης σε κάθε τμήμα είναι δυνατόν να εκφραστεί αναλυτικά συναρτήσει των ιδιοσυχνοτήτων της διέγερσης και του εν λόγω τμήματος και της απόσβεσής του. Μάλιστα, προκειμένου η εκτίμηση του σφάλματος να είναι η δυσμενέστερη δυνατή, οι αρμονικές διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται είναι σε συντονισμό είτε με το υπόβαθρο p είτε με την υπερκατασκευή s. Οι συγγραφείς καταλήγουν σε καμπύλες οι οποίες δίνουν μια εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης ανάλογα με τη συσχέτιση των δυναμικών χαρακτηριστικών των δύο τμημάτων. Με τον τρόπο αυτό προτείνουν ένα εργαλείο πρόβλεψης του σφάλματος αποσύζευξης των κατασκευών το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προκαταρκτικό στάδιο μιας μελέτης και να αποφασιστεί αν η προσέγγιση που θα ακολουθηθεί θα είναι συζευγμένη ή αποσυζευγμένη. Επιπλέον, η αναλυτική τους προσέγγιση δεν έχει περιορισμούς ως προς τη συσχέτιση των μαζών υποβάθρου και υπερκατασκευής, οπότε η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κατασκευές ενδιαφέροντος πολιτικού μηχανικού στις οποίες η μάζα της υπερκατασκευής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους σε σχέση με αυτήν του υποβάθρου.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της αλλαγής της απόκρισης των τμημάτων μιας μικτής κατασκευής όταν ακολουθείται η αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης, οι Gupta και Tembulkar προτείνουν αναλυτικές σχέσεις οι οποίες προβλέπουν την αλλαγή στην απόκριση και τις ιδιοσυχνότητες διβάθμιων [66] και πολυβάθμιων [67] μικτών συστημάτων, ανάλογα πάλι με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων, με σκοπό να προκύψει ένα εργαλείο που θα βοηθήσει την απόφαση για συζευγμένη ή αποσυζευγμένη ανάλυση. Σε μια επέκταση της διαδικασίας της

αποσύζευξης, ο Bernal [68] προχωράει στην αποσύζευξη υποβάθρου και υπερκατασκευής αλλά και του εδάφους, οπότε καταλήγει σε τρία υποσυστήματα τα οποία αναλύει στον τομέα των συχνοτήτων. Εναλλακτικά, οι Chen και Soong [69] καταφέρνουν να αποκτήσουν ορθά μεγέθη απόκρισης πολυβάθμιων μικτών κατασκευών προβαίνοντας σε μια διαφορετική αποσύζευξη κατά την οποία το σύστημα μετατρέπεται σε πολλούς μονοβάθμιους ταλαντωτές οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά υποβάθρου και υπερκατασκευής. Τέλος, ο Gupta [70] προτείνει μια εναλλακτική πρόταση για τη συνάρτηση μεταφοράς της υπερκατασκευής ώστε να προβλεφθεί η απόκρισή της, ενώ κάνει και μια σύνοψη πολλών από τις μεθόδους ανάλυσης των μικτών συστημάτων [71].

Μια διαφορετική προσέγγιση της αποσυζευγμένης ανάλυσης των μικτών κατασκευών, προβλέπει επαναληπτικές μεθόδους ώστε να απαλειφθεί το σφάλμα αποσύζευξης. Οι Zavoni et al. [72] επικεντρώνουν τη μελέτη τους στο να προτείνουν μια επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό ενός μητρώου μεταφοράς για τον υπολογισμό της απόκρισης των μικτών κατασκευών. Σε μια πιο κλασσική επαναληπτική προσέγγιση, οι Adam και Fotiu [73] προτείνουν δύο επαναληπτικές διαδικασίες για την ανάλυση ελαστοπλαστικών μικτών κατασκευών. Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά και οι δυνάμεις στη διεπιφάνεια θεωρούνται ως μια επιπλέον πλασματική φόρτιση στη διέγερση του υποβάθρου και της υπερκατασκευής, και οι αναλύσεις των δύο τμημάτων γίνονται με τρόπο επαναληπτικό ώστε να υπάρξει σύγκλιση στα μεγέθη απόκρισης. Επαναληπτικές μεθόδους προκειμένου να αντιμετωπίσουν τις δυσκολίες στην ανάλυση συστημάτων με μη κλασσική απόσβεση προτείνουν και οι Udwadia και Kumar [74] ενώ οι Claret και Venancio-Filho [75] προτείνουν μια επαναληπτική διαδικασία ιδιομορφικής ανάλυσης κατασκευών με μη κλασσική απόσβεση κατά την οποία οι μη διαγώνιοι όροι του μητρώου απόσβεσης αντιμετωπίζονται σαν πλασματική διέγερση.

Μια εναλλακτική μέθοδος ανάλυσης των μικτών καθ' ύψος κατασκευών είναι η χρήση φασμάτων απόκρισης ορόφου με τα οποία μπορεί να εξαχθεί η απόκριση της υπερκατασκευής με μια τυπική φασματική ανάλυση. Οι Paskalov και Reese [76] προτείνουν μια αναλυτική διαδικασία υπολογισμού του φάσματος ορόφου, και τη συγκρίνουν με τα φάσματα που προκύπτουν από την ανάλυση συγκεκριμένου κτιρίου το οποίο υποβάλλεται σε τεχνητό επιταχυνσιογράφημα. Αντίστοιχα, ο Varpasuo [77] εξάγει φάσματα ορόφου εκτελώντας αναλύσεις χρονοϊστορίας σε

τρισδιάστατο προσομοίωμα ενός κτιρίου πυρηνικού αντιδραστήρα το οποίο υπόκειται σε σεισμική διέγερση η οποία περιγράφεται από ένα επίσης τεχνητό επιταχυνσιογράφημα. Σε μια διαφορετική προσέγγιση, οι Medina et al. [78] προτείνουν φάσματα απόκρισης ορόφου για την ανάλυση ελαφρών υπερκατασκευών οι οποίες στηρίζονται σε πλαισιακές κατασκευές. Για να το πετύχουν αυτό εκτελούν παραμετρικές αναλύσεις οι οποίες καλύπτουν μια ευρεία γκάμα τόσο ως προς τα χαρακτηριστικά των πλαισίων όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά των σεισμικών διεγέρσεων. Τέλος, οι Chaudhuri και Gupta [79] και οι Rao et al. [80] προτείνουν μια αναλυτική μέθοδο ιδιομορφικών επιταχύνσεων προκειμένου να μπορέσουν να πάρουν μεγέθη απόκρισης του υποβάθρου τα οποία τα μετατρέπουν σε φάσμα ορόφου στη στάθμη έδρασης της υπερκατασκευής.

Αυτό που πολλές φορές είναι χρήσιμο σε μια αποσυζευγμένη μελέτη μιας μικτής κατασκευής είναι η εκ των προτέρων γνώση του σφάλματος αποσύζευξης, σε στάδιο προκαταρκτικής ακόμα μελέτης. Η γνώση αυτή είναι καθοριστική για το αν η ανάλυση της κατασκευής θα γίνει αποσυζευγμένα ή συζευγμένα, και καλύπτεται μερικώς από τους Chen και Wu [65] με τις καμπύλες αποσύζευξης που προτείνουν. Για το λόγο αυτό, στο 3^{ο} κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, επιχειρείται να δοθούν οργανωμένα καμπύλες αποσύζευξης μικτών κατασκευών καθ' ύψος κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα. Οι καμπύλες αυτές είναι αντίστοιχες με αυτές που προτείνουν οι Chen και Wu [65], είναι δηλαδή παραμετρικές ως προς τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και απεικονίζουν τρία χαρακτηριστικά επίπεδα σφάλματος, ενώ συμπληρωματικά προτείνονται και καμπύλες αποσύζευξης που αφορούν το σφάλμα του υποβάθρου. Πέρα όμως από την θεώρηση αρμονικών διεγέρσεων, λαμβάνονται υπόψη και σεισμικές διεγέρσεις, και οι περιπτώσεις ελαστοπλαστικών κατασκευών. Προκειμένου να γίνουν αυτά, η ανάλυση γίνεται όχι αναλυτικά όπως στους Chen και Wu [65] αλλά αριθμητικά, πράγμα που επιτρέπει εκτός των άλλων και να συμπεριληφθεί και το μεταβατικό (transient) τμήμα της απόκρισης στις καμπύλες αποσύζευξης. Επιπλέον, κατ' αντιστοιχία με την πρόταση των Chen και Wu [65] για χρήση των καμπυλών αποσύζευξης σε μονοβάθμιες υπερκατασκευές που στηρίζονται σε πολυβάθμια υπόβαθρα, προτείνεται και εδώ μια διαδικασία επέκτασης των καμπυλών αποσύζευξης σε πολυβάθμιες υπερκατασκευές που στηρίζονται σε πολυβάθμια υπόβαθρα. Επιπλέον εισάγεται μια τροποποίηση της διαδικασίας αποσύζευξης κατά την οποία η μάζα της υπερκατασκευής προστίθεται στη μάζα του

υποβάθρου κατά την αποσυζευγμένη ανάλυση προκειμένου να μειωθεί το σφάλμα αποσύζευξης. Οι επεκτάσεις αυτές μαζί με προτάσεις εφαρμογής σε πολυβάθμια μικτά πλαίσια, αποτυπώνονται από τους Papageorgiou και Gantes [81,82].

2.7.2 Απόσβεση κατασκευών και ισοδύναμη απόσβεση μικτών συστημάτων

Ζητήματα που άπτονται της απόσβεσης των κατασκευών έχουν επίσης απασχολήσει επανειλημμένα τη βιβλιογραφία. Η ενασχόληση αυτή έγινε πιο έντονη λόγω της χρήσης συστημάτων απόσβεσης και σεισμικής μόνωσης, η προσθήκη των οποίων αυτόματα μετατρέπει την αναλογική απόσβεση σε μη κανονική, δημιουργώντας έτσι τα προβλήματα ανάλυσης που έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες. Παράλληλα, πολλές εργασίες έχουν επικεντρωθεί στην μελέτη της απόσβεσης αυτής καθεαυτής, ακόμα και σε συνηθισμένες κατασκευές. Οι Fritz et al. [83] για παράδειγμα, παρουσιάζουν μια βάση δεδομένων από μετρήσεις περιόδων και απόσβεσης σε σχεδόν 1000 κτίρια. Έπειτα από μια στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων η οποία λαμβάνει υπόψη της τις διαφοροποιήσεις από κτίριο σε κτίριο και τις διαφοροποιήσεις που προκύπτουν εξαιτίας της ποικιλίας των διεγέρσεων, προτείνουν υπολογιστικά μοντέλα για την εκτίμηση της περιόδου και της απόσβεσης. Σε μια παρόμοια προσέγγιση, οι Kareem και Gurley [84] μελετούν την απόσβεση των κατασκευών, ιδιαίτερα σε ότι έχει να κάνει με την αβεβαιότητα στην εκτίμησή της, και με μια στατιστική προσέγγιση εκτιμώνται οι συνέπειες στην ανάλυση των κατασκευών λόγω της διαφοροποίησης της.

Όσον αφορά την προσομοίωση της απόσβεσης, οι Leger και Dussault [85] παρουσιάζουν μια παραμετρική διερεύνηση της προσομοίωσης της απόσβεσης σε κατασκευές που έχουν ελαστοπλαστική συμπεριφορά, με έμφαση στις συνέπειες που έχει η προσομοίωση αυτή στην τελική απόκριση της κατασκευής. Ο Adhikari [86] προτείνει μια νέα μέθοδο προσομοίωσης της απόσβεσης, σε αντιδιαστολή με την προσομοίωση κατά Rayleigh, η οποία λαμβάνει υπόψη της τη μεταβολή της απόσβεσης σε συνάρτηση με την συχνότητα της επιβαλλόμενης διέγερσης, και οι Trombetti και Silvestri [87] κάνουν μια μαθηματική διερεύνηση της αναλογικής απόσβεσης, και προτείνουν σχέσεις υπολογισμού των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης για κατασκευές με αναλογική κατανομή της απόσβεσης.

Μια κατασκευή η οποία έχει πρόσθετα στοιχεία απόσβεσης ενέργειας ή είναι μονωμένη σεισμικά, ή μια μικτή κατασκευή του τύπου που εξετάζει η παρούσα εργασία έχει μη κανονική κατανομή της απόσβεσης. Οι Liu et al. [88] εισάγουν τρεις δείκτες οι οποίοι βασίζονται στις μιγαδικές ιδιομορφές της κατασκευής, και με τους οποίους κάνουν την εκτίμηση της ανώμαλης κατανομής της απόσβεσης. Σε μια μελέτη των συνεπειών της προσομοίωσης της απόσβεσης με αναλογικό τρόπο, ο Charney [89] αναλύει ελαστοπλαστικές κατασκευές. Η μελέτη επικεντρώνεται στην δυσκαμψία η οποία λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του μητρώου απόσβεσης, είτε αρχική είτε εφαπτομενική, και εξετάζεται το αν προκύπτει υπερεκτίμηση της απόσβεσης. Αντίστοιχα, ο Bernal [90] κάνει μια διερεύνηση στη γένεση πλασματικών δυνάμεων απόσβεσης όταν σε μια κατασκευή η οποία αρχικά έχει ένα κανονικό ορθογωνικό μητρώο απόσβεσης, συμβαίνουν πλαστικοποιήσεις.

Η αυξανόμενη χρήση των αποσβεστήρων στις κατασκευές, έδωσε αφορμή για πολλές ερευνητικές εργασίες πάνω στην συνεπαγόμενη ανώμαλη κατανομή της απόσβεσης. Οι Sylmans et al. [91] κάνουν μια επισκόπηση των δυνατοτήτων εφαρμογής συστημάτων απόσβεσης ενέργειας. Αναλύονται οι κυριότεροι τύποι αποσβεστήρων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση τους, και το γενικότερο πλαίσιο για τη διαδικασία σχεδιασμού των συστημάτων αυτών. Σε μια ανάλογη μελέτη, οι Jurukovski et al. [92], παρουσιάζουν και αυτοί μεθόδους ελέγχου της συμπεριφοράς των κατασκευών, με έμφαση στις μεθόδους παθητικού ελέγχου, δηλαδή στη χρήση στοιχείων απόσβεσης, και παρουσιάζουν παραδείγματα απόκρισης πλαισίων στα οποία έχουν προστεθεί αποσβεστήρες.

Οι Uriz και Whittaker [93] αναγνωρίζοντας ότι ένα μεγάλο μέρος των εφαρμογών των αποσβεστήρων σε κτιριακά έργα, αφορά περιπτώσεις ενίσχυσης, περιγράφουν τη χρήση γραμμικών αποσβεστήρων ιξώδους απόσβεσης στην ενίσχυση μεταλλικών κτιρίων τα οποία είχαν κατασκευαστεί πριν το σεισμό του Northridge. Στο πεδίο των εφαρμογών των αποσβεστήρων, οι Dimova et al. [94] προτείνουν αριθμητικές μεθόδους οι οποίες αποσκοπούν στο να επιλύσουν τις εξισώσεις κίνησης πλαισίων στα οποία προστίθενται αποσβεστήρες τριβής. Σε μια άλλη μελέτη, οι Hitchcock et al. [95], μελετούν την απόκριση ενός μεταλλικού πύργου στον οποίο προστίθενται συσκευές απόσβεσης τύπου υγρής στήλης (liquid column dampers), και δείχνουν την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των μεγεθών της απόκρισης της κατασκευής.

Σε ακόμα πιο ιδιόμορφες περιπτώσεις εφαρμογής των αποσβεστήρων, οι Chrysostomou et al. [96] και οι El-Borgi et al. [97] προτείνουν την ενίσχυση ιστορικών λιθόκτιστων κατασκευών με τη χρήση συσκευών απόσβεσης.

Η ανάλυση των κατασκευών στις οποίες έχουν προστεθεί αποσβεστήρες με μεθόδους χρονοϊστορίας, προσφέρει τα ακριβέστερα αποτελέσματα, είναι όμως χρονοβόρα και συνεπάγεται μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι υπολογισμού ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης, σκοπός των οποίων είναι να εφαρμοστούν σε μια διαδικασία φασματικής ανάλυσης, αντί να γίνει ανάλυση της κατασκευής με χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης. Οι Charney και McNamara [98] κάνουν σύγκριση τριών μεθόδων υπολογισμού ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης για πλαίσια στα οποία έχουν προστεθεί αποσβεστήρες. Η μελέτη εξετάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές διαμορφώσεις της τοποθέτησης των συσκευών απόσβεσης και καταλήγει σε σημαντικές διαφορές ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Οι Veletsos και Ventura [99] εναλλακτικά, αναπτύσσουν μια μέθοδο ιδιομορφικής ανάλυσης κατασκευών με μη κανονική απόσβεση οι οποία καταλήγει κατά τα γνωστά σε συνδυασμό των ιδιομορφικών αποκρίσεων προκειμένου να εξαχθούν τα μεγέθη απόκρισης, και οι Kawashima και Shimogo [100] προτείνουν μια πειραματική διαδικασία προκειμένου να εξαχθούν τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής με μη κανονική απόσβεση.

Στα πλαίσια της αντικατάστασης της ανάλυσης με χρονική ολοκλήρωση, ο Occhiuzzi [101] προτείνει μια μέθοδο υπολογισμού των ισοδύναμων τιμών ιξώδους απόσβεσης για κάθε ιδιομορφή μιας κατασκευής στην οποία έχουν προστεθεί αποσβεστήρες. Η εξίσωση κίνησης της κατασκευής μετατρέπεται στη διαμόρφωση χώρου-κατάστασης (state-space formulation), και με μια ιδιομορφική ανάλυση η οποία λαμβάνει υπόψη και το μητρώο απόσβεσης, προκύπτουν οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης. Μια νέα μέθοδος υπολογισμού των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης για κατασκευές με αποσβεστήρες αναπτύσσεται από τους Lee et al. [102], οι οποίοι κάνουν και αυτοί χρήση της διαμόρφωσης χώρου-κατάστασης. Οι Bilbao et al. [103] προκειμένου να υπολογίσουν τους ισοδύναμους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης, δεν αλλάζουν τη διατύπωση της εξίσωσης κίνησης της κατασκευής αλλά τροποποιούν το μητρώο απόσβεσης με τρόπο ώστε να εξακολουθεί να είναι αναλογικό και ταυτόχρονα να συμπεριλαμβάνει και τη δράση των στοιχείων

απόσβεσης. Οι Papagiannopoulos και Beskos επεκτείνουν πρόταση για εξαγωγή των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης για κατασκευές με κλασσική απόσβεση [104] σε κατασκευές με μη κλασσική απόσβεση [105]. Η προσέγγισή τους βασίζεται στις συναρτήσεις μεταφοράς της κατασκευής στον τομέα των συχνοτήτων και στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά της και αξιολογούν την ισχύ της με προσομοίωση της απόκρισης επίπεδων πλαισίων με μη κανονική κατανομή απόσβεσης. Σε μια τρισδιάστατη επέκταση, οι Lin και Chopra [106] εισάγουν και τη στρεπτική απόκριση πλαισίων στα οποία τοποθετούνται αποσβεστήρες και υπολογίζουν την απόκριση μέσω αναλύσεων χρονοϊστορίας και τροποποιημένων φασματικών αναλύσεων ώστε να συμπεριλάβουν και την δράση των αποσβεστήρων. Τέλος, σε μια εργασία η οποία έχει και πειραματικό σκέλος, οι Shen et al. [107] προσαρμόζουν αποσβεστήρες σε υφιστάμενα πλαίσια από σκυρόδεμα, εξετάζουν την απόκρισή τους και εν τέλει υπολογίζουν τους ισοδύναμους συντελεστές ιδιομορφικής απόσβεσης με βάση τη μέθοδο της ενέργειας των ιδιομορφικών παραμορφώσεων (modal strain energy method), ενώ παρόμοια οι Chang et al. [108] κάνουν την αντίστοιχη εργασία με μεταλλικά πλαίσια.

Μια διαφορετική προσέγγιση στον υπολογισμό των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης επιχειρείται από τους Huang et al. [109]. Η μελέτη τους επικεντρώνεται σε έναν τηλεπικοινωνιακό πύργο, ο οποίος από άποψη υλικού είναι μια μικτή καθ' ύψος κατασκευή, η οποία αποτελείται από σκυρόδεμα και χάλυβα, με το τμήμα από χάλυβα να εδράζεται επί του τμήματος από σκυρόδεμα. Επιχειρούν δύο προσεγγίσεις προκειμένου να καταλήξουν στις τιμές ισοδύναμης απόσβεσης. Στην πρώτη η πολυβάθμια υπό μελέτη κατασκευή μετατρέπεται σε μια ισοδύναμη διβάθμια, μέσω μιας διαδικασίας που παρουσιάζεται από τον Leung [110], κατά την οποία η αρχική κατασκευή διασπάται σε δύο τμήματα ομοιογενή από άποψη υλικού. Το κάθε ένα από τα δύο τμήματα αναλύεται στις ιδιομορφές του, και η πρώτη ιδιομορφή του κάθε τμήματος μετατρέπεται σε έναν βαθμό ελευθερίας της ισοδύναμης διβάθμιας κατασκευής. Οι Huang et al. [109] υπολογίζουν αρχικά αναλυτικά τους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης για την διβάθμια κατασκευή αγνοώντας τους μη διαγώνιους όρους του μητρώου απόσβεσης, και σε μια δεύτερη προσέγγιση εκτελούν μια επαναληπτική διαδικασία ελαχιστοποίησης σφάλματος προκειμένου να καταλήξουν στους συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι προσεγγίζουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την απόκριση της πραγματικής κατασκευής.

Μια άλλη κατηγορία κατασκευών οι οποίες έχουν καθ' ύψος ανομοιομορφία είναι αυτές στις οποίες γίνεται χρήση συστημάτων μόνωσης στη βάση τους. Το αποτέλεσμα είναι ότι ένας βαθμός ελευθερίας στην κάθε διεύθυνση, αυτός που αντιστοιχεί στη μετακίνηση των εφεδράνων, έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά απόκρισης από τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας, αυτούς δηλαδή που αντιστοιχούν στην κίνηση της κατασκευής. Η διαφορά έγκειται και στη δυσκαμψία των δύο τμημάτων αλλά και στα διαφορετικά μεγέθη απόσβεσής τους. Η ανομοιομορφία στα μεγέθη αυτά έχει προκαλέσει και το ερευνητικό ενδιαφέρον προκειμένου να προκύψουν λύσεις που θα επιτρέψουν την ανάλυση και το σχεδιασμό των κατασκευών αυτών. Ο Kelly [111] παραθέτει μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας και των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να αναλυθούν οι κατασκευές με σεισμική μόνωση. Στα πλαίσια των απλουστευμένων μεθόδων ανάλυσης, χωρίς να επιστρατεύονται αναλύσεις χρονοϊστορίας και μιγαδικές ιδιομορφές, οι Weitzmann et al. [112] παρουσιάζουν μια μέθοδο η οποία κάνει απομείωση των φασμάτων επιταχύνσεων με τρόπο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη της σεισμικής μόνωσης και η επιπλέον απόσβεση που προσδίδει στο σύστημα. Εναλλακτικά, οι Shrimali και Jangid [113] προτείνουν μια απλή αναλυτική μέθοδο ώστε να προκύψουν τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά συστημάτων με σεισμική μόνωση, και τροποποιούν και τους κανόνες συνδυασμού των μεγίστων των ιδιομορφών, ώστε η σεισμική απόκριση της μονωμένης κατασκευής να προκύψει από μια φασματική ανάλυση.

Δεδομένου ότι πολλές φορές το σφάλμα αποσύζευξης μια μικτής καθ' ύψος κατασκευής σκυροδέματος/χάλυβα μπορεί να είναι απαγορευτικά μεγάλο, είναι σκόπιμο η συζευγμένη πλέον ανάλυσή της να μη γίνει με ενιαίο συντηρητικό συντελεστή απόσβεσης ίσο με 2%, όπως είναι η μελετητική πρακτική, αλλά με έναν ισοδύναμο συντελεστή απόσβεσης. Αυτός, πρέπει να προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική απόκριση της μικτής κατασκευής και να έχει τέτοια μορφή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνήθεις διαδικασίες ανάλυσης. Οι προαναφερθείσες εργασίες, καταλήγουν σε ισοδύναμες μεθόδους ανάλυσης κατασκευών με μη κανονική απόσβεση, οι προτάσεις τους όμως είναι μάλλον δύσκολο να εφαρμοστούν ευρέως σε μελέτες κατασκευών καθώς δεν υπάρχει άμεση συσχέτισή τους με τις αναλύσεις, ιδιομορφικές, χρονοϊστορίας ή και φασματικές, που εκτελούνται με εμπορικά πακέτα λογισμικού. Αντίθετα, μάλλον απευθύνονται σε μεθόδους ανάλυσης

οι οποίες προϋποθέτουν δημιουργία κώδικα σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού. Εξαίρεση αποτελεί η προσέγγιση των Huang et al. [109], οι οποίοι εξάγουν ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης με τρόπο και μορφή που να μπορούν να εφαρμοστούν σε μια συνηθισμένη μελέτη. Το κάνουν όμως για συγκεκριμένη κατασκευή και λείπει η παραμετρική διάσταση ώστε να προκύψουν αποτελέσματα ευρύτερης χρησιμότητας.

Στο πρόβλημα αυτό, επιχειρείται να δοθεί λύση στα κεφάλαια 4 και 5 της παρούσας διατριβής. Κάνοντας χρήση διβάθμιων ταλαντωτών, προτείνονται ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης για συζευγμένη ανάλυση των μικτών κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα. Αρχικά, προτείνονται ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης μέσα από μια διαδικασία αναλυτικού υπολογισμού τους μέσω των μιγαδικών ιδιομορφών των μικτών διβάθμιων κατασκευών. Οι εξισώσεις κίνησης μετατρέπονται στην διαμόρφωση χώρου-κατάστασης, επιλύεται το μιγαδικό πρόβλημα ιδιοτιμών, υπολογίζονται οι μιγαδικές ιδιομορφές και προκύπτει γραφικά η κατανομή των συντελεστών απόσβεσης ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Ακολούθως, δεν εφαρμόζεται η ορθή μιγαδική ανάλυση, αλλά μια προσεγγιστική κλασσική ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής και γίνεται διερεύνηση του προκύπτοντος σφάλματος. Όπως προκύπτει, το σφάλμα αυτό είναι πολύ μικρό, και ενθαρρύνεται η εφαρμογή των ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης και σε πραγματικές κατασκευές, όπως αντίστοιχα επιχειρείται και από τους Papageorgiou και Gantes [114] και Παπαγεωργίου και Γαντές [115].

Εναλλακτικά προτείνονται ενιαίοι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης για τη μελέτη των μικτών καθ' ύψος κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα. Πάλι μέσω διβάθμιων κατασκευών και με μια επαναληπτική διαδικασία ελαχιστοποίησης σφάλματος ανάλογη με αυτή των Huang et al. [109], αναζητούνται ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι να μπορούν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά την ορθή απόκριση της μικτής κατασκευής. Τελικά προτείνεται η ανάλυση να γίνεται με τη χρήση δύο ενιαίων συντελεστών απόσβεσης, και η χρήση του κάθε ενός δίνει βέλτιστη προσέγγιση της πραγματικής απόκρισης στο υπόβαθρο και στην υπερκατασκευή, όπως προτείνεται από τους Papageorgiou και Gantes [116] και Παπαγεωργίου και Γαντές [117]. Το τελικό υπολογιστικό κόστος είναι διπλό, πρόκειται όμως για μια απλή διαδικασία η οποία υποστηρίζεται από υφιστάμενα πακέτα λογισμικού και αποφεύγεται η υιοθέτηση συντηρητικών τιμών απόσβεσης.

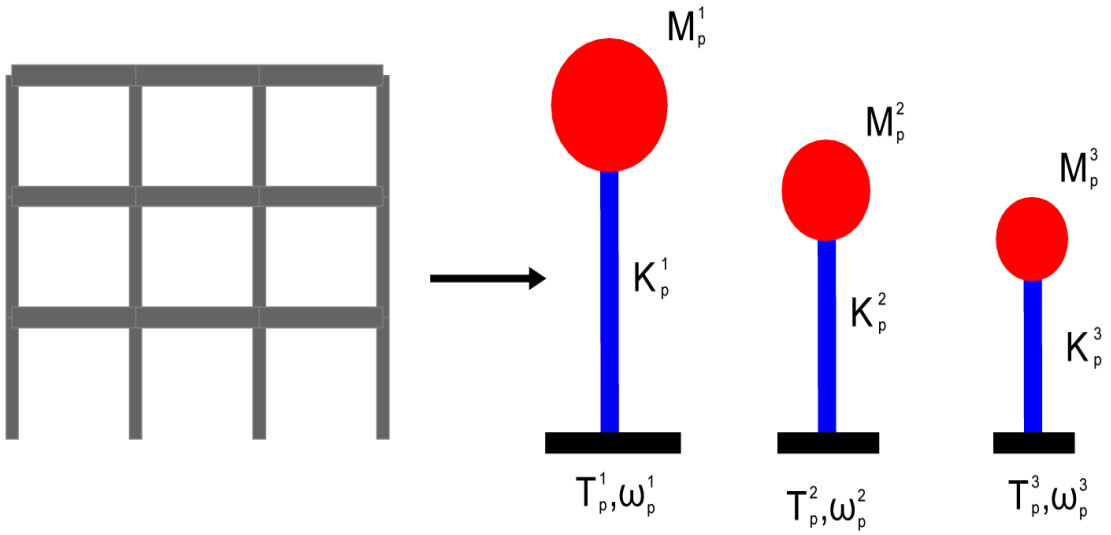
2.8 Ισοδύναμοι διβάθμιοι ταλαντωτές

Η μελέτη των μικτών καθ' ύψος κατασκευών στην παρούσα εργασία γίνεται μέσω ισοδύναμων διβάθμιων κατασκευών. Ο λόγος είναι ότι μελετώντας την κάθε μια κατασκευή ξεχωριστά, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα γενικότερης ισχύος. Αντίθετα, με τη μελέτη να γίνεται σε διβάθμια ισοδύναμα συστήματα τα οποία συνδέονται με συγκεκριμένο τρόπο με τις πολυβάθμιες μικτές κατασκευές, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι δυνατόν να επεκταθούν και να έχουν δυνατότητα γενικότερης εφαρμογής. Επιπλέον, η μελέτη με βάση διβάθμιες κατασκευές μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, ειδικά στις περιπτώσεις ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

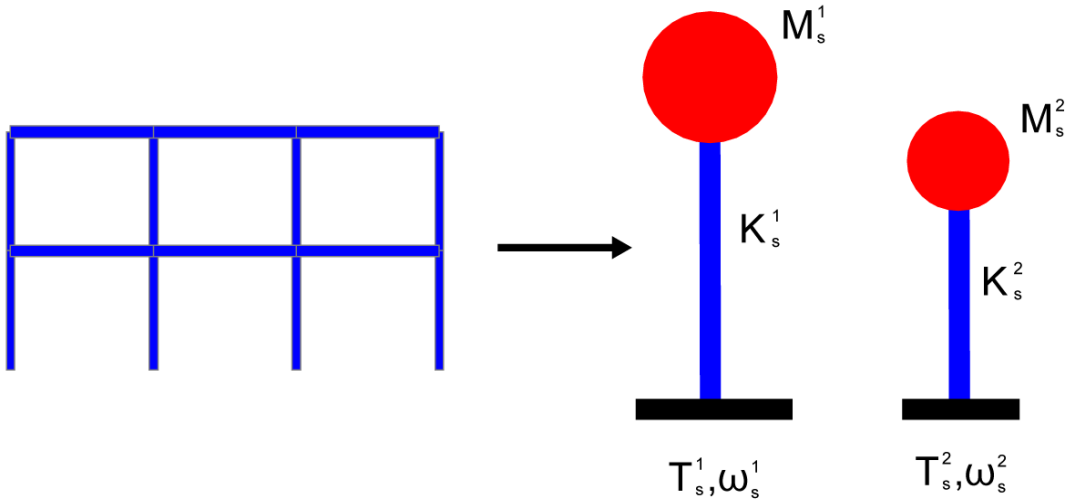
Προτάσεις για το χωρισμό των κατασκευών σε υποσυστήματα έχουν γίνει από πολλούς ερευνητές προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Ενδεικτικές είναι οι προτεινόμενες μέθοδοι ανάλυσης μεγάλων προβλημάτων αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής, αλλά και οι προτάσεις των Biondi και Muscolino [118] και Biondi et al. [119] καθώς και του Leung [120], οι οποίοι προχωρούν στο χωρισμό της κατασκευής σε δύο διακριτά συστήματα λαμβάνοντας υπόψη τη συσχέτιση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών τους, ενώ οι Law et al. [121] εισάγουν και την έννοια της βλάβης στο χωρισμό της κατασκευής σε υποσυστήματα. Μια διαφορετική μέθοδος αντικατάστασης της ανάλυσης πολυβάθμιας κατασκευής με ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή, προτείνεται από τους Sugiyama et al. [122] οι οποίοι μέσω μιας διαδικασίας στατικής συμπύκνωσης καταλήγουν σε μονοβάθμιο ταλαντωτή, τα αποτελέσματα της ανάλυσης του οποίου ακολουθώντας μια αντίστροφη διαδικασία μπορούν να μετατραπούν σε απόκριση της αρχικής πολυβάθμιας κατασκευής.

Στην παρούσα εργασία γίνεται χωρισμός της κατασκευής σε δύο επιμέρους τμήματα, αλλά και το κάθε ένα από αυτά προσομοιώνεται με έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή, όπως υιοθετείται από τους Huang et al. [109]. Συγκεκριμένα, η αρχική πολυβάθμια κατασκευή από σκυρόδεμα και χάλυβα, χωρίζεται στα επιμέρους τμήματά της, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.14. Κριτήριο για το χωρισμό αυτό είναι το κάθε νέο τμήμα που προκύπτει, να είναι αμιγές ως προς τις ιδιότητες του υλικού, και ως εκ τούτου να μην προκύπτει καμία ανομοιομορφία στην απόσβεση και στην ελαστοπλαστική του συμπεριφορά. Εν τέλει δηλαδή, προκύπτουν δύο νέες πολυβάθμιες κατασκευές, μία που αποτελείται εξ' ολοκλήρου από σκυρόδεμα, και μια που αποτελείται εξ'

ολοκλήρου από χάλυβα. Η κάθε μια από τις κατασκευές αυτές, έχει μητρώο μάζας $\mathbf{M}_p$ και $\mathbf{M}_s$, και μητρώο δυσκαμψίας $\mathbf{K}_p$ και $\mathbf{K}_s$, συμβατά με τη διαμόρφωση της αρχικής κατασκευής. Ακολούθως, στην κάθε μια από τις δύο νέες κατασκευές, εκτελείται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση όπως περιγράφεται από την εξίσωση (2.7). Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι ιδιομορφές, και τα χαρακτηριστικά τους σε όρους ιδιοπεριόδων και ιδιοσυχνοτήτων, καθώς και ιδιομορφικών μαζών και δυσκαμψιών, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.16 για το τμήμα από σκυρόδεμα και στην Εικ. 2.17 για το τμήμα από χάλυβα. Η αδιαστατοποίηση των ιδιοδιανυσμάτων γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε στον ανώτερο βαθμό ελευθερίας του κάθε τμήματος, το ιδιοδιάνυσμα να λαμβάνει την τιμή ένα.



Εικ. 2.16: Τμήμα από σκυρόδεμα και ιδιομορφές

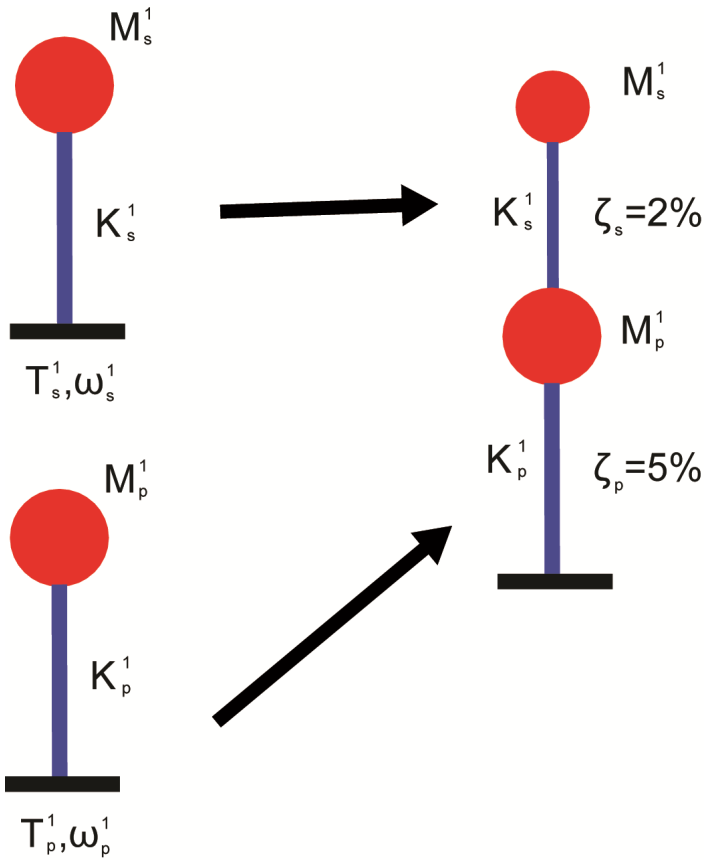


Εικ. 2.17: Τμήμα από χάλυβα και ιδιομορφές

Η μετατροπή της πολυβάθμιας κατασκευής στην ισοδύναμη διβάθμια βασίζεται στην υπόθεση ότι το κάθε ένα από τα τμήματα μπορεί να αντιπροσωπευθεί επαρκώς από την πρώτη του ιδιομορφή. Η υπόθεση αυτή με τη σειρά της, βασίζεται στο ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής στη συνολική απόκριση της κάθε κατασκευής. Το ποσοστό αυτό, προκειμένου για επίπεδα πλαίσια είναι αρκετά μεγάλο, ειδικά όταν υπάρχει κανονική κατανομή καθ' ύψος της μάζας και της δυσκαμψίας, οπότε και η αρχική υπόθεση θεωρείται βάσιμη.

Προκειμένου να γίνει η κατασκευή του διβάθμιου ταλαντωτή, τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των πρώτων ιδιομορφών του υποβάθρου και της υπερκατασκευής, γίνονται δυναμικά χαρακτηριστικά της στάθμης p και της στάθμης s του διβάθμιου ταλαντωτή, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.18. Η αντιστοιχία με την αρχική πολυβάθμια κατασκευή, πέρα από την αντιστοιχία ιδιομορφικών-δυναμικών χαρακτηριστικών, διατηρείται και μέσω της αντιστοιχίας των συντελεστών απόσβεσης. Έτσι, στη στάθμη p του διβάθμιου ταλαντωτή γίνεται η παραδοχή ότι η τιμή του συντελεστή απόσβεσης είναι $\zeta_p = 5\%$, όπως στο υπόβαθρο της αρχικής πολυβάθμιας κατασκευής, και στη στάθμη s του διβάθμιου ταλαντωτή γίνεται η παραδοχή ότι η τιμή του συντελεστή απόσβεσης είναι $\zeta_s = 2\%$, όπως στην υπερκατασκευή της αρχικής πολυβάθμιας κατασκευής. Προκύπτει έτσι ένας ισοδύναμος διβάθμιος ταλαντωτής ο οποίος έχει και αυτός μη κανονική κατανομή της απόσβεσης, όπως και η αρχική κατασκευή, δηλαδή δεν ακυρώνεται η ανομοιομορφία της απόσβεσης.

Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η ανάλυση του ισοδύναμου ταλαντωτή αντί της αρχικής πολυβάθμιας κατασκευής. Το κέρδος είναι ότι η μελέτη του σφάλματος της αποσύζευξης και των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας γίνεται στο διβάθμιο ταλαντωτή και όχι σε κάθε μια μικτή καθ' ύψος κατασκευή. Επιτρέπεται έτσι η εξαγωγή συμπερασμάτων με δυνατότητα γενικότερης εφαρμογής με αντιστοίχιση της συμπεριφοράς του διβάθμιου ταλαντωτή σε συμπεριφορά πολυβάθμιων κατασκευών.



Εικ. 2.18: Κατασκευή διβάθμιου ταλαντωτή

Όπως φαίνεται και στα επόμενα κεφάλαια, όταν πρόκειται να ελεγχθούν σε πολυβάθμιες κατασκευές τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη διβάθμιων ταλαντωτών, ακολουθείται η πορεία που περιγράφεται παραπάνω προκειμένου σε αυτές να γίνει η αντιστοίχιση και να προκύψουν συμπεράσματα για το σφάλμα αποσύζευξης ή για τα μεγέθη απόσβεσης του διβάθμιου ταλαντωτή. Τα συμπεράσματα αυτά έπειτα επεκτείνονται στην αρχική κατασκευή. Ακολουθείται δηλαδή μια πορεία διαφορετική από τη συνηθισμένη όσον αφορά τη χρήση των ισοδύναμων ταλαντωτών όπως αυτή γίνεται στη βιβλιογραφία. Ενώ δηλαδή είθισται να γίνεται η ανάλυση μιας διβάθμιας κατασκευής και τα αποτελέσματα της απόκρισής της να επεκτείνονται κατάλληλα στην αρχική πολυβάθμια κατασκευή, στην παρούσα εργασία η πολυβάθμια κατασκευή αντιστοιχείται σε ένα διβάθμιο ταλαντωτή στον οποίο έχουν ήδη αποδοθεί όχι μεγέθη απόκρισης αλλά μεγέθη σφάλματος αποσύζευξης και ισοδύναμης απόσβεσης, και αυτά υιοθετούνται ως χαρακτηριστικά της αρχικής πολυβάθμιας κατασκευής.

2.9 Σεισμικές διεγέρσεις

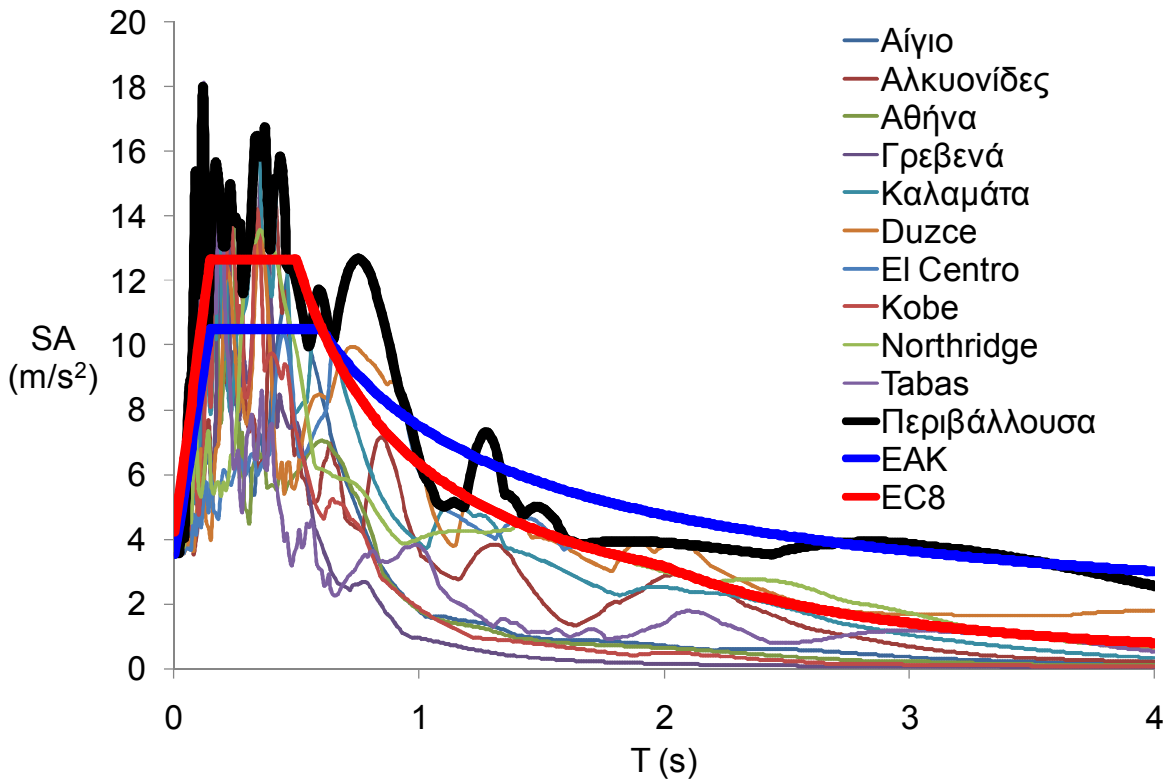
Οι αναλύσεις των μικτών καθ' ύψος κατασκευών, είτε των αρχικών πολυβάθμιων είτε των ισοδύναμων διβάθμιων, στην παρούσα εργασία γίνονται αριθμητικά, με αναλύσεις χρονικής ολοκλήρωσης. Η προσέγγιση αυτή, έχει μεν το μειονέκτημα ότι δεν είναι πρόσφορη για την εξαγωγή συμπερασμάτων σε αναλυτική μορφή, επιτρέπει όμως την εύκολη θεώρηση σεισμικών καταγραφών ως διεγέρσεων, πράγμα που καταλήγει σε ρεαλιστικότερη φόρτιση των υπό μελέτη κατασκευών. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα κριτήρια επιλογής σεισμικών καταγραφών προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε αναλύσεις χρονοϊστορίας, ενδεικτικά αναφέρεται η εργασία των Katsanos et al. [123] οι οποίοι αναφέρουν τις επικρατούσες μεθόδους επιλογής επιταχυνσιογραφημάτων με σκοπό τη χρήση τους σε δυναμική ανάλυση κατασκευών.

Στην παρούσα εργασία οι σεισμικές αναλύσεις γίνονται με μια βάση 10 επιταχυνσιογραφημάτων, 5 ελληνικών και 5 διεθνών, από του ακόλουθους σεισμούς:

- Σεισμός Αιγίου, 1995
- Σεισμός Αλκυονίδων, 1981
- Σεισμός Αθήνας, 1999
- Σεισμός Γρεβενών, 1995
- Σεισμός Καλαμάτας, 1986
- Σεισμός Duzce, 1999
- Σεισμός El Centro, 1940
- Σεισμός Kobe, 1995
- Σεισμός Northridge, 1994
- Σεισμός Tabas, 1978

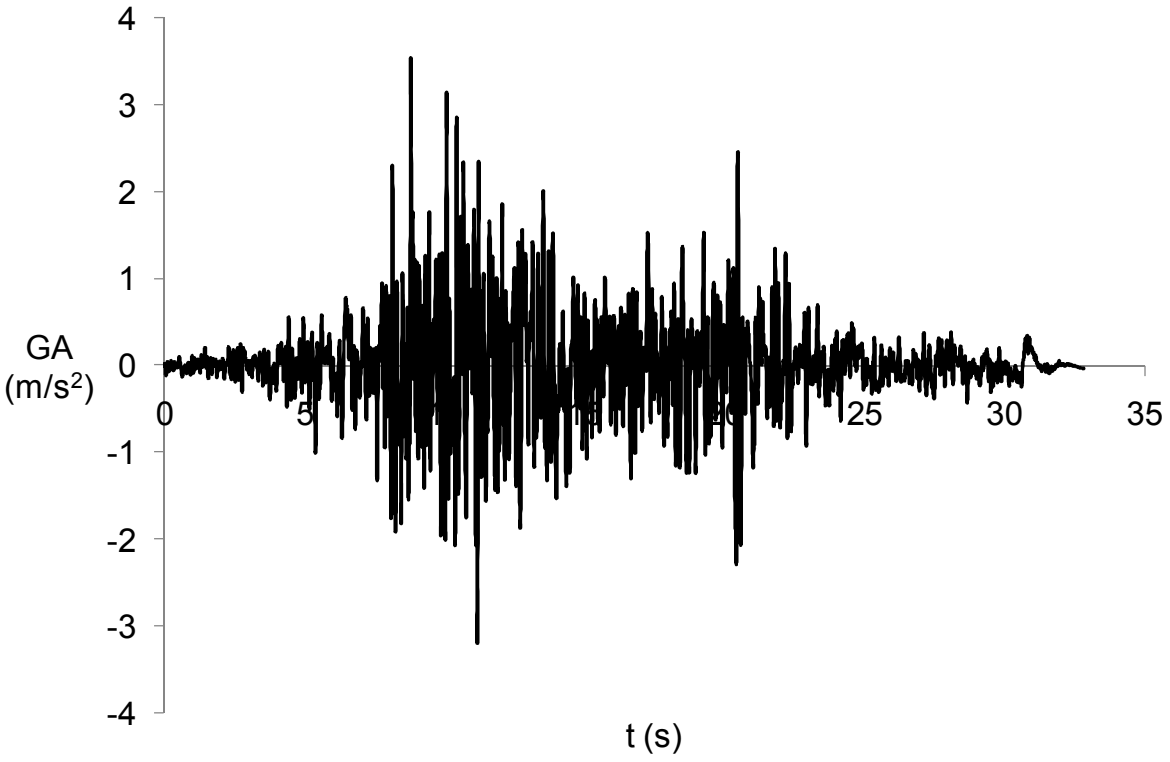
Η επιλογή έγινε με κριτήριο το φάσμα των καταγραφών. Συγκεκριμένα, απαιτείται συνολικά τα φάσματα απόκρισης των καταγραφών που χρησιμοποιούνται να υπερκαλύπτουν τα κανονιστικά φάσματα. Η απαίτηση αυτή καλύπτεται επαρκώς από τις 10 παραπάνω διεγέρσεις. Οι καταγραφές αυτές αρχικά κλιμακώνονται ώστε να έχουν μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.36g. Η θεώρηση αυτή είναι αντίστοιχη με την πρόβλεψη μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης που κάνει ο ΕΑΚ [2] για κατασκευές σε ζώνη ΙΙΙ, κατασκευές που βρίσκονται δηλαδή σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Ακολούθως κατασκευάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης, και η σύγκριση τους, καθώς και της περιβάλλουσάς τους, για απόσβεση ίση με 2% με τα ελαστικά κανονιστικά φάσματα κατά ΕΑΚ [2] και EC8 [3] φαίνεται στην Εικ. 2.19, σε όρους

φασματικών επιταχύνσεων (spectral acceleration-SA). Ακολουθούν στις Εικ. 2.20 ως 2.39 οι χρονοϊστορίες των καταγραφών σε όρους εδαφικής επιτάχυνσης (ground acceleration-GA), και τα ελαστικά φάσματα απόκρισης της κάθε μιας για αποσβέσεις 5% και 2% σε όρους φασματικών επιταχύνσεων.

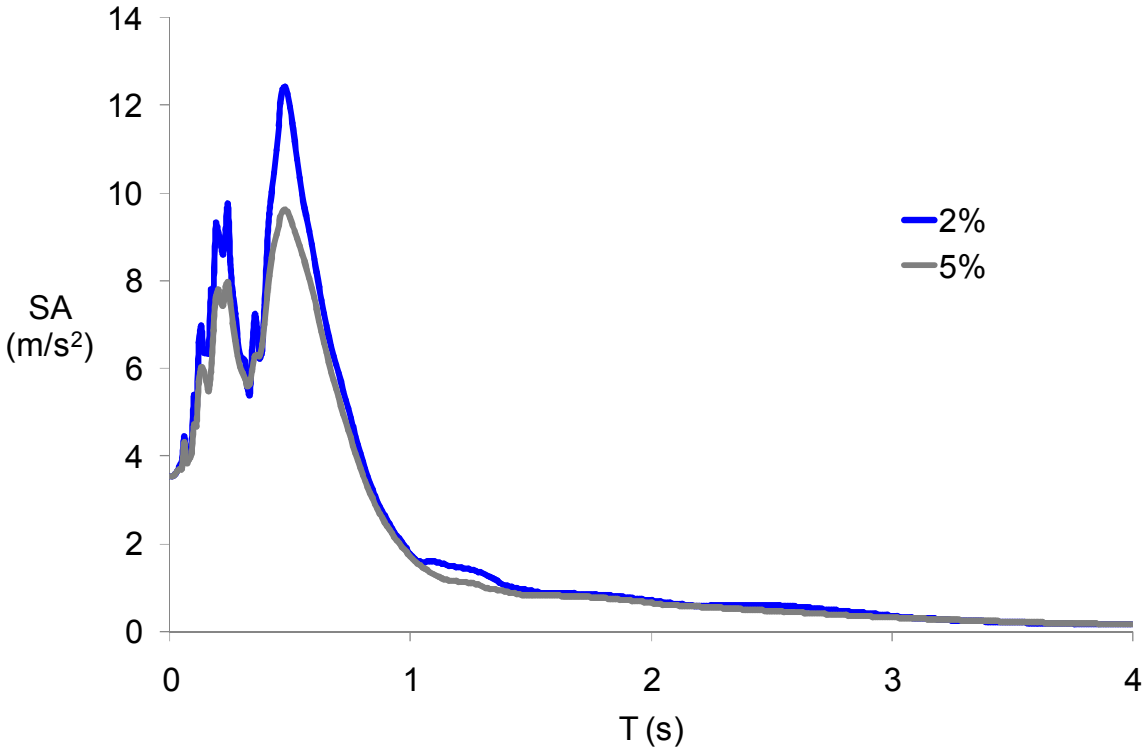


Εικ. 2.19: Σύγκριση κανονιστικών φασμάτων και φασμάτων καταγραφών για απόσβεση 2%

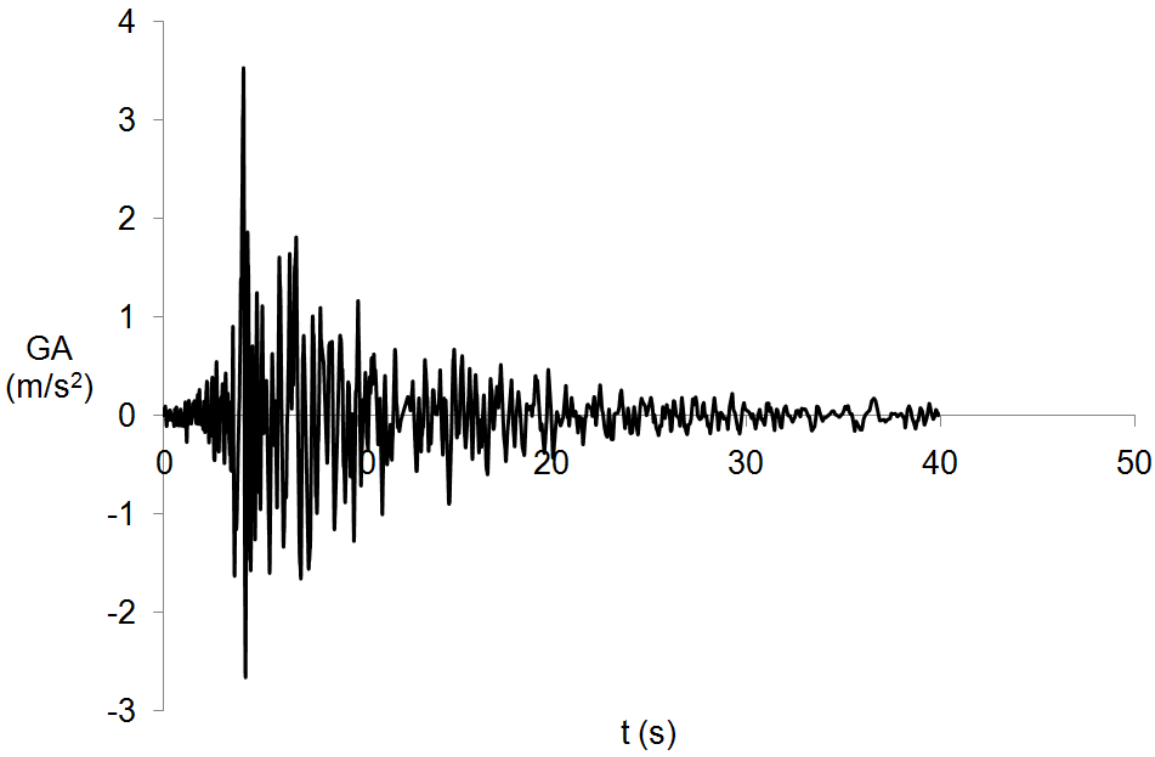
Από τις παραπάνω καταγραφές, καμία από μόνη της δεν είναι δυνατόν να υπερκαλύψει συνολικά τα κανονιστικά φάσματα χωρίς να γίνει τροποποίησή της. Η τροποποίηση όμως των φυσικών καταγραφών ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Επίσης, θεωρείται σκόπιμο να γίνει χρήση φυσικών καταγραφών, με μόνη αλλοίωση την κλιμάκωσή τους, και όχι τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, τα οποία δεν είναι ρεαλιστικές διεγέρσεις. Έτσι χρησιμοποιούνται οι 10 κλιμακωμένες καταγραφές, τα φάσματα των οποίων έχουν περιβάλλουσα η οποία υπερκαλύπτει επαρκώς τα κανονιστικά φάσματα όπως φαίνεται στην Εικ. 2.19. Η υπερκάλυψη αυτή δεν καλύπτει όλο το φάσμα των περιόδων, ειδικά στην περίπτωση του φάσματος του ΕΑΚ [2], αλλά είναι επαρκής σε ένα μεγάλο εύρος, το οποίο καλύπτει τις ιδιοπεριόδους των περισσότερων κτιριακών κατασκευών.



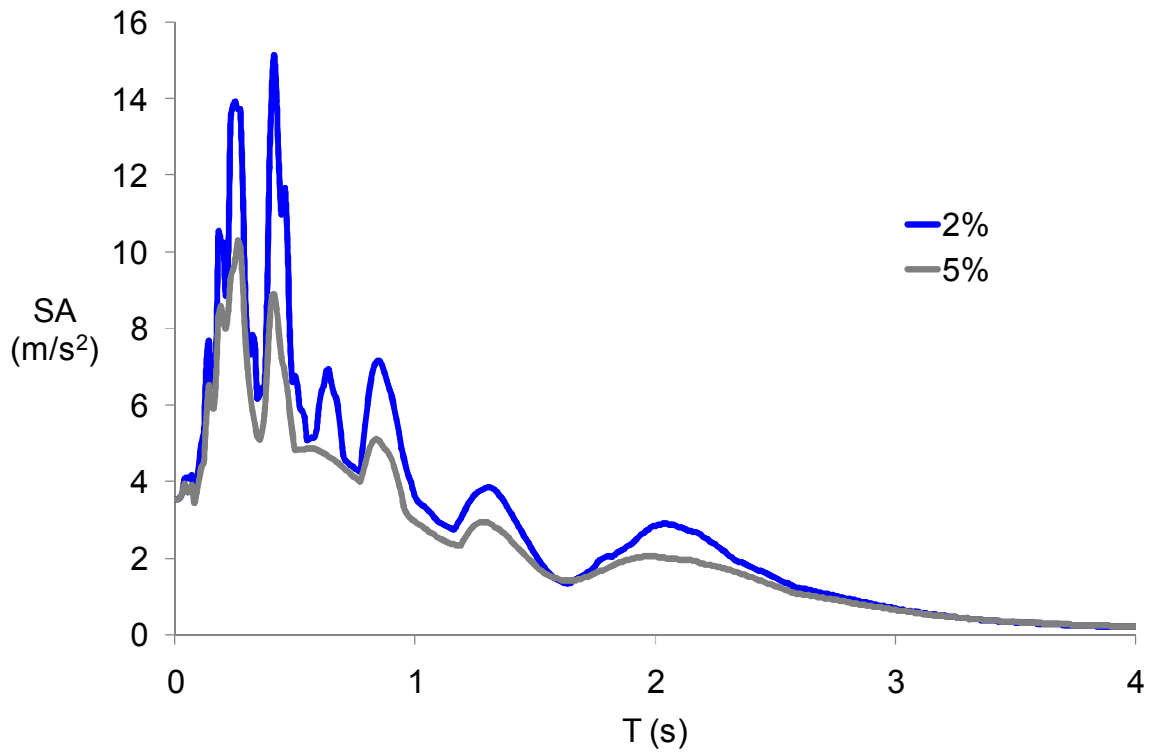
Εικ. 2.20: Καταγραφή από το σεισμό του Αιγίου



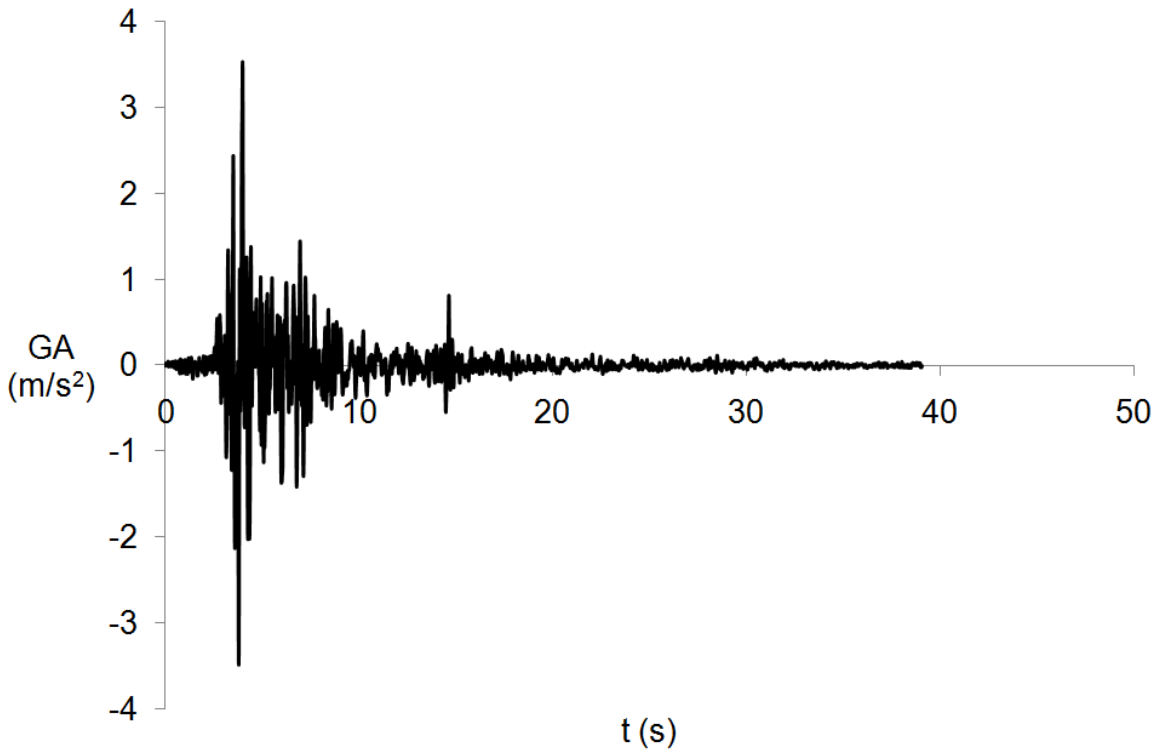
Εικ. 2.21: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή του Αιγίου



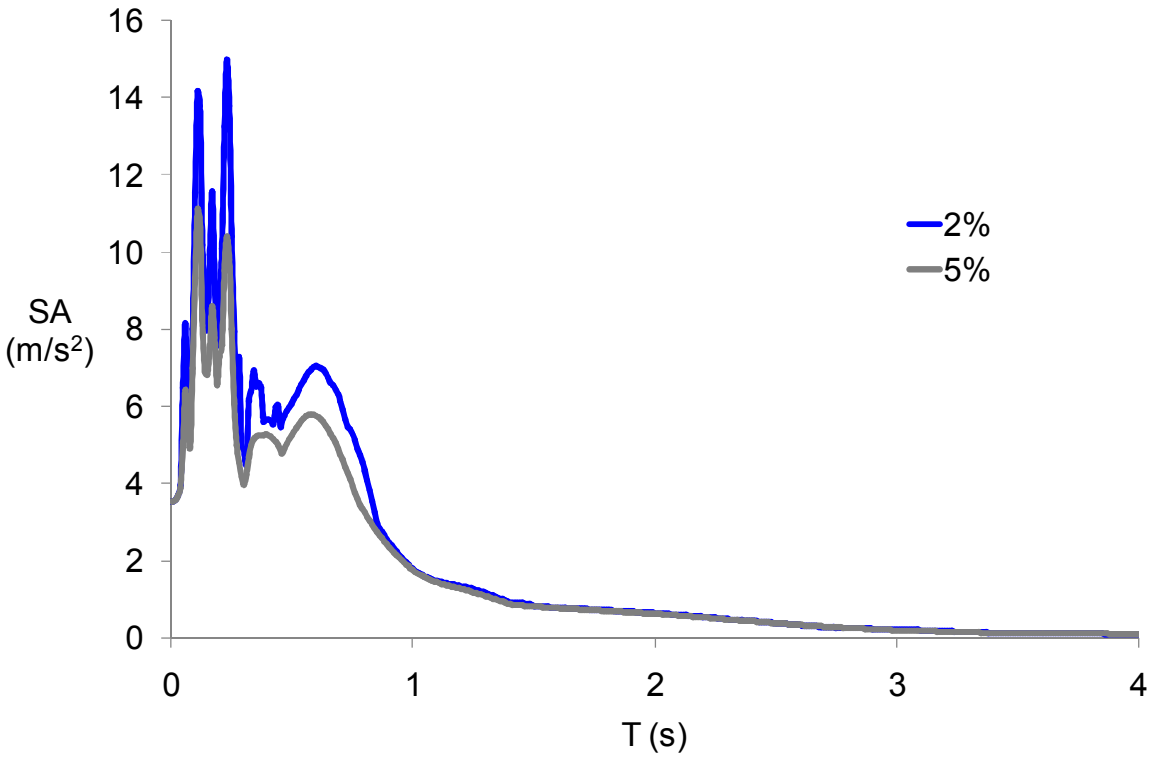
Εικ. 2.22: Καταγραφή από το σεισμό των Αλκυονίδων



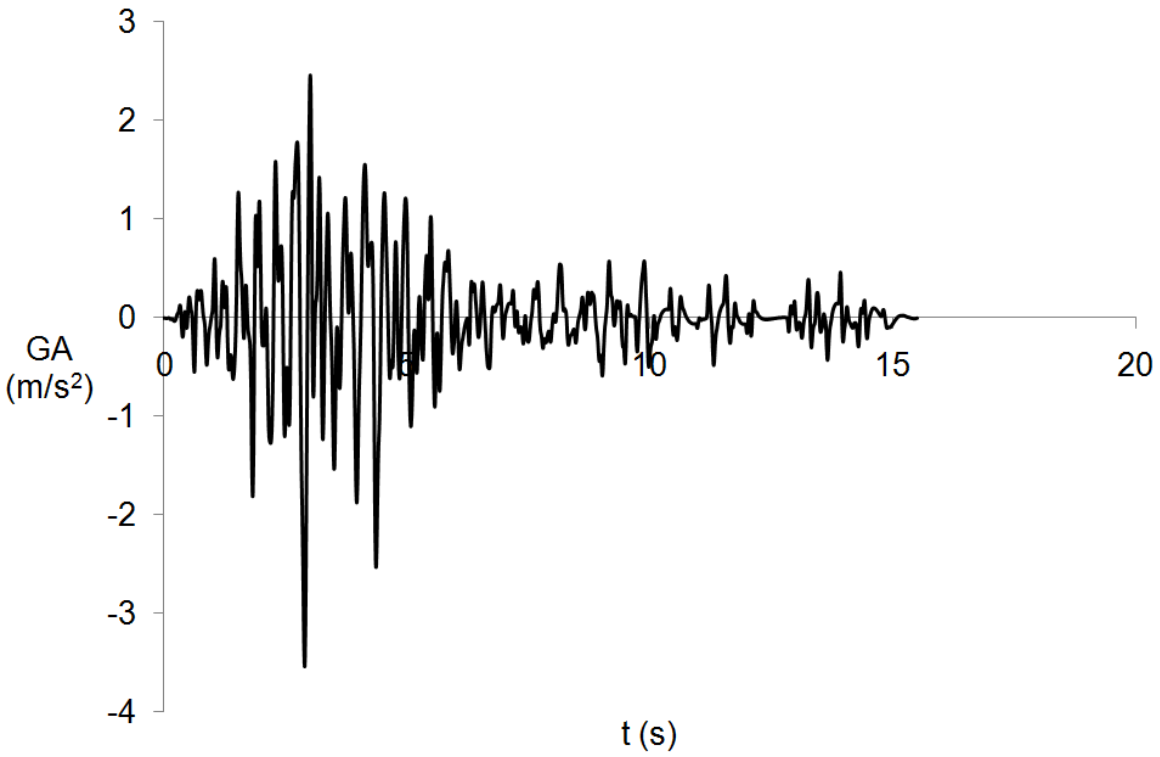
Εικ. 2.23: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή των Αλκυονίδων



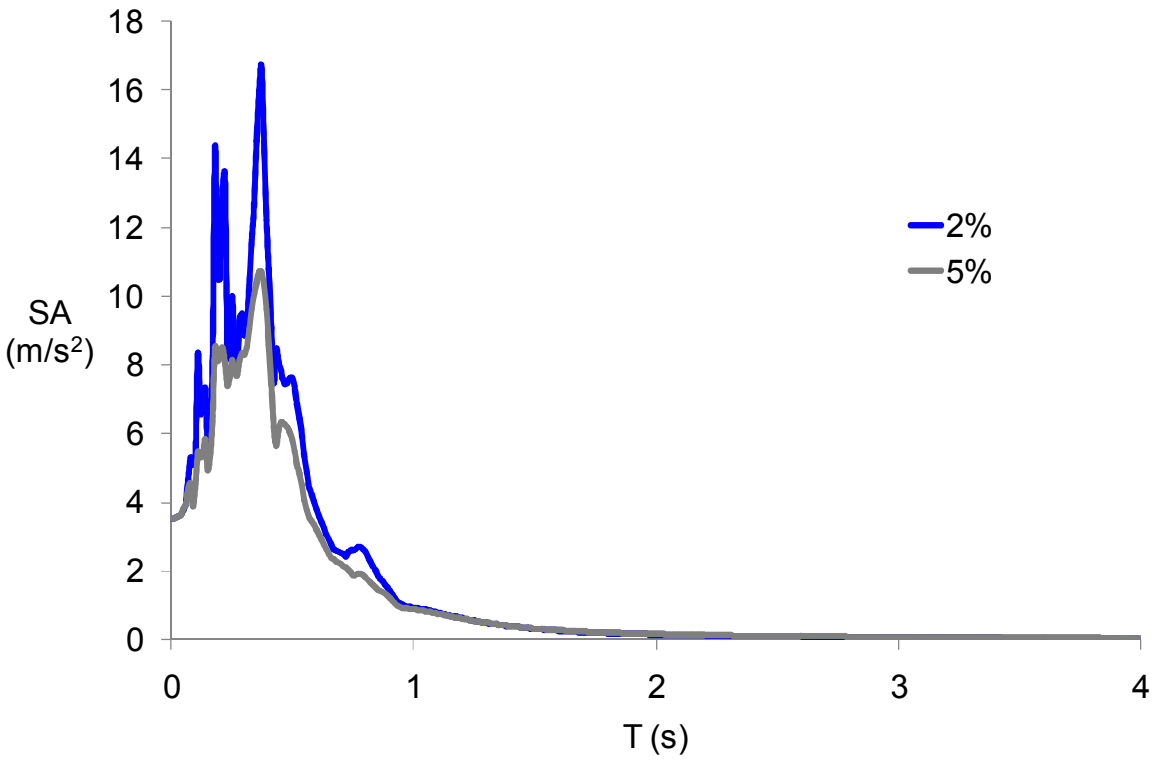
Εικ. 2.24: Καταγραφή από το σεισμό της Αθήνας



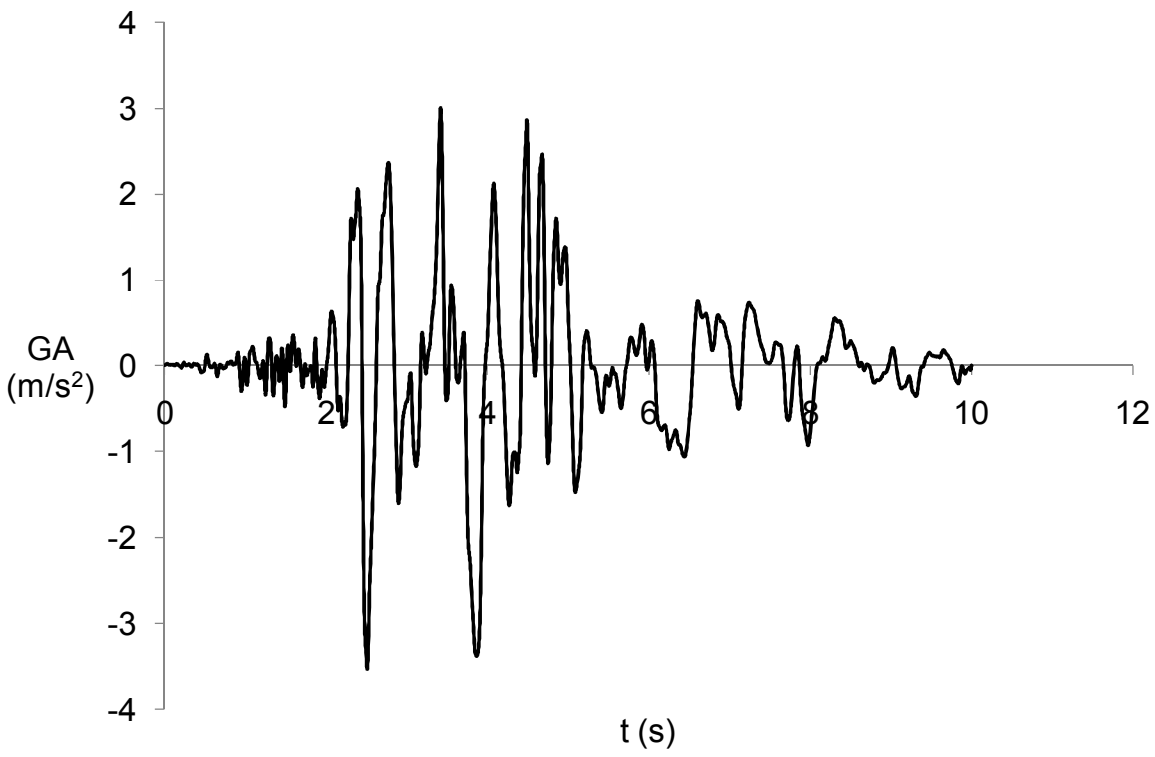
Εικ. 2.25: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή της Αθήνας



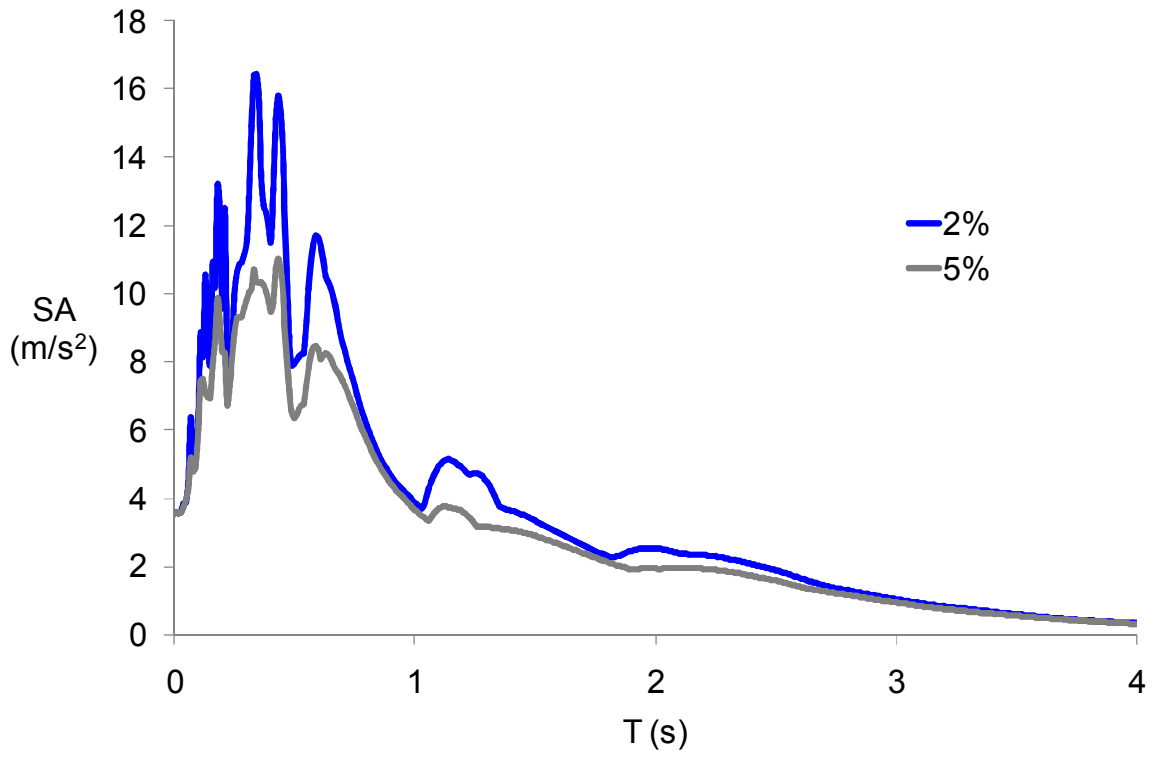
Εικ. 2.26: Καταγραφή από το σεισμό των Γρεβενών



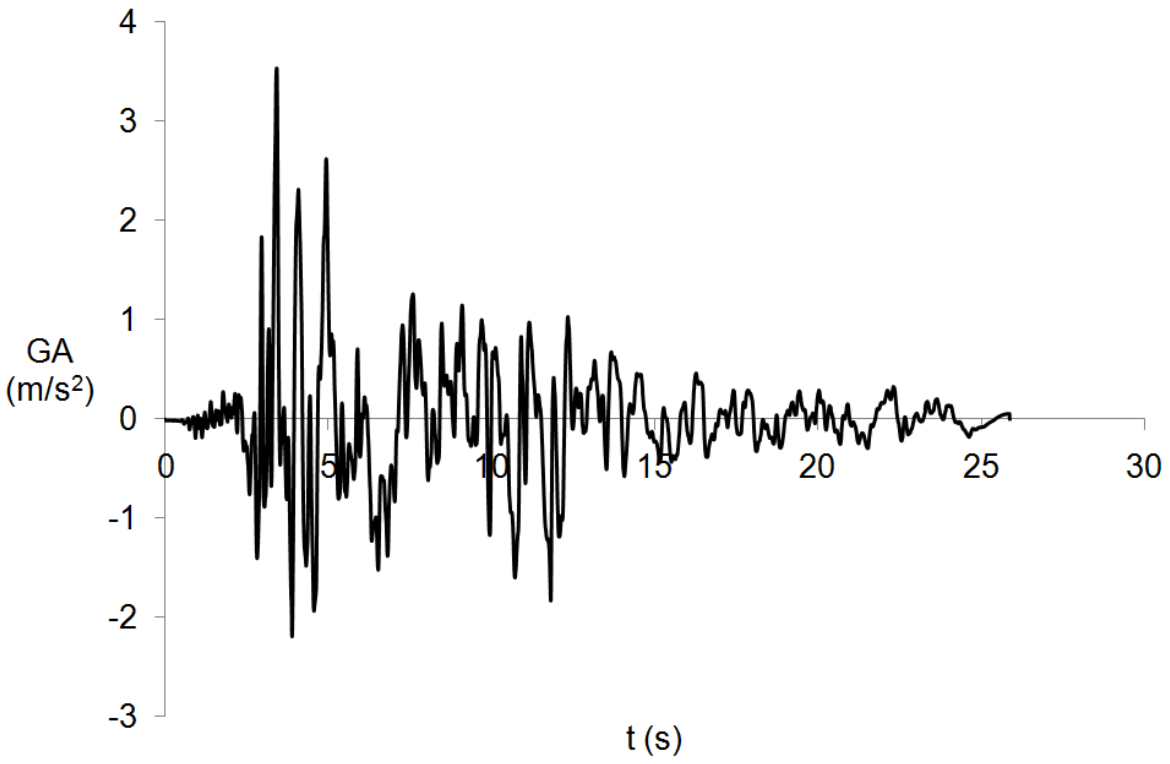
Εικ. 2.27: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή των Γρεβενών



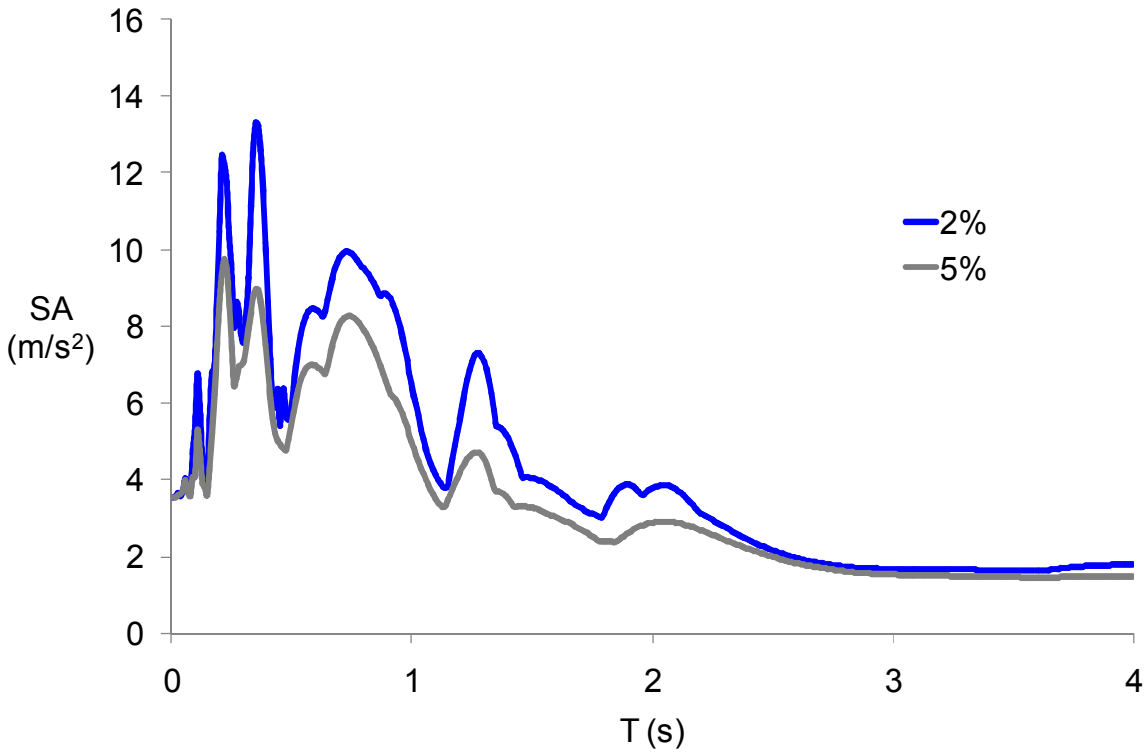
Εικ. 2.28: Καταγραφή από το σεισμό της Καλαμάτας



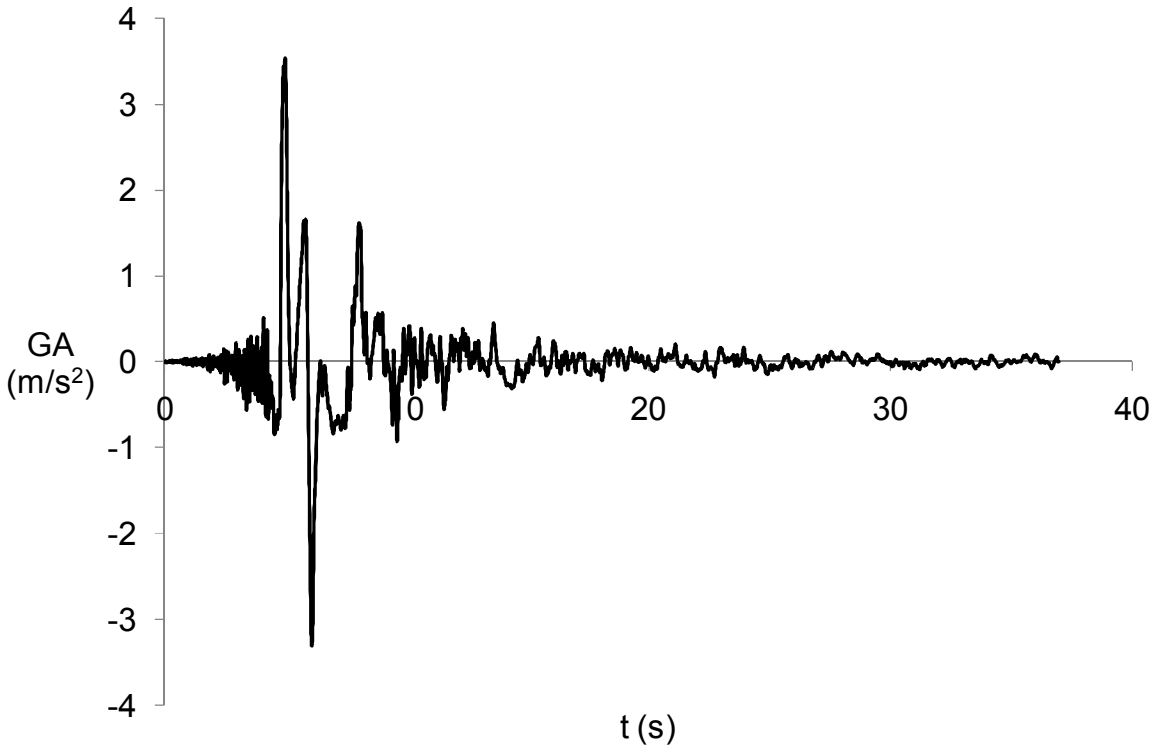
Εικ. 2.29: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή της Καλαμάτας



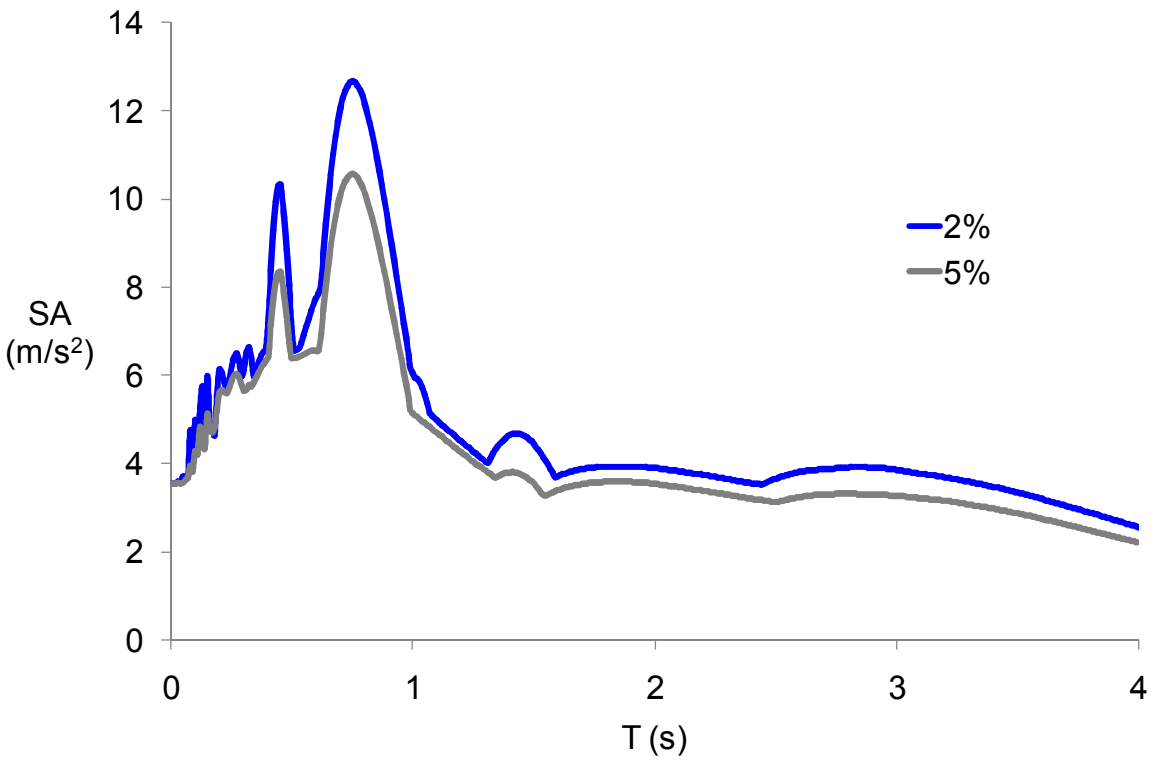
Εικ. 2.30: Καταγραφή από το σεισμό του Duzce



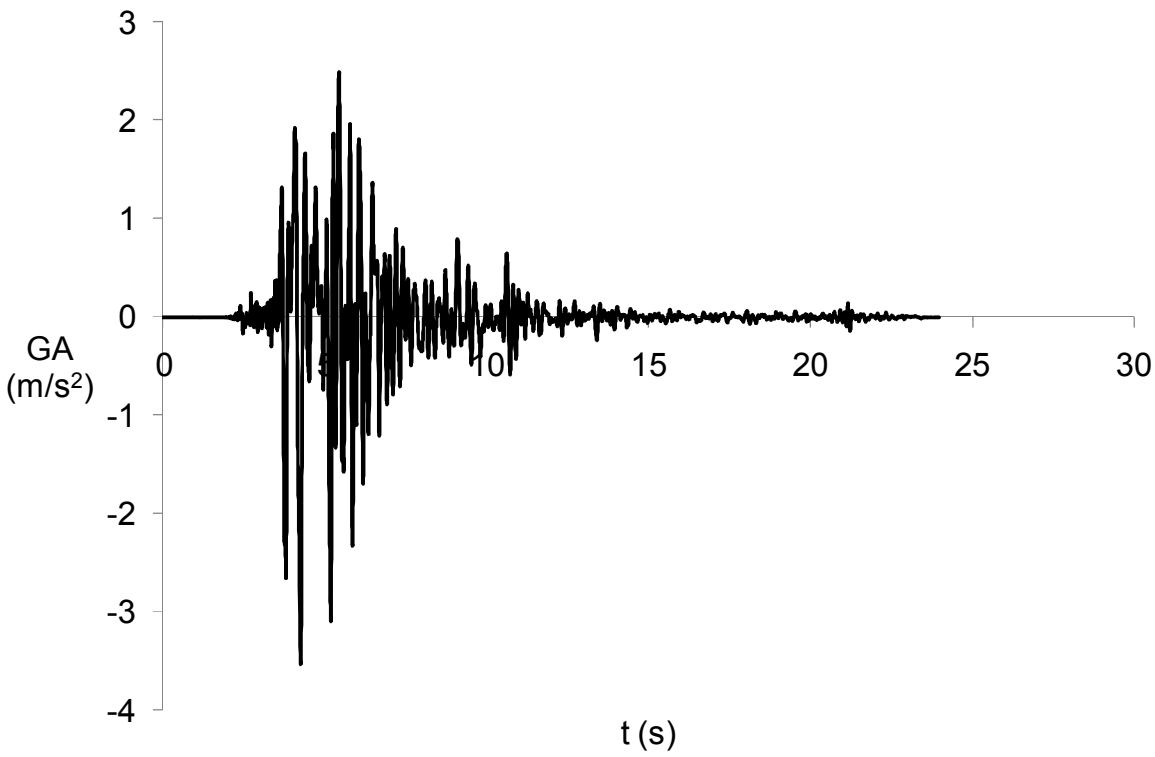
Εικ. 2.31: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή του Duzce



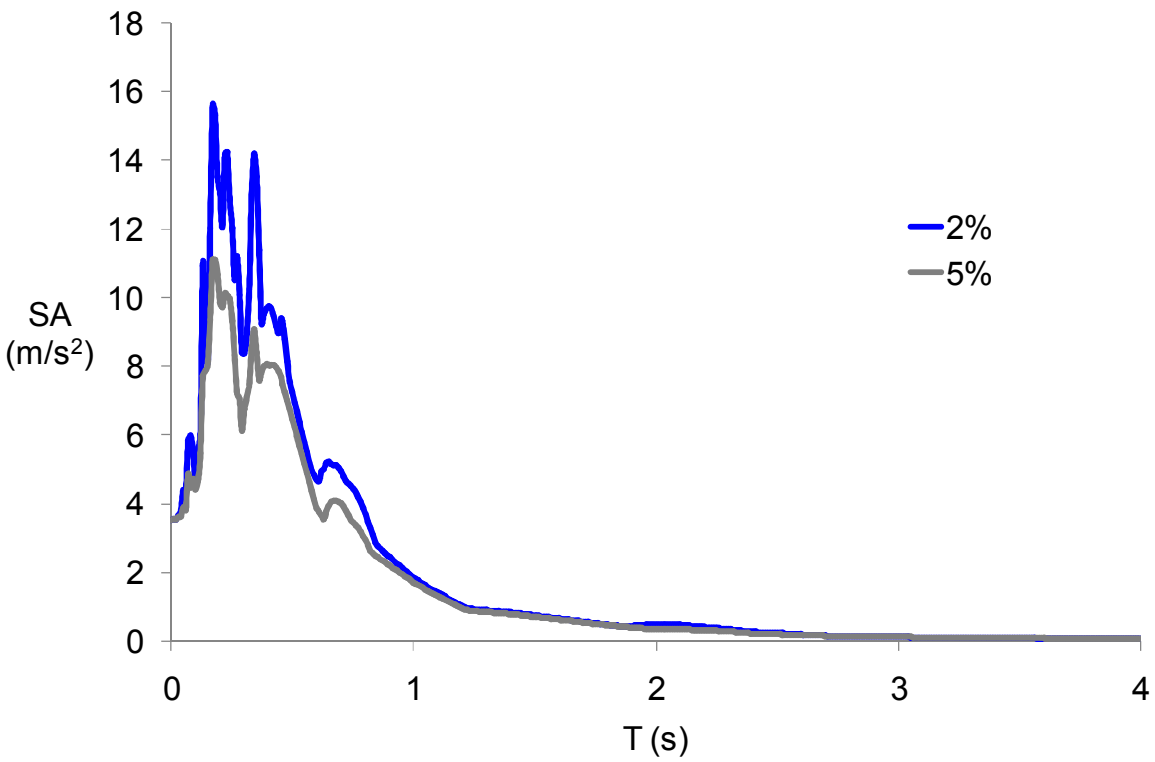
Εικ. 2.32: Καταγραφή από το σεισμό του El Centro



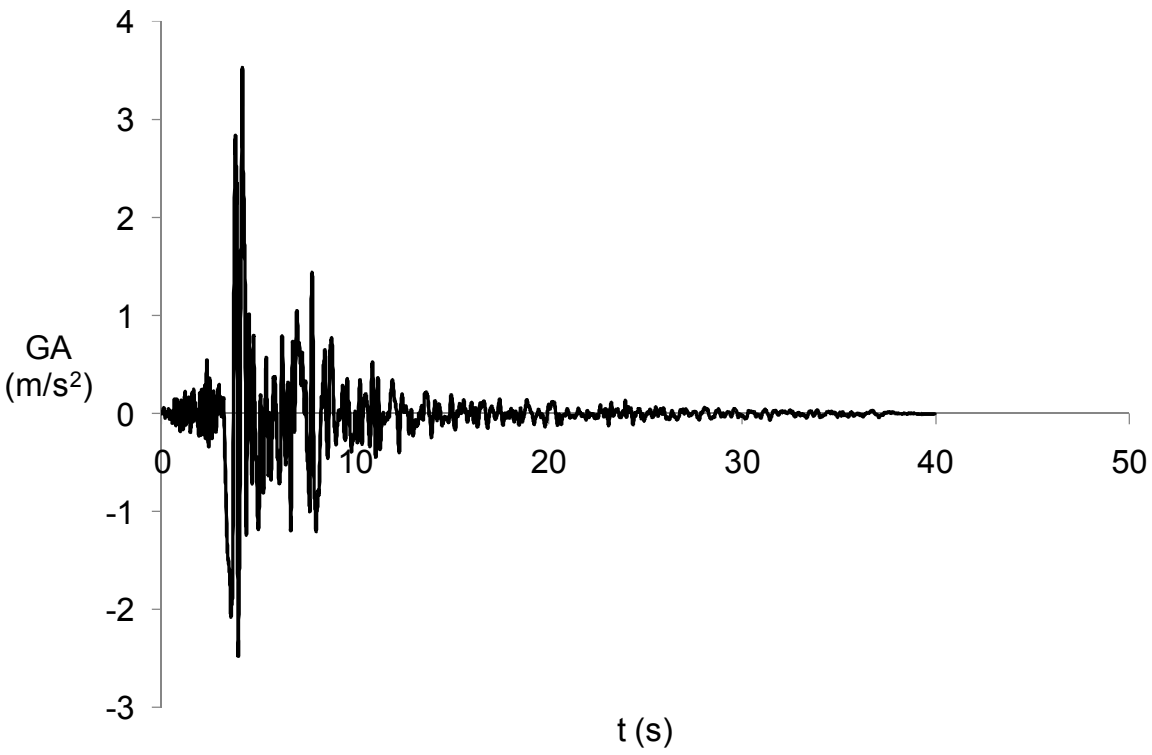
Εικ. 2.33: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή του El Centro



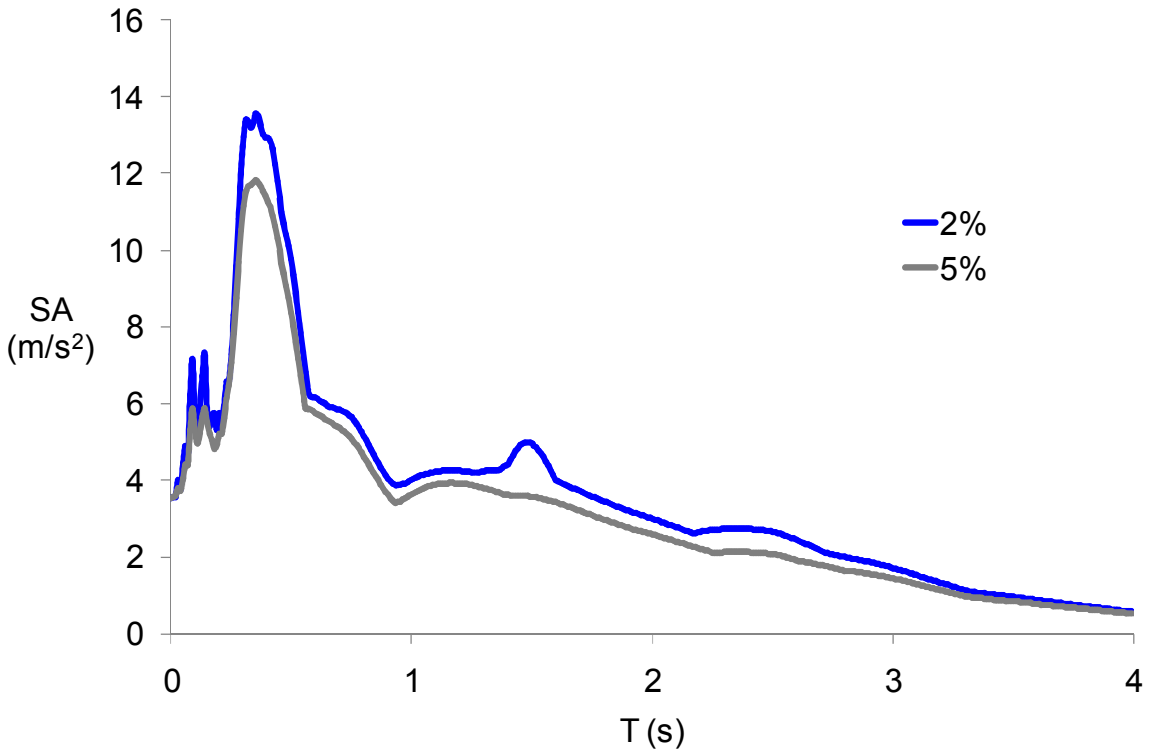
Εικ. 2.34: Καταγραφή από το σεισμό του Kobe



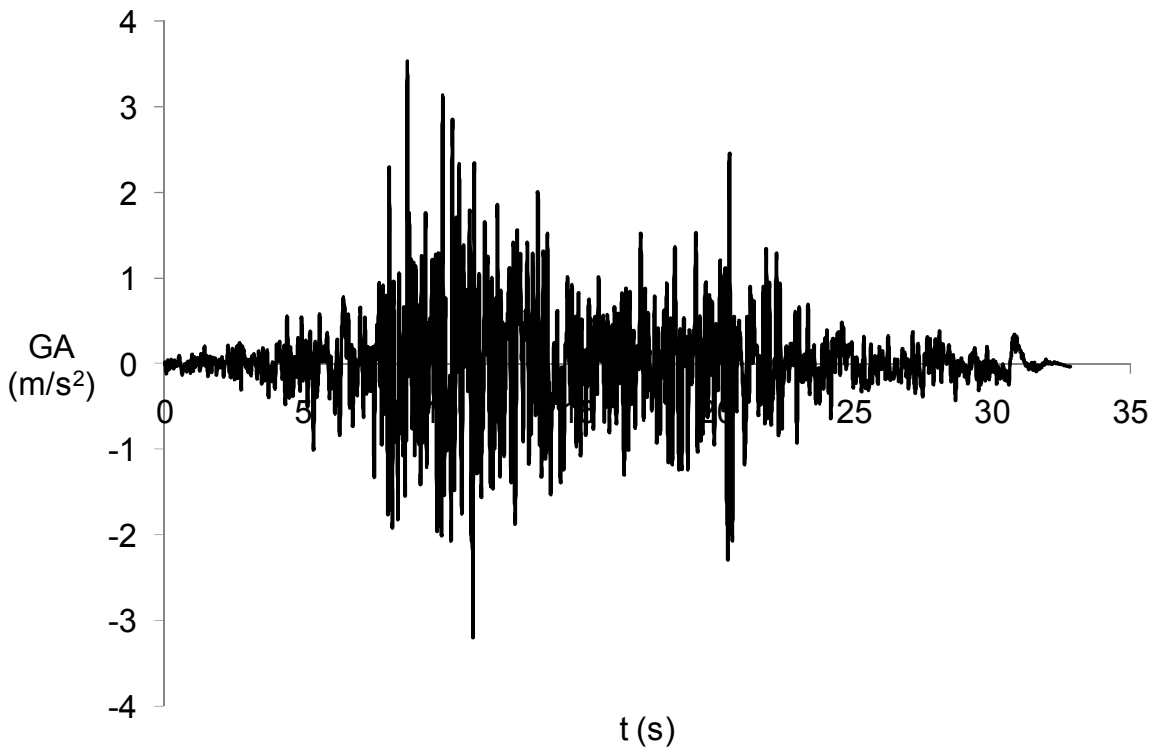
Εικ. 2.35: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή του Kobe



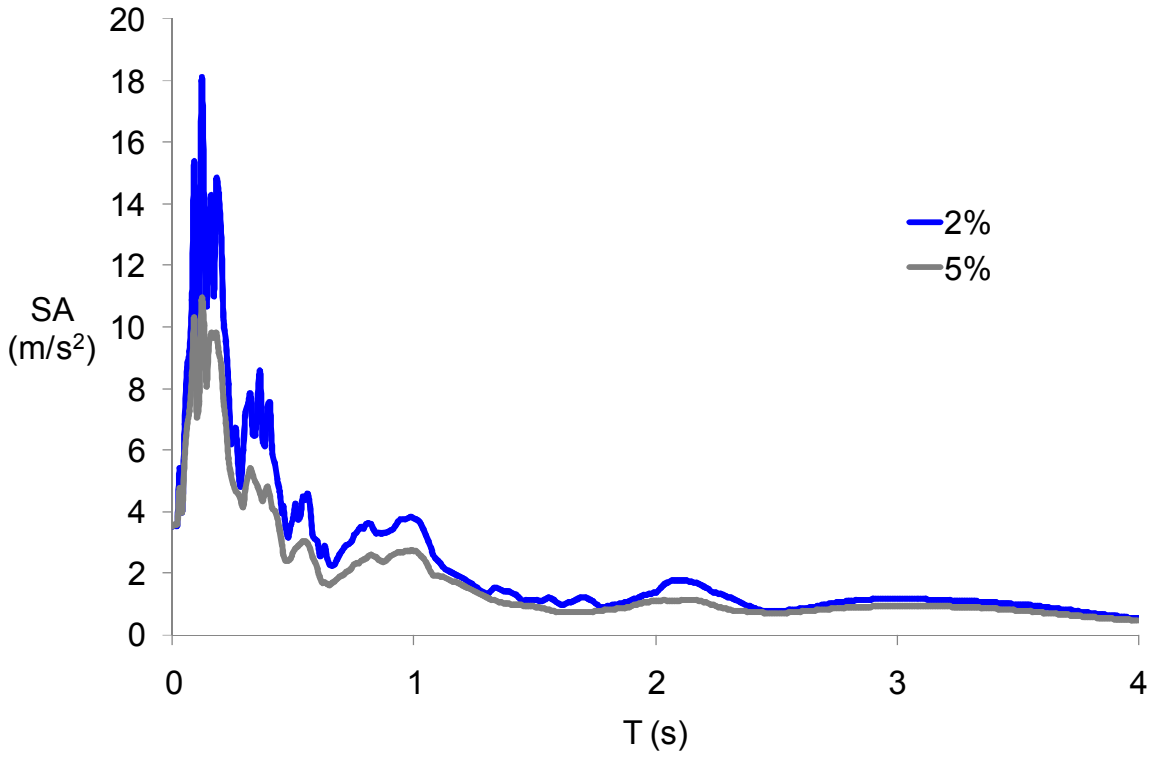
Εικ. 2.36: Καταγραφή από το σεισμό του Northridge



Εικ. 2.37: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή του Northridge



Εικ. 2.38: Καταγραφή από το σεισμό του Tabas



Εικ. 2.39: Φάσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή για τιμές απόσβεσης 5% και 2% από την καταγραφή του Tabas

3

Διαδικασία αποσύζευξης μικτών κατασκευών

3.1 Γενικά

Η μελέτη των μικτών κατασκευών, παρουσιάζει πολλές δυσκολίες, όποιος τύπος ανάλυσης και αν επιλεγεί. Για το λόγο αυτό έχει επινοηθεί η διαδικασία της αποσύζευξης (decoupling) στην ανάλυσή τους, με σκοπό να υπερκεραστούν κάποιες από αυτές τις δυσκολίες. Η μικτή κατασκευή πλέον δεν αναλύεται ως ενιαία, αλλά χωρίζεται σε δύο τμήματα, ένα το οποίο αποτελείται αμιγώς από σκυρόδεμα (υποκατασκευή) και ένα που αποτελείται αμιγώς από χάλυβα (υπερκατασκευή). Η εδαφική διέγερση εισάγεται στη βάση της υποκατασκευής και λαμβάνεται η απόκρισή της σε όρους απολύτων επιταχύνσεων σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας, συμπεριλαμβανομένης και της θέσης έδρασης της υπερκατασκευής. Η απόκριση στη θέση αυτή εισάγεται ως διέγερση στη βάση της υπερκατασκευής, η οποία αναλύεται ξεχωριστά.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αρχική κατασκευή, η οποία λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής της απόσβεσης και λόγω των διαφορετικών ελαστοπλαστικών συμπεριφορών των δύο υλικών, παρουσιάζει προβλήματα στην ανάλυση, να μετατρέπεται σε δύο κατασκευές, οι οποίες είναι κανονικές και όσον αφορά την απόσβεσή τους και όσον αφορά το νόμο υλικού. Αυτό σημαίνει ότι η ανάλυσή τους για σεισμική φόρτιση μπορεί να γίνει με συνήθεις μεθόδους. Το υπολογιστικό κόστος βέβαια είναι διπλό, αυτό όμως με τα σημερινά μέσα δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Επίσης, δεδομένου ότι πολλές φορές διαφορετικές μελετητικές ομάδες αναλαμβάνουν το κάθε τμήμα μιας κατασκευής, η αποσύζευξη συνάδει και με τον εκ των πραγμάτων διαχωρισμό της κατασκευής σε τμήματα για τον αντισεισμικό της σχεδιασμό.

Το πρόβλημα με τη διαδικασία της αποσύζευξης είναι ότι δεν αναλύεται η πραγματική κατασκευή αλλά δύο νέες κατασκευές, οι οποίες απλά έχουν τα ίδια δυναμικά χαρακτηριστικά με το τμήμα της αρχικής κατασκευής από το οποίο προήλθαν. Το

μόνο που τις συνδέει μεταξύ τους είναι ότι η απόκριση της πρώτης είναι η διέγερση της δεύτερης, πράγμα που σημαίνει ότι αγνοείται σε μεγάλο βαθμό η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Έτσι, εισάγεται σφάλμα στην ανάλυση, το οποίο αναλόγως με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και της διέγερσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο.

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια διερεύνηση του σφάλματος που προκύπτει από την αποσύζευξη ελαστικών και ελαστοπλαστικών κατασκευών. Η διερεύνηση αυτή γίνεται σε συνάρτηση με την εδαφική διέγερση, και με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, δηλαδή τις μάζες και τις δυσκαμψίες του κάθε τμήματος, και την ελαστική ή ελαστοπλαστική τους συμπεριφορά. Σκοπός είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για το σφάλμα της αποσύζευξης, τα οποία να επιτρέπουν σε προκαταρκτικό ακόμα στάδιο της μελέτης να αποφασιστεί αν η ανάλυση θα γίνει με αποσυζευγμένο ή συζευγμένο τρόπο.

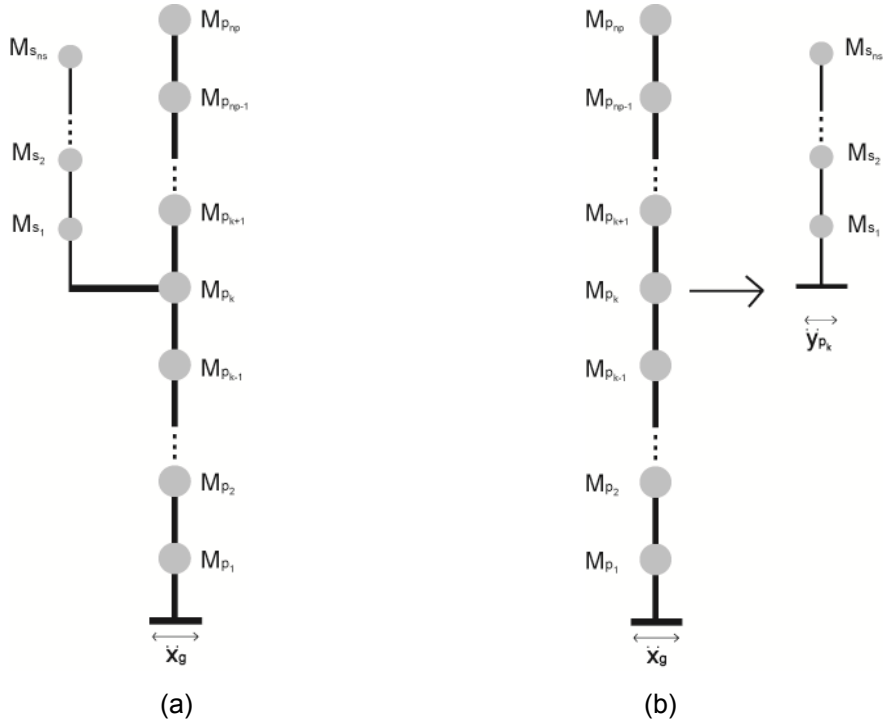
3.2 Διαδικασία αποσύζευξης

Για τη γενικότερη περίπτωση μιας μικτής κατασκευής η οποία αποτελείται από np βαθμούς ελευθερίας από σκυρόδεμα και ns βαθμούς ελευθερίας από χάλυβα, με το τμήμα από χάλυβα να εδράζεται σε τυχούσα θέση k, η συζευγμένη ανάλυση παριστάνεται σε αντιδιαστολή με την αποσυζευγμένη στις εικόνες 3.1-a και 3.1-b. Στη συζευγμένη (coupled) ανάλυση η κατασκευή μελετάται ως ενιαία, εισάγεται η εδαφική διέγερση στη βάση της και λαμβάνεται η απόκριση σε όλες τις $np+ns$ στάθμες, όπως γίνεται συνήθως. Αντίθετα, στην αποσυζευγμένη (decoupled) ανάλυση, η κατασκευή χωρίζεται σε δύο αμιγή από άποψη υλικού τμήματα, στο p τμήμα από σκυρόδεμα και στο s τμήμα από χάλυβα. Η εδαφική διέγερση εισάγεται στη βάση του p τμήματος και λαμβάνονται αποτελέσματα σε όλες τις np στάθμες, συμπεριλαμβανομένης και της στάθμης k. Ακολούθως η απόκριση της στάθμης k, η οποία στη συζευγμένη ανάλυση είναι η στάθμη έδρασης του τμήματος s επί του p, εισάγεται στο s τμήμα σαν διέγερση και λαμβάνεται η απόκριση σε όλες τις ns στάθμες. Οι αναλύσεις μπορούν να είναι είτε αναλύσεις χρονοϊστορίας, οπότε τα αποτελέσματα είναι και αυτά σε μορφή χρονοϊστορίας, είτε φασματικές, οπότε τα αποτελέσματα είναι σε μορφή μεγίστων απόκρισης στον κάθε βαθμό ελευθερίας.

Η συζευγμένη ανάλυση του πλήρους συστήματος των np+ns βαθμών ελευθερίας, όταν αυτό υπόκειται σε εδαφική διέγερση $\ddot{x}_g$, περιγράφεται από τη συνήθη εξίσωση κίνησης των πολυβάθμιων συστημάτων:

$$\mathbf{M}\left\{\ddot{y}^{coup}\right\}+\mathbf{C}\left\{\dot{y}^{coup}\right\}+\mathbf{K}\left\{y^{coup}\right\}=-\mathbf{M}\{r\}\,\ddot{x}_g \tag{3.1}$$

όπου με **M** συμβολίζεται το μητρώο μάζας της κατασκευής, με **C** το μητρώο απόσβεσης, και με **K** το μητρώο δυσκαμψίας, και τα τρία διαστάσεων $(np+ns)\times(np+ns)$. Το διάνυσμα $\left\{y^{coup}\right\}$ αντιπροσωπεύει τις σχετικές μετατοπίσεις του κάθε βαθμού ελευθερίας ως προς τη βάση της κατασκευής με διαστάσεις $(np+ns)\times 1$, και το (r) είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα, διαστάσεων επίσης $(np+ns)\times 1$.



Εικ. 3.1: Συζευγμένη (a) και αποσυζευγμένη (b) ανάλυση πολυβάθμιας μικτής κατασκευής

Σε κάθε βαθμό ελευθερίας λαμβάνονται ως αποτελέσματα οι σχετικές επιταχύνσεις, από τις οποίες προκύπτουν οι απόλυτες ως εξής:

$$\left\{\overline{\ddot{y}}^{coup}\right\}=\left\{\ddot{y}^{coup}\right\}+\{r\}\,\ddot{x}_g \tag{3.2}$$

Με τον τρόπο αυτό αναλύεται η πλήρης κατασκευή, χωρίς να εισάγεται σφάλμα. Τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας αντιστοιχούν στην πραγματική κατασκευή, η οποία διεγείρεται από την εδαφική επιτάχυνση. Έτσι, η εξίσωση (3.1)

περιγράφει την διέγερση μιας μικτής κατασκευής από εδαφική κίνηση $\ddot{x}_g$, όπως γίνεται στην πραγματικότητα, χωρίς δηλαδή να εισάγεται σφάλμα. Οι δυσκολίες που υπεισέρχονται σε αυτή τη συζευγμένη διαδικασία είναι η δημιουργία του σύνθετου μητρώου απόσβεσης $\mathbf{C}$ όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 2, και η προσέγγιση που θα ακολουθηθεί για την αριθμητική επίλυση αυτής της εξίσωσης.

Αντίθετα, στην αποσυζευγμένη ανάλυση, τα δύο τμήματα p και s αναλύονται ξεχωριστά. Πρώτα γίνεται η ανάλυση του πρωτεύοντος τμήματος, το οποίο διεγείρεται με την εδαφική διέγερση $\ddot{x}_g$, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{M}_p\left\{\ddot{y}_p^{dec}\right\}+\mathbf{C}_p\left\{\dot{y}_p^{dec}\right\}+\mathbf{K}_p\left\{y_p^{dec}\right\}=-\mathbf{M}_p\left\{r_p\right\}\ddot{x}_g \tag{3.3}$$

Τα μητρώα $\mathbf{M}_p$, $\mathbf{C}_p$ και $\mathbf{K}_p$ είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας του p τμήματος θεωρούμενου ως ανεξάρτητη κατασκευή, και έχουν διαστάσεις $np\times np$. Το διάνυσμα $\left\{y_p^{dec}\right\}$ περιγράφει τις σχετικές μετατοπίσεις των βαθμών ελευθερίας του p τμήματος ως προς το έδαφος και έχει διαστάσεις $np\times 1$, και το διάνυσμα $\left\{r_p\right\}$ είναι μοναδιαίο, διαστάσεων και αυτό $np\times 1$. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι πάλι σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όπως περιγράφεται στην εξίσωση (3.4), κατ' αντιστοιχία με την (3.2).

$$\left\{\overline{\ddot{y}}_p^{dec}\right\}=\left\{\ddot{y}_p^{dec}\right\}+\left\{r_p\right\}\ddot{x}_g \tag{3.4}$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, εξάγεται και η χρονοϊστορία των απολύτων επιταχύνσεων στη στάθμη k του υποβάθρου, $\left\{{}^{k}\overline{\ddot{y}}_p^{dec}\right\}$, η οποία ακολούθως χρησιμοποιείται σαν διέγερση για την υπερκατασκευή. Η κίνηση της υπερκατασκευής περιγράφεται από την εξίσωση (3.5), όπου με $\mathbf{M}_s$, $\mathbf{C}_s$, $\mathbf{K}_s$ συμβολίζονται τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας της υπερκατασκευής, διαστάσεων $ns\times ns$. Το διάνυσμα $\left\{y_s^{dec}\right\}$ δίνει τις σχετικές μετατοπίσεις των ns βαθμών ελευθερίας ως προς τη στάθμη έδρασης k, και το $\left\{r_s\right\}$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα διαστάσεων $ns\times 1$. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται πάλι σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (3.6).

$$\mathbf{M}_s\left\{\ddot{y}_s^{dec}\right\}+\mathbf{C}_s\left\{\dot{y}_s^{dec}\right\}+\mathbf{K}_s\left\{y_s^{dec}\right\}=-\mathbf{M}_s\left\{r_s\right\}{}^k\ddot{\overline{y}}_p^{dec} \tag{3.5}$$

$$\left\{\ddot{\overline{y}}_s^{dec}\right\}=\left\{\ddot{y}_s^{dec}\right\}+\left\{r_s\right\}{}^k\ddot{\overline{y}}_p^{dec} \tag{3.6}$$

Το κέρδος που προκύπτει από τη διαδικασία της αποσύζευξης είναι ότι, πλέον, οι δύο ξεχωριστές κατασκευές που αναλύονται είναι κανονικές, και δεν παρουσιάζουν καμία ιδιαιτερότητα. Παράλληλα, και τα δύο μητρώα απόσβεσης $\mathbf{C}_p$ και $\mathbf{c}_s$ αντιστοιχούν σε ομοιόμορφη και ενιαία κατανομή απόσβεσης στον κάθε υποφορέα, οπότε μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς καμία δυσκολία κατά Rayleigh. Επίσης, η ελαστοπλαστική συμπεριφορά, εφ' όσον εμφανιστεί, αντιμετωπίζεται πιο εύκολα, αφού σε κάθε τμήμα επικρατεί ένας ελαστοπλαστικός νόμος υλικού. Τα παραπάνω καθιστούν την αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης εύχρηστη για σχεδιασμό, παρά το γεγονός του επιπλέον υπολογιστικού κόστους, το οποίο όμως πλέον δεν είναι απαγορευτικό με τα μέσα που υπάρχουν. Το μειονέκτημα αυτής της αποσυζευγμένης διαδικασίας είναι ότι δεν αναλύεται σε καμιά από τις δύο φάσεις η πραγματική κατασκευή. Η ανάλυση του υποβάθρου αγνοεί την υπερκατασκευή, και η ανάλυση της υπερκατασκευής με τη σειρά της αγνοεί ότι ο φορέας εδράζεται σε τμήμα κατασκευής και όχι στο έδαφος. Έτσι, μοιραία, υπεισέρχεται στην ανάλυση σφάλμα, το οποίο αποτυπώνεται στα αποτελέσματα που λαμβάνονται.

3.3 Προσδιορισμός του σφάλματος αποσύζευξης

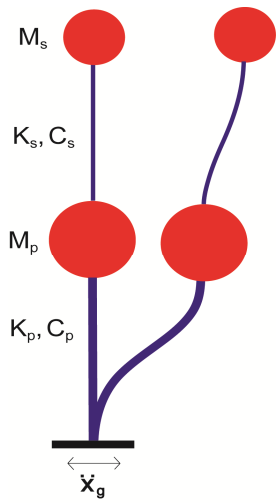
Ο προσδιορισμός του σφάλματος γίνεται κατ' αντιστοιχία με τους Chen και Wu [65]. Αναλόγως με τη μορφή της ανάλυσης, δυναμική ή φασματική, λαμβάνονται τα απόλυτα μέγιστα της απόκρισης του κάθε βαθμού ελευθερίας και από τις δύο διαδικασίες, συζευγμένη και αποσυζευγμένη. Ακολούθως, υπολογίζεται η διαφορά τους σαν απόλυτο μέγεθος και κανονικοποιείται με το απόλυτο μέγιστο του αντίστοιχου ορθού μεγέθους, αυτού δηλαδή που προκύπτει από την συζευγμένη ανάλυση, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (3.7) για ένα τυχαίο βαθμό ελευθερίας n. Παρά το γεγονός ότι τα μέγιστα των δύο διαδικασιών δε συμβαίνουν κατ' ανάγκη στο ίδιο χρονικό βήμα, γίνεται η σύγκρισή τους γιατί αυτά αποτελούν και τα μεγέθη σχεδιασμού της κάθε διαδικασίας.

$$e_n = \left| \frac{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_n^{dec}\right|\right) - \max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_n^{coup}\right|\right)}{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_n^{coup}\right|\right)} \right| \tag{3.7}$$

Στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή ότι η στάθμη έδρασης της υπερκατασκευής k είναι η ψηλότερη στάθμη του υποβάθρου np. Αυτή η διαμόρφωση αντιστοιχεί στις περισσότερες εφαρμογές των μικτών κατασκευών στον τομέα πολιτικού μηχανικού, αφού έδραση σε ενδιάμεσες στάθμες συναντάται συνήθως μόνο σε περιπτώσεις στήριξης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Έτσι, η απόκριση του υποβάθρου που χρησιμοποιείται στην αποσύζευξη είναι η ${}^{np}\ddot{\bar{y}}_p^{dec}$.

3.4 Ισοδύναμα διβάθμια συστήματα

Η παραπάνω διαδικασία οδηγεί στην εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης κατά την ανάλυση μιας τυχούσας πολυβάθμιας μικτής κατασκευής, η οποία υπόκειται σε επίσης τυχαία εδαφική διέγερση. Έτσι όμως, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων γενικότερης φύσης. Για το λόγο αυτό και με δεδομένη την δυνατότητα αντιστοίχισης μεταξύ μικτών πολυβάθμιων και ισοδύναμων διβάθμιων φορέων όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2, η μελέτη της αποσύζευξης στην παρούσα εργασία γίνεται σε διβάθμια μικτά συστήματα, όπως αυτό που φαίνεται στην Εικ. 3.2.



Εικ. 3.2: Ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή

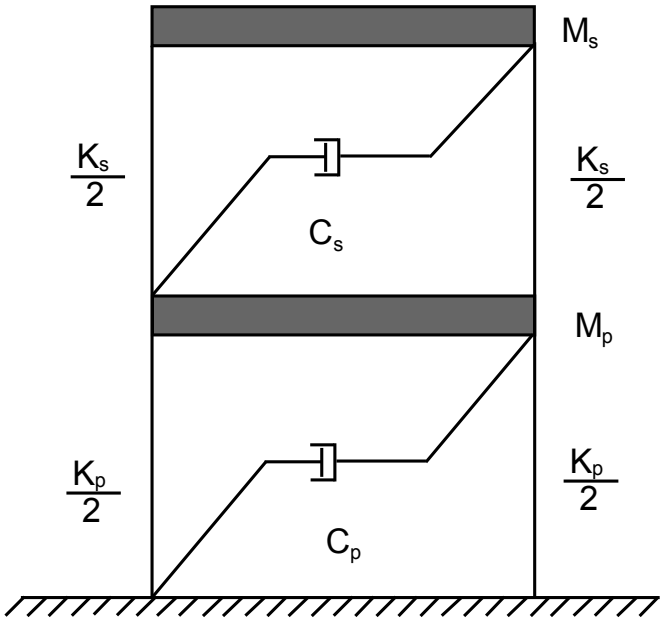
Πλέον ο κάθε βαθμός ελευθερίας έχει χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν το τμήμα της πολυβάθμιας κατασκευής από την οποία προήλθε. Έτσι, ο βαθμός ελευθερίας p έχει συντελεστή απόσβεσης $\zeta_p = 5\%$ και ο βαθμός ελευθερίας s έχει συντελεστή απόσβεσης $\zeta_s = 2\%$. Με δεδομένες τις μάζες και τις δυσκαμψίες του κάθε ορόφου, $K_i, M_i, i = s,p$, αντίστοιχα, υπολογίζονται και οι ιδιοσυχνότητες της κάθε στάθμης, θεωρώντας την ως έναν ανεξάρτητο μονοβάθμιο ταλαντωτή, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.8), και σχηματίζονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.9).

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_i}{M_i}} \quad i = s,p \tag{3.8}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_p + K_s & -K_s \\ -K_s & K_s \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Όπως προτείνεται και από τους Chen και Wu [65], η απόσβεση σε κάθε στάθμη δεν θεωρείται ως αναλογική κατά Rayleigh, αλλά οφείλεται μόνο στη σχετική κίνηση μεταξύ των δύο βαθμών ελευθερίας και μεταξύ της στάθμης p και του εδάφους, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.3. Για την κάθε στάθμη, η συνολική απόσβεσή της δίνεται από την εξίσωση (3.10), θεωρείται δηλαδή ως προς την απόσβεση ότι και πάλι η κάθε στάθμη είναι ένας ανεξάρτητος μονοβάθμιος ταλαντωτής.

$$C_i = 2M_i\omega_i\zeta_i, \; i = s,p \tag{3.10}$$



Εικ. 3.3: Διβάθμιος ταλαντωτής και κατανομή απόσβεσης

Έτσι, μετά από τον υπολογισμό των C_p και C_s, μορφώνεται το μητρώο απόσβεσης σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_p + C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Αφού μορφωθούν τα παραπάνω μητρώα μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης για το διβάθμιο ταλαντωτή, η εξίσωση κίνησης στη συζευγμένη ανάλυση παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{M}\begin{Bmatrix} \ddot{y}_p^{coup} \\ \ddot{y}_s^{coup} \end{Bmatrix} + \mathbf{C}\begin{Bmatrix} \dot{y}_p^{coup} \\ \dot{y}_s^{coup} \end{Bmatrix} + \mathbf{K}\begin{Bmatrix} y_p^{coup} \\ y_s^{coup} \end{Bmatrix} = -\mathbf{M}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}\ddot{x}_g \tag{3.12}$$

και από τη συζευγμένη ανάλυση εξάγεται η απόκριση του κάθε βαθμού ελευθερίας σε όρους απολύτων επιταχύνσεων:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\ddot{y}}_p^{coup} \\ \bar{\ddot{y}}_s^{coup} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ddot{y}_p^{coup} \\ \ddot{y}_s^{coup} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}\ddot{x}_g \tag{3.13}$$

Αντίθετα, στην αποσυζευγμένη ανάλυση, η εξίσωση κίνησης του p βαθμού ελευθερίας μόνου του είναι η εξής:

$$M_p\ddot{y}_p^{dec} + C_p\dot{y}_p^{dec} + K_p y_p^{dec} = -M_p\ddot{x}_g \tag{3.14}$$

και από την ανάλυσή του, εξάγεται η απόκρισή του σε όρους απολύτων επιταχύνσεων:

$$\bar{\ddot{y}}_p^{dec} = \ddot{y}_p^{dec} + \ddot{x}_g \tag{3.15}$$

Αυτή η απόλυτη επιτάχυνση εισάγεται τώρα στο τμήμα s της κατασκευής σα διέγερση:

$$M_s\ddot{y}_s^{dec} + C_s\dot{y}_s^{dec} + K_s y_s^{dec} = -M_s\bar{\ddot{y}}_p^{dec} \tag{3.16}$$

και από την ανάλυσή της λαμβάνεται η απόκρισή της σε όρους απολύτων επιταχύνσεων:

$$\bar{\ddot{y}}_s^{dec} = \ddot{y}_s^{dec} + \bar{\ddot{y}}_p^{dec} \tag{3.17}$$

Για κάθε μια από τις δύο στάθμες p και s, το σφάλμα στην εκτίμηση των απολύτων επιταχύνσεων μεταξύ της συζευγμένης και της αποσυζευγμένης ανάλυσης υπολογίζεται ως εξής:

$$e_i = \left| \frac{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i^{dec}\right|\right) - \max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i^{coup}\right|\right)}{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i^{coup}\right|\right)} \right|, i = s,p \tag{3.18}$$

Για παράδειγμα, εξετάζεται μια ελαστική διβάθμια κατασκευή αντίστοιχη αυτής της Εικ. 3.3, με δυσκαμψία κάθε στάθμης ίση με 20000kN/m, και μάζα κάθε στάθμης ίση με 20MGr, οπότε τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας διαμορφώνονται όπως στις εξισώσεις (3.19) και (3.20).

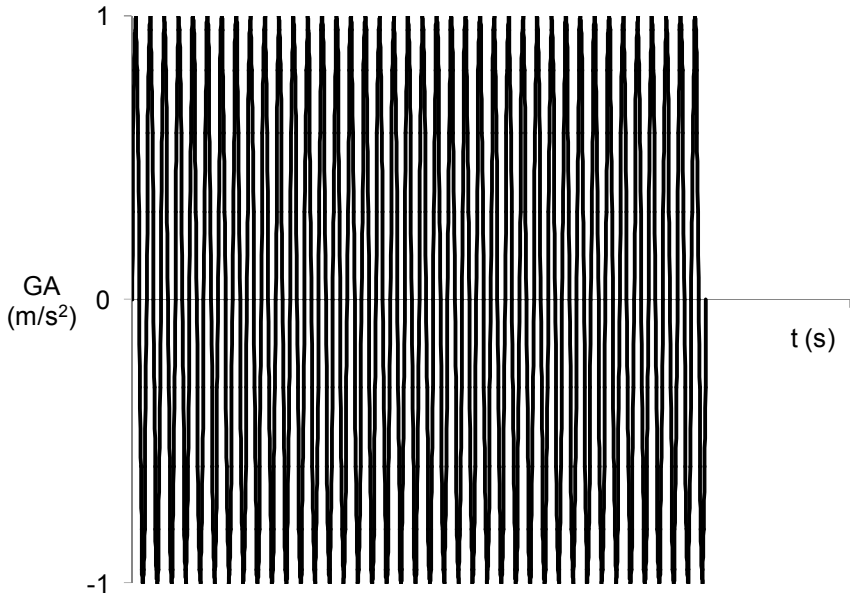
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_p + K_s & -K_s \\ -K_s & K_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40000 & -20000 \\ -20000 & 20000 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Τα μεγέθη αυτά, σύμφωνα με την εξίσωση (3.8) συνεπάγονται ιδιοσυχνότητα της κάθε στάθμης ίση με 31.62r/s, και απόσβεση $C_p = 63.24 kNs/m$ για τη στάθμη p και $C_s = 25.29 kNs/m$ για τη στάθμη s σύμφωνα με την εξίσωση (3.10) και για ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$ κατά τις παραδοχές της παρούσας εργασίας. Το τελικό μητρώο απόσβεσης είναι το ακόλουθο:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 88.53 & -25.29 \\ -25.29 & 25.29 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Εκτελώντας τη συζευγμένη και την αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης όπως περιγράφονται στις εξισώσεις (3.12) ως (3.17) για τον εν λόγω διβάθμιο ταλαντωτή, και χρησιμοποιώντας μια αρμονική εδαφική διέγερση (ground acceleration – GA), της μορφής της Εικ. 3.4, η οποία έχει πλάτος $1 m/s^2$ και διάρκεια 40 κύκλων με ιδιοσυχνότητα ίση με 31.62r/s, σε συντονισμό δηλαδή με τα δύο τμήματα, προκύπτουν τα ακόλουθα μέγιστα των απολύτων επιταχύνσεων για τις δύο στάθμες κατά τη συζευγμένη και την αποσυζευγμένη ανάλυση, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.22) και (3.23).

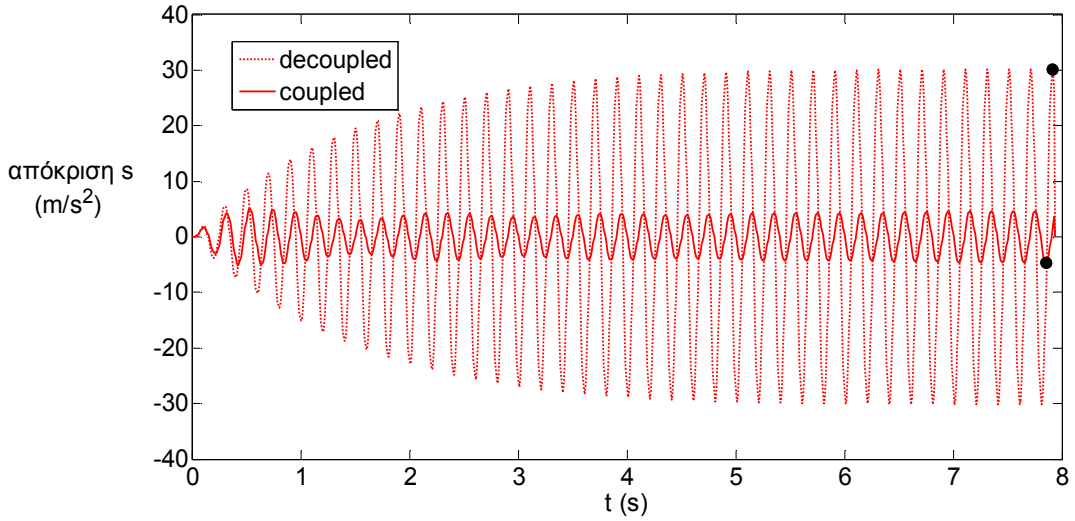


Εικ. 3.4: Αρμονική διέγερση διάρκειας 40 κύκλων

$$\ddot{\bar{y}}_p^{coup} = 1.68 m/s^2, \quad \ddot{\bar{y}}_s^{coup} = 5.10 m/s^2 \tag{3.22}$$

$$\ddot{\bar{y}}_p^{dec} = 1.64 m/s^2, \ddot{\bar{y}}_s^{dec} = 30.16 m/s^2 \tag{3.23}$$

Ενδεικτικά, η χρονοϊστορίες της αποσυζευγμένης και η συζευγμένης απόκριση της υπερκατασκευής σε όρους απολύτων επιταχύνσεων απεικονίζονται στην Εικ. 3.5, ενώ τα μέγιστα καταδεικνύονται με τελείες.



Εικ. 3.5: Σύγκριση χρονοϊστοριών συζευγμένης και αποσυζευγμένης ανάλυσης υπερκατασκευής

Με δεδομένα τα αποτελέσματα αυτά και τον ορισμό της εξίσωσης (3.18), προκύπτουν τα σφάλματα αποσύζευξης των σταθμών p και s:

$$e_p = 0.02, e_s = 4.91 \tag{3.24}$$

Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η αποσύζευξη στις μικτές κατασκευές, είτε πολυβάθμιες είτε διβάθμιες. Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός είναι η μελέτη του σφάλματος της αποσύζευξης. Το σφάλμα αυτό, στην παρούσα εργασία μελετάται σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και η μελέτη του γίνεται με βάση μια αδιαστατοποιημένη ποσότητα σφάλματος e, που ορίζεται στις εξισώσεις (3.7) και (3.18).

3.5 Τροποποίηση της αποσύζευξης

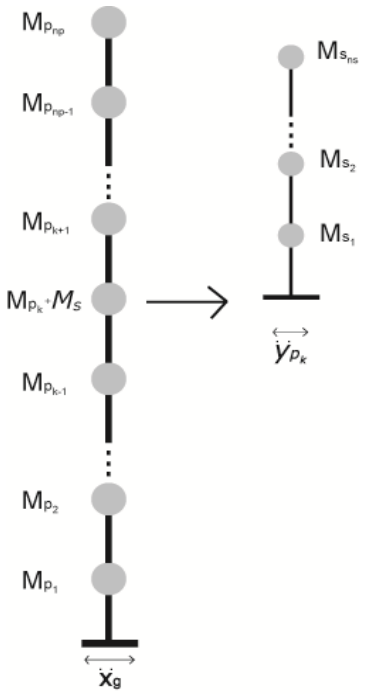
Η εγγενής αδυναμία της διαδικασίας αποσύζευξης είναι ότι σε κάθε στάδιο των δύο αναλύσεών της, ανάλυση του υποβάθρου p και ανάλυση της υπερκατασκευής s, αγνοείται το άλλο τμήμα. Έτσι, σε μια μικτή κατασκευή np+ns βαθμών ελευθερίας, όπως αυτή της Εικ. 3.1, κατά την αποσυζευγμένη ανάλυση του υποβάθρου σε πρώτη φάση, αναλύεται μια κατασκευή η οποία έχει μεν τις ίδιες μάζες $M_p^i\ (i = 1:np)$, και τις ίδιες δυσκαμψίες $K_p^i\ (i = 1:np)$, αλλά έχει μόνο np βαθμούς ελευθερίας, αγνοώντας την υπερκατασκευή. Ακολούθως, στην ανάλυση του s τμήματος, αναλύεται μια κατασκευή, η οποία έχει τις ίδιες μάζες $M_s^i\ (i = 1:ns)$, και τις ίδιες δυσκαμψίες $K_s^i\ (i = 1:ns)$ σε κάθε στάθμη, αλλά έχει μόνο ns βαθμούς ελευθερίας. Όλα αυτά είναι σε αντιδιαστολή με τη συζευγμένη ανάλυση της πλήρους κατασκευής, η οποία έχει τις μάζες και τις δυσκαμψίες $M_p^i, K_p^i\ (i = 1:np)$, και $M_s^i, K_s^i\ (i = 1:ns)$, έχει όμως np+ns βαθμούς ελευθερίας. Το αποτέλεσμα είναι να προκύπτει σφάλμα κατά την ανάλυση.

Το σφάλμα αυτό επιχειρείται να μειωθεί στην παρούσα εργασία εισάγοντας μια τροποποίηση στην διαδικασία της αποσύζευξης. Έτσι, κατά την πρώτη φάση της αποσύζευξης, όταν το υπόβαθρο p αναλύεται μόνο του, προστίθεται σε αυτό το σύνολο της μάζας της υπερκατασκευής s, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.6. Η προσθήκη της συνολικής μάζας της υπερκατασκευής M_s^{tot} γίνεται στη μάζα του βαθμού

ελευθερίας στον οποίο αυτή εδράζεται, δηλαδή στην M_{pk}, η οποία τώρα γίνεται $M_{pk} + M_s^{tot}$.

Η τροποποίηση που εισάγεται έχει σαν συνέπεια τη μεταβολή του μητρώου μάζας. Συγκεκριμένα, κατά την αποσυζευγμένη διαδικασία το υπόβαθρο p περιγράφεται από ένα μητρώο μάζας $\mathbf{M}_p^{mod}$ διαστάσεων $np \times np$, το οποίο διαφέρει από το αρχικό $\mathbf{M}_p$ κατά το ότι στο βαθμό ελευθερίας pk η μάζα έχει γίνει $M_{pk} + M_s^{tot}$. Κατά τα άλλα, η αποσυζευγμένη ανάλυση του p γίνεται όπως και πριν, δηλαδή το τροποποιημένο υπόβαθρο, το οποίο πάλι έχει np βαθμούς ελευθερίας και περιγράφεται από τα ίδια μητρώα απόσβεσης $\mathbf{C}_p$ και δυσκαμψίας $\mathbf{K}_p$, διαστάσεων $np \times np$, υπόκειται σε εδαφική διέγερση $\ddot{x}_g$, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (3.25), όπου πάλι το $\{r_p\}$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα διαστάσεων $np \times 1$:

$$\mathbf{M}_p^{mod}\left\{{}_{mod}\ddot{y}_p^{dec}\right\} + \mathbf{C}_p\left\{{}_{mod}\dot{y}_p^{dec}\right\} + \mathbf{K}_p\left\{{}_{mod}y_p^{dec}\right\} = -\mathbf{M}_p^{mod}\{r_p\}\ddot{x}_g \qquad (3.25)$$



Εικ. 3.6: Τροποποίηση της αποσύζευξης

Ακολούθως, εκτελείται η διαδικασία της αποσύζευξης, όπως έχει περιγραφεί και πιο πριν, λαμβάνονται δηλαδή αποτελέσματα σε όρους επιταχύνσεων τα οποία μετατρέπονται σε απόλυτες επιταχύνσεις, όπως στην εξίσωση (3.26). Ακολούθως η απόκριση του βαθμού ελευθερίας k του υποβάθρου $\left\{{}_{mod}^{k}\overline{\ddot{y}}_p^{dec}\right\}$ χρησιμοποιείται σα

διέγερση για την υπερκατασκευή, η οποία παραμένει ως έχει και περιγράφεται από τα ίδια μητρώα $\mathbf{M}_s$, $\mathbf{C}_s$ και $\mathbf{K}_s$, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.27). Εν τέλει, λαμβάνονται αποτελέσματα πάλι σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όπως φαίνεται στην (3.28).

$$\left\{ {}_{mod}\ddot{\bar{y}}_p^{dec} \right\} = \left\{ {}_{mod}\ddot{y}_p^{dec} \right\} + \left\{ r_p \right\} \ddot{x}_g \tag{3.26}$$

$$\mathbf{M}_s \left\{ {}_{mod}\ddot{y}_s^{dec} \right\} + \mathbf{C}_s \left\{ {}_{mod}\dot{y}_s^{dec} \right\} + \mathbf{K}_s \left\{ {}_{mod}y_s^{dec} \right\} = -\mathbf{M}_s \left\{ r_s \right\} {}_{mod}^{k}\ddot{\bar{y}}_p^{dec} \tag{3.27}$$

$$\left\{ {}_{mod}\ddot{\bar{y}}_s^{dec} \right\} = \left\{ {}_{mod}\ddot{y}_s^{dec} \right\} + \left\{ r_s \right\} {}_{mod}^{k}\ddot{\bar{y}}_p^{dec} \tag{3.28}$$

Η τροποποίηση της αποσύζευξης δεν επηρεάζει καθόλου την ορθή συζευγμένη διαδικασία ανάλυσης, η οποία πάλι περιγράφεται από την εξίσωση (3.1) και δίνει αποτελέσματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, όπως φαίνεται από την (3.2). Το σφάλμα σε κάθε βαθμό ελευθερίας υπολογίζεται με βάση τις επιταχύνσεις από τη συζευγμένη και την αποσυζευγμένη διαδικασία, όπως στην εξίσωση που ακολουθεί.

$$e_n^{mod} = \left| \frac{\max\left(\left| {}_{mod}\ddot{\bar{y}}_n^{dec} \right| \right) - \max\left(\left| \ddot{\bar{y}}_n^{coup} \right| \right)}{\max\left(\left| \ddot{\bar{y}}_n^{coup} \right| \right)} \right| \tag{3.29}$$

Στην περίπτωση του διβάθμιου φορέα της Εικ. 3.2 με τον p βαθμό ελευθερίας να έχει απόσβεση 5% και τον s να έχει απόσβεση 2%, οι ιδιοσυχνότητες της κάθε στάθμης, τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, οι αποσβέσεις και το μητρώο απόσβεσης, για το διβάθμιο συζευγμένο σύστημα, υπολογίζονται όπως στις εξισώσεις (3.8) έως (3.11), και η συζευγμένη ανάλυση του περιγράφεται από την εξίσωση (3.12) και τα αποτελέσματα λαμβάνονται όπως στην (3.13).

Αντίθετα, κατά την αποσυζευγμένη ανάλυση, όπως και στη γενικότερη περίπτωση του πολυβάθμιου φορέα που περιγράφηκε πριν, οι εξισώσεις κίνησης αλλάζουν. Έτσι, η αποσυζευγμένη ανάλυση του τροποποιημένου υποβάθρου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\left(M_p + M_s \right) {}_{mod}\ddot{y}_p^{dec} + C_p {}_{mod}\dot{y}_p^{dec} + K_p {}_{mod}y_p^{dec} = -\left(M_p + M_s \right) \ddot{x}_g \tag{3.30}$$

Κατ' αντιστοιχία με την εξίσωση (3.15), τα αποτελέσματα λαμβάνονται πάλι σε όρους απολύτων επιταχύνσεων:

$$ {}_{mod}\ddot{\bar{y}}_p^{dec} = {}_{mod}\ddot{y}_p^{dec} + \ddot{x}_g \tag{3.31} $$

Ακολουθεί η ανάλυση της υπερκατασκευής s, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.32). Τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όπως φαίνεται στην (3.33).

$$ M_{s\,mod}\ddot{y}_s^{dec} + C_{s\,mod}\dot{y}_s^{dec} + K_{s\,mod}y_s^{dec} = -M_{s\,mod}\ddot{\bar{y}}_p^{dec} \tag{3.32} $$

$$ {}_{mod}\ddot{\bar{y}}_s^{dec} = {}_{mod}\ddot{y}_s^{dec} + {}_{mod}\ddot{\bar{y}}_p^{dec} \tag{3.33} $$

Κατ' αντιστοιχία με την κανονική διαδικασία αποσύζευξης, το σφάλμα υπολογίζεται ως εξής:

$$ e_i^{mod} = \left| \frac{\max\left(\left|{}_{mod}\ddot{\bar{y}}_i^{dec}\right|\right) - \max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i^{coup}\right|\right)}{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i^{coup}\right|\right)} \right|, i = s,p \tag{3.34} $$

Κατά την τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης, η μόνη ουσιαστική αλλαγή είναι η προσθήκη της μάζας της υπερκατασκευής στη μάζα του βαθμού ελευθερίας του υποβάθρου στον οποίο γίνεται η έδραση, ενώ όλα τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν τα ίδια. Συγκεκριμένα, η ιδιοσυχνότητα και η απόσβεση της κάθε στάθμης, και κατά συνέπεια και το μητρώο απόσβεσης, παραμένουν τα ίδια και υπολογίζονται σύμφωνα με την αρχική μάζα M_p, και όχι με την νέα $M_p + M_s$ σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.8), (3.10) και (3.11). Αυτό γίνεται γιατί αν ληφθεί υπόψη η νέα μάζα $M_p + M_s$, και με βάση αυτήν υπολογιστεί η ιδιοσυχνότητα του υποβάθρου, και ακολούθως η απόσβεσή του και το μητρώο απόσβεσης, τότε δεν πρόκειται για μια τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης, αλλά για την κανονική αποσυζευγμένη ανάλυση ενός νέου διβάθμιου συστήματος, το οποίο απλά έχει μάζα ίση με $M_p + M_s$.

Η τροποποίηση της αποσύζευξης όπως περιγράφεται παραπάνω αποτελεί μια προσπάθεια να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση του υποβάθρου η υπερκατασκευή, τουλάχιστον ως προς τη μάζα της, με σκοπό, όπως προαναφέρθηκε, να μειωθεί το σφάλμα. Ο τρόπος που γίνεται η τροποποίηση είναι συμβατός και με την μελετητική πρακτική, αφού στα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού είναι δυνατόν κατά την ανάλυση του υποβάθρου να τροποποιηθεί η μάζα του με τέτοιο τρόπο, ώστε η απλή αποσυζευγμένη διαδικασία να μετατραπεί σε τροποποιημένη.

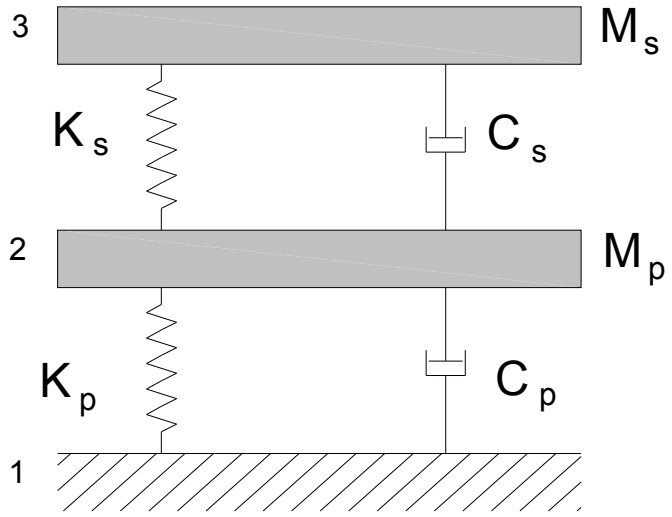
3.6 Υπολογιστική εφαρμογή ελαστικής διαδικασίας αποσύζευξης

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση της πλήρους κατασκευής στην συζευγμένη διαδικασία και οι αναλύσεις των επιμέρους τμημάτων της στην αποσυζευγμένη διαδικασία γίνονται με δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, και όχι με φασματικές αναλύσεις. Ο λόγος είναι ότι έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Επιπλέον, για να γίνει φασματική ανάλυση σε μια μικτή κατασκευή, πρέπει να υπολογιστούν μιγαδικές ιδιομορφές, και οι συνήθεις κανόνες συνδυασμού των μεγίστων όπως ο SRSS και ο CQC, χρειάζεται να τροποποιηθούν όπως περιγράφουν οι Sinha και Igusa [18], τα οποία με τη δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας αποφεύγονται. Το μειονέκτημα βέβαια, είναι το υπολογιστικό κόστος, το οποίο όμως παραμένει σε ανεκτά επίπεδα. Η δυναμική ανάλυση γίνεται αριθμητικά με τη μέθοδο του Newmark, και πιο συγκεκριμένα με τη μέθοδο της μέσης επιτάχυνσης (average acceleration) όπως περιγράφεται από τον Chopra [1], η οποία είναι σταθερή ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες χρονικές παραμέτρους του προβλήματος.

Όπως προαναφέρθηκε, η κατά περίπτωση ανάλυση της αποσύζευξης μιας κατασκευής και ο υπολογισμός του σφάλματος δεν επιτρέπουν την εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της αποσύζευξης βασίζεται σε έναν ισοδύναμο διβάθμιο ταλαντωτή, όπως αυτός απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2. Δεδομένου ότι υπάρχει αντιστοίχιση μεταξύ των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας πολυβάθμιας κατασκευής και των χαρακτηριστικών του ισοδύναμου διβάθμιου, είναι δυνατόν να γίνει παραμετρική μελέτη της αποσύζευξης, με βάση τον εύκολο στο χειρισμό διβάθμιο ταλαντωτή. Έτσι, η μελέτη για το σφάλμα που προκύπτει, μπορεί να γίνει για ένα εύρος τιμών δυσκαμψιών και μαζών του διβάθμιου συστήματος, το οποίο στον p βαθμό ελευθερίας έχει απόσβεση ίση με 5% και στον s βαθμό ελευθερίας ίση με 2%. Κατά συνέπεια πρέπει να μορφωθούν και να αναλυθούν τα αντίστοιχα προσομοιώματα διβάθμιων φορέων.

Για τις αναλύσεις στην παρούσα εργασία επιλέγεται το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Opensees (OS) [124]. Αφού σκοπός είναι η μελέτη του σφάλματος της αποσύζευξης να γίνει παραμετρικά, συναρτήσει των μαζών και των δυσκαμψιών, επιλέγεται να μη γίνει πλήρες προσομοίωμα διβάθμιας πλαισιακής κατασκευής, αλλά να αξιοποιηθούν τα στοιχεία μηδενικού μήκους, zerolength (ZL) elements, του προγράμματος, τα

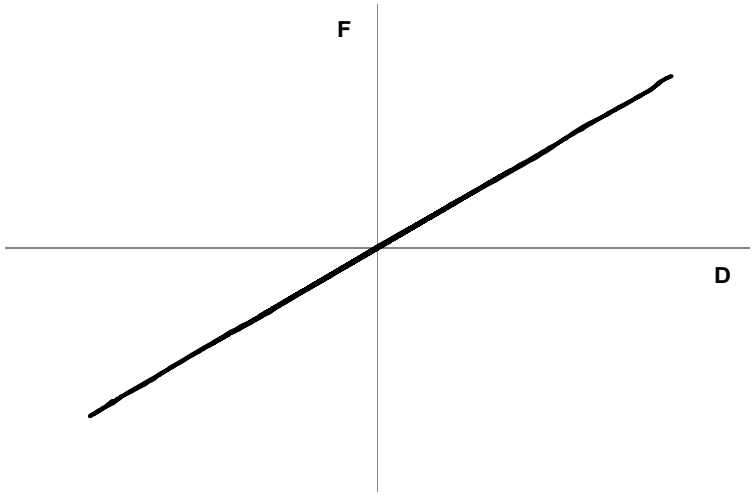
οποία είναι στοιχεία συγκεντρωμένης μάζας και δυσκαμψίας. Στα στοιχεία αυτά είναι δυνατόν να αποδοθεί η επιθυμητή δυσκαμψία και μάζα, καθώς και ο επιθυμητός νόμος ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς σε όρους δυνάμεων – μετατοπίσεων, χωρίς να οριστεί διατομή και γεωμετρία φορέα. Έτσι, ο διβάθμιος φορέας της Εικ. 3.2 προσομοιώνεται όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικ. 3.7. Ορίζονται τρεις κόμβοι, από τους οποίους ο πρώτος έχει δεσμευμένους όλους τους βαθμούς ελευθερίας, και οι υπόλοιποι δύο, οι δύο στάθμες του διβάθμιου, έχουν ελεύθερη μόνο μια μετακίνηση, κατά τη διεύθυνση της εδαφικής κίνησης. Οι κόμβοι 1, 2 και 3 στην πραγματικότητα ταυτίζονται αφού τα στοιχεία είναι μηδενικού μήκους, παρ' όλα αυτά στην Εικ. 3.7 απεικονίζονται σχηματικά απομακρυσμένοι ο ένας από τον άλλο. Στους κόμβους 2 και 3 αποδίδεται μάζα αντίστοιχη με την επιθυμητή μάζα σε κάθε στάθμη $M_i, i = s, p$, η οποία ενεργεί κατά τη διεύθυνση της κίνησης των κόμβων.



Εικ. 3.7: Σχηματική αναπαράσταση του προσομοιώματος με Zerolength στοιχεία στο Opensees

Τα ελατήρια και οι αποσβεστήρες που φαίνονται στην Εικ. 3.7, είναι το κάθε ένα και ένα ZL στοιχείο, στα οποία αποδίδονται οι επιθυμητές ιδιότητες κατά τη μία διεύθυνση κίνησης που είναι ελεύθερη στο προσομοίωμα. Έτσι τα ελατήρια $K_i, i = s, p$, αποδίδουν τη συνολική δυσκαμψία της κάθε στάθμης αλλά και την ελαστική συμπεριφορά γραμμικού τύπου και υλοποιούνται με ZL στοιχεία που συνδέουν τους κόμβους 1-2 και 2-3. Η ελαστική συμπεριφορά αυτή δεν είναι συμπεριφορά κάποιου συγκεκριμένου δομικού στοιχείου, αλλά ένα μακροσκοπικό μέγεθος της κάθε στάθμης, η οποία θεωρείται ότι μπορεί να συμπεριφερθεί ελαστοπλαστικά στη γενικότερη περίπτωση. Η τελική συμπεριφορά της στάθμης είναι γραμμική όπως φαίνεται από το βρόχο δυνάμεων (F) – μετατοπίσεων (D) στην Εικ. 3.8. Η

συμπεριφορά αυτή αν και είναι υπερβολικά εξιδανικευμένη, υιοθετείται γιατί είναι πιο εποπτική και προσφέρεται για εξαγωγή συμπερασμάτων. Εφ' όσον η επιθυμητή συμπεριφορά είναι ελαστική, απλά αποδίδεται στα ελατήρια ένα πολύ μεγάλο όριο στη δύναμη διαρροής, οπότε το κάθε ελατήριο παραμένει ελαστικό.



Εικ. 3.8: Γραμμική ελαστική συμπεριφορά

Τα ελατήρια που υλοποιούν την ελαστική ή ελαστοπλαστική συμπεριφορά, ανάλογα με την περίπτωση, είναι καθαρά γραμμικά ή διγραμμικά, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούν να αποδώσουν απόσβεση μέσω υστερητικής συμπεριφοράς. Έτσι, η επιθυμητή απόσβεση σε κάθε στάθμη, η οποία δίνεται από την εξίσωση (3.10), υλοποιείται με τους αποσβεστήρες $C_i, i = s, p$. Στο προσομοίωμα οι αποσβεστήρες υλοποιούνται με στοιχεία ZL, τα οποία έχουν μηδενική δυσκαμψία και τιμή απόσβεσης ίση με αυτή της εξίσωσης (3.10), που δρα και αυτή κατά τη μία διεύθυνση κίνησης που είναι ελεύθερη στο προσομοίωμα. Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να υλοποιείται το μητρώο απόσβεσης της εξίσωσης (3.11), συνδέουν δηλαδή τους κόμβους 1-2 και 2-3.

Όπως προαναφέρθηκε στην περιγραφή της διαδικασίας της αποσύζευξης, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι σε όρους σχετικών επιταχύνσεων, ώστε προσθέτοντας κάθε φορά τη διέγερση να μετατραπούν σε απόλυτες επιταχύνσεις. Η καταγραφή των σχετικών επιταχύνσεων γίνεται από το OS [124] σε επιλεγμένους κόμβους, στην περίπτωση του διβάθμιου προσομοιώματος στον 2 και στον 3. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχείο, το οποίο σε ένα επόμενο στάδιο επεξεργασίας ανοίγεται και στη χρονοϊστορία των σχετικών επιταχύνσεων προστίθεται και αυτή της διέγερσης, οπότε προκύπτουν για κάθε στάθμη τα

αποτελέσματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων. Τυπικά αρχεία εισαγωγής δεδομένων για το OS [124], τόσο για ένα διβάθμιο σύστημα της συζευγμένης ανάλυσης, όσο και για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή για την αποσυζευγμένη ανάλυση, παρατίθενται στο παράρτημα της διατριβής, με τίτλους zl2_decoupling.tcl και zl1_decoupling.tcl, αντίστοιχα.

3.7 Αξιολόγηση και επαλήθευση προτεινόμενης διαδικασίας

Όπως έχει προαναφερθεί, έναυσμα για τη έρευνα του σφάλματος της αποσύζευξης στις μικτές κατασκευές αποτελεί η εργασία των Chen και Wu [65]. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στη μελέτη του σφάλματος της αποσύζευξης στην ανάλυση ελαστικών διβάθμιων μικτών κατασκευών, οι οποίες διεγείρονται από αρμονική εδαφική διέγερση, λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκαμψίες και τις μάζες των δύο τμημάτων. Για το λόγο αυτό, για τη διβάθμια κατασκευή της Εικ. 3.3, ορίζονται οι ιδιοσυχνότητες του κάθε τμήματος θεωρούμενου ανεξάρτητα από το άλλο, όπως στην εξίσωση (3.8). Ακολούθως, οι συγγραφείς ορίζουν τους λόγους μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, όπως στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$R_m = \frac{M_s}{M_p}, \quad R_\omega = \frac{\omega_s}{\omega_p} \tag{3.35}$$

Έπειτα, εξάγεται αναλυτική έκφραση για το σφάλμα αποσύζευξης σαν συνάρτηση των δύο αυτών λόγων και της συχνότητας της εδαφικής διέγερσης, λαμβάνοντας υπόψη το σταθερό (steady state) κομμάτι της απόκρισης. Η έκφραση αυτή είναι παραμετρική ως προς τους λόγους μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, ως προς τις αποσβέσεις του κάθε τμήματος και ως προς τη ιδιοσυχνότητα της εδαφικής διέγερσης ω_g, οι δυσμενέστερες όμως ιδιοσυχνότητες διέγερσης είναι αυτές που είναι σε συντονισμό ή κοντά στον συντονισμό με ένα από τα δύο τμήματα της κατασκευής. Αυτή η περιοχή ιδιοσυχνοτήτων, η οποία οριοθετείται από την εξίσωση (3.36), περιλαμβάνει τις ιδιοσυχνότητες των δύο επιμέρους τμημάτων της κατασκευής θεωρούμενων ως ανεξαρτήτων συστημάτων, και τις ιδιοσυχνότητες των δύο ιδιομορφών του διβάθμιου φορέα της συζευγμένης ανάλυσης. Οι ιδιοσυχνότητες αυτές μεγιστοποιούν την απόκριση είτε του p ή του s τμήματος κατά την

αποσυζευγμένη ανάλυση, είτε του διβάθμιου ταλαντωτή κατά τη συζευγμένη ανάλυση, αλλά όχι και των δύο ταυτόχρονα, οπότε προκύπτει και η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων.

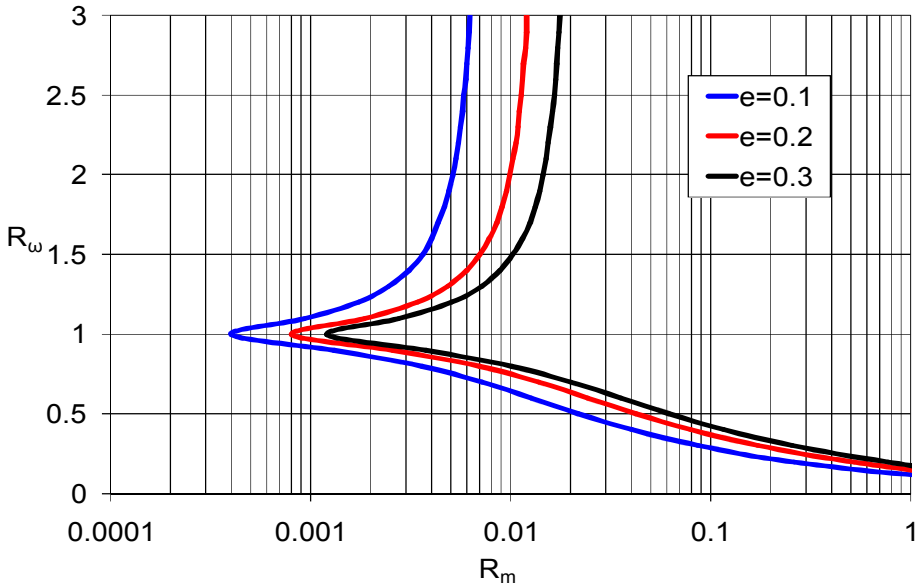
$$\omega_g = \left[0.8\omega_p : 0.01\omega_p : 1.2\omega_p, 0.8\omega_s : 0.01\omega_s : 1.2\omega_s\right] \tag{3.36}$$

Οι συγγραφείς αναγνωρίζουν ότι η εργασία τους έχει νόημα σε προκαταρκτικό στάδιο μελέτης μικτών κατασκευών, προκειμένου να αποφασιστεί αν θα γίνει αποσυζευγμένη ή συζευγμένη μελέτη της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό, ορίζουν ένα επίπεδο που ορίζεται από ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών για τα R_ω και R_m, πράγμα που σημαίνει και ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών διβάθμιων ταλαντωτών, δεδομένου ότι κάθε ζεύγος λόγων αντιστοιχεί σε ένα διβάθμιο ταλαντωτή, και για κάθε ζεύγος συντεταγμένων (R_ω, R_m) καταγράφουν το μέγιστο σφάλμα της αποσύζευξης μέσω της αναλυτικής διαδικασίας. Αποκτάται έτσι η κατανομή του σφάλματος στο επίπεδο (R_ω, R_m). Δεδομένου ότι η αναλυτική διαδικασία γίνεται για συχνότητες συντονισμού ή κοντά στο συντονισμό, τα σφάλματα που καταγράφονται στο επίπεδο (R_ω, R_m), είναι τα μέγιστα δυνατά. Ακολούθως, εκλέγοντας τρία χαρακτηριστικά επίπεδα σφάλματος σαν αντιπροσωπευτικά, $e = 0.1, 0.2, 0.3$, σχεδιάζονται οι ισοϋψείς σφάλματος στο επίπεδο (R_ω, R_m), για το συγκεκριμένο συνδυασμό αποσβέσεων των δύο τμημάτων της κατασκευής και προκύπτουν γραφικά οι καμπύλες σφάλματος αποσύζευξης.

Για την περίπτωση της διβάθμιας μικτής κατασκευής με αποσβέσεις $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$, την περίπτωση δηλαδή που μελετάται στην παρούσα εργασία, οι καμπύλες αποσύζευξης για επίπεδα σφάλματος $e = 0.1, 0.2, 0.3$, έτσι όπως προκύπτουν από την αναλυτική διαδικασία των Chen και Wu [65] φαίνονται στην Εικ. 3.9. Η κάθε μια από τις καμπύλες χωρίζει το επίπεδο (R_ω, R_m) σε δύο τμήματα. Η αριστερά από την καμπύλη περιοχή, αντιστοιχεί σε διβάθμιους ταλαντωτές οι οποίοι δίνουν μέγιστο σφάλμα αποσύζευξης το οποίο είναι μικρότερο από αυτό της καμπύλης, και η περιοχή δεξιά σε ταλαντωτές που δίνουν μέγιστο σφάλμα αποσύζευξης μεγαλύτερο από αυτό της καμπύλης.

Αν η απόφαση για το αν θα γίνει αποσύζευξη ή όχι βασιστεί στην επιθυμία να μην προκύψει σφάλμα μεγαλύτερο από 10%, ένας διβάθμιος ταλαντωτής που αντιστοιχεί

σε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) που βρίσκεται αριστερά της μπλε καμπύλης μπορεί να αναλυθεί με αποσυζευγμένη διαδικασία, ενώ ένας ταλαντωτής που βρίσκεται δεξιά της καμπύλης όχι, και αντίστοιχα για τις άλλες χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή αριστερά από μια καμπύλη μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασφαλής όσον αφορά την αποσύζευξη έχοντας ως κριτήριο ένα δεδομένο επίπεδο σφάλματος, ενώ η περιοχή δεξιά της καμπύλης είναι μη ασφαλής.



Εικ. 3.9: Καμπύλες αποσύζευξης στάθμης s διβάθμιας κατασκευής με αποσβέσεις ζ_p=5% και ζ_s=2%

Οι καμπύλες αποσύζευξης δημιουργούν ένα «εξόγκωμα» προς τα αριστερά, στην περιοχή που $R_\omega = 1$, στην περιοχή δηλαδή που τα δύο τμήματα p και s είναι σε συντονισμό. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού στην αποσυζευγμένη διαδικασία, η εδαφική κίνηση η οποία είναι ήδη σε συντονισμό με το p και το s τμήμα της κατασκευής, δίνει μεγάλη ενίσχυση στο υπόβαθρο η κίνηση του οποίου στη συνέχεια διεγείρει την επίσης σε συντονισμό υπερκατασκευή. Το αποτέλεσμα είναι μια νέα μεγάλη ενίσχυση στην απόκριση της υπερκατασκευής λόγω του διπλού συντονισμού, η οποία δεν παρατηρείται τόσο έντονα στη συζευγμένη διαδικασία στην οποία οι δύο ιδιομορφές δεν επιτρέπουν την εκδήλωση του διπλού συντονισμού. Αποτέλεσμα είναι να υπάρχει μεγάλη διαφορά στην απόκριση της υπερκατασκευής μεταξύ της αποσυζευγμένης και της συζευγμένης διαδικασίας ήδη σε περιοχές μικρών λόγων R_m και η ασφαλής περιοχή να είναι αισθητά πιο μικρή.

Αντίθετα, στην περιοχή των μικρών λόγων R_ω, οι καμπύλες αποσύζευξης είναι μετατοπισμένες στα δεξιά και η ασφαλής περιοχή είναι πολύ πιο μεγάλη. Η μικρή

τιμή του R_ω σημαίνει ότι η υπερκατασκευή είναι πολύ πιο εύκαμπτη από το υπόβαθρο. Αυτό έχει σαν συνέπεια να παραμένει πρακτικά ακίνητο το s τμήμα της κατασκευής και στις δύο αναλύσεις και κατά συνέπεια απαιτούνται πολύ μεγάλοι λόγοι μάζας για να διαφοροποιήσουν αρκετά τις δύο αναλύσεις και να καταγραφεί σφάλμα σε ένα από τα τρία επιλεγμένα επίπεδα.

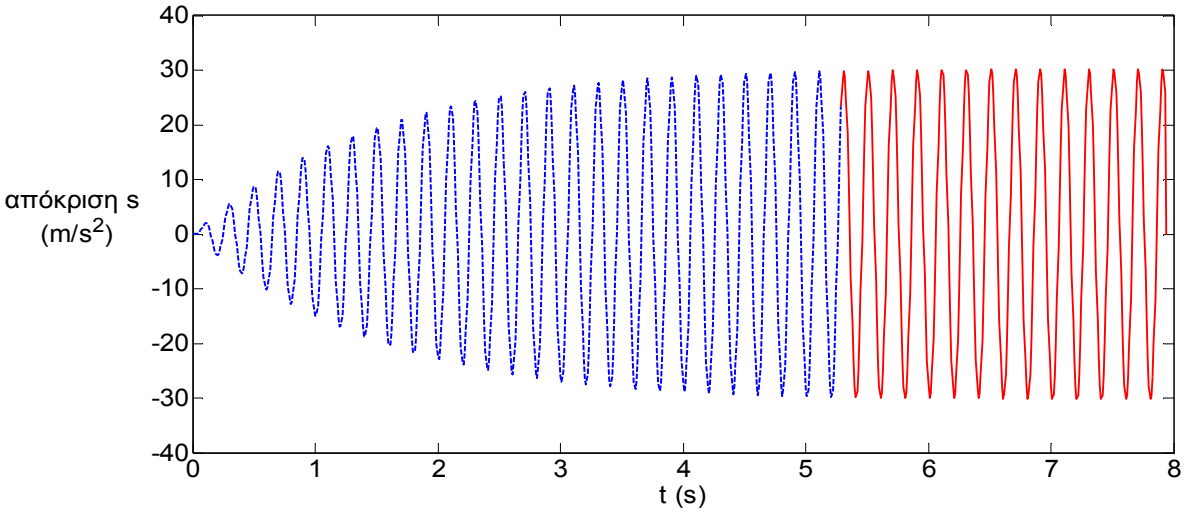
Στον αντίποδα των λόγων ιδιοσυχνοτήτων, στην περιοχή των μεγάλων λόγων R_ω, όπου η υπερκατασκευή είναι πολύ πιο δύσκαμπτη από το υπόβαθρο, οι καμπύλες έχουν μετατοπιστεί προς τα αριστερά σε σχέση με την περιοχή των μικρών R_ω, και αντιστοιχούν σε μέσες τιμές λόγου μαζών R_m. Στην περιοχή αυτή, το s τμήμα του διβάθμιου ταλαντωτή είναι αρκετά δύσκαμπτο, ώστε στην συζευγμένη ανάλυση να ακολουθεί την κίνηση του p, οπότε ο διβάθμιος ταλαντωτής υποβαθμίζεται σε μονοβάθμιο με δυσκαμψία αυτήν του p και μάζα το άθροισμα των μαζών. Στην αποσυζευγμένη ανάλυση δε, το s τμήμα επίσης παραμένει πρακτικά ακίνητο σε σχέση με την επιβαλλόμενη διέγερση, δηλαδή την απόκριση του p τμήματος και η τελική του απόκριση σε όρους απολύτων επιταχύνσεων είναι ίδια με την επιβαλλόμενη κίνηση δηλαδή την κίνηση του υποβάθρου. Έτσι, απλά απαιτούνται μέσες τιμές στους λόγους μαζών, ώστε η κίνηση του υποβάθρου να διαφοροποιηθεί αρκετά ανάμεσα στις δύο αναλύσεις και να προκύψουν οι χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος.

Η διαδικασία αυτή γίνεται από τους Chen και Wu [65] αναλυτικά, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το steady state κομμάτι της απόκρισης των ταλαντωτών, κάτι που δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις μεταφοράς και να υπολογιστεί σε κάθε στάδιο της ανάλυσης η μεγέθυνση που δίνει ο κάθε ταλαντωτής στην επιβαλλόμενη διέγερση. Προτού χρησιμοποιηθεί η εργασία των Chen και Wu [65] ως βάση για τη συνέχεια της μελέτης του σφάλματος της αποσύζευξης, γίνεται μια προσπάθεια επαλήθευσης των καμπυλών αποσύζευξης με τρόπο αριθμητικό αυτή τη φορά, χρησιμοποιώντας το προαναφερθέν προσομοίωμα με τα ZL στοιχεία στο OS [124].

Η μάζα του υποβάθρου τίθεται ίση με 20Mgr και η ιδιοπερίοδός του ίση με 0.2s, τοποθετείται δηλαδή το υπόβαθρο στο πλατό των συνήθων κανονιστικών φασμάτων. Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου και τους λόγους ιδιοσυχνοτήτων και μαζών, μπορούν να μορφωθούν τα προσομοιώματα. Αφού δημιουργηθούν διβάθμια

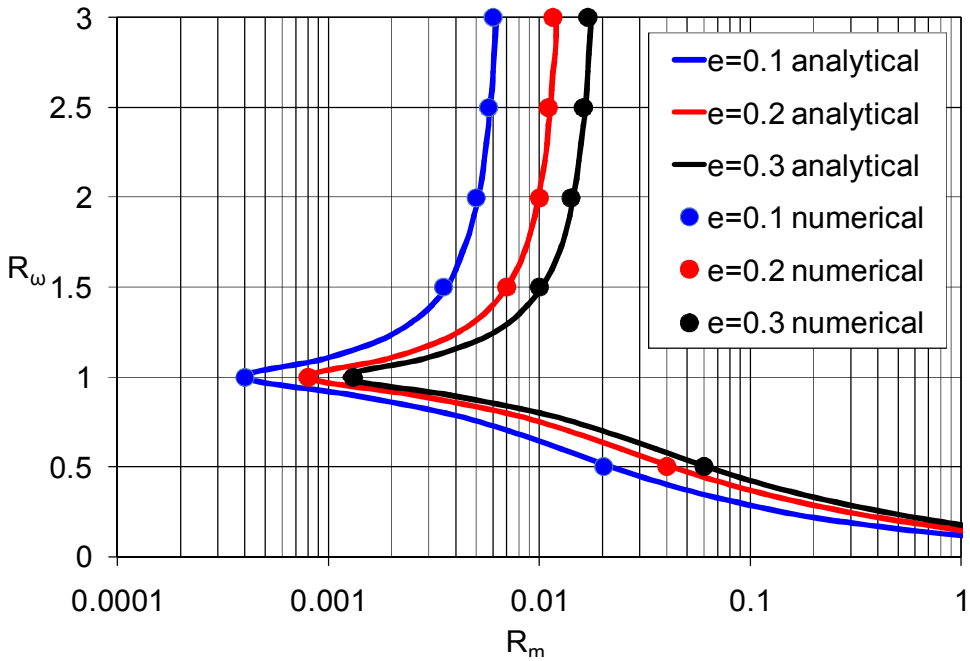
προσομοιώματα που να καλύπτουν όλο το επίπεδο (R_ω, R_m), για τους ταλαντωτές αυτούς πραγματοποιείται μια συζευγμένη και ακολούθως μια αποσυζευγμένη ανάλυση, όπως περιγράφονται στις εξισώσεις (3.12) ως (3.17), από τις οποίες λαμβάνονται οι χρονοϊστορίες απολύτων επιταχύνσεων της υπερκατασκευής. Οι χρονοϊστορίες αυτές δε λαμβάνονται υπόψη ολόκληρες, αλλά μόνο το τελευταίο τρίτο της διάρκειάς τους, ώστε να καταγραφεί μόνο το σταθερό κομμάτι της απόκρισης, όπως φαίνεται για παράδειγμα στην απόκριση της υπερκατασκευής στην Εικ. 3.10 όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το τμήμα της απόκρισης που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς. Ακολούθως, για κάθε προσομοίωμα, για κάθε σημείο δηλαδή του επιπέδου, υπολογίζεται το σφάλμα της αποσύζευξης σύμφωνα με την εξίσωση (3.18).

Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται κάθε φορά είναι αρμονικές όπως αυτή της Εικ. 3.4, και βρίσκονται στη γειτονιά του συντονισμού, έχουν δηλαδή ιδιοσυχνότητες οι οποίες κυμαίνονται από το 80% ως το 120% των ιδιοσυχνοτήτων ω_p και ω_s όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.36), με σκοπό να προκύψει το μέγιστο δυνατό σφάλμα. Το πλάτος τους είναι $1m/s^2$ και η διάρκειά τους είναι 40 κύκλοι. Σκοπός των 40 κύκλων είναι να προκύψει η μέγιστη δυνατή μεγέθυνση, ενώ το πλάτος της κίνησης είναι αδιάφορο, αφού ο υπολογισμός του σφάλματος γίνεται με κανονικοποίηση. Έτσι, για κάθε διβάθμιο ταλαντωτή προκύπτουν πολλά σφάλματα, όσα και οι ιδιοσυχνότητες ω_g, από τα οποία καταγράφεται το μέγιστο. Κατά συνέπεια προκύπτει η κατανομή των μεγίστων δυνατών σφαλμάτων στο επίπεδο (R_ω, R_m).



Εικ. 3.10: Απόκριση υπερκατασκευής, με κόκκινο το τμήμα που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς

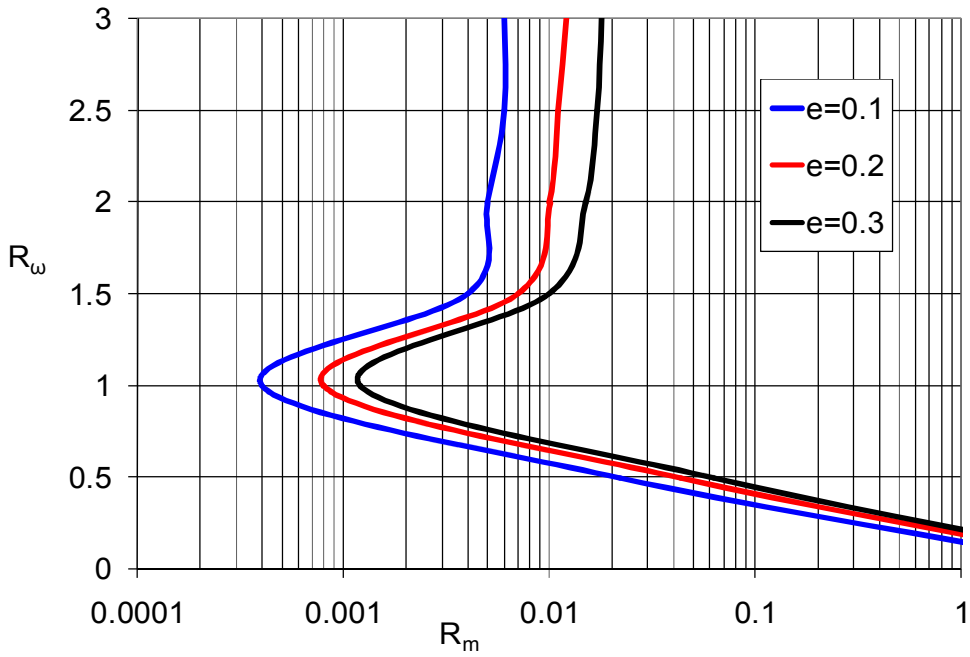
Ακολούθως χαράσσονται τα διαγράμματα των καμπυλών αποσύζευξης για τις χαρακτηριστικές τιμές του σφάλματος $e = 0.1, 0.2, 0.3$ και γίνεται η σύγκρισή τους με αυτές των Chen & Wu [65]. Στην Εικ. 3.11, με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι καμπύλες αποσύζευξης από την αναλυτική διαδικασία των Chen & Wu [65] και με τελείες οι καμπύλες αποσύζευξης από την αριθμητική διαδικασία. Οι δύο καμπύλες, αναλυτική και αριθμητική, σχεδόν ταυτίζονται. Αυτό σημαίνει ότι το αριθμητικό προσομοίωμα που έχει κατασκευαστεί δίνει σωστά αποτελέσματα και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση, ώστε να επεκταθεί η προσέγγιση των Chen & Wu [65].



Εικ. 3.11: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης υπερκατασκευής μεταξύ της αναλυτικής προσέγγισης των Chen και Wu [65] και αριθμητικής προσέγγισης

Με βάση το αριθμητικό προσομοίωμα που έχει δημιουργηθεί είναι δυνατόν να εξαχθούν αντίστοιχες καμπύλες αποσύζευξης και για το υπόβαθρο p με τον ίδιο τρόπο που εξάγονται οι αντίστοιχες καμπύλες της υπερκατασκευής s. Δηλαδή, δημιουργούνται πάλι διβάθμια μοντέλα που αντιστοιχούν σε όλα τα σημεία του επιπέδου (R_ω, R_m), και ακολούθως, για κάθε διβάθμιο ταλαντωτή πραγματοποιούνται οι συζευγμένες και αποσυζευγμένες αναλύσεις με αρμονικές εδαφικές διεγέρσεις 40 κύκλων πλάτους $1m/s^2$. Για κάθε μια από τις διεγέρσεις λαμβάνονται τα μέγιστα και υπολογίζεται το σφάλμα, και εν τέλει καταγράφεται το μέγιστο. Έτσι, προκύπτει η κατανομή των μεγίστων σφαλμάτων για όλο το εύρος των λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων και σχεδιάζονται οι καμπύλες αποσύζευξης για τα τρία επίπεδα

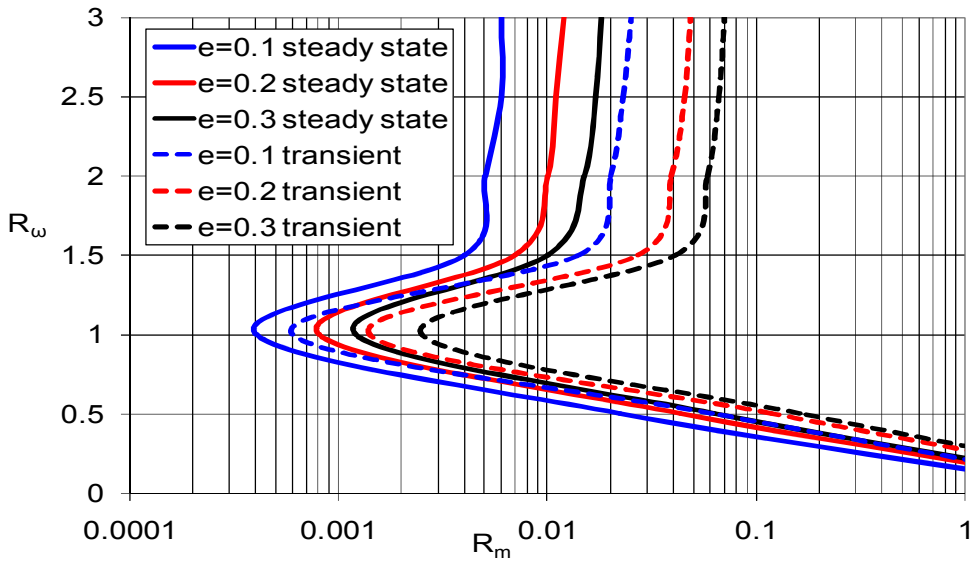
σφάλματος (Εικ. 3.12), οι οποίες έχουν αντίστοιχη μορφή με τις καμπύλες αποσύζευξης της υπερκατασκευής της Εικ. 3.9. Λόγω του ότι η διαδικασία πλέον είναι αριθμητική, και με σκοπό να εξοικονομηθεί χρόνος, οι καμπύλες αποσύζευξης της Εικ. 3.12 προκύπτουν υπολογίζοντας τις θέσεις τους σε συγκεκριμένους λόγους ιδιοσυχνοτήτων. Οι λόγοι αυτοί είναι αυτοί για τους οποίους ελέγχεται η ταύτιση των δύο μεθόδων στην Εικ. 3.11, και ακολούθως χαράσσονται οι καμπύλες ενώνοντας τα σημεία.



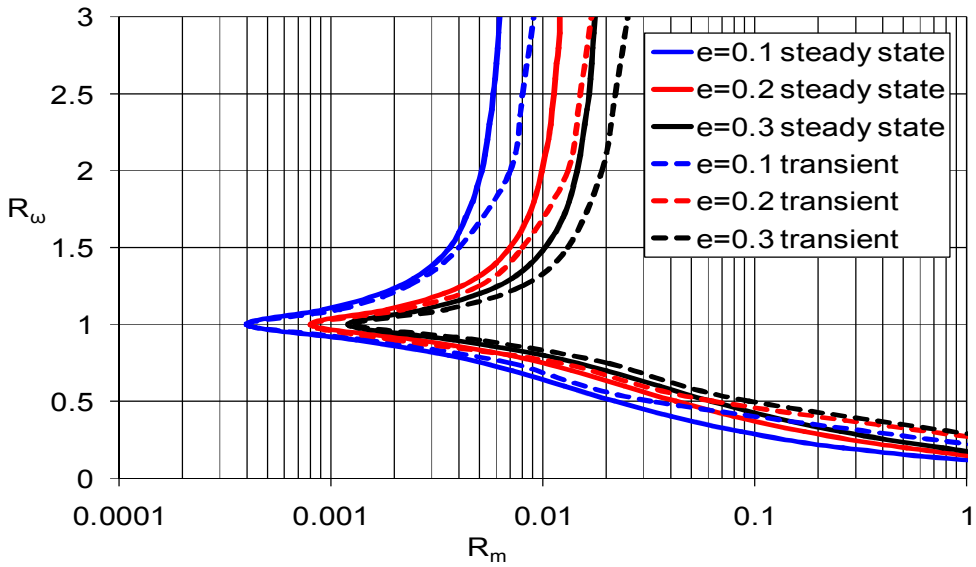
Εικ. 3.12: Καμπύλες αποσύζευξης στάθμης p διβάθμιας κατασκευής με αποσβέσεις ζ_p=5% και ζ_s=2%

Οι Chen και Wu [65] λαμβάνουν υπόψη τις επιταχύνσεις του σταθερού (steady state) τμήματος της απόκρισης μόνον, αγνοώντας το μεταβατικό (transient) τμήμα, παραδοχή που τους επιτρέπει να χειριστούν με αναλυτικό τρόπο το σφάλμα της αποσύζευξης. Στην παρούσα εργασία η μελέτη της αποσύζευξης γίνεται αριθμητικά, οπότε είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη και το transient τμήμα της απόκρισης της κάθε στάθμης. Έτσι, η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για την εξαγωγή των καμπυλών αποσύζευξης για το υπόβαθρο και την υπερκατασκευή όταν αυτά υπόκεινται σε αρμονική σε συντονισμό διέγερση επαναλαμβάνεται, μόνο που τώρα τα μέγιστα της απόκρισης δε λαμβάνονται από το τελευταίο τρίτο της χρονοϊστορίας των επιταχύνσεων, αλλά από το σύνολο της, με σκοπό οι νέες καμπύλες να αντιστοιχούν σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες.

Οι νέες καμπύλες αποσύζευξης για την μικτή κατασκευή με $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$ σε σύγκριση με τις καμπύλες που προκύπτουν από το steady state κομμάτι της απόκρισης, παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.13 για το υπόβαθρο και 3.14 για την υπερκατασκευή. Οι νέες καμπύλες αποσύζευξης είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πιο ευμενείς, αφού αφήνουν μεγαλύτερη περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m) να δίνει μέγιστο σφάλμα αποσύζευξης μικρότερο από τις χαρακτηριστικές τιμές $e = 0.1, 0.2, 0.3$.



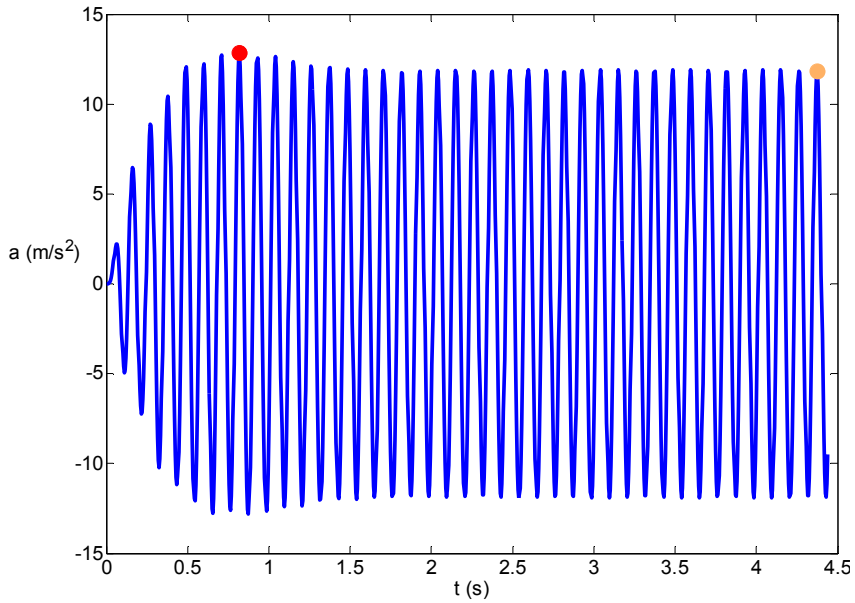
Εικ. 3.13: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης steady state και transient για τη στάθμη p



Εικ. 3.14: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης steady state και transient για τη στάθμη s

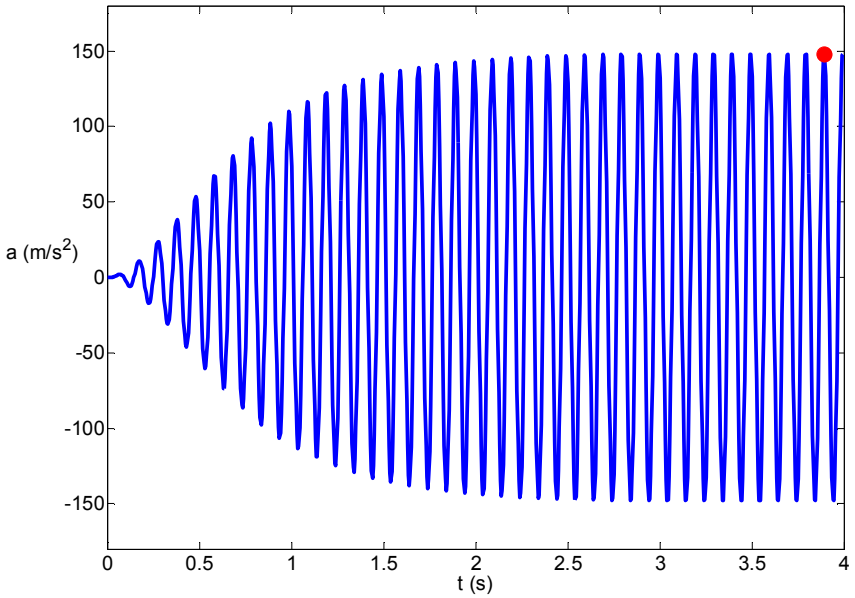
Οι δύο καμπύλες δεν ταυτίζονται γιατί η χρονοϊστορία απόκρισης των σταθμών είτε στη συζευγμένη είτε στην αποσυζευγμένη ανάλυση δεν έχει περιβάλλουσα σταθερά

αύξουσα, αλλά πολλές φορές το ολικό απόλυτο μέγιστο των επιταχύνσεων εντοπίζεται στο transient κομμάτι της απόκρισης όπως φαίνεται για την αποσυζευγμένη ανάλυση της στάθμης s στην Εικ. 3.15, στην οποία το ολικό μέγιστο σημειώνεται με κόκκινη τελεία, ενώ το μέγιστο που αντιστοιχεί στο steady state τμήμα με πορτοκαλί. Αντίθετα στην περίπτωση του συντονισμού των δύο τμημάτων, η υπερκατασκευή στην αποσυζευγμένη ανάλυση διεγείρεται από διέγερση σε συντονισμό, οπότε η χρονοϊστορία των απολύτων επιταχύνσεων έχει τη μορφή της Εικ. 3.16, όπου το απόλυτο μέγιστο εντοπίζεται στο steady state τμήμα, σημειωμένο στην εικόνα με κόκκινη τελεία, και κατά συνέπεια οι δύο καμπύλες ταυτίζονται.



Εικ. 3.15: Χρονοϊστορία απόκρισης στάθμης s από αποσυζευγμένη ανάλυση, στάθμη p εκτός συντονισμού

Παρά το γεγονός ότι οι καμπύλες αποσύζευξης που προκύπτουν λαμβάνοντας το transient τμήμα της απόκρισης υπόψη είναι πιο ευμενείς, κρίνεται ότι είναι ταυτόχρονα και πιο ρεαλιστικές, αφού μια κατασκευή στην πραγματικότητα θα διεγερθεί από όλη τη διάρκεια της εδαφικής διέγερσης. Κατά συνέπεια, οι νέες καμπύλες χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή ως αντιπροσωπευτικές για την εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης μικτής διβάθμιας κατασκευής με απόσβεση $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$, όταν υπόκειται σε αρμονική διέγερση, σε συντονισμό με ένα από τα δύο τμήματα της κατασκευής, στη δυσμενέστερη δηλαδή και μη ρεαλιστική περίπτωση εδαφικής διέγερσης.



Εικ. 3.16: Χρονοϊστορία απόκρισης στάθμης s από αποσυζευγμένη ανάλυση, στάθμη p σε συντονισμό

3.8 Αξιολόγηση της μορφής της απόσβεσης

Ο διβάθμιος ταλαντωτής που χρησιμοποιήθηκε από τους Chen και Wu [65] για τον υπολογισμό του σφάλματος αποσύζευξης και την παραγωγή των καμπυλών αποσύζευξης στο επίπεδο (R_ω, R_m), έχει απόσβεση η οποία δεν είναι αναλογική. Αντίθετα, σε κάθε στάθμη αποδίδεται απόσβεση η οποία συνδέεται μόνο με τη σχετική κίνηση των σταθμών και όχι με την απόλυτη, όπως φαίνεται από τις Εικ. 3.3 και 3.7. Οι τιμές των αποσβεστήρων δίνονται από την εξίσωση (3.10) και τελικά η κατασκευή έχει ένα μη αναλογικό μητρώο απόσβεσης της μορφής της εξίσωσης (3.11).

Προκειμένου να αξιολογηθεί αυτή η παραδοχή, η διαδικασία της αποσύζευξης επαναλαμβάνεται αριθμητικά, αυτή τη φορά όμως ο διβάθμιος ταλαντωτής έχει μητρώο απόσβεσης τύπου Rayleigh. Ο υπολογισμός ενός αναλογικού μητρώου απόσβεσης για μια κατασκευή με ενιαίο συντελεστή απόσβεσης είναι αρκετά απλή διαδικασία, η οποία είναι ενσωματωμένη και σε πολλά εμπορικά πακέτα λογισμικού ανάλυσης και διαστασιολόγησης. Στην περίπτωση όμως της κατασκευής με τη μικτή απόσβεση, η διαδικασία αυτή θα πρέπει να τροποποιηθεί, όπως περιγράφεται από τον Chopra [1] και από τους Clough & Penzien [5]. Το συνολικό μητρώο απόσβεσης

της μικτής διβάθμιας κατασκευής θεωρείται ότι προκύπτει από το άθροισμα δύο υπομητρώων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί και σε ένα τμήμα της κατασκευής. Πρώτα όμως, τα μητρώα μάζας $\mathbf{M}$ και δυσκαμψίας $\mathbf{K}$, χωρίζονται και αυτά σε δύο υπομητρώα $\mathbf{M}^i$ και $\mathbf{K}^i$, $i = s,p$, το κάθε ένα από τα οποία δείχνει τη συμμετοχή του κάθε τμήματος στο συνολικό μητρώο μάζας και δυσκαμψίας, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\mathbf{M}^p = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}^s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

$$\mathbf{K}^p = \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^s = \begin{bmatrix} K_s & -K_s \\ -K_s & K_s \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

Με δεδομένα τα μητρώα, όπως έχουν οριστεί από την εξίσωση (3.9), ισχύει:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}^p + \mathbf{M}^s, \quad \mathbf{K} = \mathbf{K}^p + \mathbf{K}^s \tag{3.39}$$

Ακολούθως, οι δύο ιδιοσυχνότητες ω_1 και ω_2 του διβάθμιου ταλαντωτή υπολογίζονται με μια συνήθη ιδιομορφική ανάλυση, και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών a_0 και a_1:

$$\begin{Bmatrix} a_{0,i} \\ a_{1,i} \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta_i}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1\omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix}, i = s,p \tag{3.40}$$

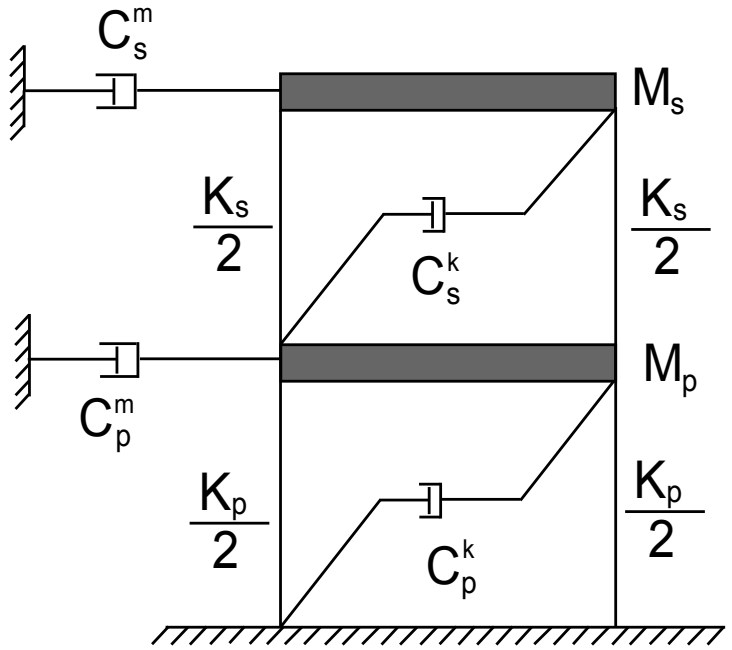
Το κάθε υπομητρώο απόσβεσης προκύπτει ως εξής:

$$\mathbf{C}^i = a_{0,i}\mathbf{M}^i + a_{1,i}\mathbf{K}^i, i = s,p \tag{3.41}$$

Το τελικό μητρώο απόσβεσης της κατασκευής προκύπτει από το άθροισμα των δύο υπομητρώων:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}^p + \mathbf{C}^s \tag{3.42}$$

Τώρα πλέον, ο διβάθμιος ταλαντωτής δεν έχει τη διάταξη των αποσβεστήρων της Εικ. 3.7. Αφού υπάρχει απόσβεση που συνδέεται με την απόλυτη κίνηση της κάθε στάθμης και όχι μόνο με τη σχετική, πρέπει να προστεθούν αποσβεστήρες με το ένα άκρο τους πακτωμένο και το άλλο συνδεδεμένο με τις στάθμες της κατασκευής, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.17.

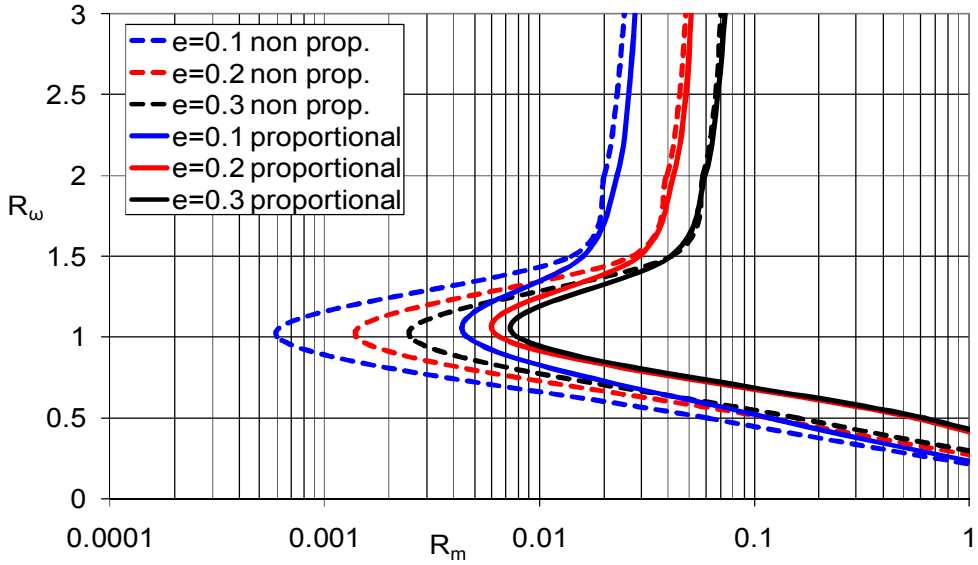


Εικ. 3.17: Διβάθμιος φορέας με απόσβεση κατά Rayleigh

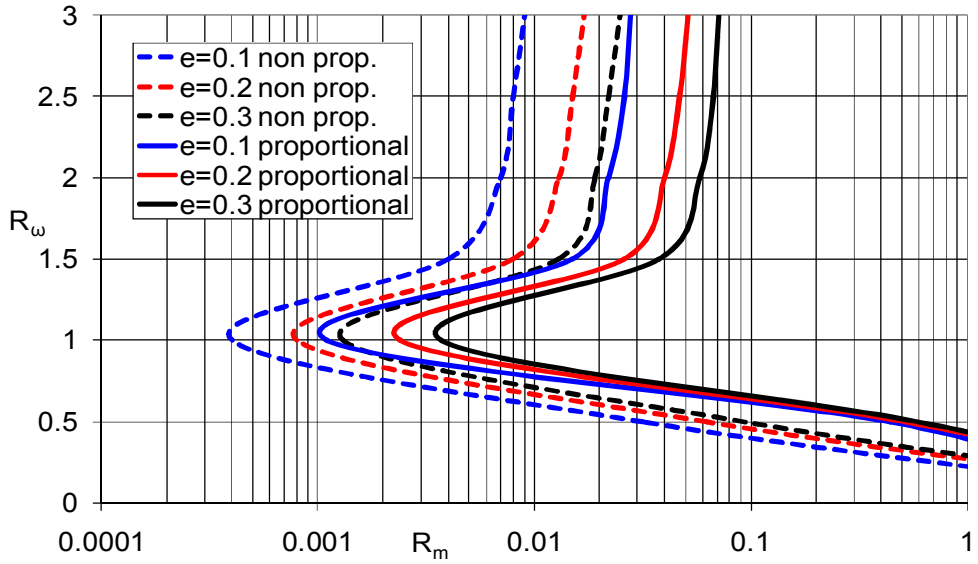
Οι αποσβεστήρες C_i^m παίρνουν τις τιμές τους από τα στοιχεία ενός πίνακα που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό $a_{0,i}\mathbf{M}^i$ και οι αποσβεστήρες C_i^k από τα στοιχεία ενός πίνακα που προκύπτει από το γινόμενο $a_{1,i}\mathbf{K}^i$. Οι αποσβεστήρες αυτοί στο προσομοίωμα στο OS [124] μεταφράζονται σε ZL στοιχεία με αρχή τον κόμβο 1 (πάκτωση) και τέλος τους κόμβους 2 και 3 για τους αποσβεστήρες C_i^m, και σε ZL στοιχεία που συνδέουν τους κόμβους 1 και 2 και 2 και 3 για τους αποσβεστήρες C_p^k και C_s^k, αντίστοιχα.

Κατά τα άλλα, η διαδικασία της αποσύζευξης είναι ακριβώς η ίδια, για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), δηλαδή για κάθε διβάθμιο ταλαντωτή δηλαδή υπό εξέταση. Έτσι, για κάθε σημείο, πρώτα γίνεται η συζευγμένη ανάλυση του διβάθμιου φορέα της Εικ. 3.17, και ακολούθως η αποσυζευγμένη ανάλυση των δύο μονοβάθμιων ταλαντωτών p και s, θεωρώντας εδαφικές διεγέρσεις που είναι στη γειτονιά του συντονισμού, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (3.36). Τα αποτελέσματα από κάθε ανάλυση είναι σε όρους απολύτων επιταχύνσεων σε κάθε στάθμη, και για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.7 το απόλυτο μέγιστο των επιταχύνσεων της κάθε στάθμης λαμβάνεται από το σύνολο της χρονοϊστορίας και όχι μόνο από το steady state κομμάτι. Τέλος, υπολογίζονται τα σφάλματα αποσύζευξης, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (3.18), και αποκτάται κατ' αυτόν τον τρόπο η κατανομή

του σφάλματος της αποσύζευξης στο επίπεδο (R_ω, R_m). Έτσι, είναι δυνατόν να σχεδιαστούν οι καμπύλες αποσύζευξης για τις επιλεγμένες στάθμες σφάλματος $e = 0.1, 0.2, 0.3$, όπως φαίνεται στις Εικ. 3.18 και 3.19. Στις εικόνες αυτές συγκρίνονται οι καμπύλες αποσύζευξης για το p και s τμήμα της διβάθμιας κατασκευής με την απλή και με την κατά Rayleigh θεώρηση της απόσβεσης.



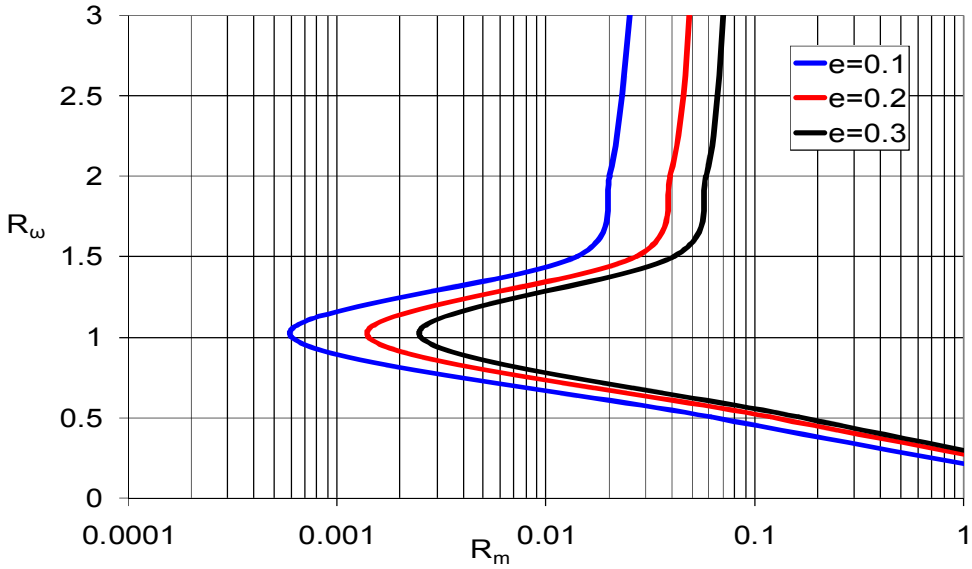
Εικ. 3.18: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης αναλογικής και μη αναλογικής απόσβεσης στη στάθμη p



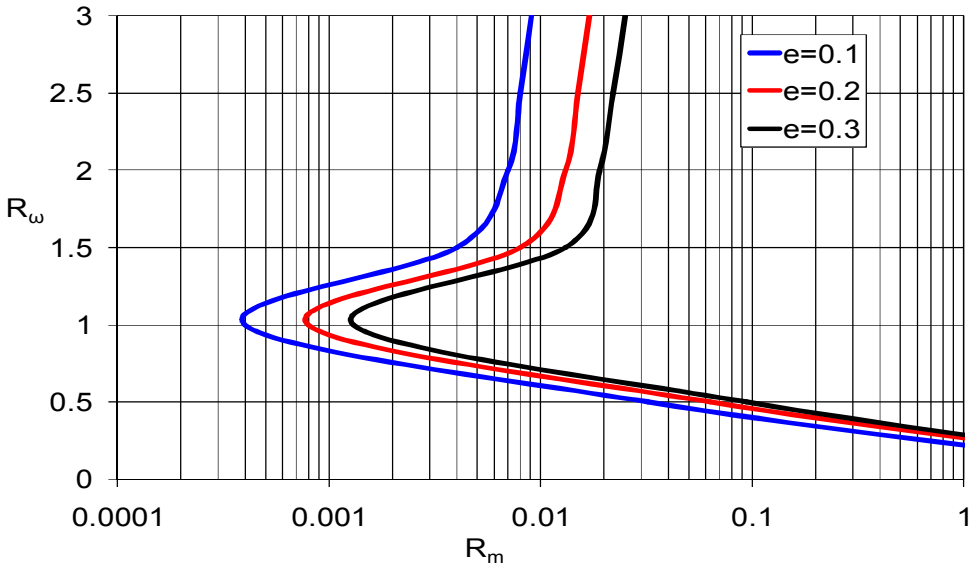
Εικ. 3.19: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης αναλογικής και μη αναλογικής απόσβεσης στη στάθμη s

Οι νέες καμπύλες αποσύζευξης, είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά στο επίπεδο (R_ω, R_m), πράγμα που σημαίνει ότι είναι πιο ευμενείς όσον αφορά την εκτίμηση του σφάλματος της αποσύζευξης. Για το λόγο αυτό, αντιπροσωπευτικές καμπύλες αποσύζευξης για το διβάθμιο φορέα που υπόκειται σε αρμονική σε συντονισμό

διέγερση θεωρούνται αυτές που έχουν προκύψει από τα προσομοιώματα με την απλή κατανομή αποσύζευξης, οι οποίες μόνες τους φαίνονται στις Εικ. 3.20 και 3.21, για τη στάθμη p και τη στάθμη s αντίστοιχα, δηλαδή οι συντηρητικότερες.



Εικ. 3.20: Καμπύλες αποσύζευξης στη στάθμη p από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση



Εικ. 3.21: Καμπύλες αποσύζευξης στη στάθμη s από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση

Οι καμπύλες αποσύζευξης που φαίνονται στις Εικ. 3.20 και 3.21, είναι αυτές που προκύπτουν τελικά από το πλήρες κομμάτι της απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη δηλαδή και μεταβατικό και σταθερό κομμάτι, και με κατανομή απόσβεσης όχι κατά Rayleigh αλλά αυτήν που φαίνεται στην Εικ. 3.3. Αν και η ενσωμάτωση της μεταβατικής απόκρισης δίνει ευμενέστερες καμπύλες αποσύζευξης, μετατοπισμένες προς τα δεξιά στο επίπεδο (R_ω, R_m), αυτές κρίνονται ως πιο ρεαλιστικές, και υιοθετούνται. Υπενθυμίζεται ότι σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης από εδαφική

διέγερση, η φόρτιση της κατασκευής και τα εντατικά μεγέθη στα δομικά στοιχεία θα προέλθουν από την πλήρη χρονοϊστορία της απόκρισης, οπότε και τα μέγιστα των εντατικών μεγεθών είναι δυνατόν να προκύψουν σε έναν από τους πρώτους κύκλους ταλάντωσης της μικτής διβάθμιας κατασκευής. Οι καμπύλες αυτές πλέον χαρακτηρίζονται ως EDPT (Elastic Decoupling Procedure Transient) με σκοπό να μπορούν να συγκριθούν με καμπύλες αποσύζευξης που προκύπτουν σε επόμενα στάδια μελέτης.

3.9 Τροποποίηση της αποσύζευξης – αρμονική διέγερση

Σε ένα επόμενο στάδιο μελέτης, η διαδικασία της αποσύζευξης επαναλαμβάνεται με την τροποποίηση η οποία περιγράφηκε στην ενότητα 3.5. Έτσι, ο διβάθμιος ταλαντωτής με την απλή κατανομή της απόσβεσης (Εικ. 3.3), υποκείμενος σε εδαφική διέγερση $\ddot{x}_g$, σε πρώτη φάση αναλύεται ολόκληρος στα πλαίσια της συζευγμένης ανάλυσης και ακολούθως χωρίζεται σε δύο τμήματα τα οποία αναλύονται χωριστά. Τώρα όμως, το υπόβαθρο p έχει μάζα $M_p + M_s$, έχει δηλαδή τροποποιηθεί όπως περιγράφεται στην εξίσωση (3.30), ενώ η υπερκατασκευή παραμένει ως έχει. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), γίνεται η συζευγμένη ανάλυση όπως πριν, και στην αποσυζευγμένη ανάλυση του υποβάθρου προστίθεται η μάζα της υπερκατασκευής, ενώ τέλος η αποσυζευγμένη ανάλυση της υπερκατασκευής γίνεται και αυτή όπως και πριν.

Παρά το γεγονός ότι η μάζα του υποβάθρου για την αποσυζευγμένη ανάλυση θεωρείται ίση με $M_p + M_s$, η ιδιοσυχνότητά του υπολογίζεται ως εξής:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{K_p}{M_p}} \tag{3.43}$$

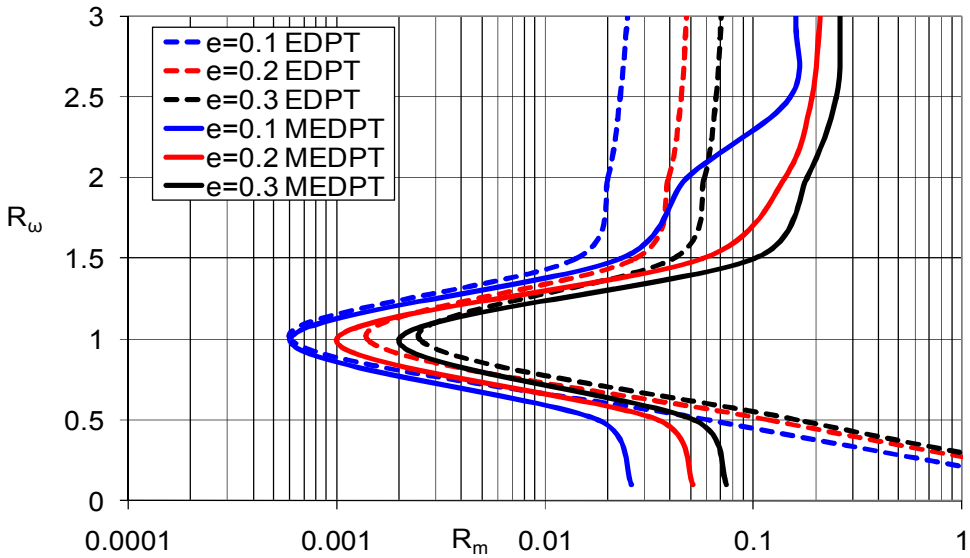
δεν λαμβάνεται υπόψη δηλαδή η πρόσθετη μάζα M_s της υπερκατασκευής. Ομοίως, η εδαφική διέγερση που χρησιμοποιείται, είναι πάλι αρμονική με πλάτος $1 m/s^2$ και διάρκειας 40 κύκλων, και η ιδιοσυχνότητά της βρίσκεται στο εύρος:

$$\omega_g = \left[0.8\omega_p \div 1.2\omega_p, 0.8\omega_s \div 1.2\omega_s\right] \tag{3.44}$$

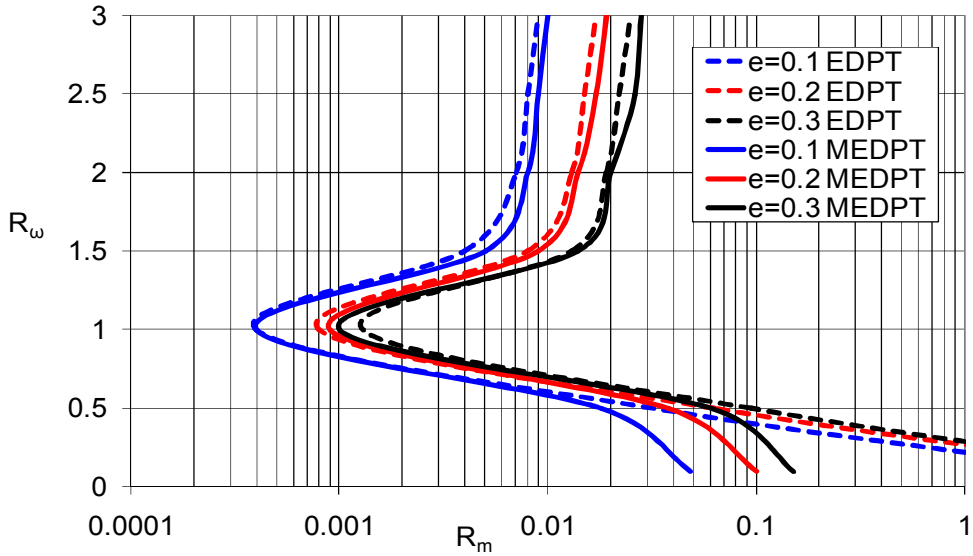
Σκοπός είναι να μην αλλάξει η ιδιοσυχνότητα του υποβάθρου και να μην αλλάξει η ιδιοσυχνότητα της διέγερσης, γιατί αν γίνει κάτι τέτοιο τότε δε γίνεται τροποποιημένη αποσύζευξη διβάθμιας κατασκευής με ιδιοσυχνότητα ω_p όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (3.43), αλλά κανονική αποσυζευγμένη ανάλυση μιας κατασκευής με υπόβαθρο που έχει ιδιοσυχνότητα που υπολογίζεται από την (3.45), μιας κατασκευής δηλαδή η οποία απλά αντιστοιχεί σε άλλη θέση στο (R_ω, R_m).

$$\omega'_p = \sqrt{\frac{K_p}{M_p + M_s}} \tag{3.45}$$

Το σφάλμα της αποσύζευξης από την τροποποιημένη διαδικασία υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.34) και προκύπτει έτσι η κατανομή του σφάλματος αποσύζευξης στη στάθμη p και s για το σύνολο των διβάθμιων ταλαντωτών που αντιστοιχούν στο επίπεδο (R_ω, R_m). Όπως και προηγουμένως, επιλέγονται οι τρεις χαρακτηριστικές στάθμες σφάλματος και απεικονίζονται στις καμπύλες αποσύζευξης που φαίνονται στις Εικ. 3.22 και 3.23 με το χαρακτηρισμό MEDPT (modified elastic decoupling procedure transient), σε σύγκριση με τις απλές καμπύλες αποσύζευξης EDPT των Εικ. 3.20 και 3.21.



Εικ. 3.22: Σύγκριση κανονικών και τροποποιημένων καμπυλών αποσύζευξης στάθμης p από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση



Εικ. 3.23: Σύγκριση κανονικών και τροποποιημένων καμπυλών αποσύζευξης στάθμης s από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση

Οι νέες καμπύλες MEDPT είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά στην περιοχή των μεγάλων λόγων R_ω σε σχέση με τις αρχικές καμπύλες EDPT, ενώ στον αντίποδα των λόγων ιδιοσυχνοτήτων, είναι μετατοπισμένες προς τα αριστερά, πράγμα που ισχύει και για τις δύο στάθμες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στις μεγάλες τιμές του λόγου R_ω, η τροποποίηση της αποσύζευξης δίνει πιο ευμενείς καμπύλες, δηλαδή η διαδικασία της αποσύζευξης για ένα συγκεκριμένο διβάθμιο ταλαντωτή δίνει μικρότερο σφάλμα αποσύζευξης. Αντίθετα, για μικρές τιμές λόγου R_ω, οι νέες καμπύλες MEDPT είναι μετατοπισμένες προς τα αριστερά, οπότε μεγαλύτερη περιοχή του επιπέδου δίνει σφάλμα αντίστοιχο ή και μεγαλύτερο από τις τρεις χαρακτηριστικές τιμές, οπότε οι νέες καμπύλες είναι δυσμενέστερες.

Η περιοχή των μεγάλων λόγων ιδιοσυχνοτήτων αντιστοιχεί σε πολύ δύσκαμπτες υπερκατασκευές, οι οποίες πρακτικά ακολουθούν την επιβαλλόμενη στη βάση τους διέγερση. Το αποτέλεσμα είναι στη συζευγμένη ανάλυση ο διβάθμιος ταλαντωτής να συμπεριφέρεται ως μονοβάθμιος με δυσκαμψία K_p και μάζα $M_p + M_s$. Την ίδια στιγμή, στην αποσυζευγμένη ανάλυση το υπόβαθρο δυσκαμψίας K_p έχει τη δική του μάζα και την επιπλέον μάζα της υπερκατασκευής, με αποτέλεσμα να έχει απόκριση σχεδόν ίδια με αυτή του υποβάθρου της συζευγμένης ανάλυσης. Έτσι, απαιτούνται μεγάλες μάζες υπερκατασκευής, κατ' αντιστοιχία μεγάλοι λόγοι μαζών, προκειμένου οι αποκρίσεις του υποβάθρου στις δύο αναλύσεις να διαφοροποιηθούν αρκετά και να προκύψουν σφάλματα ίσα ή μεγαλύτερα από τις χαρακτηριστικές τιμές. Αντίστοιχα,

για την υπερκατασκευή s, η οποία ακολουθεί την κίνηση του υποβάθρου, χρειάζονται μεγαλύτεροι λόγοι μαζών, ώστε η απόκρισή της να διαφοροποιηθεί στις δύο αναλύσεις.

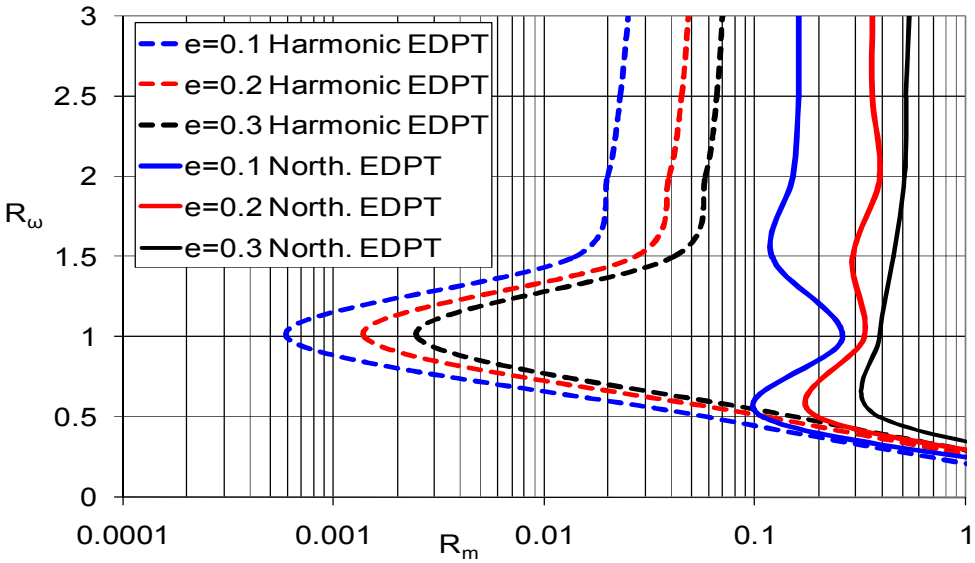
Για μικρές τιμές των λόγων ιδιοσυχνοτήτων, η υπερκατασκευή είναι πολύ πιο εύκαμπτη σε σχέση με το υπόβαθρο, με αποτέλεσμα τόσο στη συζευγμένη όσο και στην αποσυζευγμένη ανάλυση να παραμένει πρακτικά ακίνητη. Η προσθήκη όμως της μάζας της υπερκατασκευής στη μάζα του υποβάθρου μεγαλώνει την ιδιοπερίοδό του και το φέρνει έτσι κοντά στο συντονισμό με την πολύ εύκαμπτη υπερκατασκευή. Στο υπόβαθρο p το αποτέλεσμα είναι ότι η απόκρισή του διαφοροποιείται μεταξύ αποσυζευγμένης και συζευγμένης ανάλυσης και απαιτούνται μικρότεροι λόγοι μάζας σε σχέση με την EDPT διαδικασία αποσύζευξης, ώστε να προκύψουν σφάλματα που να αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές στάθμες. Στη δε υπερκατασκευή s το μεγαλύτερης περιόδου υπόβαθρο της αποσυζευγμένης ανάλυσης δίνει απόκριση που είναι λίγο πιο κοντά στο συντονισμό, οπότε και η απόκρισή της είναι μεγαλύτερη σε σχέση την συζευγμένη ανάλυση και ομοίως οι χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος προκύπτουν σε μικρότερες τιμές λόγων μαζών.

3.10 Αποσύζευξη - σεισμικές διεγέρσεις

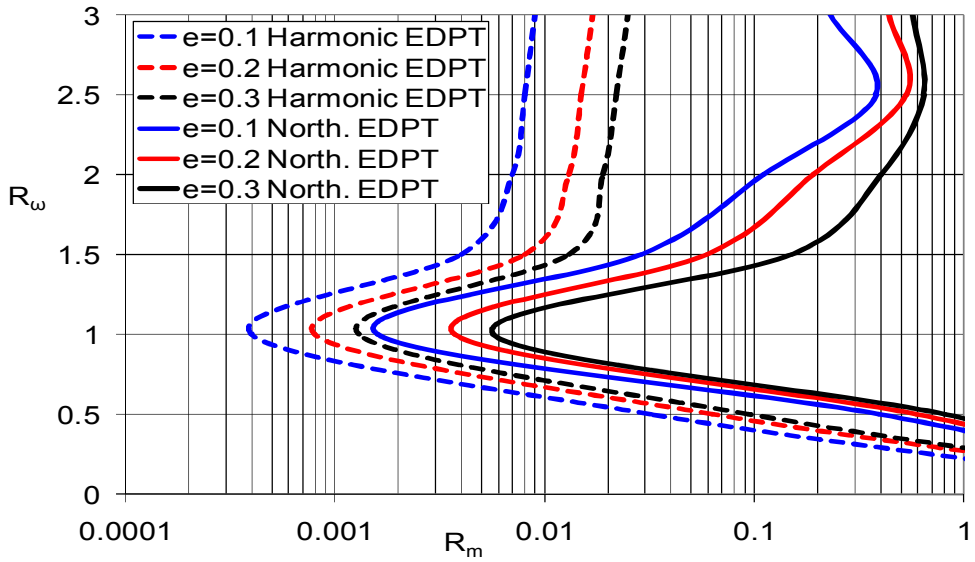
Η εκτέλεση της διαδικασίας της αποσύζευξης με αριθμητικό τρόπο, επιτρέπει την επέκταση σε σεισμικές εδαφικές διεγέρσεις, σε αντιδιαστολή με την αναλυτική επίλυση, η οποία είναι πρόσφορη μόνο για αρμονικές διεγέρσεις. Έτσι, ο διβάθμιος μικτός ταλαντωτής της Εικ. 3.3, υποβάλλεται στη συζευγμένη και στην αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης που περιγράφεται στις εξισώσεις (3.12) ως (3.17), και το σφάλμα που προκύπτει από την αποσύζευξη υπολογίζεται από την εξίσωση (3.18). Η διαφορά τώρα είναι ότι δε χρησιμοποιούνται αρμονικές διεγέρσεις με συχνότητα στη γειτονιά του συντονισμού, αλλά σεισμικές.

Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι δέκα καταγραφές που έχουν ήδη παρουσιαστεί. Για κάθε μια από αυτές εκτελείται η συζευγμένη και η αποσυζευγμένη διαδικασία ανάλυσης για κάθε διβάθμιο που αντιστοιχεί σε ένα σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), και υπολογίζεται το σφάλμα όπως στην εξίσωση (3.18). Κατ' αυτόν τον

τρόπο, αποκτάται για κάθε μια από τις δέκα καταγραφές η κατανομή του σφάλματος στο επίπεδο (R_ω, R_m), και σχεδιάζονται οι καμπύλες αποσύζευξης για τις τρεις χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος $e = 0.1, 0.2, 0.3$. Οι καμπύλες αυτές για την καταγραφή του Northridge, φαίνονται στις Εικ. 3.24 και 3.25 σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αρμονικές.



Εικ. 3.24: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση και καταγραφή Northridge στη στάθμη p



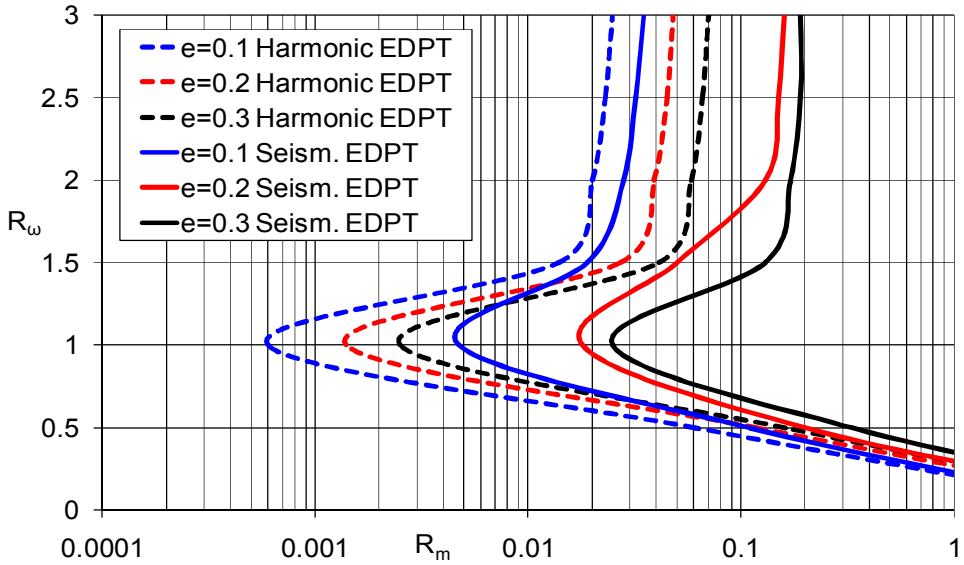
Εικ. 3.25: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση και καταγραφή Northridge στη στάθμη s

Οι καμπύλες αποσύζευξης που έχουν προκύψει από τη σεισμική φόρτιση είναι σαφώς ευμενέστερες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από την αρμονική διέγερση σε συντονισμό. Η διαφορά προκύπτει από το συχνοτικό περιεχόμενο των

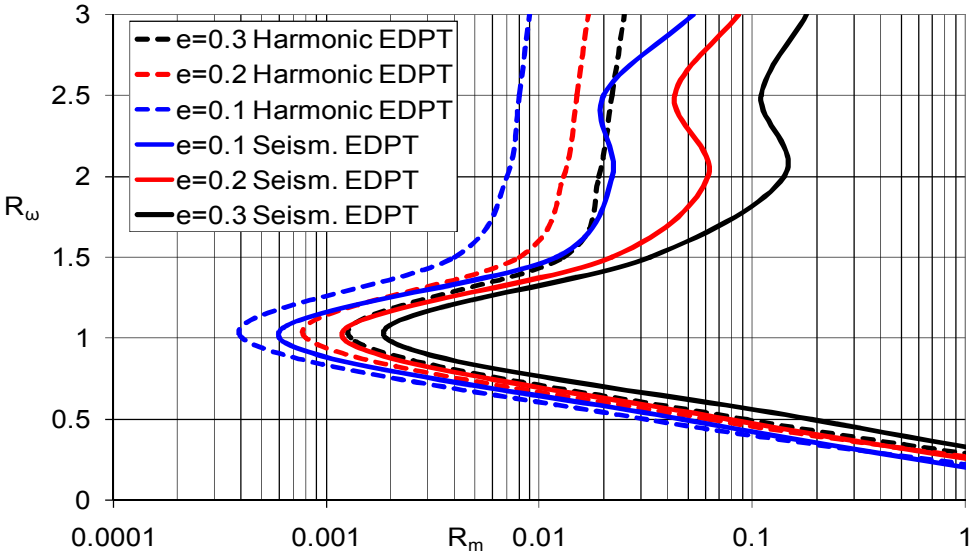
δύο διεγέρσεων. Η μεν αρμονική διέγερση έχει συχνότητα στη γειτονιά του συντονισμού, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (3.36), με σκοπό για κάθε διβάθμιο ταλαντωτή να προκύψει το μέγιστο δυνατό σφάλμα αποσύζευξης. Αντίθετα, η σεισμική διέγερση περιέχει μια πληθώρα συχνοτήτων, οι οποίες σε κάθε ταλαντωτή δίνουν μια ενίσχυση η οποία είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη της αρμονικής φόρτισης και κατά συνέπεια και οι διαφορές μεταξύ συζευγμένης και αποσυζευγμένης διαδικασίας αμβλύνονται. Το πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης προκαλεί και τις αλλαγές στο σχήμα των καμπυλών. Έτσι, η ανομοιομορφία με την οποία μια σεισμική διέγερση ενισχύει διάφορες ιδιοπεριόδους, όπως φαίνεται από τα φάσματα απολύτων επιταχύνσεων των καταγραφών που χρησιμοποιούνται, προκαλεί και τα ακανόνιστα σχήματα στις καμπύλες αποσύζευξης, αφού ένας συνδυασμός λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών μπορεί να οδηγήσει σε περιοχές του φάσματος με μεγάλη ενίσχυση, ενώ ένας άλλος σε περιοχές με μικρότερη ενίσχυση. Παρ' όλα αυτά, το εξόγκωμα προς τα αριστερά των καμπυλών της στάθμης s στο $R_\omega = 1$ παραμένει, λόγω του συντονισμού υποβάθρου και υπερκατασκευής.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τις δέκα καταγραφές και για κάθε θέση (R_ω, R_m) λαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές του σφάλματος αποσύζευξης για την κάθε στάθμη. Ακολούθως, για κάθε σημείο καταχωρείται η μέγιστη τιμή σφάλματος και έτσι προκύπτει η δυσμενέστερη κατανομή σφάλματος από τις δέκα σεισμικές διεγέρσεις. Αυτή η κατανομή οδηγεί σε νέες καμπύλες αποσύζευξης, οι οποίες αποτελούν τη δυσμενέστερη περιβάλλουσα των καμπυλών αποσύζευξης των σεισμικών καταγραφών, και φαίνονται στις Εικ. 3.26 και 3.27 σε σύγκριση με τις αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν από την EDPT διαδικασία αποσύζευξης με αρμονική σε συντονισμό διέγερση.

Ακόμα και στην περίπτωση της περιβάλλουσας των σεισμικών EDPT καμπυλών αποσύζευξης, είναι εμφανές ότι και στις δύο στάθμες οι σεισμικές διεγέρσεις είναι πιο ευμενείς ως προς το σφάλμα αποσύζευξης σε σχέση με τις αρμονικές σε συντονισμό διεγέρσεις. Επίσης, οι περιβάλλουσες των σεισμικών καμπυλών αποσύζευξης, αν και έχουν πιο ομαλό σχήμα που πλησιάζει αυτό των αρμονικών διεγέρσεων, εξακολουθούν να εμφανίζουν ανομοιομορφίες στη μορφή.



Εικ. 3.26: Σύγκριση αρμονικών και περιβάλλουσας σεισμικών EDPT καμπυλών στάθμης p

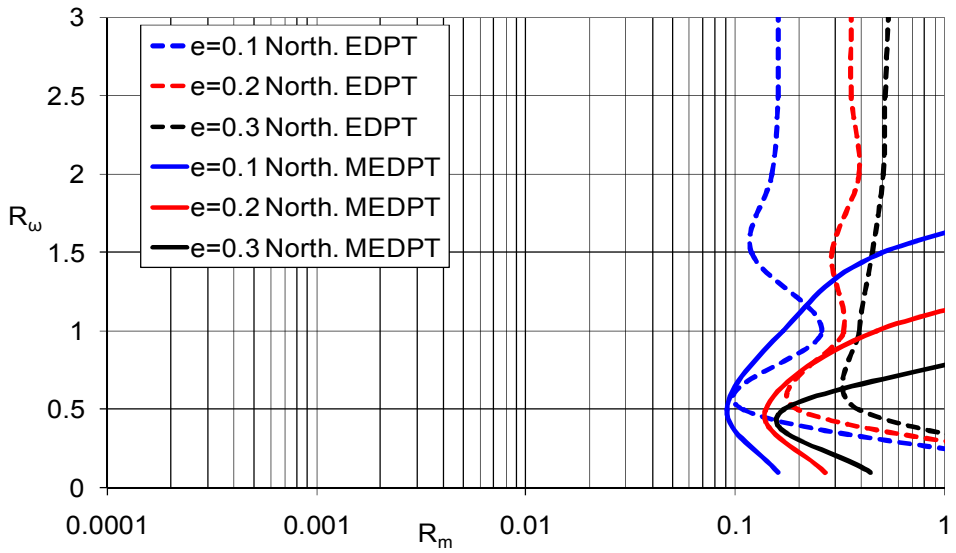


Εικ. 3.27: Σύγκριση αρμονικών και περιβάλλουσας σεισμικών EDPT καμπυλών στάθμης s

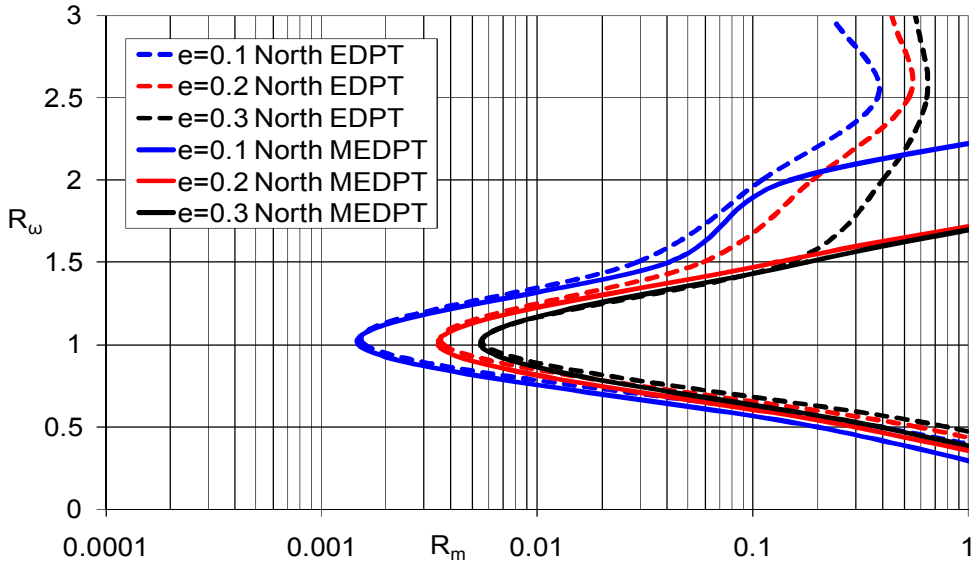
3.11 Τροποποιημένη αποσύζευξη - σεισμικές διεγέρσεις

Η τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης που ακολουθήθηκε για τον ελαστικό διβάθμιο ταλαντωτή που υπόκειται σε αρμονική εδαφική διέγερση, εφαρμόζεται και στις δέκα σεισμικές καταγραφές. Έτσι, πάλι ο διβάθμιος ταλαντωτής κατά τη συζευγμένη ανάλυση αναλύεται ως έχει, και κατά την αποσυζευγμένη ανάλυση το υπόβαθρο αναλύεται με την τροποποιημένη μάζα $M_b + M_s$. Πάλι, μόνο η μάζα είναι

αυτή που τροποποιείται, ενώ η ιδιοσυχνότητα παραμένει η ίδια, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (3.43). Η τροποποιημένη αυτή διαδικασία αποσύζευξης εκτελείται για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), για κάθε μια από τις σεισμικές καταγραφές. Έτσι, αποκτώνται κατανομές σφάλματος για κάθε διέγερση. Για την καταγραφή του Northridge, η σύγκριση των κανονικών καμπυλών αποσύζευξης EDPT και των τροποποιημένων MEDPT για τις χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος φαίνεται στις Εικ. 3.28 και 3.29.



Εικ. 3.28: Σύγκριση καμπυλών EDPT και MEDPT στάθμης p για διέγερση με Northridge



Εικ. 3.29: Σύγκριση καμπυλών EDPT και MEDPT στάθμης s για διέγερση με Northridge

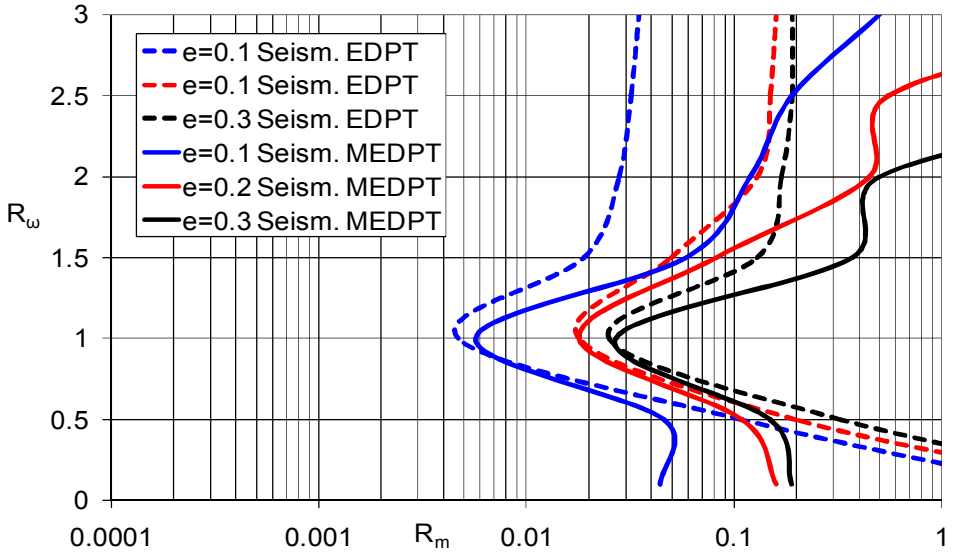
Όπως και στην περίπτωση της αρμονικής σε συντονισμό διέγερσης, στη σύγκριση μεταξύ κανονικής και τροποποιημένης διαδικασίας για σεισμική διέγερση, η

μετατόπιση των καμπυλών αποσύζευξης είναι μικτή. Έτσι, στην περιοχή των μεγάλων R_ω όπου η υπερκατασκευή είναι πολύ δύσκαμπτη, οι νέες καμπύλες είναι ευμενέστερες, ενώ αντίθετα για μικρές τιμές R_ω, όπου η υπερκατασκευή είναι εύκαμπτη, οι νέες καμπύλες είναι δυσμενέστερες. Το σχήμα τους εξακολουθεί να είναι λιγότερο κανονικό σε σχέση με τις καμπύλες που προκύπτουν από αρμονική διέγερση, ενώ παραμένει εμφανές το εξόγκωμα στο $R_\omega = 1$ των καμπυλών αποσύζευξης στη στάθμη s.

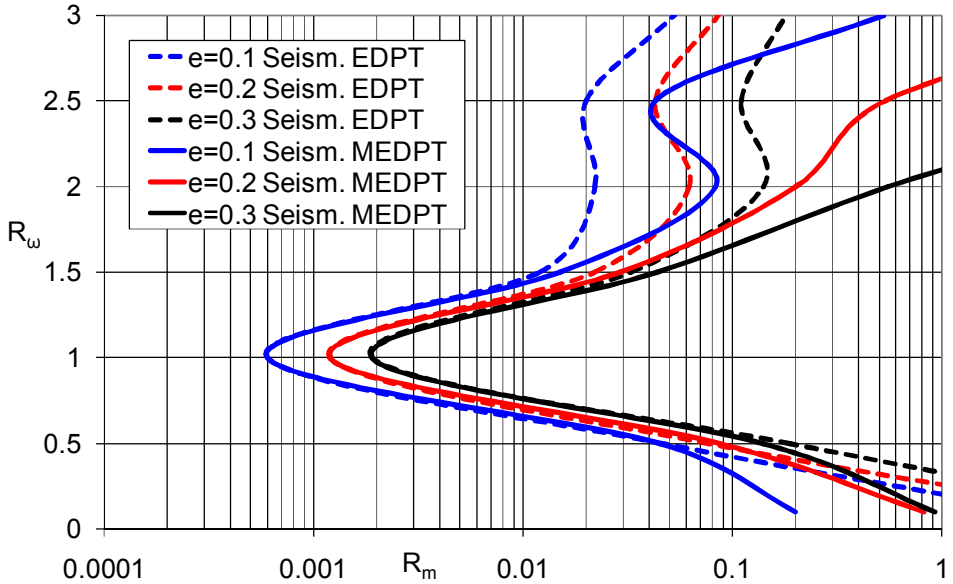
Λαμβάνοντας τη μεγαλύτερη τιμή σφάλματος για κάθε σημείο του επιπέδου, από κάθε μια από τις δέκα καταγραφές, προκύπτει η δυσμενέστερη κατανομή του σφάλματος αποσύζευξης για τις δύο στάθμες. Έτσι, αποκτώνται οι καμπύλες τροποποιημένης αποσύζευξης, οι οποίες για τις χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος φαίνονται στις Εικ. 3.30 και 3.31 σε αντιδιαστολή με τις αντίστοιχες περιβάλλουσες καμπύλες από την κανονική διαδικασία αποσύζευξης.

Κατ' αντιστοιχία με τις Εικ. 3.28 και 3.29, στις οποίες γίνεται σύγκριση μεταξύ των καμπυλών EDPT και MEDPT με διέγερση μόνο το Northridge, έτσι και στις καμπύλες που απεικονίζουν την περιβάλλουσα των χαρακτηριστικών τιμών σφάλματος, οι οποίες προκύπτουν και από τις δέκα καταγραφές, οι νέες MEDPT διαφοροποιούνται σε σχέση με τις προηγούμενες EDPT, ανάλογα με την τιμή του λόγου ιδιοσυχνοτήτων. Έτσι, για μεγάλες τιμές R_ω οι νέες καμπύλες είναι ευμενέστερες, ενώ στην περιοχή μικρών τιμών R_ω είναι δυσμενέστερες. Τέλος, η σύγκριση των MEDPT καμπυλών αποσύζευξης που προκύπτουν από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση και από την περιβάλλουσα των σφαλμάτων από τις σεισμικές καταγραφές γίνεται στις Εικ. 3.32 και 3.33.

Όπως και στην σύγκριση των EDPT καμπυλών από αρμονική φόρτιση και από την περιβάλλουσα των σεισμικών, έτσι και στις MEDPT, οι σεισμικές καμπύλες είναι ευμενέστερες σε σχέση με τις αρμονικές. Ο λόγος είναι πάλι ότι η αρμονική φόρτιση, είναι σε συντονισμό, πράγμα που την κάνει συντηρητικότερη ως προς την εκτίμηση του σφάλματος σε σχέση με τις σεισμικές διεγέρσεις.



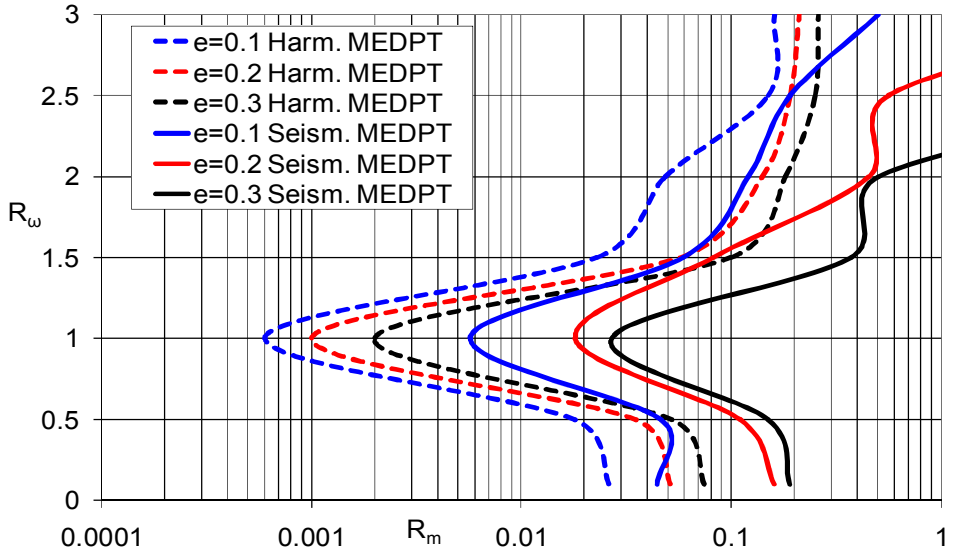
Εικ. 3.30: Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών αποσύζευξης EDPT και MEDPT στάθμης p



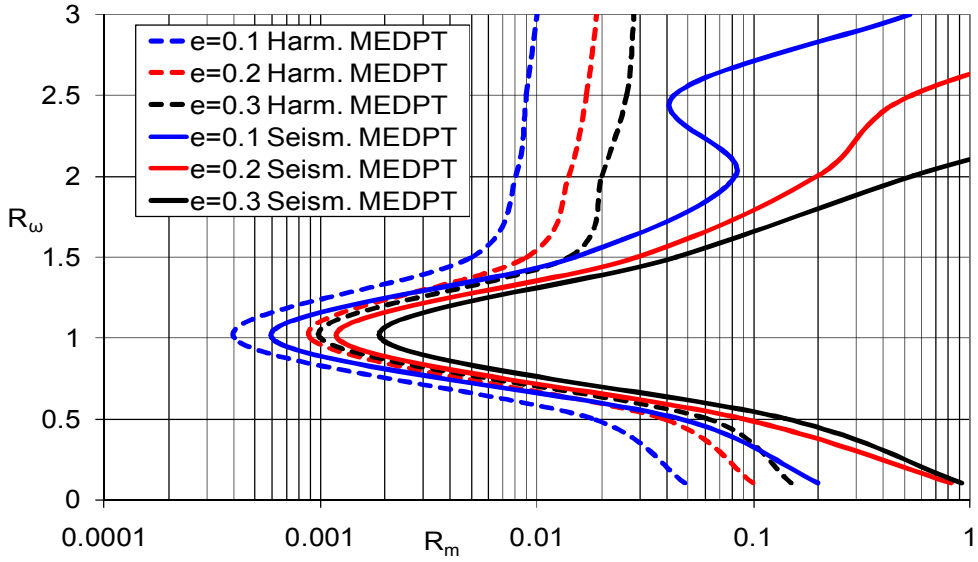
Εικ. 3.31: Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών αποσύζευξης EDPT και MEDPT στάθμης s

Εν γένει, όσον αφορά τον ελαστικό διβάθμιο ταλαντωτή, οι αρμονικές σε συντονισμό διεγέρσεις οι οποίες εφαρμόστηκαν από τους Chen και Wu [65], είναι εύκολες στον αναλυτικό χειρισμό τους και κατά συνέπεια μπορούν να οδηγήσουν σε σχέσεις υπολογισμού του σφάλματος, οι οποίες δίνουν ομαλά σχήματα καμπυλών αποσύζευξης. Όμως, όπως ήταν αναμενόμενο, οι αρμονικές διεγέρσεις αποδεικνύονται πολύ συντηρητικές και οδηγούν στο μεγαλύτερο μέρος του επιπέδου (R_ω, R_m) σε καμπύλες αποσύζευξης κατά πολύ μετατοπισμένες προς τα αριστερά, πολύ δυσμενέστερες δηλαδή, σε σχέση με τις σεισμικές, ακόμα και με τις καμπύλες αποσύζευξης που προέκυψαν από τις περιβάλλουσες των σφαλμάτων των δέκα

σεισμικών καταγραφών. Βέβαια, το σχήμα των αρμονικών καμπυλών αποσύζευξης είναι πολύ πιο κανονικό σε σχέση με το αντίστοιχο των σεισμικών, λόγω της ακανόνιστης μορφής του σεισμικού φάσματος, όταν όμως οι καταγραφές αντιμετωπιστούν σαν ομάδα και σχεδιαστούν οι καμπύλες αποσύζευξης με βάση την περιβάλλουσα των σφαλμάτων τους, τότε οι καμπύλες αποσύζευξης που προκύπτουν είναι αρκετά πιο ομαλές.



Εικ. 3.32: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης MEDPT από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση και από την περιβάλλουσα των σεισμικών για τη στάθμη p



Εικ. 3.33: Σύγκριση καμπυλών αποσύζευξης MEDPT από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση και από την περιβάλλουσα των σεισμικών για τη στάθμη s

Η τροποποίηση στην αποσυζευγμένη διαδικασία του ελαστικού διβάθμιου ταλαντωτή, τόσο στις αρμονικές όσο και στις σεισμικές διεγέρσεις, είτε αυτές

εξετάζονται μεμονωμένα είτε ομαδικά με την περιβάλλουσα των σφαλμάτων, δίνει μετατόπιση των καμπυλών αποσύζευξης ανάλογα με την δυσκαμψία της υπερκατασκευής σε σχέση με το υπόβαθρο. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις των μεγάλων λόγων ιδιοσυχνοτήτων, οι καμπύλες MEDPT είναι ευμενέστερες σε σχέση με τις EDPT, ενώ για τους μικρούς λόγους ιδιοσυχνοτήτων είναι δυσμενέστερες.

3.12 Αποσύζευξη ελαστοπλαστικών μικτών κατασκευών

Η εφαρμογή της αποσυζευγμένης ανάλυσης με αριθμητικό τρόπο αντί του αναλυτικού, εκτός των άλλων επιτρέπει και τη θεώρηση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς στην υπό μελέτη κατασκευή. Μια τέτοια θεώρηση συμπεριφοράς για τις μικτές κατασκευές δεν είναι η συνήθης, αφού κατά κανόνα η μελέτη τους γίνεται ελαστικά. Οι μικτές κατασκευές, είτε αυτές είναι μεταλλικές προσθήκες σε υφιστάμενες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε είναι εξ' ολοκλήρου νέες κατασκευές, μελετώνται ελαστικά, διότι δεν είναι σίγουρο ότι το υπόβαθρο θα έχει ικανότητα μετελαστικής συμπεριφοράς, ή για λόγους γενικότερης αβεβαιότητας στην πρόβλεψη της μετελαστικής συμπεριφοράς της συνολικής κατασκευής. Παρ' όλα αυτά η ελαστοπλαστική μελέτη του σφάλματος αποσύζευξης έχει ενδιαφέρον γιατί, ακόμα και αν μια κατασκευή μελετάται ως ελαστική, υπό πραγματικές συνθήκες ισχυρής σεισμικής φόρτισης, μπορεί να αναπτυχθεί ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Έτσι, είναι ενδιαφέρον να υπάρχει πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης και υπό αυτές τις συνθήκες, ακόμα και αν αυτές δεν προβλέπονται από τη μελέτη της κατασκευής.

Η θεώρηση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς γίνεται στη στάθμη p, αφού οι πλαστικές αρθρώσεις μιας κατασκευής κατά κύριο λόγο εμφανίζονται στις κατώτερες στάθμες, ενώ η στάθμη s θεωρείται ότι παραμένει ελαστική. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την αποσυζευγμένη διαδικασία, διατηρούν την ίδια μορφή. Η ουσιαστική αλλαγή επέρχεται στη μόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας, το οποίο πρέπει να αποδώσει την ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Έτσι, στις εξισώσεις κίνησης της κατασκευής με $np+ns$ βαθμούς ελευθερίας, το γινόμενο $\mathbf{K}\{y\}$ το οποίο αποδίδει τις δυνάμεις που ασκούνται στους βαθμούς ελευθερίας λόγω των σχετικών τους

μετακινήσεων, αντικαθίσταται από ένα διάνυσμα $\mathbf{F}$ διαστάσεων $(np+ns)\times 1$, οπότε η εξίσωση (3.1) που περιγράφει τη συζευγμένη διαδικασία ανάλυσης του διβάθμιου μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$\mathbf{M}\left\{\ddot{y}^{coup}\right\}+\mathbf{C}\left\{\dot{y}^{coup}\right\}+\mathbf{F}=-\mathbf{M}\{r\}\ddot{x}_g \tag{3.46}$$

Και πάλι λαμβάνονται αποτελέσματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όπως περιγράφεται από την (3.2). Ακολουθεί η αποσυζευγμένη ανάλυση του ελαστοπλαστικού πλέον υποβάθρου, οπότε η εξίσωση (3.3) γίνεται:

$$\mathbf{M}_p\left\{\ddot{y}_p^{dec}\right\}+\mathbf{C}_p\left\{\dot{y}_p^{dec}\right\}+\mathbf{F}_p=-\mathbf{M}_p\left\{r_p\right\}\ddot{x}_g \tag{3.47}$$

με το διάνυσμα $\mathbf{F}_p$ να είναι διαστάσεων $np\times 1$. Πάλι εξάγονται τα αποτελέσματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, όπως στην (3.4), και η χρονοϊστορία της στάθμης έδρασης της υπερκατασκευής, αποτελεί διέγερση για την υπερκατασκευή, της οποίας η κίνηση, αφού παραμένει ελαστική, περιγράφεται από την εξίσωση (3.5). Η απόκριση μετατρέπεται σε όρους απολύτων επιταχύνσεων σύμφωνα με την (3.6), και το σφάλμα της αποσύζευξης για την κάθε στάθμη εκτιμάται από την (3.7).

Στο διβάθμιο ταλαντωτή της Εικ. 3.3 που μελετάται στην παρούσα εργασία, η πλαστικοποίηση εμφανίζεται στη στάθμη p, ενώ η s παραμένει ελαστική. Έτσι, οι ιδιοσυχνότητες της κάθε στάθμης δίνονται από την (3.8) και το μητρώο μάζας περιγράφεται από την εξίσωση (3.9) όχι όμως και το μητρώο δυσκαμψίας. Το μητρώο απόσβεσης κατασκευάζεται όπως περιγράφεται από τις (3.10) και (3.11), και το διάνυσμα $\{F\}$, διαστάσεων 2×1, εισάγεται στην (3.12) η οποία γίνεται:

$$\mathbf{M}\begin{Bmatrix}\ddot{y}_p^{coup}\\ \ddot{y}_s^{coup}\end{Bmatrix}+\mathbf{C}\begin{Bmatrix}\dot{y}_p^{coup}\\ \dot{y}_s^{coup}\end{Bmatrix}+\{F\}=-\mathbf{M}\begin{Bmatrix}1\\1\end{Bmatrix}\ddot{x}_g \tag{3.48}$$

Τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε όρους απολύτων επιταχύνσεων στις δύο στάθμες όπως στην (3.13). Ακολουθεί η αποσυζευγμένη ανάλυση του ελαστοπλαστικού αποσυζευγμένου υποβάθρου, οπότε η (3.14) μετατρέπεται στην:

$$M_p\ddot{y}_p^{dec}+C_p\dot{y}_p^{dec}+F_p=-M_p\ddot{x}_g \tag{3.49}$$

Το F_p είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που περιγράφει τη δύναμη που ασκείται στο μονοβάθμιο ταλαντωτή p λόγω της σχετικής μετακίνησής του ως προς το έδαφος. Η

απόκρισή του μετατρέπεται σε απόλυτες επιταχύνσεις σύμφωνα με την (3.15), και χρησιμοποιείται σα διέγερση στην υπερκατασκευή s, η οποία παραμένει ελαστική και η κίνησή της περιγράφεται από την (3.16). Η απόκρισή της λαμβάνεται σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και υπολογίζεται το σφάλμα αποσύζευξης όπως στις εξισώσεις (3.17) και (3.18).

Σε περίπτωση που ακολουθηθεί η τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης, τότε για την περίπτωση της πολυβάθμιας μικτής κατασκευής η εξίσωση (3.25) μετατρέπεται στην:

$$\mathbf{M}_p^{mod}\left\{{}_{mod}\ddot{y}_p^{dec}\right\}+\mathbf{C}_p\left\{{}_{mod}\dot{y}_p^{dec}\right\}+\mathbf{F}_p=-\mathbf{M}_p^{mod}\left\{r_p\right\}\ddot{x}_g \tag{3.50}$$

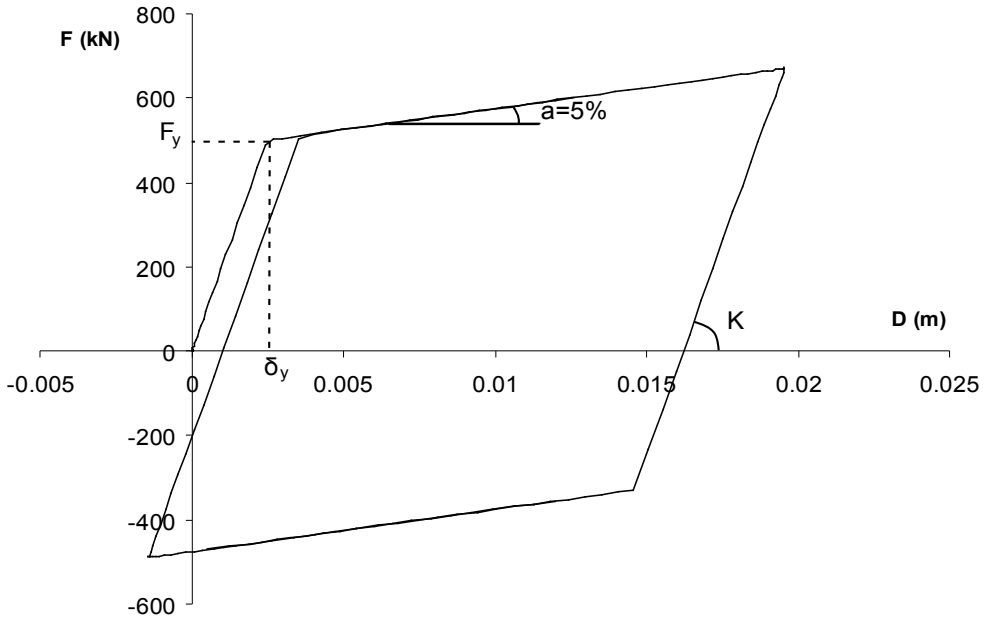
και τα αποτελέσματα γίνονται απόλυτες επιταχύνσεις, γίνεται η ανάλυση της υπερκατασκευής και υπολογίζεται το σφάλμα όπως στις εξισώσεις (3.26) ως (3.29).

3.13 Υπολογιστική εφαρμογή ελαστοπλαστικής διαδικασίας αποσύζευξης

Όπως και στην ελαστική ανάλυση της αποσύζευξης, έτσι και στην ελαστοπλαστική οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν τη συζευγμένη ανάλυση του διβάθμιου ταλαντωτή και τις αποσυζευγμένες αναλύσεις των μονοβάθμιων ταλαντωτών, επιλύονται αριθμητικά με χρήση ολοκλήρωσης κατά Newmark με τη μέθοδο της μέσης επιτάχυνσης.

Τα προσομοιώματα του διβάθμιου μικτού φορέα στη συζευγμένη ανάλυση και των δύο μονοβάθμιων φορέων στην αποσυζευγμένη ανάλυση μορφώνονται πάλι στο λογισμικό OS [124]. Ουσιαστικά, χρησιμοποιούνται τα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν για την ελαστική διαδικασία αποσύζευξης με κατάλληλες τροποποιήσεις, ώστε να ληφθεί υπόψη η ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Έτσι, όλα παραμένουν τα ίδια, όπως σχηματικά απεικονίζονται στην Εικ. 3.7, εκτός από τα στοιχεία ZL που αποδίδουν την δυσκαμψία της κάθε στάθμης, τα οποία προσαρμόζονται, ώστε να αποδώσουν τη διγραμμική ελαστοπλαστική συμπεριφορά της στάθμης p.

Προκειμένου να αποδοθεί η ελαστοπλαστική συμπεριφορά της στάθμης p, στο ZL στοιχείο που συνδέει τους κόμβους 1 και 2 του προσομοιώματος της Εικ. 3.7 αποδίδεται όριο διαρροής τέτοιο, ώστε να υπάρξει πλαστικοποίηση κατά τη διάρκεια της διέγερσης. Μάλιστα γίνονται δοκιμές με διάφορα όρια διαρροής, ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους, σε αντιδιαστολή με τις ελαστικές αναλύσεις, στις οποίες το όριο διαρροής θεωρείται αρκετά μεγάλο ώστε ποτέ να μη ξεπεραστεί. Η σχέση δύναμης μετατόπισης που αποδίδεται στο ZL στοιχείο του υποβάθρου είναι διγραμμική με κινηματική υστέρηση, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.34. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση είναι ο πλήρης Newton όπως περιγράφεται από τον Chopra [1] και το εγχειρίδιο του OS [124], ο οποίος για τη διγραμμική συμπεριφορά που έχουν τα ZL στοιχεία δίνει ακριβείς λύσεις.



Εικ. 3.34: Διγραμμική ελαστοπλαστική συμπεριφορά με κινηματική κράτυνση 5%

Η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης που φαίνεται στην Εικ. 3.34, δε μπορεί να αποδώσει την απόσβεση λόγω της ελαστικής υστερητικής συμπεριφοράς του υλικού. Για το λόγο αυτό, και παρά την ελαστοπλαστική συμπεριφορά που δίνουν τα ZL στοιχεία, πάλι εφαρμόζονται ZL στοιχεία που παρέχουν στην κάθε στάθμη μόνο απόσβεση, όπως και στο ελαστικό προσομοίωμα. Τα στοιχεία αυτά δίνουν απόσβεση μόνο στη σχετική κίνηση της κάθε στάθμης σε σχέση με την υποκείμενη, και όχι στην απόλυτη κίνηση, υλοποιούν δηλαδή την απόσβεση μη αναλογικού τύπου που περιγράφεται στο μητρώο της εξίσωσης (3.11). Οι ιδιότητες των στοιχείων αυτών, όπως και στην περίπτωση του ελαστικού διβάθμιου ταλαντωτή, καθορίζονται από την εξίσωση (3.10), με τις ιδιοσυχνότητες της κάθε στάθμης να καθορίζονται από

την εξίσωση (3.8). Χρησιμοποιούνται οι ιδιοσυχνότητες οι οποίες προκύπτουν από την ελαστική δυσκαμψία, αφού τα συγκεκριμένα στοιχεία έχουν σκοπό να αποδώσουν την απόσβεση λόγω ελαστικής υστερητικής συμπεριφοράς.

3.14 Υλοποίηση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Η ελαστοπλαστική θεώρηση για τη συμπεριφορά της στάθμης p κατά τη συζευγμένη και την αποσυζευγμένη ανάλυση, προσθέτει άλλη μια παράμετρο σε αυτές που ελέγχουν το σφάλμα της αποσύζευξης, όπως έχει μελετηθεί μέχρι στιγμής. Πλέον, πέρα από τους λόγους μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, και από το είδος της διέγερσης, αρμονική σε συντονισμό ή σεισμική, και η αντοχή F_y του υποβάθρου ελέγχει το σφάλμα αποσύζευξης που προκύπτει για κάθε ένα διβάθμιο του επιπέδου (R_ω, R_m).

Για λόγους οργάνωσης της μελέτης του σφάλματος της αποσύζευξης όταν πλαστικοποιείται το υπόβαθρο p, εκλέγονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές για την αντοχή F_y του υποβάθρου, οι οποίες ορίζονται με βάση την απόκριση του σε μια πλήρως ελαστική ανάλυση. Συγκεκριμένα, για κάθε ένα σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) γίνεται μια ελαστική ανάλυση του υποβάθρου μόνου του, με την εκλεγμένη κάθε φορά εδαφική διέγερση, αρμονική ή σεισμική. Καταγράφεται η χρονοϊστορία της δύναμης F_p του ZL στοιχείου που παρέχει τη δυσκαμψία, το οποίο στο στάδιο αυτό παραμένει ελαστικό. Ακολούθως, το απόλυτο μέγιστο από την χρονοϊστορία αυτή διαιρείται με 2,3 και 10, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.51), και με τον τρόπο αυτό προκύπτουν τα τρία χαρακτηριστικά επίπεδα αντοχής.

$$F_y = \frac{\max\left(\left|F_p\right|\right)}{\lambda}, \quad \lambda = (2, 3, 10) \tag{3.51}$$

Ο συντελεστής αυτός λ ο οποίος διαιρεί την απόλυτη μέγιστη δύναμη του ελαστικού υποβάθρου, δεν είναι ένας συντελεστής πλαστιμότητας, αφού δεν αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη διατομή. Επίσης, δεν είναι και ένας συντελεστής συμπεριφοράς όπως ορίζεται από τους αντισεισμικούς κανονισμούς, αφού δεν αναφέρεται στη μείωση των σεισμικών εντατικών μεγεθών μιας ιδιομορφής. Είναι απλά ένας συντελεστής που

μειώνει την αντοχή της στάθμης του υποβάθρου, αναφέρεται δηλαδή σε μια στάθμη, όχι σε μια διατομή, ούτε σε μια ιδιομορφή. Ο σκοπός του είναι να προσομοιώσει τη μείωση των σεισμικών εντατικών μεγεθών σε μια στάθμη μιας κατασκευής, στην οποία εφαρμόζεται ένας συντελεστής συμπεριφοράς q.

Επειδή λοιπόν οι πλαστικές αρθρώσεις σε μια κατασκευή εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις κατώτερες στάθμες, εκεί δηλαδή που η σεισμική ένταση είναι μεγαλύτερη, και στην εργασία αυτή, επιλέγεται να μειωθεί η αντοχή του υποβάθρου και όχι της υπερκατασκευής, εκεί δηλαδή γίνεται η διαίρεση της μέγιστης ελαστικής σεισμικής δύναμης με το συντελεστή λ. Δεδομένου ότι σκοπός του λ είναι να προσομοιώσει το q που συνήθως χρησιμοποιείται, παίρνει και τις τιμές 2 και 3, προκειμένου να υπάρχει μια αντιστοιχία με τη μελετητική πρακτική. Η τιμή 10 είναι ακραία, χρησιμοποιείται όμως προκειμένου να μελετηθεί το σφάλμα της αποσύζευξης σε ακραίες ελαστοπλαστικές συμπεριφορές.

3.15 Αποσύζευξη ελαστοπλαστικών κατασκευών σε αρμονική διέγερση

Προκειμένου να γίνει η εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης σε ελαστοπλαστικές κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε αρμονική διέγερση, δε χρησιμοποιούνται διεγέρσεις με συχνότητα στη γειτονιά του συντονισμού, όπως δείχνει η εξίσωση (3.36). Αντίθετα τώρα, για κάθε ένα διβάθμιο ταλαντωτή του επιπέδου (R_ω, R_m) χρησιμοποιείται μία μόνο διέγερση, αυτή που είναι σε συντονισμό με το υπόβαθρο p. Ο λόγος είναι ότι επιδιώκεται να υπάρξει ο μέγιστος δυνατός συντονισμός στο υπόβαθρο p που θα οδηγήσει στη μέγιστη ενίσχυση της εδαφικής διέγερσης, άρα και σε πιο έντονη εκδήλωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

Το υπόβαθρο που μελετήθηκε και στην ελαστική διαδικασία αποσύζευξης, αυτό δηλαδή που βρίσκεται στο πλατό του κανονιστικού φάσματος με μάζα $M_p = 20Mgr$ και περίοδο $T_p = 0.2s$, αποτελεί και τώρα τη βάση για τη δημιουργία όλων των διβάθμιων ταλαντωτών του επιπέδου (R_ω, R_m) μέσω των τιμών που λαμβάνουν οι λόγοι ιδιοσυχνοτήτων και μαζών. Για κάθε ένα από τα ζεύγη τιμών, δημιουργείται μια

εδαφική διέγερση της μορφής της εξίσωσης (3.52), η οποία διεγείρει όλους τους διβάθμιους ταλαντωτές του επιπέδου.

$$\ddot{x}_g = \sin\left(\omega_p t\right) \tag{3.52}$$

Αυτή η εδαφική διέγερση, χρησιμοποιείται πρώτα μια φορά στο υπόβαθρο p μόνο του, ώστε να προκύψει η χρονοϊστορία των δυνάμεων του στοιχείου ZL που υλοποιεί τη δυσκαμψία του. Από τη χρονοϊστορία αυτή λαμβάνεται το απόλυτο μέγιστο, το οποίο διαιρείται με τις τρεις τιμές του λόγου λ, και δίνει έτσι τις τρεις χαρακτηριστικές τιμές της αντοχής. Κάθε μια από αυτές τις τρεις τιμές, χρησιμοποιείται για να καθορίσει την αντοχή του υποβάθρου σε ισάριθμες αναλύσεις αποσύζευξης.

Σε κάθε μια από αυτές τις αναλύσεις, αποδίδεται σαν αντοχή στο υπόβαθρο p η αντοχή που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία, και ακολούθως όπως στην EDPT ανάλυση αποσύζευξης για κάθε ζεύγος λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών κατασκευάζονται το διβάθμιο μοντέλο και ο μονοβάθμιος ταλαντωτής s και εκτελείται η διαδικασία αποσύζευξης με διέγερση αυτήν που περιγράφεται από την εξίσωση (3.52).

Όπως και στην προηγούμενη EDPT διαδικασία αποσύζευξης, σε κάθε σημείο του επιπέδου $\left(R_\omega, R_m\right)$ από την νέα EPDPT (Elasto – Plastic Decoupling Procedure Transient) καταγράφεται το σφάλμα αποσύζευξης. Στην Εικ. 3.35 φαίνεται για κάθε τιμή του λόγου λ και για τις δύο στάθμες η σύγκριση των EDPT και των EPDPT καμπυλών αποσύζευξης για τις χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος. Οι νέες καμπύλες είναι σαφώς ευμενέστερες σε σχέση με τις ελαστικές. Ο λόγος είναι ότι η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του υποβάθρου και στις δύο αναλύσεις, συζευγμένη και αποσυζευγμένη, δεν επιτρέπει μεγάλες ενισχύσεις της εδαφικής διέγερσης. Ως εκ τούτου, οι αποκρίσεις που λαμβάνονται και στις δύο στάθμες είναι συγκρίσιμες μεταξύ των δύο τύπων ανάλυσης και τα σφάλματα για κάθε σημείο $\left(R_\omega, R_m\right)$ είναι μικρότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα από την EDPT διαδικασία αποσύζευξης.

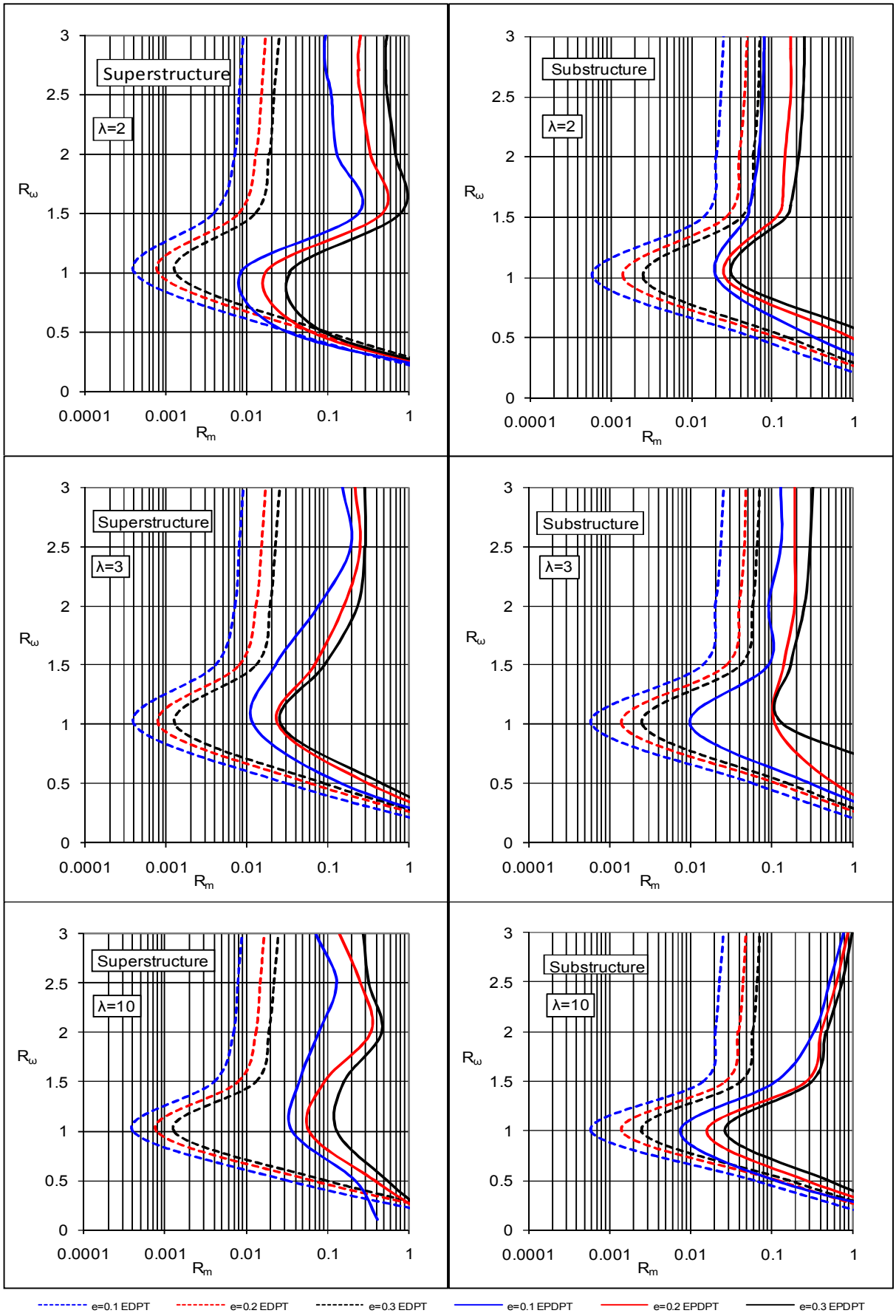
Η μορφή που έχουν οι νέες καμπύλες είναι σχεδόν η ίδια με αυτήν της ελαστικής ανάλυσης. Η περιοχή γύρω από το συντονισμό των δύο τμημάτων είναι η δυσμενέστερη όσον αφορά το σφάλμα αποσύζευξης, η περιοχή των μικρών R_ω παραμένει ευμενής, ενώ στον αντίποδα των λόγων ιδιοσυχνοτήτων οι χαρακτηριστικές τιμές του σφάλματος εντοπίζονται σε μέσες τιμές του λόγου μαζών.

Χαρακτηριστικό είναι το τοπικό εξόγκωμα των καμπυλών αποσύζευξης της υπερκατασκευής στην περιοχή του $R_\omega = 3$, ιδιαίτερα εμφανές στις περιπτώσεις $\lambda = 3$ και $\lambda = 10$. Αυτό οφείλεται στη μορφή της απόκρισης που δίνει η ελαστοπλαστική απόκριση του υποβάθρου κατά την αποσυζευγμένη διαδικασία.

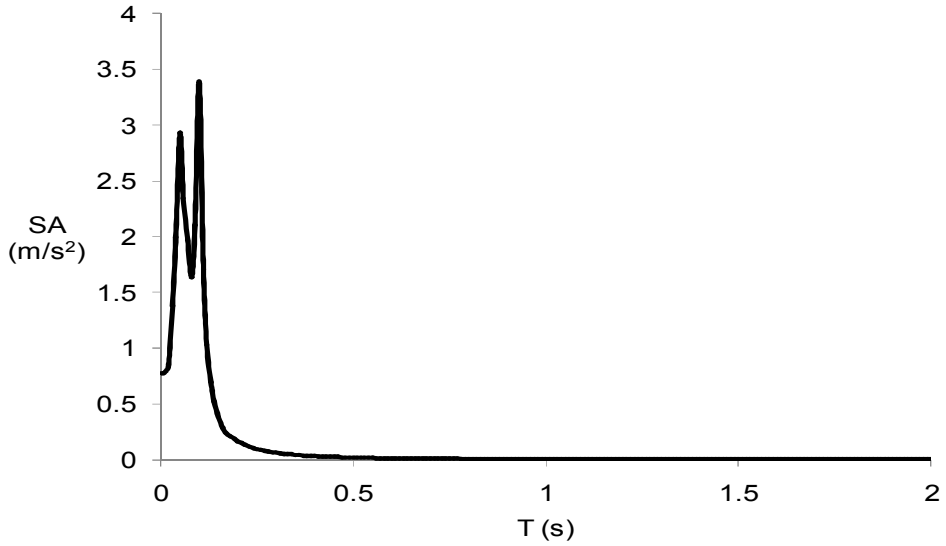
Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικ. 3.36, η οποία απεικονίζει το φάσμα σε όρους φασματικών επιταχύνσεων, spectral acceleration – SA, ενός ελαστοπλαστικού μονοβάθμιου ταλαντωτή ο οποίος διεγείρεται από εδαφική διέγερση σε συντονισμό, η απόκρισή του δεν είναι μονοχρωματική. Για την περίπτωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του διγραμμικού τύπου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, και με αρμονική διέγερση σε συντονισμό, η απόκριση δίνει ενίσχυση σε δύο συχνότητες. Η μία είναι αυτή του γραμμικού ταλαντωτή και της επιβαλλόμενης διέγερσης, και η δεύτερη οφείλεται στην χρονοϊστορία της απόκρισης η οποία λόγω των επαναλαμβανόμενων πλαστικοποιήσεων δεν περιγράφεται πλέον μόνο από μια συχνότητα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι, λόγω των επιπλέον συχνοτήτων στις οποίες προκύπτει ενίσχυση, να υπάρχουν και άλλες κορυφές στις καμπύλες αποσύζευξης.

Τελικά, η δεύτερη συχνότητα που υπάρχει στην απόκριση του αποσυζευγμένου υποβάθρου, δίνει σημαντική ενίσχυση σε υπερκατασκευές οι οποίες βρίσκονται σε λόγο ιδιοσυχνοτήτων κοντά στο $R_\omega = 3$. Έτσι, πέρα από την περιοχή του πρωτεύοντος συντονισμού στο $R_\omega = 1$, προκύπτει και μια δεύτερη περιοχή όπου οι καμπύλες είναι μετατοπισμένες προς τα αριστερά, προκύπτει δηλαδή και μια δεύτερη περιοχή δυσμενών καμπυλών αποσύζευξης..

Η μετατόπιση αυτή, δεν είναι τόσο έντονη όσο αυτή του κλασσικού συντονισμού, η ενίσχυση δηλαδή που δίνει στην υπερκατασκευή δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στην περίπτωση $R_\omega = 1$, όπως άλλωστε φαίνεται και από το φάσμα της Εικ. 3.36. Επιπλέον, είναι πιο εμφανής όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του συντελεστή λ. Έτσι, στην περίπτωση που $\lambda = 10$ η μετατόπιση των καμπυλών αποσύζευξης προς τα αριστερά είναι εμφανής, στην περίπτωση που $\lambda = 3$ λιγότερο, ενώ όταν $\lambda = 2$ δεν εμφανίζεται. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν η αντοχή του υποβάθρου είναι μικρή, στην περίπτωση δηλαδή $\lambda = 10$, το υπόβαθρο αρχίζει να κάνει ελαστοπλαστικές ταλαντώσεις ήδη από την αρχή της διέγερσης, οπότε οι ελαστοπλαστικοί κύκλοι ταλάντωσης είναι περισσότεροι, άρα και η δεύτερη κορυφή στο φάσμα απόκρισης πιο έντονη.



Εικ. 3.35: Σύγκριση καμπυλών EDPT και EPDPT από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



Εικ. 3.36: Φάσμα απόκρισης κίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού ταλαντωτή

Οι καμπύλες αποσύζευξης της υπερκατασκευής από την EDPT και την EPDPT διαδικασία πλησιάζουν μεταξύ τους στην περιοχή των μικρών λόγων ιδιοσυχνοτήτων. Στην περιοχή αυτή η στάθμη s παραμένει πρακτικά ακίνητη λόγω της μεγάλης ευκαμψίας της, και σε αποσυζευγμένη και σε συζευγμένη ανάλυση, γι' αυτό και στην EDPT διαδικασία χρειάζονται αρκετά μεγάλοι λόγοι μαζών προκειμένου να προκύψει διαφορά ανάμεσα στις δυο αναλύσεις. Τώρα όμως στην EPDPT διαδικασία, το συζευγμένο διβάθμιο είναι εκτός συντονισμού σε σχέση με την εδαφική διέγερση η οποία έχει ιδιοσυχνότητα ω_p, σε αντίθεση με το αποσυζευγμένο υπόβαθρο το οποίο και πλαστικοποιείται πιο έντονα, οπότε προκύπτει διαφορά στην απόκριση της στάθμης s ανάμεσα στις δύο αναλύσεις. Ως εκ τούτου, δεν απαιτούνται πολύ μεγάλοι λόγοι μάζας για να προκύψουν οι χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος. Εν γένει όμως, η ελαστοπλαστική θεώρηση δίνει καμπύλες αποσύζευξης και στις δύο στάθμες οι οποίες είναι ευμενέστερες σε σχέση με αυτές της ελαστικής θεώρησης, ακόμα και στην περίπτωση της αρμονικής σε συντονισμό διέγερσης.

3.16 Αποσύζευξη τροποποιημένων ελαστοπλαστικών κατασκευών υπό αρμονική διέγερση

Όπως και στην περίπτωση των ελαστικών μικτών κατασκευών, έτσι και τώρα στις ελαστοπλαστικές, εκτελείται η αποσύζευξη και με την τροποποιημένη διαδικασία, με

τη διαφοροποίηση της σε σχέση με την ελαστική περίπτωση να αποτυπώνεται στην εξίσωση (3.50). Πάλι, το υπόβαθρο είναι ενιαίο σε όλο το επίπεδο (R_ω, R_m), και με βάση τα χαρακτηριστικά του σε κάθε σημείο του επιπέδου διαμορφώνεται ο διβάθμιος φορέας και η υπερκατασκευή μέσω των λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών. Για κάθε σημείο του επιπέδου γίνεται η συζευγμένη ανάλυση του διβάθμιου προσομοιώματος και οι αποσυζευγμένες αναλύσεις των δύο μονοβάθμιων υποφορέων, με τη διαφορά ότι στο υπόβαθρο αποδίδεται μάζα ίση με $M_p + M_s$.

Αν και το υπόβαθρο αναλύεται με την πρόσθετη μάζα της υπερκατασκευής, η εδαφική διέγερση που χρησιμοποιείται είναι αυτή της εξίσωσης (3.52), είναι δηλαδή σε συντονισμό με το μη τροποποιημένο υπόβαθρο. Ο λόγος είναι, όπως και στην MEDPT διαδικασία, ότι αν γινόταν χρήση μιας εδαφικής διέγερσης η οποία είναι σε συντονισμό με το τροποποιημένο υπόβαθρο, τότε ουσιαστικά δεν υφίσταται τροποποίηση, αλλά γίνεται μελέτη της αποσύζευξης κατά την EPDPT διαδικασία ενός διβάθμιου ταλαντωτή ο οποίος δεν αντιστοιχεί στο σημείο (R_ω, R_m), αλλά σε ένα άλλο σημείο (R_ω, R'_m), όπου το R'_m αντιστοιχεί στη μάζα $M_p + M_s$. Για τον ίδιο λόγο, οι στάθμες αντοχής είναι οι ίδιες με αυτές της EPDPT διαδικασίας αποσύζευξης, ο κανονικός δηλαδή μονοβάθμιος ταλαντωτής της στάθμης p αναλύεται ελαστικά υποκείμενος στην εδαφική διέγερση της (3.52). Το απόλυτο μέγιστο της χρονοϊστορίας της δύναμης του ZL στοιχείου που υλοποιεί τη δυσκαμψία του διαιρείται με τους λόγους λ όπως στην (3.51), και προκύπτουν οι στάθμες αντοχής που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις.

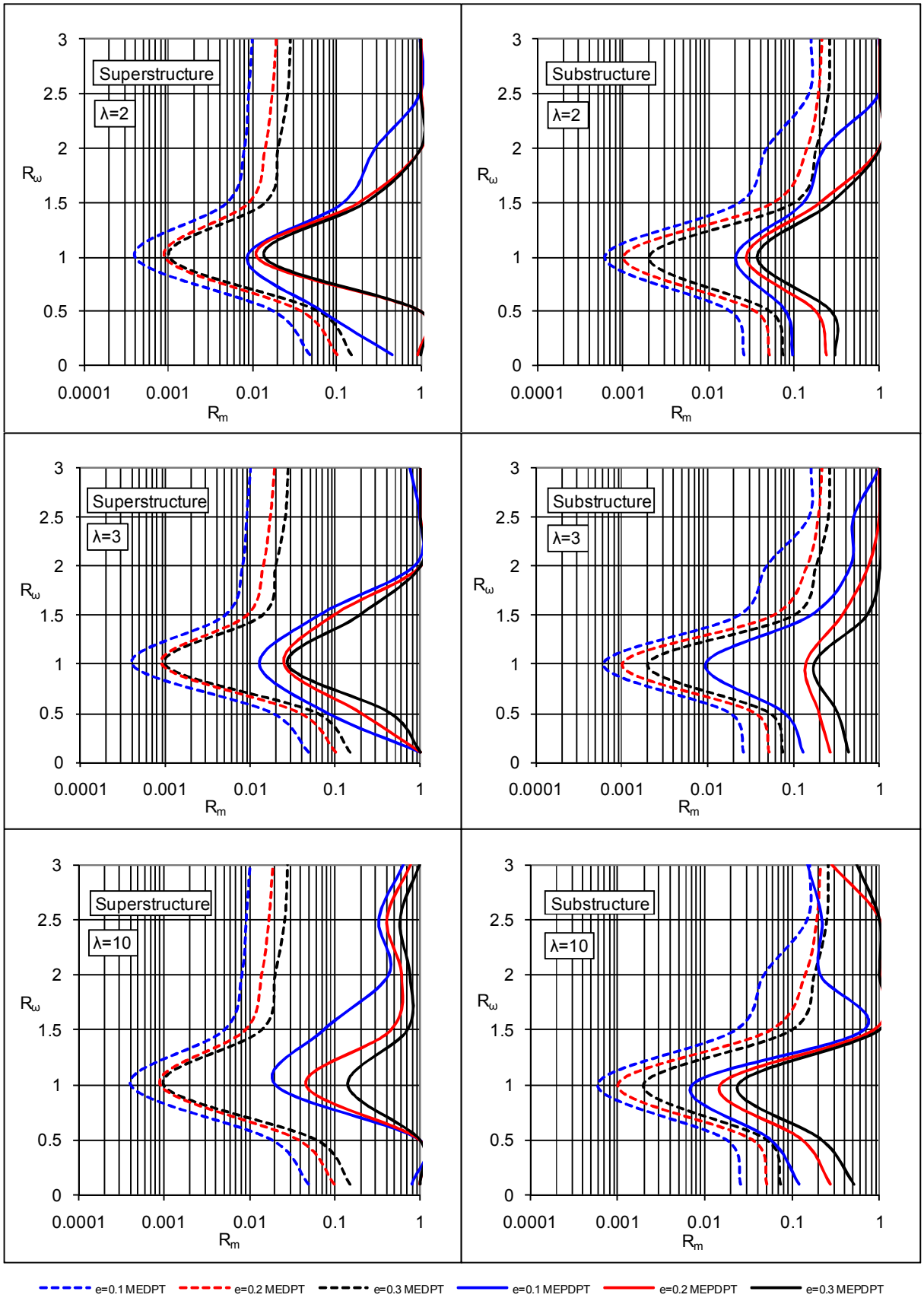
Για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) γίνεται η συζευγμένη και η αποσυζευγμένη ανάλυση και γίνεται η καταγραφή του σφάλματος της αποσύζευξης στην κάθε στάθμη. Η κατανομή αυτή του σφάλματος δίνει τις καμπύλες αποσύζευξης MEPDPT (Modified Elasto – Plastic Decoupling Procedure) στα χαρακτηριστικά επίπεδα σφάλματος, οι οποίες στην Εικ. 3.37 απεικονίζονται σε σύγκριση με τις καμπύλες MEDPT. Όπως είναι αναμενόμενο, οι ελαστοπλαστικές καμπύλες τροποποιημένης αποσύζευξης είναι πιο ευμενείς σε σχέση με τις ελαστικές καμπύλες τροποποιημένης αποσύζευξης. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο διαδικασίες είναι η ελαστοπλαστική συμπεριφορά, οπότε, όπως και στη σύγκριση των EDPT και EPDPT καμπυλών, οι ελαστοπλαστικές είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά. Ο λόγος είναι πάλι ότι η ελαστοπλαστική συμπεριφορά δεν επιτρέπει σημαντικές ενισχύσεις, και κατά

συνέπεια η απόκριση των δύο σταθμών δε διαφέρει πολύ ανάμεσα στη συζευγμένη και στην αποσυζευγμένη ανάλυση.

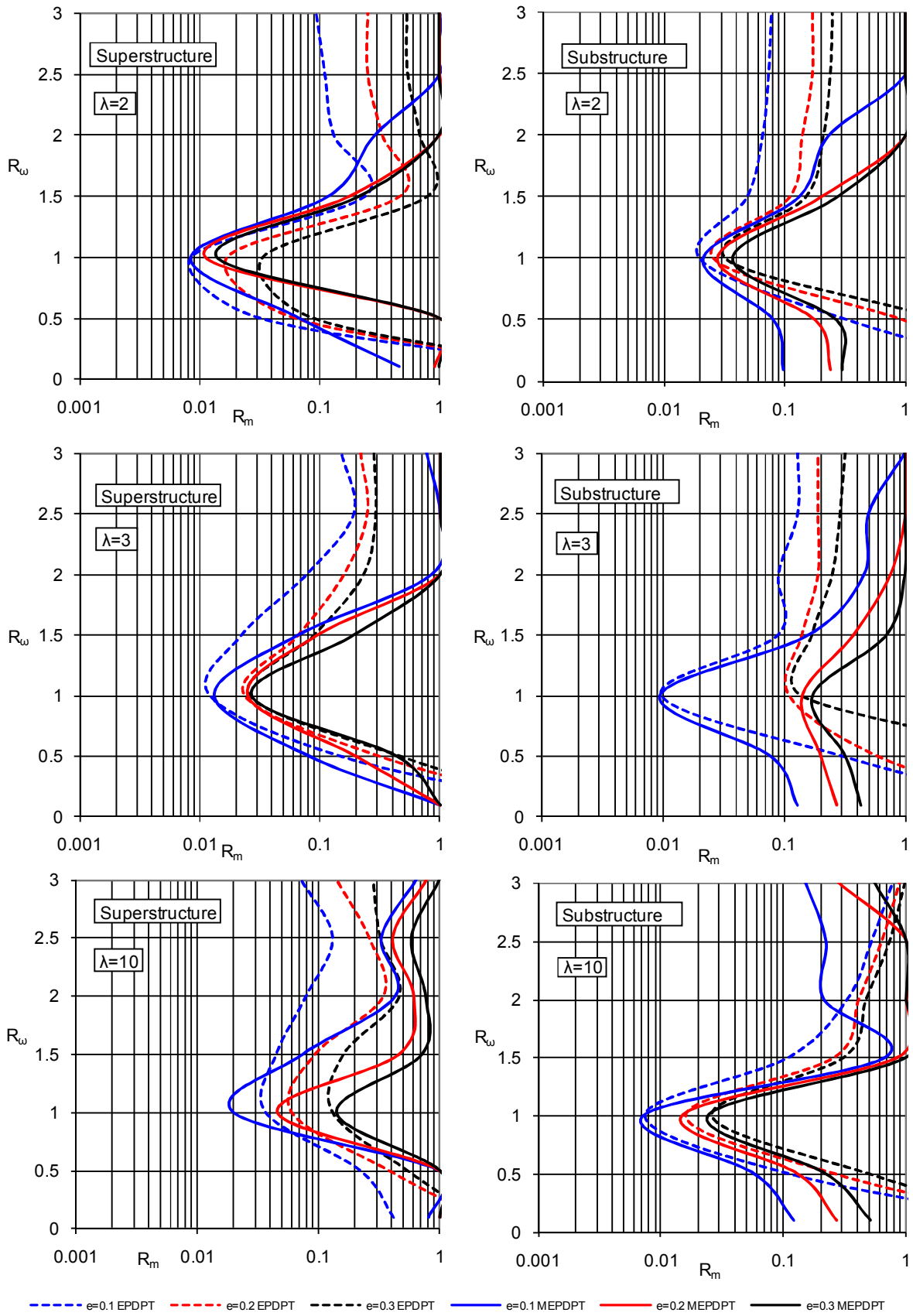
Αντίθετα, στη σύγκριση των EPDPT και MEPDPT καμπυλών που φαίνονται στην Εικ. 3.38, τα αποτελέσματα είναι ανάμικτα. Όσον αφορά τη στάθμη s, οι τροποποιημένες καμπύλες είναι ευμενέστερες στην περιοχή των μεγάλων R_ω, ενώ αντίθετα είναι δυσμενέστερες στα μικρά R_ω, για όλες τις τιμές του λόγου λ. Το ίδιο συμβαίνει και για το υπόβαθρο, εκτός από την περίπτωση του λόγου $\lambda = 10$, στην περίπτωση δηλαδή που η αντοχή του είναι πολύ μικρή. Ενώ δηλαδή, σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις η τροποποίηση δρα όπως και στην ελαστική περίπτωση, μειώνοντας το σφάλμα της αποσύζευξης στα μεγάλα R_ω και το αυξάνοντάς το κατά λίγο στα μικρά, στην περίπτωση του υποβάθρου με πολύ μικρή αντοχή το σφάλμα μεγαλώνει και σε μεγάλες τιμές R_ω. Ο λόγος είναι ότι η πολύ μικρή του αντοχή σε συνδυασμό με την πρόσθετη μάζα, η οποία συνεπάγεται μεγαλύτερες αδρανειακές δυνάμεις, οδηγούν σε πλαστικοποίηση από την αρχή των ταλαντώσεών του, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.39.

Οι πλαστικοποιήσεις σε αυτό το επίπεδο του λόγου λ, συμβαίνουν σχεδόν από την αρχή και στο αποσυζευγμένο υπόβαθρο της EPDPT διαδικασίας. Όπως όμως φαίνεται στην Εικ. 3.40, η οποία απεικονίζει την διαφορά της χρονοϊστορίας των δυνάμεων της αποσυζευγμένης στάθμης p ανάμεσα στην EPDPT και στην MEPDPT διαδικασία, οι δύο ταλαντωτές δεν εισέρχονται ταυτόχρονα στην ελαστοπλαστική περιοχή και δεν παραμένουν σε αυτήν ίδιο χρόνο. Αυτά αποτυπώνονται στην κίνηση του πολύ δύσκαμπτου ταλαντωτή s, οπότε και η τροποποίηση δεν έχει την ίδια επίδραση με την ελαστική ανάλυση.

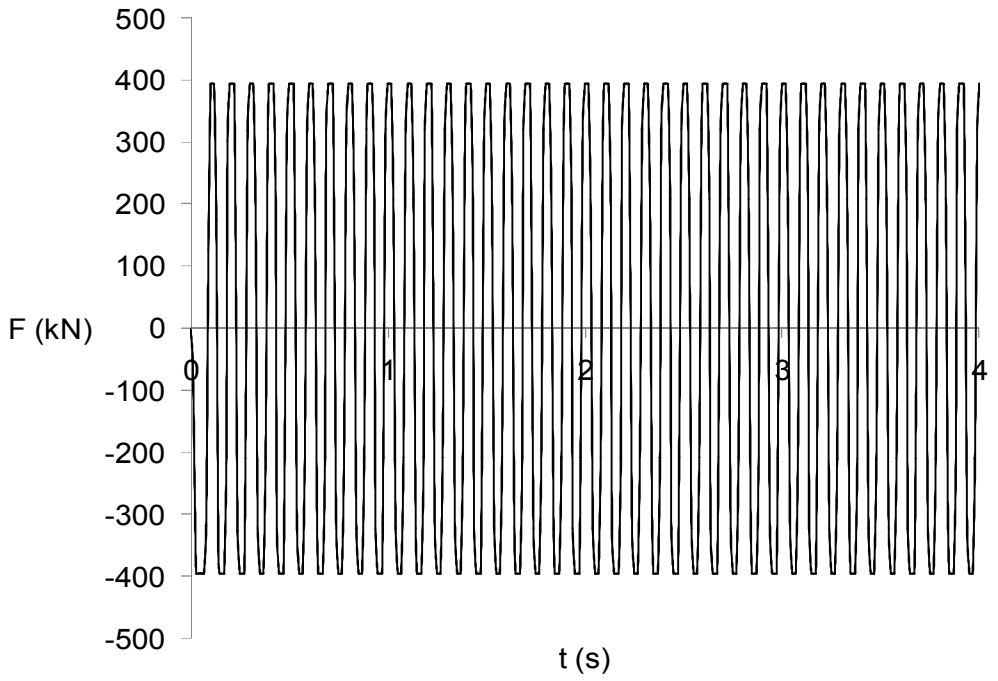
Η διαφοροποίηση δηλαδή της απόκρισης του μη γραμμικού υποβάθρου σε σχέση με αυτήν της γραμμικής περίπτωσης, δεν επιτρέπει την πλήρη εκδήλωση των συνεπειών της τροποποίησης της αποσυζευγμένης διαδικασίας. Όπως και στην απλή ελαστοπλαστική διαδικασία αποσύζευξης, EPDPT, οι πλαστικοποιήσεις του υποβάθρου p, ο χρόνος που συμβαίνουν και η διάρκεια που το υπόβαθρο παραμένει στην πλαστική περιοχή της δυσκαμψίας του, αλλοιώνουν την απόκρισή του, και εν τέλει η τροποποίηση η οποία έχει επίδραση στην MEDPT αποσύζευξη ανάλογα με τις τιμές των λόγων R_ω και R_m, τώρα έχει περιορισμένη επίδραση στο σχήμα των MEPDPT καμπυλών.



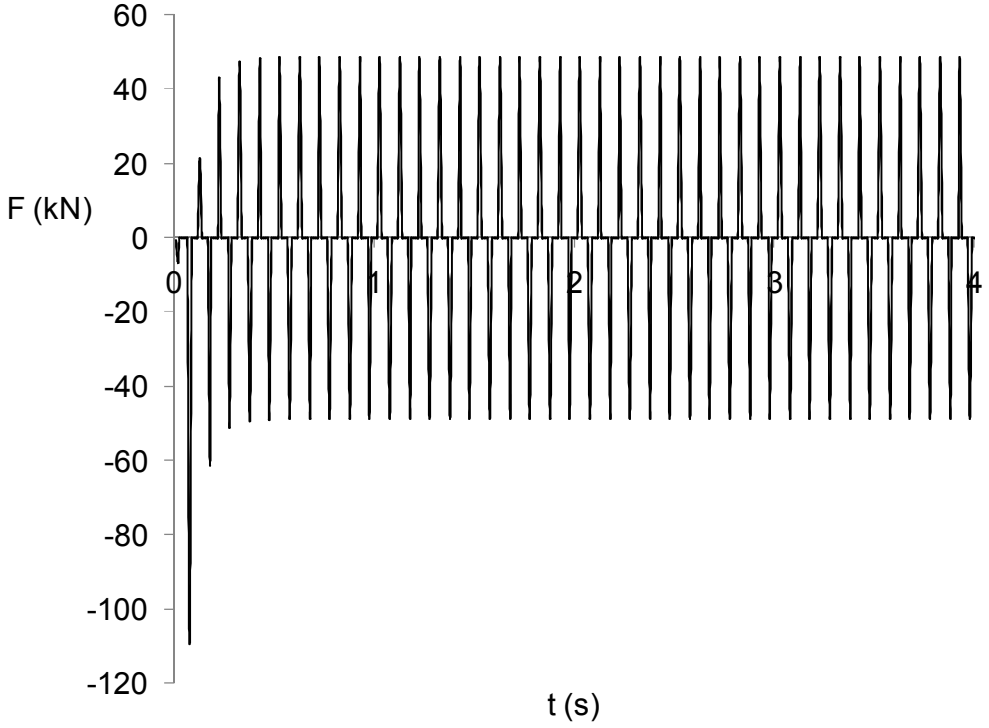
Εικ. 3.37: Σύγκριση καμπυλών MEDPT και MEPDPT για τις δύο στάθμες υπό αρμονική διέγερση



Εικ. 3.38: Σύγκριση καμπυλών EPDPT και MEPDPT για τις δύο στάθμες υπό αρμονική διέγερση



Εικ. 3.39: Χρονοϊστορία δύναμης αποσυζευγμένου τροποποιημένου υποβάθρου, λ=10

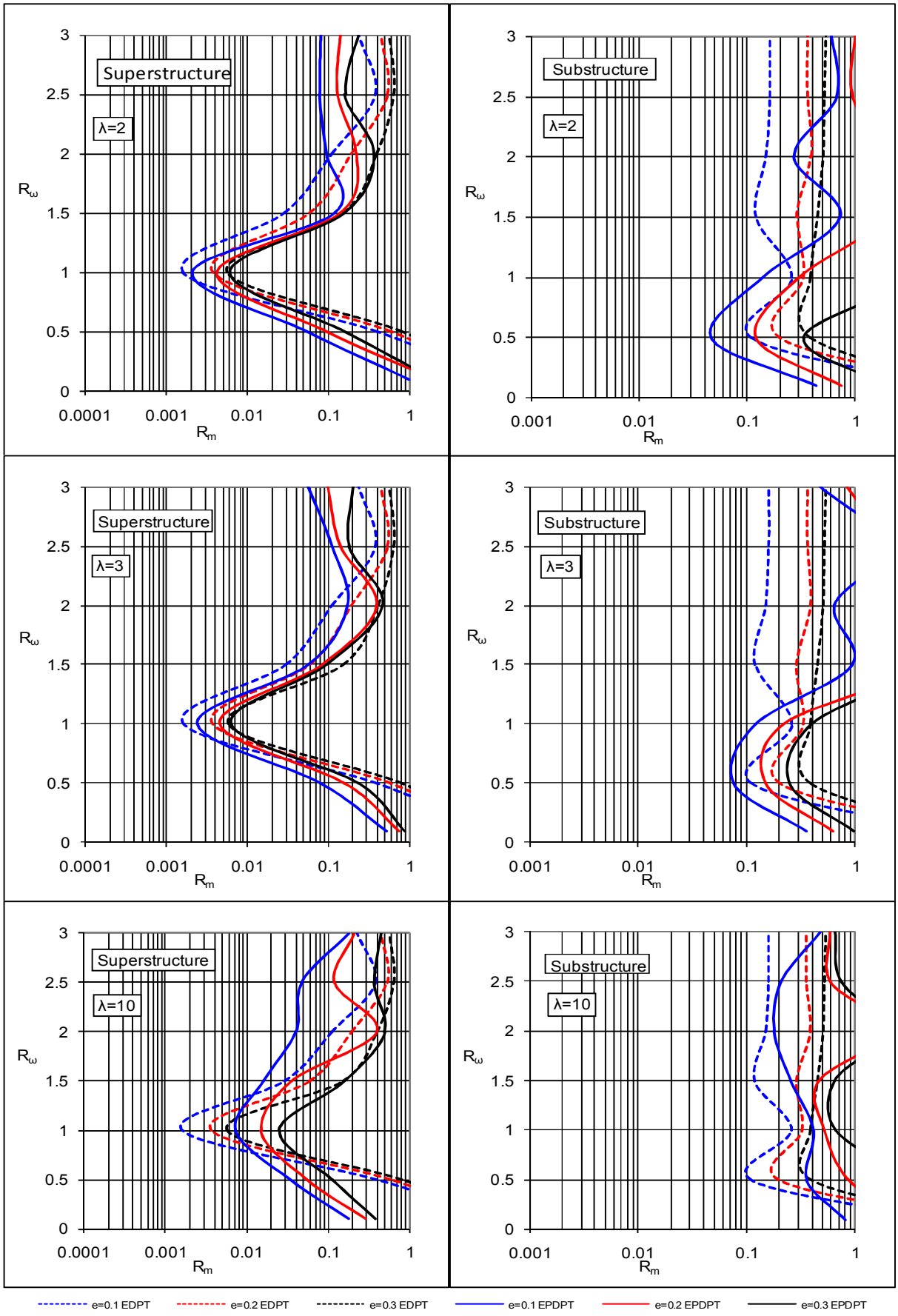


Εικ. 3.40: Διαφορά δυνάμεων αποσυζευγμένου υποβάθρου ανάμεσα σε EPDPT και MEPDPT αναλύσεις

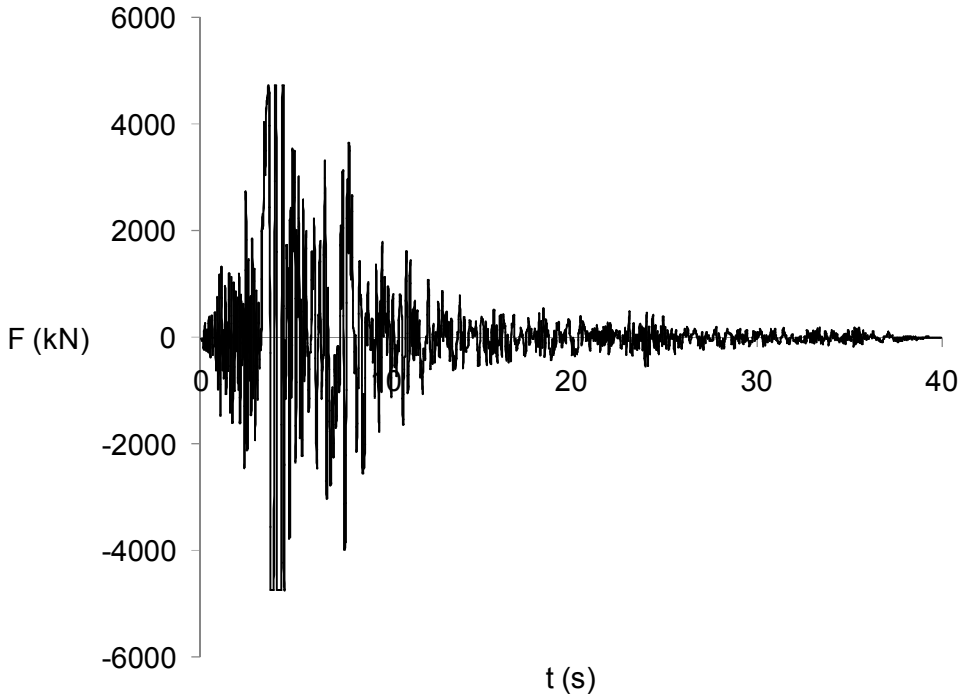
3.17 Αποσυζευγμένη ανάλυση ελαστοπλαστικών κατασκευών υπό σεισμικές διεγέρσεις

Όπως και στην αποσύζευξη με ελαστική θεώρηση για τη συμπεριφορά του υποβάθρου, έτσι και τώρα γίνεται επέκταση όσον αφορά την εδαφική διέγερση και στις δέκα σεισμικές καταγραφές που έχουν επιλεγεί. Ο τρόπος προσέγγισης είναι ο ίδιος με αυτόν της EPDPT διαδικασίας αποσύζευξης, με τη διαφορά της επιβαλλόμενης διέγερσης. Συγκεκριμένα, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής που αντιστοιχεί στο αποσυζευγμένο υπόβαθρο p, με μάζα 20Mgr και ιδιοπερίοδο ίση με 0.2s, αναλύεται χρησιμοποιώντας σαν διέγερση την κάθε μια από τις δέκα καταγραφές. Λαμβάνεται ως αποτέλεσμα η χρονοϊστορία της δύναμης του ελατηρίου που δίνει τη δυσκαμψία του ταλαντωτή, και το απόλυτο μέγιστο της κάθε μιας από τις δέκα χρονοϊστορίες, διαιρείται με τους λόγους λ, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.51). Έτσι προκύπτουν οι τρεις στάθμες αντοχής του υποβάθρου για τον κάθε σεισμό.

Όπως και στην ανελαστική ανάλυση αποσύζευξης EPDPT για αρμονική διέγερση, έτσι και για κάθε μια από τις δέκα καταγραφές γίνεται η συζευγμένη και η αποσυζευγμένη ανάλυση για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) και καταγράφεται το σφάλμα αποσύζευξης στην κάθε στάθμη. Το σφάλμα αυτό απεικονίζεται, όπως προηγουμένως, με τις καμπύλες αποσύζευξης στις τρεις χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος, δηλαδή στις $e = 0.1, 0.2, 0.3$. Η διαδικασία αυτή γίνεται για την κάθε καταγραφή τρεις φορές, μία για κάθε μια στάθμη αντοχής, οπότε για τον κάθε σεισμό προκύπτουν σε κάθε στάθμη τρία σετ καμπυλών αποσύζευξης. Συγκεκριμένα για την καταγραφή του Northridge οι καμπύλες αποσύζευξης των δύο σταθμών από τις ελαστοπλαστικές αναλύσεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ελαστικές καμπύλες με διέγερση πάλι το Northridge, φαίνονται στην Εικ. 3.41. Η διαφορά ανάμεσα στις EDPT και στις EPDPT καμπύλες αποσύζευξης από τη σεισμική φόρτιση, δεν είναι τόσο έντονη όσο η αντίστοιχη διαφορά στις καμπύλες που προέκυψαν από αρμονική σε συντονισμό φόρτιση. Ο λόγος είναι ότι μια σεισμική καταγραφή έχει έναν ή δύο σημαντικούς κύκλους φόρτισης, και η επιβαλλόμενη διέγερση στην υπόλοιπη διάρκειά της δεν είναι πολύ έντονη. Έτσι, παρατηρούνται λιγότερες πλαστικοποιήσεις στο υπόβαθρο p όπως φαίνεται στην Εικ. 3.42, και οι ελαστικοί κύκλοι ταλάντωσης είναι περισσότεροι. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει έντονη διαφορά ανάμεσα στην ελαστική και στην ανελαστική ανάλυση.



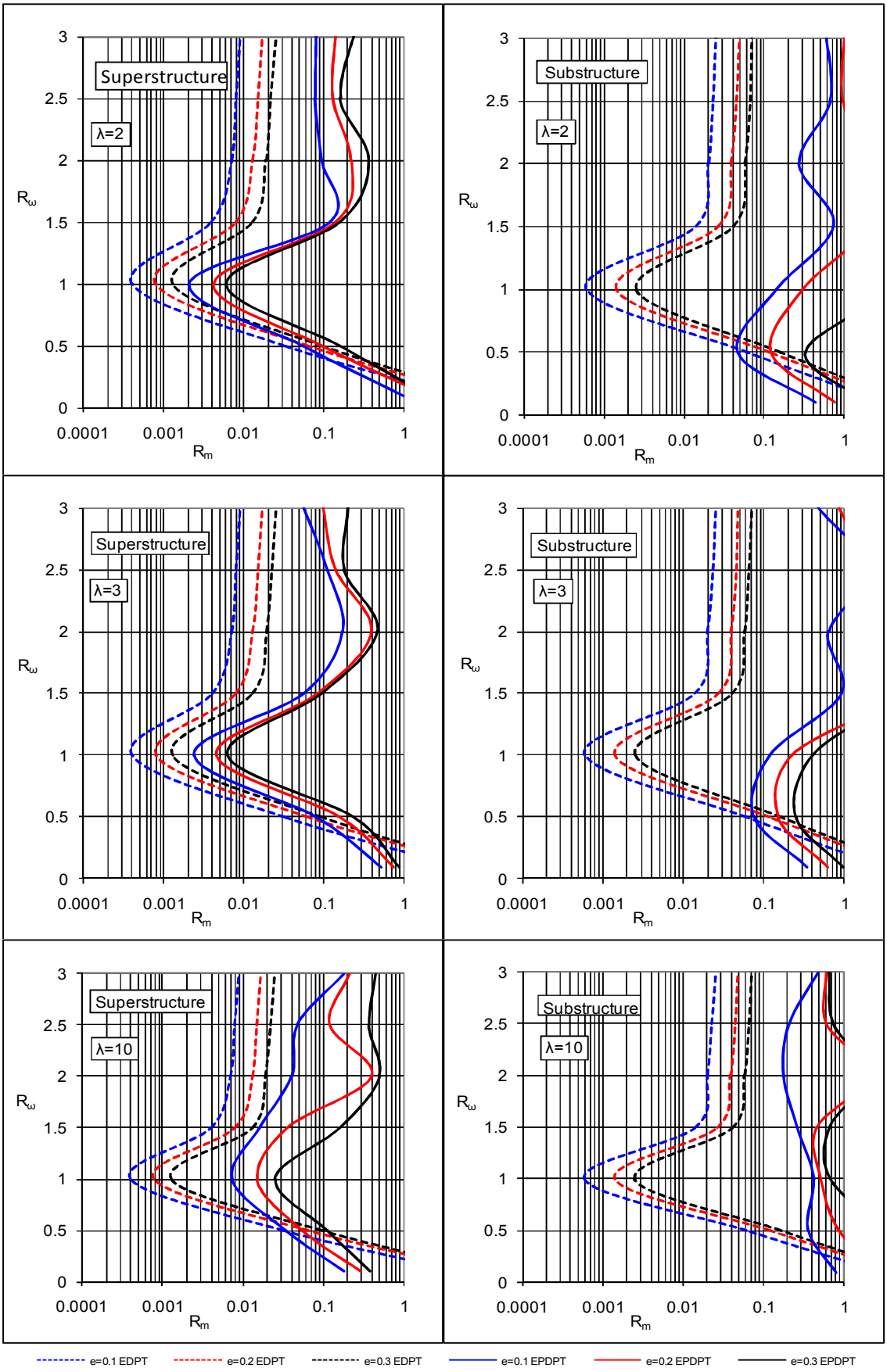
Εικ. 3.41: Σύγκριση καμπυλών EDPT και EPDPT για τις δύο στάθμες με διέγερση το Northridge



Εικ. 3.42: Χρονοϊστορία δύναμης αποσυζευγμένου υποβάθρου με διέγερση το Northridge

Αντίθετα, στη σύγκριση των EPDPT καμπυλών αποσύζευξης με διέγερση το Northridge με τις EDPT καμπύλες αποσύζευξης με αρμονική σε συντονισμό διέγερση που φαίνεται στην Εικ. 3.43, η διαφορά είναι πιο εμφανής, όπως είναι και αναμενόμενο. Η ελαστική ανάλυση γίνεται με αρμονική σε συντονισμό διέγερση, κάτι που την κάνει πολύ δυσμενή, ενώ η ελαστοπλαστική ανάλυση γίνεται με σεισμική διέγερση, οπότε λόγω και της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς αλλά και λόγω της σεισμικής διέγερσης, οι νέες καμπύλες είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά, είναι δηλαδή πιο ευμενείς.

Όπως και στις ελαστικές αναλύσεις, έτσι και στις ελαστοπλαστικές, οι καμπύλες αποσύζευξης για σεισμική διέγερση δεν έχουν το ομαλό σχήμα των αρμονικών καμπυλών, όπως φαίνεται και στην Εικ. 3.41 και στην Εικ. 3.43. Μάλιστα, ενώ στην ελαστική ανάλυση υπό σεισμική φόρτιση, ο μόνος παράγοντας που δίνει ανώμαλο σχήμα στις καμπύλες αποσύζευξης είναι το συχνοτικό περιεχόμενο της καταγραφής, τώρα προστίθεται σε αυτόν και η ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία αναλόγως του λόγου λ διαφοροποιεί την απόκριση του αποσυζευγμένου υποβάθρου και του συζευγμένου διβάθμιου και προκαλεί μη κανονικές κατανομές του σφάλματος.

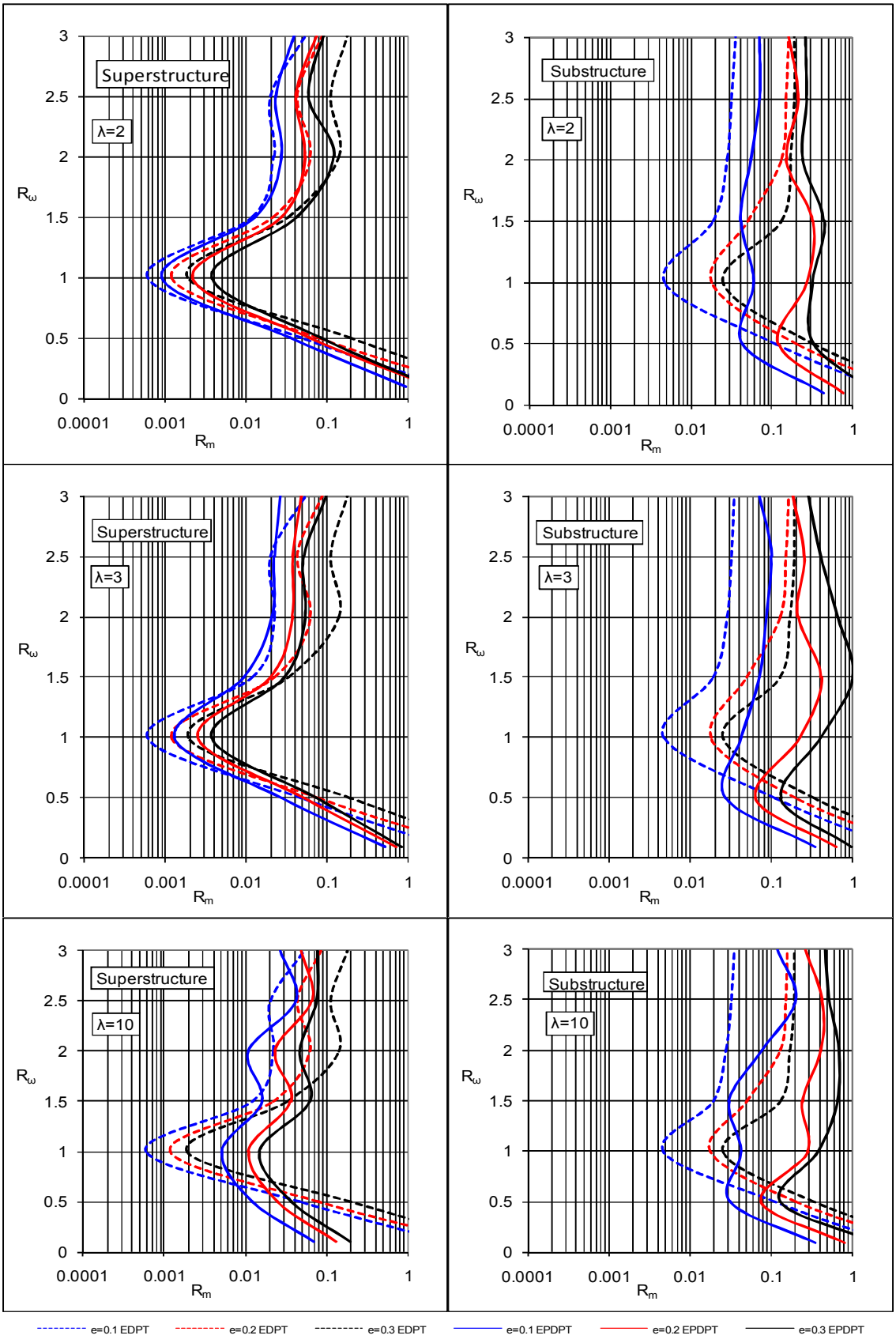


Εικ. 3.43: Σύγκριση καμπυλών EDPT από αρμονική φόρτιση και EPDPT από Northridge για τις δύο στάθμες

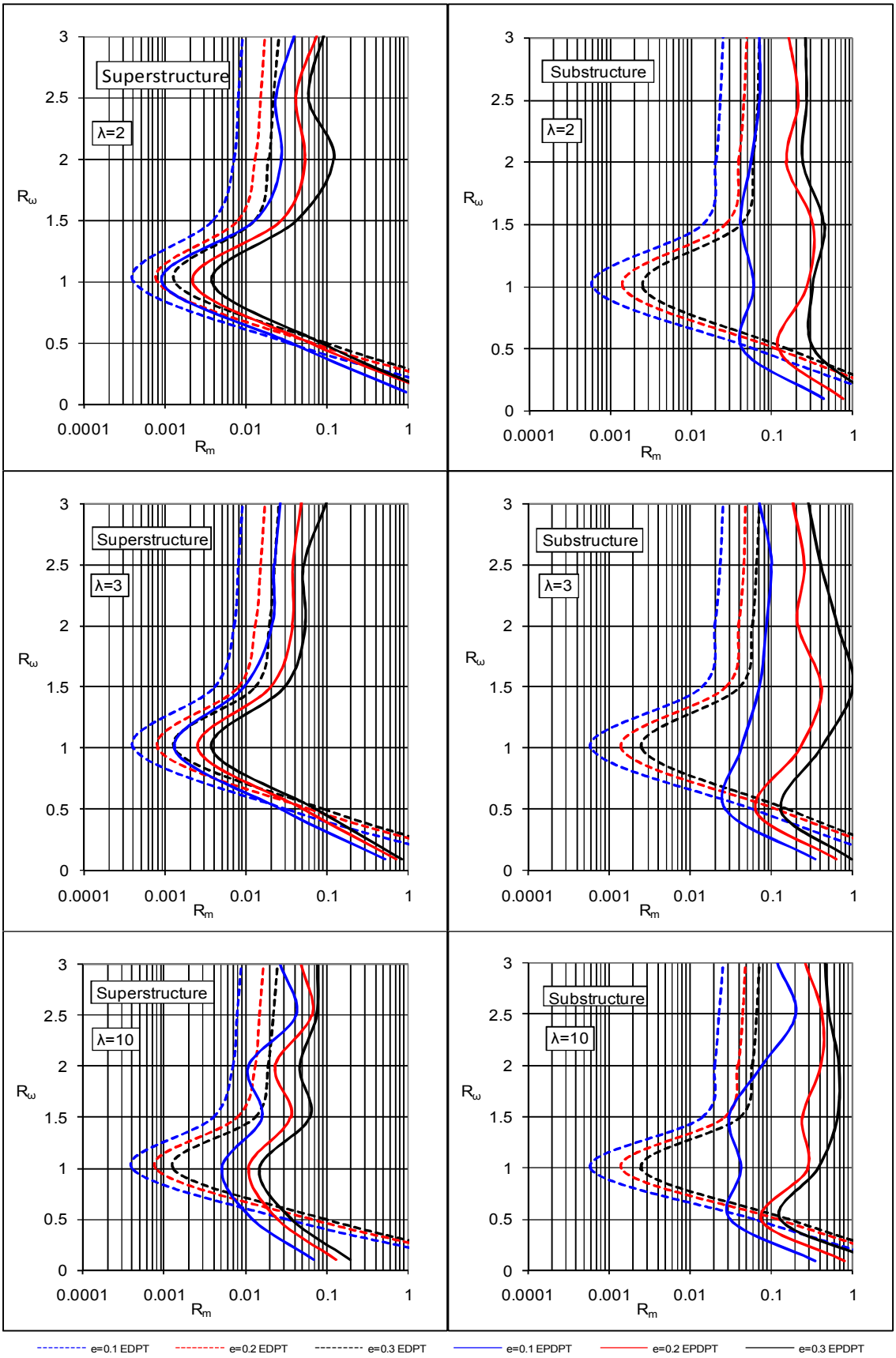
Η εκτίμηση του σφάλματος από τις ελαστοπλαστικές αναλύσεις αποσύζευξης γίνεται για όλες τις καταγραφές και για τα τρία επίπεδα αντοχής. Ακολούθως, όπως και στην ελαστική περίπτωση, σε κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) αντιστοιχείται το μέγιστο σφάλμα για κάθε στάθμη από όλες τις σεισμικές διεγέρσεις. Αυτό γίνεται για κάθε τιμή του συντελεστή λ, οπότε προκύπτει για κάθε επίπεδο αντοχής η κατανομή των μεγίστων σφαλμάτων.

Η κατανομή του μέγιστου σφάλματος αποσύζευξης από τους δέκα σεισμούς δίνει τις περιβάλλουσες καμπύλες αποσύζευξης για τις χαρακτηριστικές τιμές σφάλματος, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες σεισμικές περιβάλλουσες καμπύλες αποσύζευξης της EDPT ανάλυσης στην Εικ. 3.44. Επίσης, οι περιβάλλουσες καμπύλες από την ανελαστική ανάλυση των δέκα καταγραφών, συγκρίνονται με τις EDPT καμπύλες αποσύζευξης υπό αρμονική διέγερση στην Εικ. 3.45 και με τις EPDPT καμπύλες υπό αρμονική διέγερση στην Εικ. 3.46.

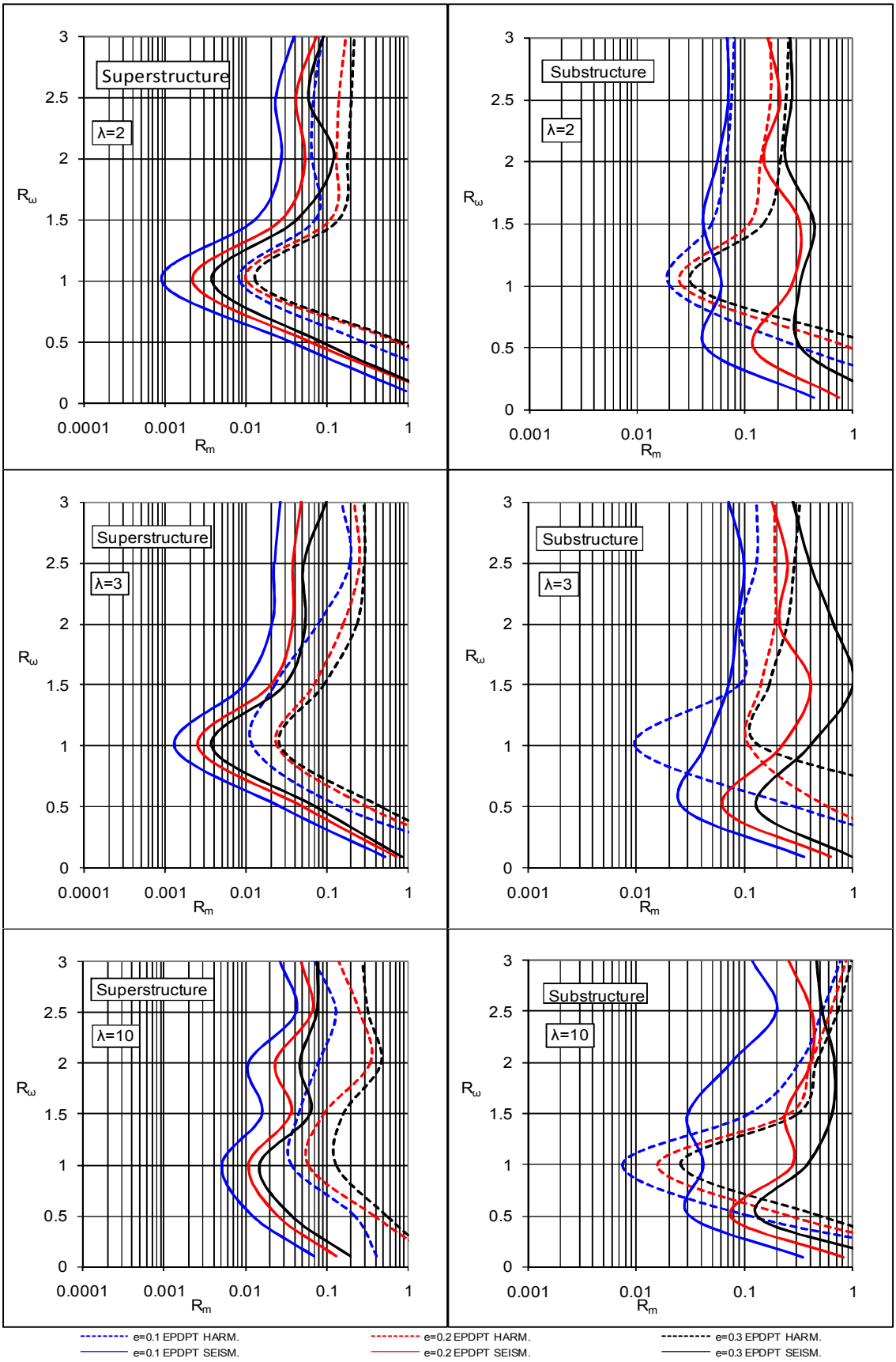
Οι νέες EPDPT περιβάλλουσες καμπύλες αποσύζευξης είναι πιο ευμενείς σε σχέση με τις αντίστοιχες ελαστικές περιβάλλουσες. Μάλιστα, η σύγκριση στις περιβάλλουσες του σφάλματος αποσύζευξης, από ελαστικές και ανελαστικές σεισμικές αναλύσεις, είναι πιο συστηματική σε σχέση με αυτήν της Εικ. 3.41, στην οποία η σύγκριση γίνεται για μόνο μια καταγραφή. Έτσι, στην περίπτωση των περιβαλλουσών οι ελαστικές καμπύλες, είναι δυσμενέστερες από τις ανελαστικές, αν και η διαφορά δεν είναι τόσο έντονη, όπως στην σύγκριση ελαστικών και ανελαστικών καμπυλών αρμονικής φόρτισης. Αντίστοιχα, η σύγκριση ελαστοπλαστικών σεισμικών περιβαλλουσών με τις αρμονικές καμπύλες αποσύζευξης στην Εικ. 3.45, είναι ομοίως συστηματική, με τις σεισμικές καμπύλες να είναι πάλι ευμενέστερες. Αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν από τη σύγκριση των σεισμικών με τις αρμονικές EPDPT καμπύλες στην Εικ.3.46, όπου οι σεισμικές καμπύλες είναι μάλλον δυσμενέστερες. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως προαναφέρθηκε, οι σεισμικές διεγέρσεις οδηγούν σε λιγότερους κύκλους πλαστικοποίησης στο συζευγμένο και στο αποσυζευγμένο υπόβαθρο, ενώ οι αρμονικές διεγέρσεις οι οποίες είναι σε συντονισμό με το υπόβαθρο καταλήγουν σε περισσότερους και μεγαλύτερης διάρκειας ελαστοπλαστικούς κύκλους ταλάντωσης. Αυτό σημαίνει μικρότερες ενισχύσεις, άρα και μικρότερες διαφοροποιήσεις μεταξύ συζευγμένης και αποσυζευγμένης διαδικασίας.



Εικ. 3.44: Σύγκριση περιβαλλουσών καμπυλών EDPT και EPDPT από σεισμικές φορτίσεις για τις δύο στάθμες



Εικ. 3.45: Σύγκριση αρμονικών καμπυλών EDPT και περιβαλλουσών EPDPT από σεισμικές φορτίσεις για τις δύο στάθμες



Εικ. 3.46: Σύγκριση αρμονικών καμπυλών EPDPT και περιβαλλουσών EPDPT από σεισμικές φορτίσεις για τις δύο στάθμες

Παρά το γεγονός ότι οι σεισμικές διεγέρσεις για κάθε τιμή του λόγου λ δίνουν και διαφορετική αντοχή υποβάθρου η κάθε μια, τα σφάλματα που δίνουν στο επίπεδο (R_ω, R_m) συγκρίνονται και επιλέγονται οι μέγιστες τιμές σφάλματος για κάθε θέση, ώστε να προκύψουν οι περιβάλλουσες καμπύλες αποσύζευξης. Έτσι, ενώ η ελαστοπλαστική διαδικασία αποσύζευξης είναι μη γραμμική, τα σφάλματα συγκρίνονται και επιλέγονται τα δυσμενέστερα. Αυτό γίνεται αφ' ενός γιατί η διαδικασία υπολογισμού του σφάλματος είναι αδιαστατοποιημένη, οπότε η αντοχή του υποβάθρου υπεισέρχεται και στον αριθμητή και στον παρονομαστή, επομένως το σφάλμα δεν εξαρτάται τόσο από την ίδια την τιμή της αντοχής όσο από το λόγο λ. Αφ' ετέρου χρησιμοποιούνται σκόπιμα οι δέκα καταγραφές, ώστε να προκύψουν περιβάλλουσες καμπύλες, οι οποίες να καλύψουν ένα ρεαλιστικό εύρος πραγματικών διεγέρσεων, ακόμα και αν η απ' ευθείας σύγκριση μεταξύ τους δεν είναι εντελώς δόκιμη.

3.18 Αποσυζευγμένη ανάλυση τροποποιημένων ελαστοπλαστικών κατασκευών υπό σεισμικές διεγέρσεις

Οι σεισμικές αναλύσεις EPDPT των μικτών κατασκευών με τις δέκα καταγραφές γίνονται και με την τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης με την τροποποίηση που περιγράφεται στην εξίσωση (3.50). Όπως και στην περίπτωση της αρμονικής διέγερσης, αν και στο αποσυζευγμένο υπόβαθρο προστίθεται η μάζα της υπερκατασκευής, η ιδιοσυχνότητά του, και κατά συνέπεια και ο λόγος ιδιοσυχνοτήτων, και ο λόγος μαζών υπολογίζονται με την κανονική μάζα M_p. Επίσης, ο λόγος λ εφαρμόζεται στα απόλυτα μέγιστα της χρονοϊστορίας των δυνάμεων των κανονικών υποβάθρων και όχι των τροποποιημένων. Ο λόγος είναι ο ίδιος, σκοπός δηλαδή είναι να διερευνηθεί η επίδραση της τροποποίησης στο σφάλμα αποσύζευξης του ταλαντωτή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη θέση στο (R_ω, R_m), και όχι να γίνει μια κανονική διαδικασία αποσύζευξης ενός ταλαντωτή που βρίσκεται σε μια άλλη θέση (R'_ω, R'_m), ο οποίος έχει στάθμες αντοχής F'_p.

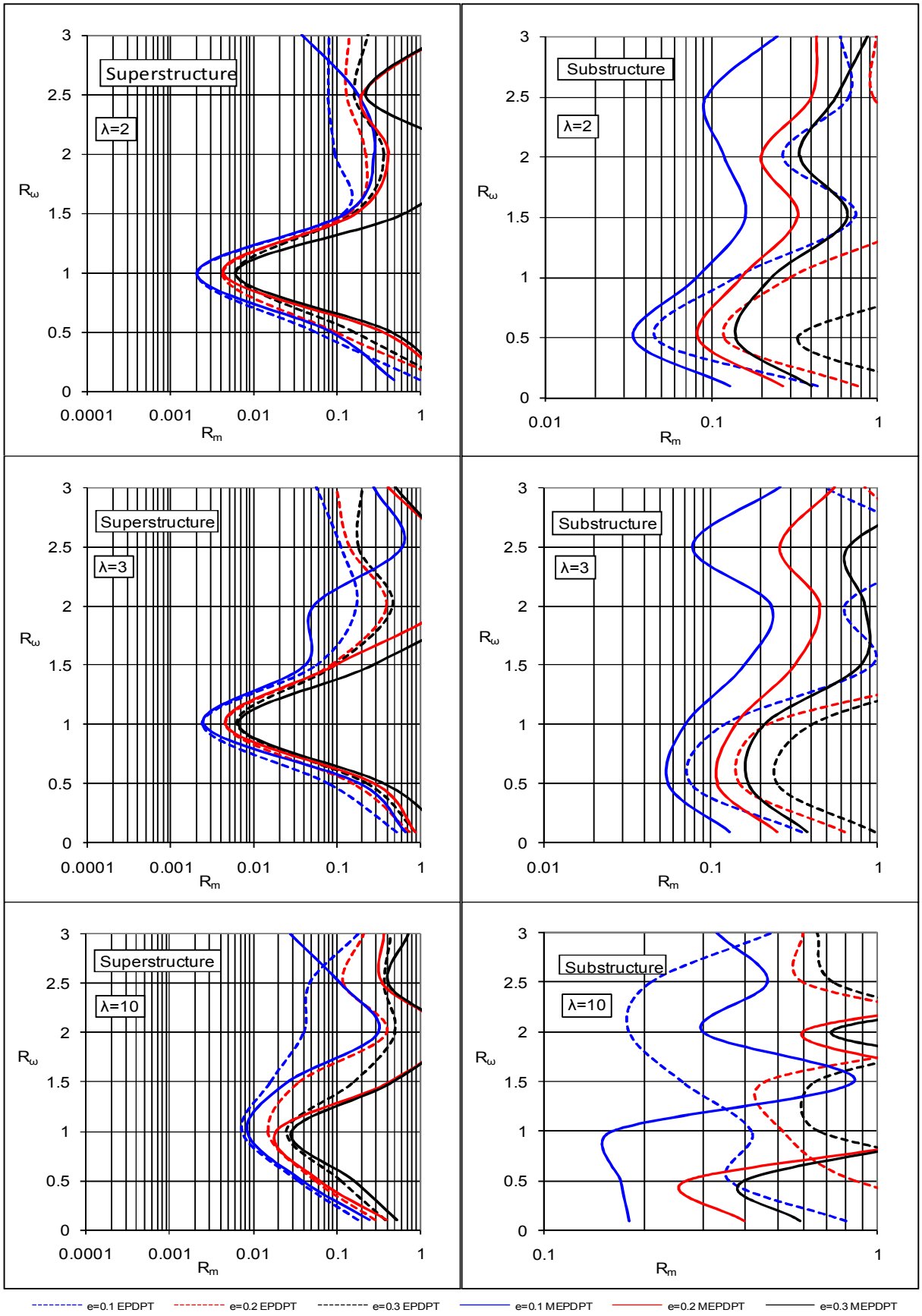
Έτσι, προκύπτουν για κάθε καταγραφή οι MEPDPT κατανομές σφάλματος στο επίπεδο (R_ω, R_m) για κάθε λόγο λ. Συγκεκριμένα για την καταγραφή του Northridge, η

σύγκριση των καμπυλών MEPDPT και EPDPT φαίνεται στην Εικ. 3.47 για όλες τις στάθμες και για όλες τις τιμές του λ, και η σύγκριση των καμπυλών MEPDPT με τις MEDPT καμπύλες στην Εικ. 3.48, και τέλος η σύγκριση με τις MEPDPT καμπύλες από αρμονική διέγερση στην Εικ. 3.49.

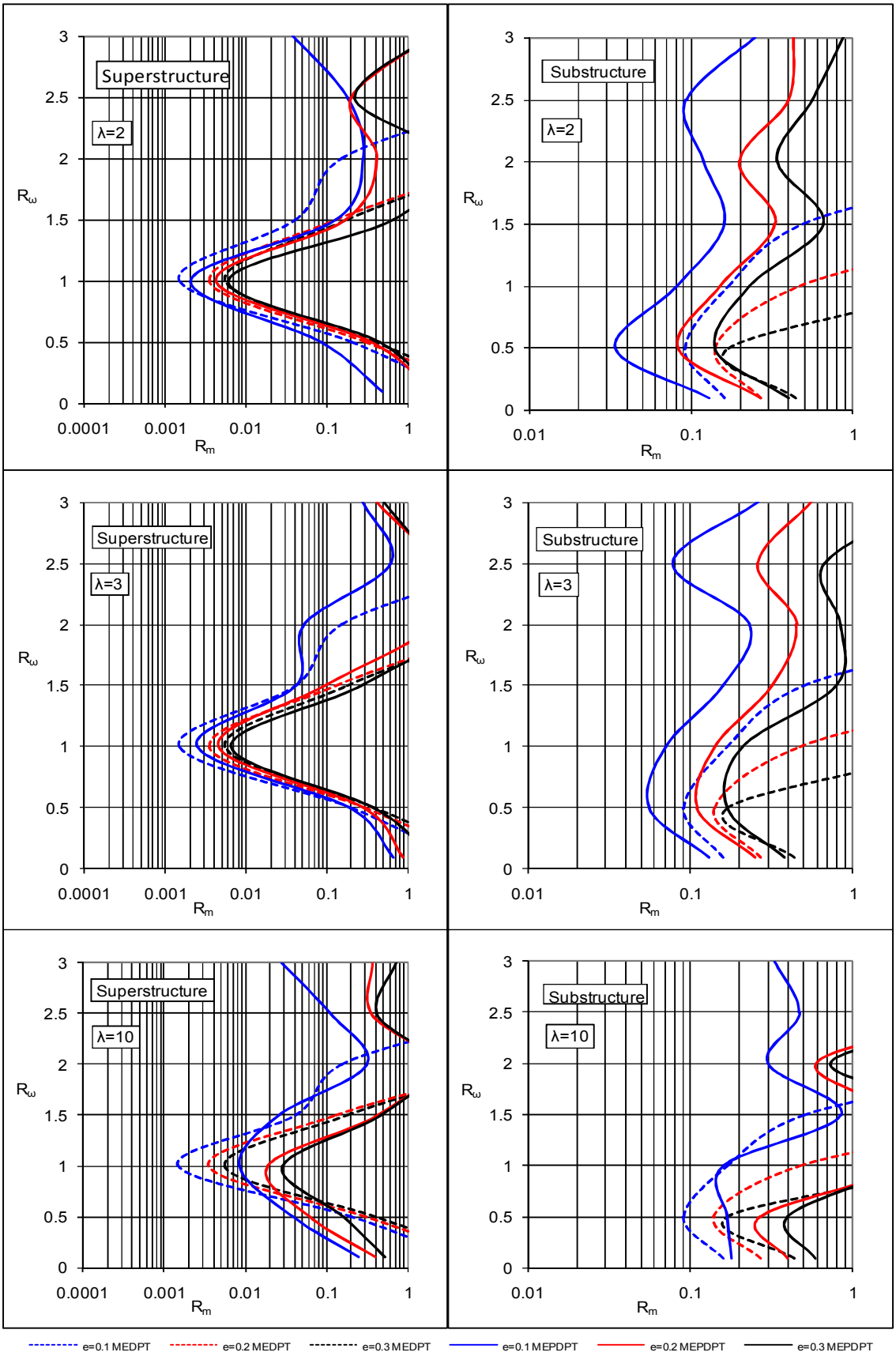
Η τροποποίηση της αποσύζευξης σε ελαστοπλαστικούς ταλαντωτές που διεγείρονται από σεισμικές καταγραφές, δεν έχει την επίδραση στο σφάλμα της αποσύζευξης που παρατηρείται στις ελαστικές κατασκευές. Έτσι, οι νέες καμπύλες MEPDPT που προκύπτουν από το Northridge, δεν είναι μετατοπισμένες σε σχέση με τις EPDPT καμπύλες όπως στην ελαστική περίπτωση. Συγκεκριμένα, ενώ στην ελαστική ανάλυση οι τροποποιημένες καμπύλες αποσύζευξης μετατοπίζονται προς τα δεξιά σε σχέση με τις κανονικές στην περιοχή των μεγάλων λόγων ιδιοσυχνοτήτων και προς τα αριστερά στις μικρές ιδιοσυχνότητες, τώρα δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Αντίθετα, οι MEPDPT καμπύλες διαφοροποιούνται ανομοιόμορφα σε σχέση με τις EPDPT, κάτι που οφείλεται στη μη γραμμικότητα της ελαστοπλαστικής διαδικασίας σε συνδυασμό με το πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής καταγραφής.

Επίσης, η σύγκριση ελαστικών τροποποιημένων καμπυλών αποσύζευξης και ελαστοπλαστικών, δείχνει ότι όπως και στις καμπύλες αποσύζευξης της κανονικής διαδικασίας, οι ελαστοπλαστικές καμπύλες δεν είναι κατά πολύ πιο ευμενείς σε σχέση με τις ελαστικές όταν πρόκειται για σεισμικές διεγέρσεις, κάτι που συμβαίνει και στη σύγκριση των περιβαλλουσών της Εικ. 3.44. Ο λόγος είναι πάλι ότι οι σεισμικές καταγραφές καταλήγουν σε λίγους κύκλους ελαστοπλαστικής ταλάντωσης του υποβάθρου, σε αντίθεση με την αρμονική σε συντονισμό διέγερση, η οποία δίνει πλαστικοποίηση επανειλημμένα κατά τη διάρκειά της, και για το λόγο αυτό σε αρκετά σημεία είναι δυσμενέστερες και από τις MEPDPT από αρμονική διέγερση όπως φαίνεται και στην Εικ. 3.49.

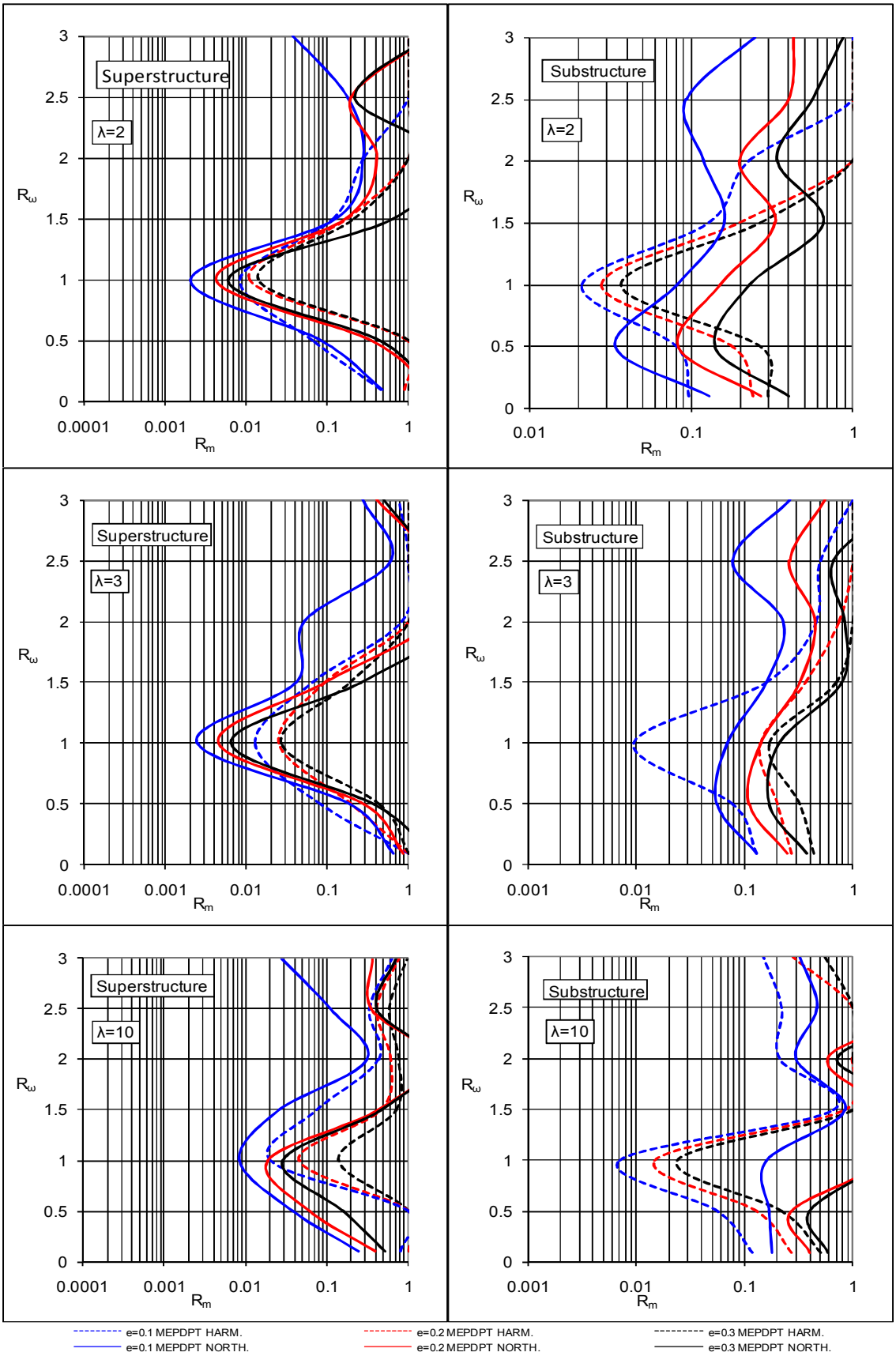
Ακολούθως, συγκεντρώνονται τα σφάλματα από την τροποποιημένη ελαστοπλαστική ανάλυση του διβάθμιου ταλαντωτή υποκείμενου στις δέκα διεγέρσεις, και για κάθε σημείο υιοθετείται το μέγιστο σφάλμα από τις καταγραφές για κάθε τιμή του λόγου λ. Έτσι, κατασκευάζονται οι περιβάλλουσες MEPDPT περιβάλλουσες, καμπύλες, οι οποίες σε σύγκριση με τις EPDPT περιβάλλουσες φαίνονται στην Εικ. 3.50, και σε σύγκριση με τις MEDPT περιβάλλουσες καμπύλες στην Εικ. 3.51, και τέλος σε σύγκριση με τις MEPDPT καμπύλες από αρμονική φόρτιση στην Εικ. 3.52.



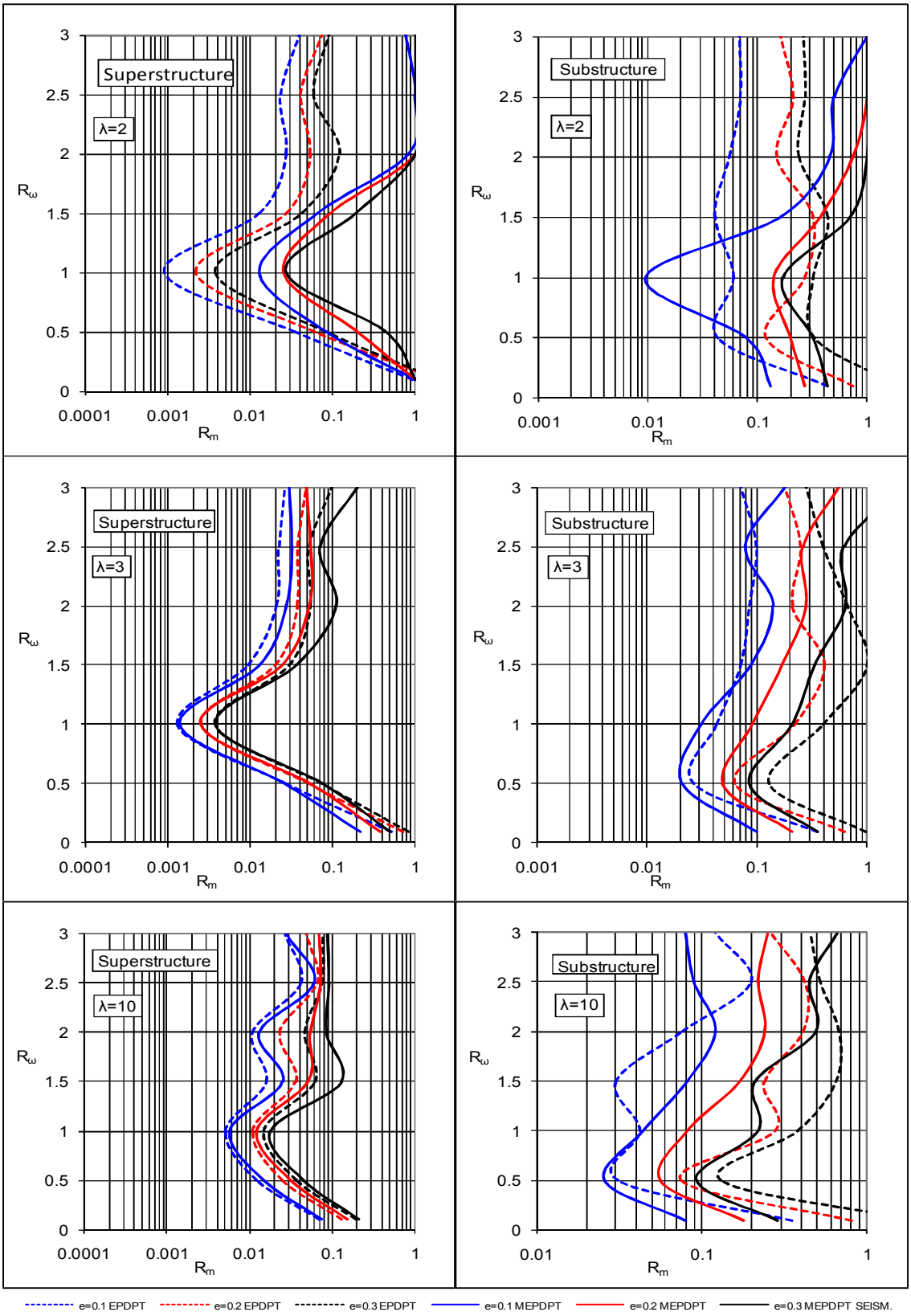
Εικ. 3.47 Σύγκριση καμπύλων EPDPT και MEPDPT για τις δύο στάθμες με διέγερση το Northridge



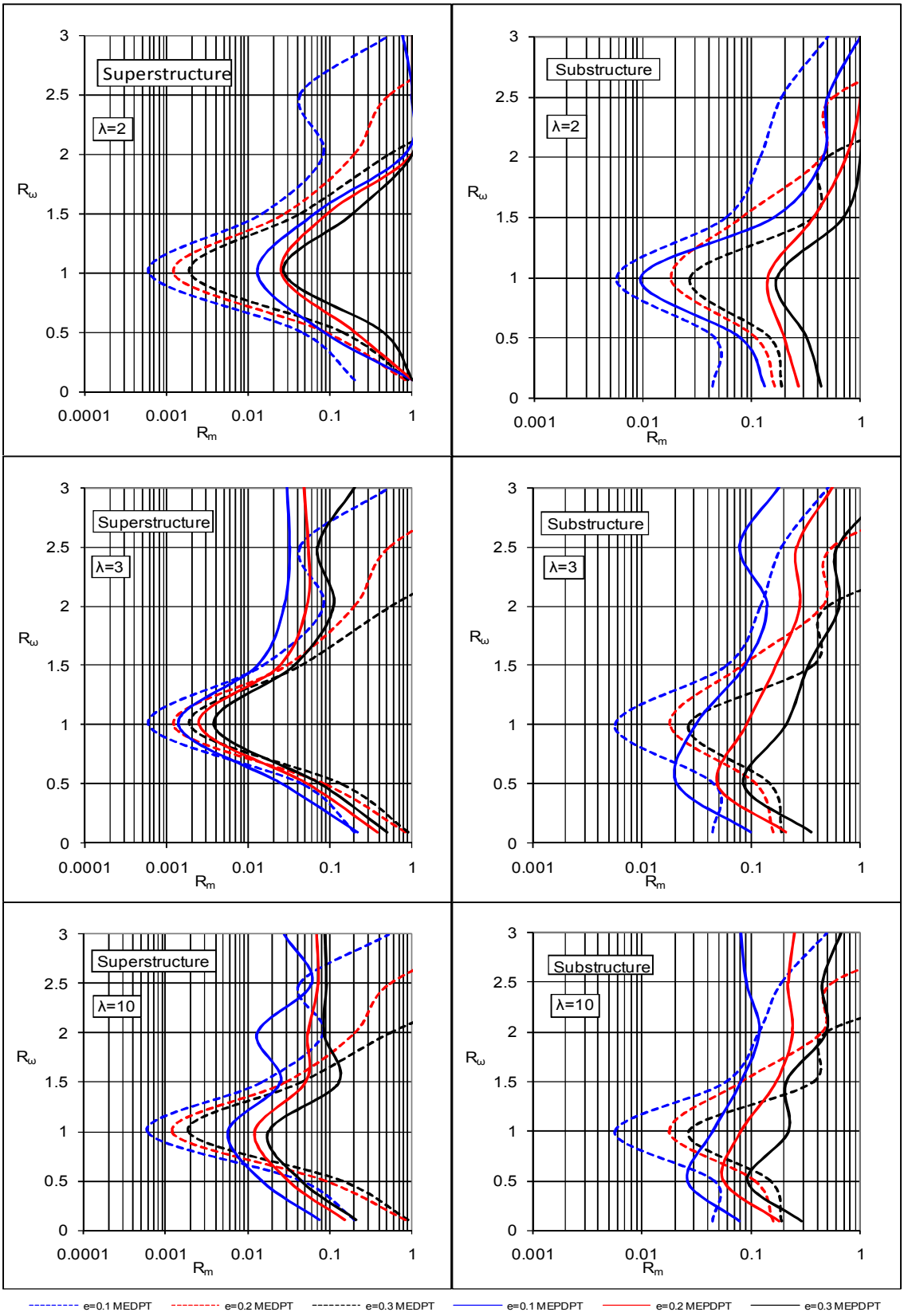
Εικ. 3.48: Σύγκριση καμπυλών MEDPT και MEPDPT για τις δύο στάθμες με διέγερση το Northridge



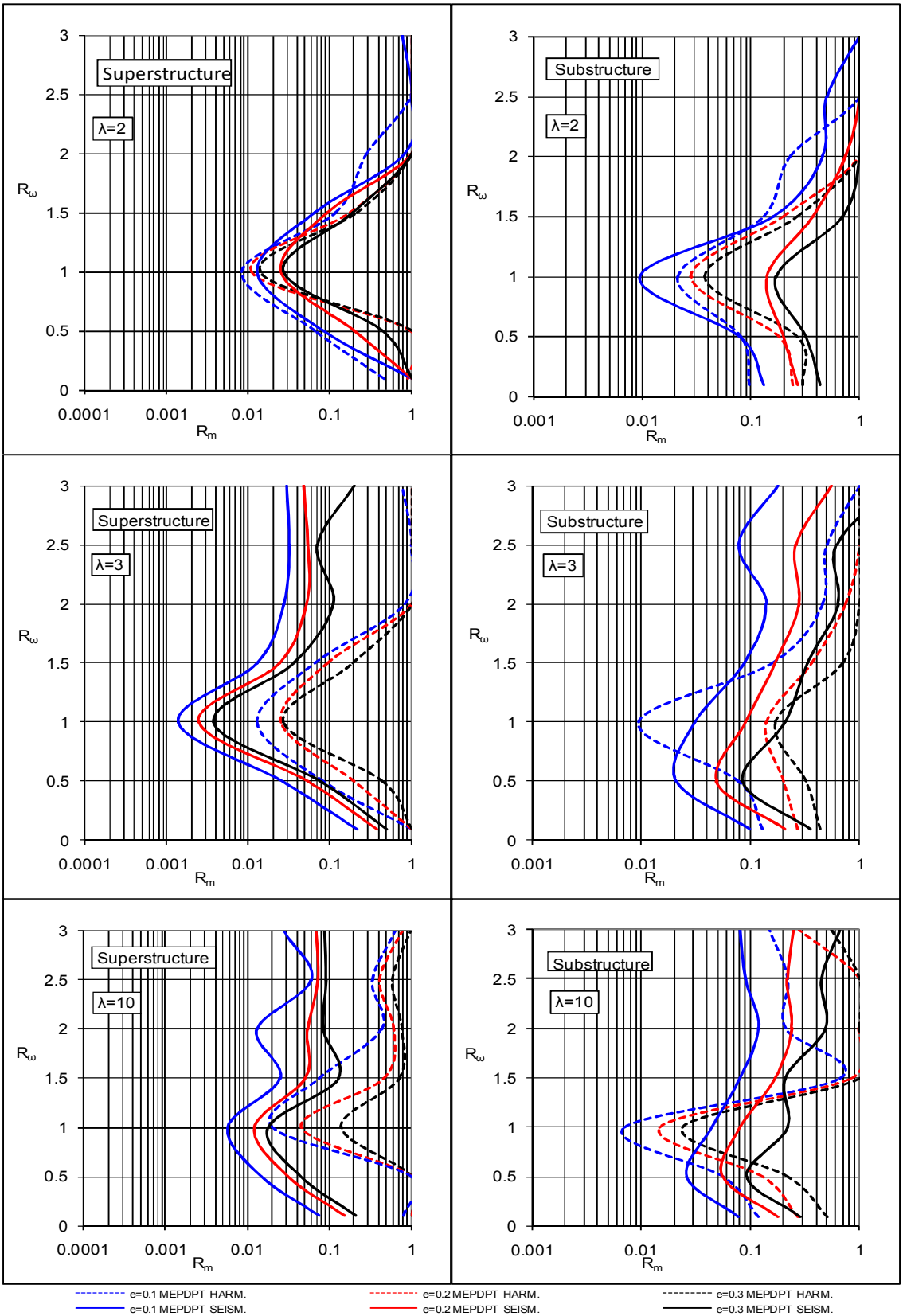
Εικ. 3.49: Σύγκριση καμπυλών MEPDPT από αρμονική διέγερση και MEPDPT με διέγερση το Northridge για τις δύο στάθμες



Εικ. 3.50: Σύγκριση περιβαλλουσών καμπυλών EPDPT και MEPDPT για τις δύο στάθμες από σεισμικές φορτίσεις



Εικ. 3.51: Σύγκριση περιβαλλουσών καμπυλών MEDPT και MEPDPT για τις δύο στάθμες από σεισμικές φορτίσεις



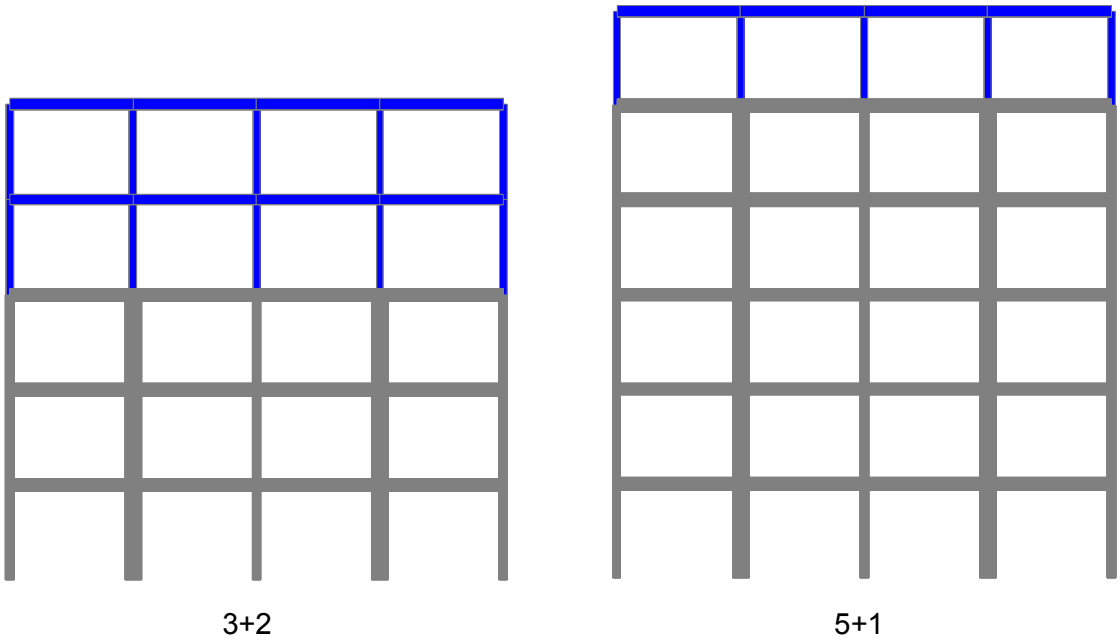
Εικ. 3.52: Σύγκριση περιβαλλουσών καμπυλών MEPDPT από σεισμικές φορτίσεις και MEPDPT από αρμονική φόρτιση για τις δύο στάθμες

Όπως και για την EPDPT διαδικασία, έτσι και για την MEPDPT, η σεισμική διέγερση δεν επιφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα στις καμπύλες αποσύζευξης. Έτσι, δεν υπάρχει συστηματική μετατόπιση των καμπυλών προς τα δεξιά του επιπέδου στην περιοχή των μεγάλων λόγων ιδιοσυχνοτήτων, ούτε προς τα αριστερά στην περιοχή των μικρών λόγων R_ω. Μάλιστα, ούτε οι περιβάλλουσες σεισμικές καμπύλες αποσύζευξης, παρά το ότι λαμβάνουν υπόψη το δυσμενέστερο σφάλμα από ένα μεγάλο πλήθος ιδιοσυχνοτήτων διέγερσης, προκαλούν συστηματική συμπεριφορά, ούτε σε σχέση με τις ελαστικές τροποποιημένες περιβάλλουσες, ούτε σε σχέση με τις ελαστοπλαστικές κανονικές περιβάλλουσες καμπύλες αποσύζευξης.

Γενικά, ο συνδυασμός ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς και σεισμικών διεγέρσεων, κάνει τη συμπεριφορά του υποβάθρου δυσκολότερη στην πρόβλεψη. Ως εκ τούτου και παρά το γεγονός ότι η συμπεριφορά της ελαστικής υπερκατασκευής μπορεί να προβλεφθεί αναλόγως με την περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m), το σφάλμα αποσύζευξης της συνολικής διβάθμιας κατασκευής δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Αντίθετα, στην περίπτωση του ελαστικού υποβάθρου, ακόμα και οι μικτές κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμικές διεγέρσεις δίνουν σφάλμα αποσύζευξης με αναμενόμενη κατανομή, η οποία στην περίπτωση των περιβαλλουσών καμπυλών είναι ακόμα πιο ομαλή και πλησιάζει πιο πολύ την αντίστοιχη αρμονική.

3.19 Εφαρμογές αποσύζευξης

Στην ενότητα αυτή, ελέγχεται κατά πόσον τα διαγράμματα με τις καμπύλες αποσύζευξης πάνω από το επίπεδο (R_ω, R_m) που προκύπτουν από τις ελαστικές και ελαστοπλαστικές αναλύσεις των διβάθμιων μικτών κατασκευών, μπορούν να προβλέψουν τα σφάλμα αποσύζευξης πολυβάθμιων μικτών κατασκευών. Συγκεκριμένα, η δοκιμή γίνεται σε κατασκευές οι οποίες αποτελούνται από 3 στάθμες σκυροδέματος + 2 στάθμες χάλυβα και 5 στάθμες σκυροδέματος + 1 στάθμη χάλυβα, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.53, όπου με το γκρι χρώμα απεικονίζεται το υπόβαθρο από σκυρόδεμα και με μπλε η υπερκατασκευή από χάλυβα.



Εικ. 3.53: Διαμορφώσεις μικτών κατασκευών που δοκιμάζονται

Γίνεται η παραδοχή ότι τα επίπεδα πλαίσια που ελέγχονται ανήκουν σε κτίρια με πλάκες που παρέχουν διαφραγματική λειτουργία. Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι κάθε στάθμη μπορεί να περιγραφεί με μια μάζα και μια δυσκαμψία, ακριβώς δηλαδή όπως γίνεται και με τα ZL στοιχεία του OS [124] που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής. Η κάθε στάθμη προσομοιώνεται με έναν κόμβο με ελευθερία μετακίνησης μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση, και δεσμευμένη την κατακόρυφη μετακίνηση και τη στροφή, στον οποίο αποδίδεται και η αντίστοιχη μάζα. Ο κάθε κόμβος συνδέεται με τον προηγούμενο και τον επόμενο με τα στοιχεία ZL, τα οποία υλοποιούν τη δυσκαμψία της κάθε στάθμης. Από τη μάζα και τη δυσκαμψία της κάθε στάθμης υπολογίζεται η ιδιοσυχνότητά της και η απόσβεσή, της όπως στις εξισώσεις (3.8) και (3.10), και η απόσβεση υλοποιείται πάλι με ZL στοιχεία, αντίστοιχα με το διβάθμιο προσομοίωμα της Εικ. 3.7.

Η αντιστοίχιση του κάθε ενός πολυβάθμιου πλαισίου σε ένα σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) προκειμένου να γίνει η σύγκριση με τις καμπύλες αποσύζευξης που έχουν προκύψει μέχρι στιγμής, γίνεται βάση των χαρακτηριστικών της πρώτης ιδιομορφής του κάθε τμήματος. Το κάθε πολυβάθμιο της Εικ. 3.53 πρώτα χωρίζεται στα τμήματα p και s που το αποτελούν, και σε κάθε ένα από αυτά γίνεται μια κλασσική ανάλυση ιδιοτιμών, οπότε προκύπτουν τα χαρακτηριστικά της πρώτης, όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.8 της παρούσας διατριβής. Από την ιδιοσυχνότητα της πρώτης

ιδιομορφής του κάθε τμήματος, ω_p^1 και ω_s^1, καθώς και από τις αντίστοιχες μάζες, M_p^1 και M_s^1, υπολογίζονται οι λόγοι ιδιοσυχνοτήτων και μαζών:

$$R_\omega = \frac{\omega_p^1}{\omega_s^1} \quad \& \quad R_m = \frac{M_p^1}{M_s^1} \tag{3.53}$$

Σκοπός είναι να γίνει διερεύνηση σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m). Για το λόγο αυτό, επιλέγονται οι ακόλουθες τρεις τιμές του λόγου ιδιοσυχνοτήτων: $R_\omega = \{0.5, 1, 1.5\}$, οι οποίες στις περισσότερες καμπύλες αποσύζευξης αντιστοιχούν στην πιο δυσμενή περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m). Ακολούθως, ορίζονται οι λόγοι μαζών ώστε η κάθε τιμή R_ω να σαρώνεται από τα αριστερά ως τα δεξιά του επιπέδου: $R_m = \{0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1\}$.

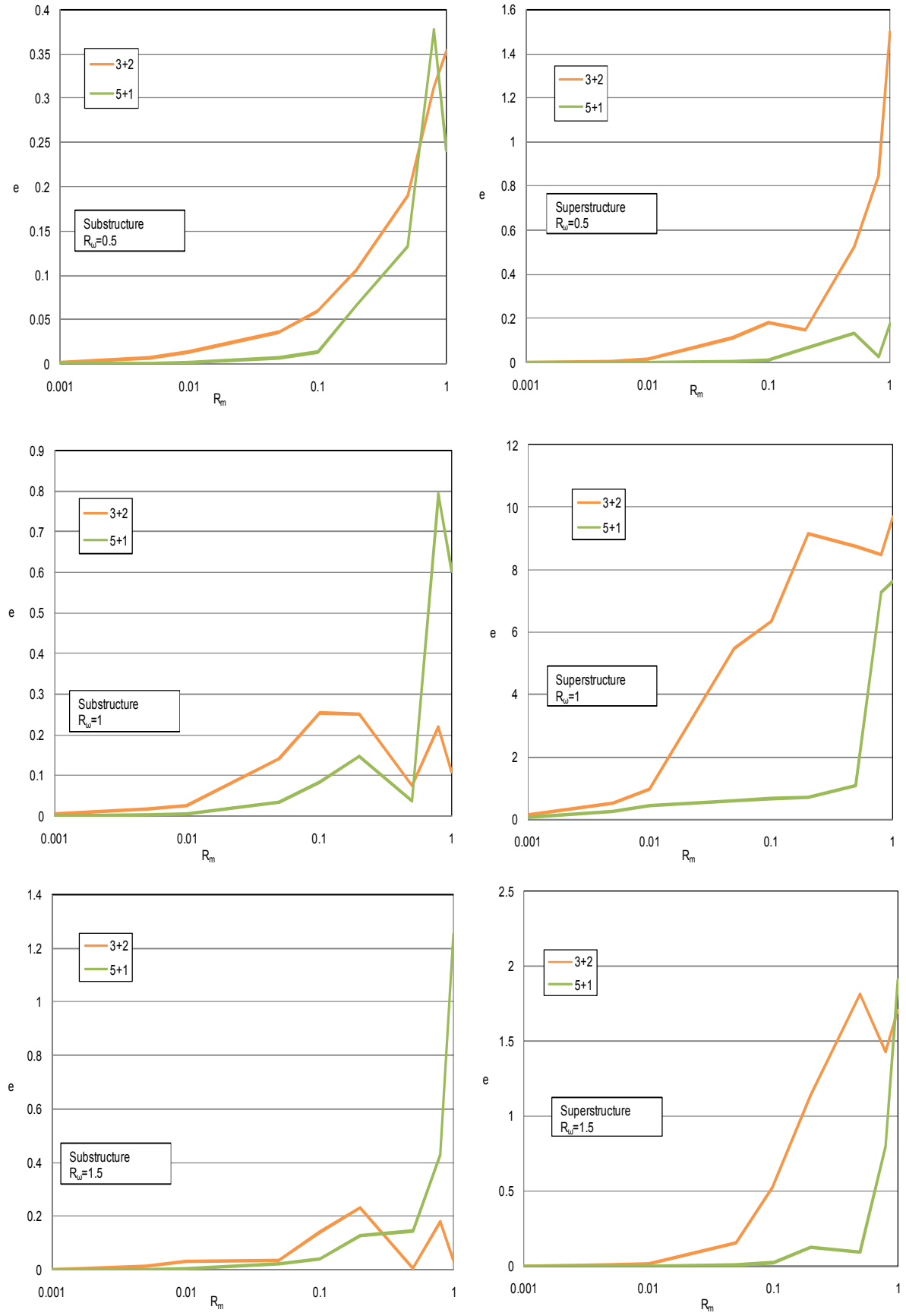
Προκειμένου να κατασκευαστούν οι πολυβάθμιες κατασκευές που να αντιστοιχούν στις παραπάνω θέσεις, τίθεται για την πρώτη ιδιομορφή του υποβάθρου ιδιοσυχνότητα ίση με 0.16s. Έπειτα, αποδίδεται στην κάθε στάθμη μάζα ίση με 200Mgr, και ανάλογα με τον αριθμό των σταθμών, μέσω μιας ιδιομορφικής ανάλυσης υπολογίζεται η απαιτούμενη δυσκαμψία της κάθε στάθμης και η προκύπτουσα μάζα της πρώτης ιδιομορφής. Ακολούθως, με το ζευγάρι τιμών R_ω και R_m, υπολογίζονται η ιδιοσυχνότητα και η μάζα της πρώτης ιδιομορφής υπερκατασκευής, και τέλος με μια ακόμα ιδιομορφική ανάλυση, και ανάλογα με τον αριθμό των σταθμών, προκύπτει η απαιτούμενη δυσκαμψία και μάζα της κάθε στάθμης του τμήματος s.

Έτσι, για κάθε συνδυασμό λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών που επιλέχθηκε να μελετηθούν, κατασκευάζονται τα αντίστοιχα προσομοιώματα για κάθε ένα τύπο κατασκευής: 3+2 και 5+1 στάθμες. Ακολούθως, για κάθε μια από τις κατασκευές γίνεται η διαδικασία της αποσύζευξης χρησιμοποιώντας ως διέγερση την καταγραφή Athens η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα 2.9. Δηλαδή, κάθε ένα υπόβαθρο που αντιστοιχεί σε κάθε συνδυασμό λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών, αναλύεται με επιβαλλόμενη διέγερση το Athens. Λαμβάνεται η απόκριση στην ανώτερή του στάθμη, στη στάθμη δηλαδή που εδράζεται η υπερκατασκευή, και η απόκριση αυτή σε όρους απολύτων επιταχύνσεων χρησιμοποιείται σαν διέγερση για την υπερκατασκευή. Τελικά, λαμβάνονται οι αποκρίσεις οροφής υποβάθρου και οροφής υπερκατασκευής, σε όρους απολύτων επιταχύνσεων. Έπειτα, γίνεται η συζευγμένη ανάλυση του συνολικού φορέα υποβαλλόμενου στην εδαφική διέγερση, και

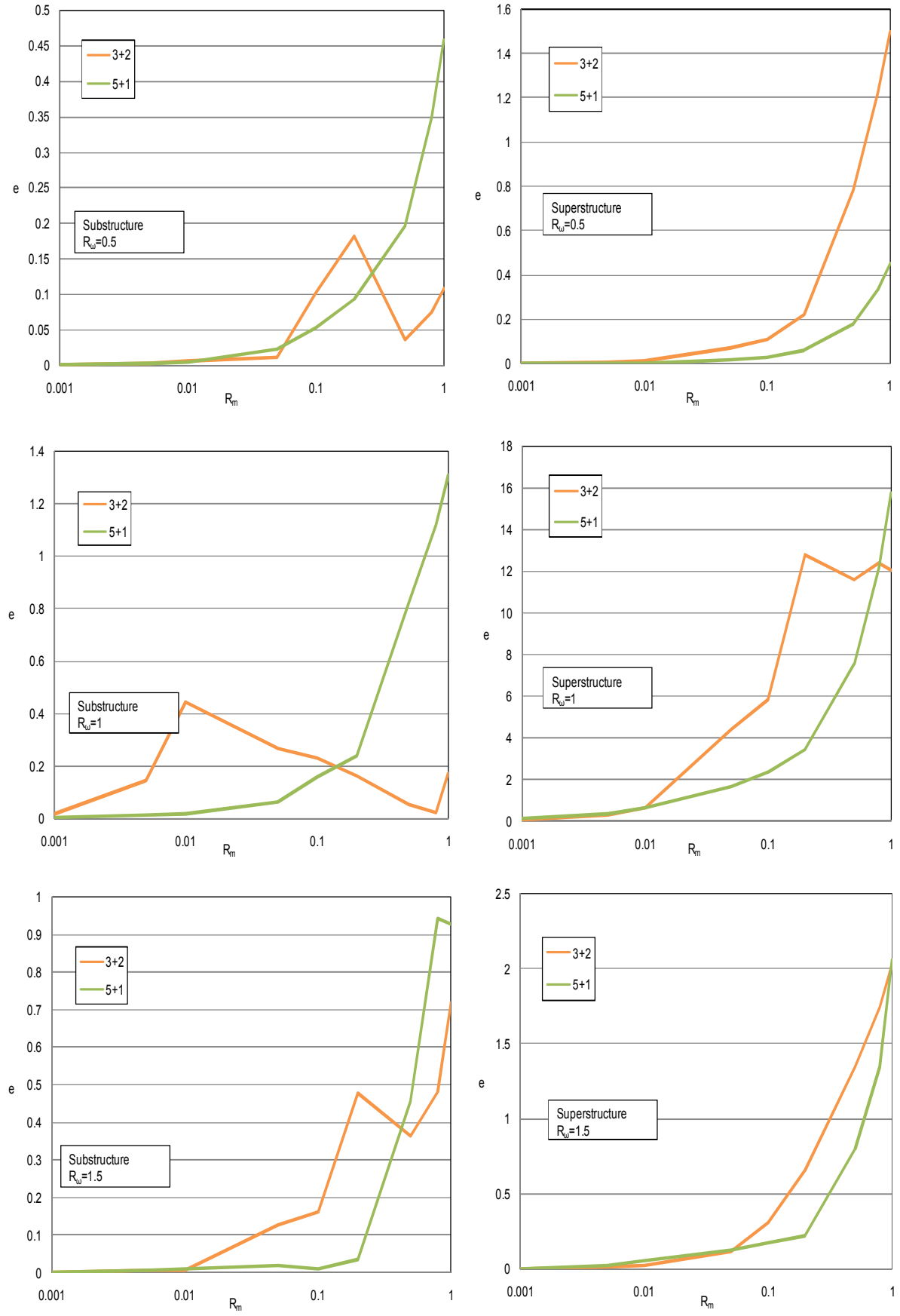
λαμβάνονται πάλι οι αποκρίσεις ανώτατης στάθμης υποβάθρου και ανώτατης στάθμης υπερκατασκευής. Τέλος, για κάθε μια από τις δύο στάθμες για τις οποίες καταγράφονται τα αποτελέσματα, υπολογίζεται το σφάλμα όπως στην εξίσωση (3.7).

Η διαδικασία της αποσύζευξης γίνεται ελαστικά και ελαστοπλαστικά, με την ελαστοπλαστική ανάλυση να υλοποιείται με διγραμμικό ελαστοπλαστικό νόμο υλικού, όπως αυτός της Εικ. 3.34, με μηδενική κράτυνση. Προκειμένου να γίνει η ελαστοπλαστική ανάλυση, πρώτα γίνεται μια ελαστική ανάλυση του υποβάθρου για κάθε ζεύγος λόγων R_ω και R_m. Λαμβάνεται σαν αποτέλεσμα η χρονοϊστορία μετατοπίσεων της ανώτατης στάθμης, και το απόλυτο μέγιστό της διαιρείται με τους λόγους $\lambda = 2 \,\&\, 3$ της εξίσωσης (3.51). Ο λόγος $\lambda = 10$ που είναι μη ρεαλιστικός δε χρησιμοποιείται στις εφαρμογές. Γίνεται η υπόθεση ότι το υπόβαθρο ταλαντώνεται αποκλειστικά κατά την πρώτη του ιδιομορφή, και το διάνυσμα της πρώτης ιδιομορφής του κανονικοποιείται με τρόπο τέτοιο ώστε στην ανώτερη στάθμη του να παίρνει την τιμή 1. Ακολούθως, με το κανονικοποιημένο διάνυσμα πολλαπλασιάζεται το μέγιστο απόλυτο της ανώτατης στάθμης διαιρεμένο με την τιμή του λόγου λ, και το γινόμενο πολλαπλασιάζεται με τη δυσκαμψία της κάθε στάθμης. Προκύπτει έτσι η αντοχή του υποβάθρου σε κάθε στάθμη του η οποία υλοποιείται στις ελαστοπλαστικές αναλύσεις κατά τη συζευγμένη και την αποσυζευγμένη ανάλυση. Η διαδικασία της αποσύζευξης γίνεται και με τον τροποποιημένο τρόπο. Έτσι, στην ανώτερη στάθμη του υποβάθρου προστίθεται όλη η μάζα της υπερκατασκευής κατά την αποσυζευγμένη ανάλυση, ενώ όπως στο διβάθμιο, η αντοχή του υποβάθρου υπολογίζεται από την ελαστική ανάλυση του κανονικού φορέα και όχι του τροποποιημένου.

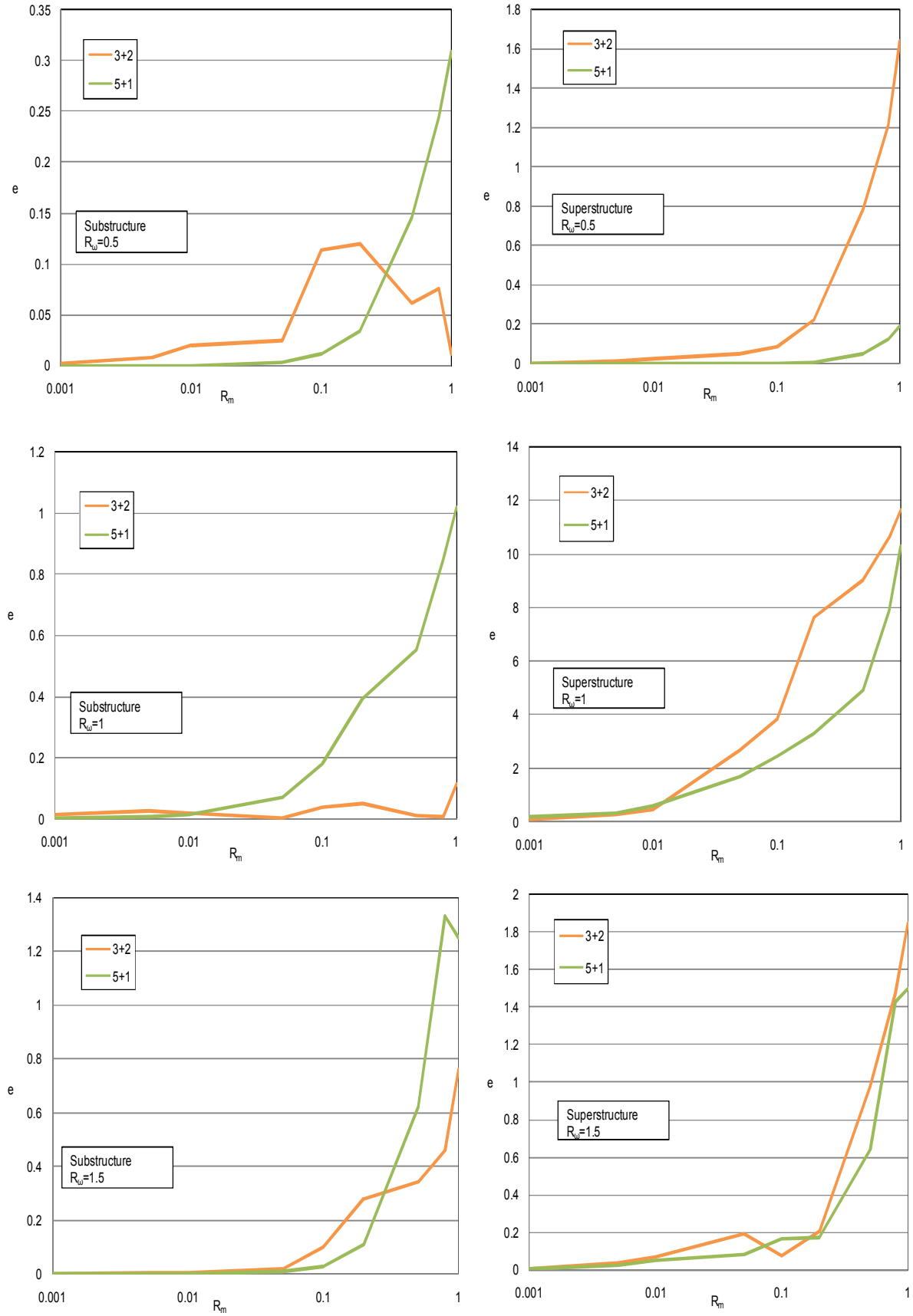
Για κάθε έναν από τους συνδυασμούς λόγων R_ω και R_m, γίνεται η διαδικασία της αποσύζευξης και καταγράφεται το σφάλμα για κάθε τύπο κατασκευής. Αυτή τη φορά, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή προφίλ σφάλματος πάνω από τον άξονα των λόγων μαζών για κάθε λόγο ιδιοσυχνοτήτων, για το υπόβαθρο και την υπερκατασκευή. Έτσι, στην Εικ. 3.54 φαίνεται το προφίλ του σφάλματος αποσύζευξης για ελαστική θεώρηση των υπό μελέτη κατασκευών (EDPT), στην Εικ. 3.55, το προφίλ για την περίπτωση που $\lambda = 2$ (EPDPT), και στην Εικ. 3.56 το προφίλ του σφάλματος αποσύζευξης για την περίπτωση που $\lambda = 3$ (EPDPT), και τα αντίστοιχα προφίλ στην περίπτωση που η αποσύζευξη γίνει με την τροποποιημένη διαδικασία φαίνονται στις Εικ. 3.57 (MEDPT), και 3.58 και 3.59 (MEPDPT).



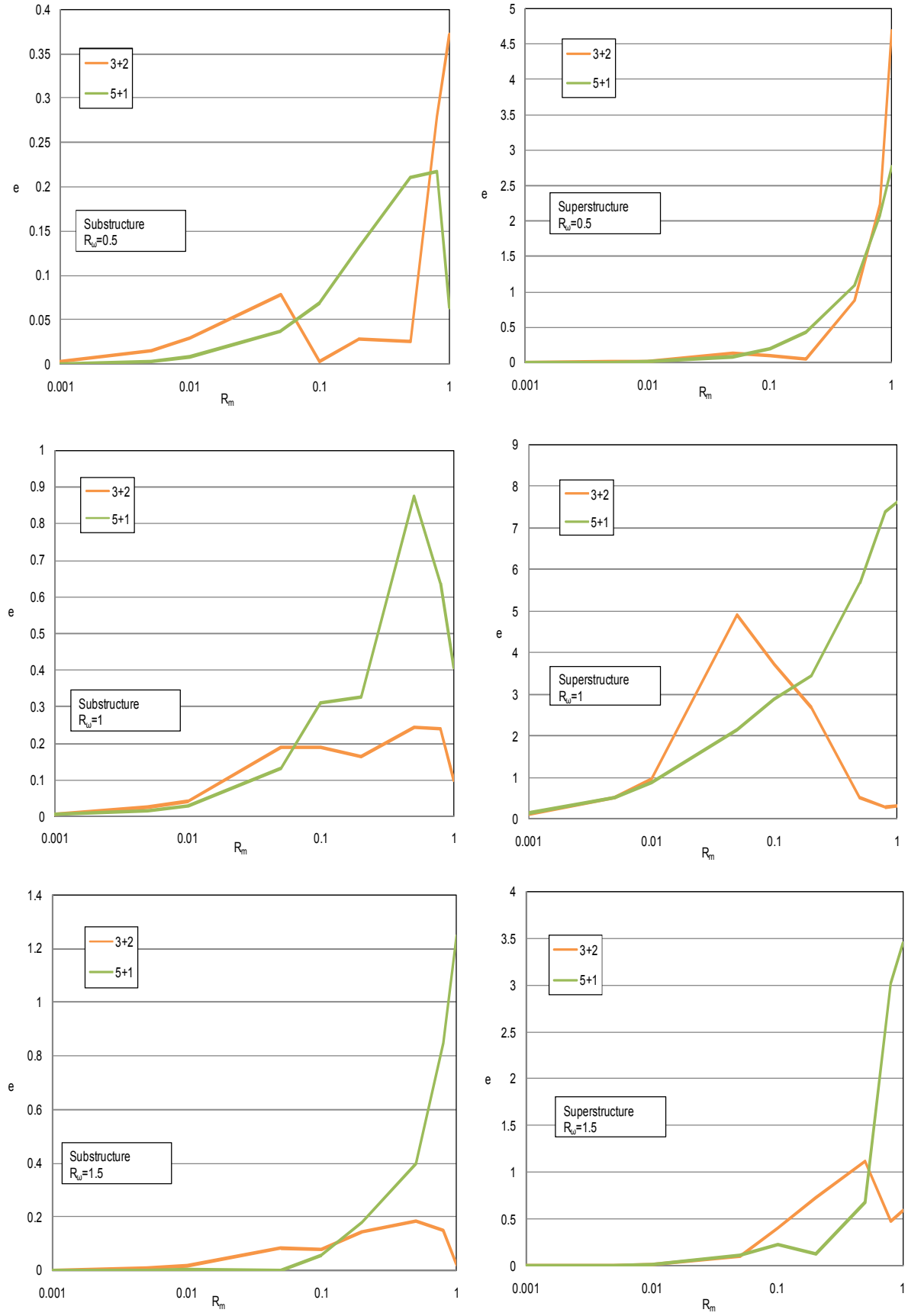
Εικ. 3.54: Προφίλ EDPT σφάλματος



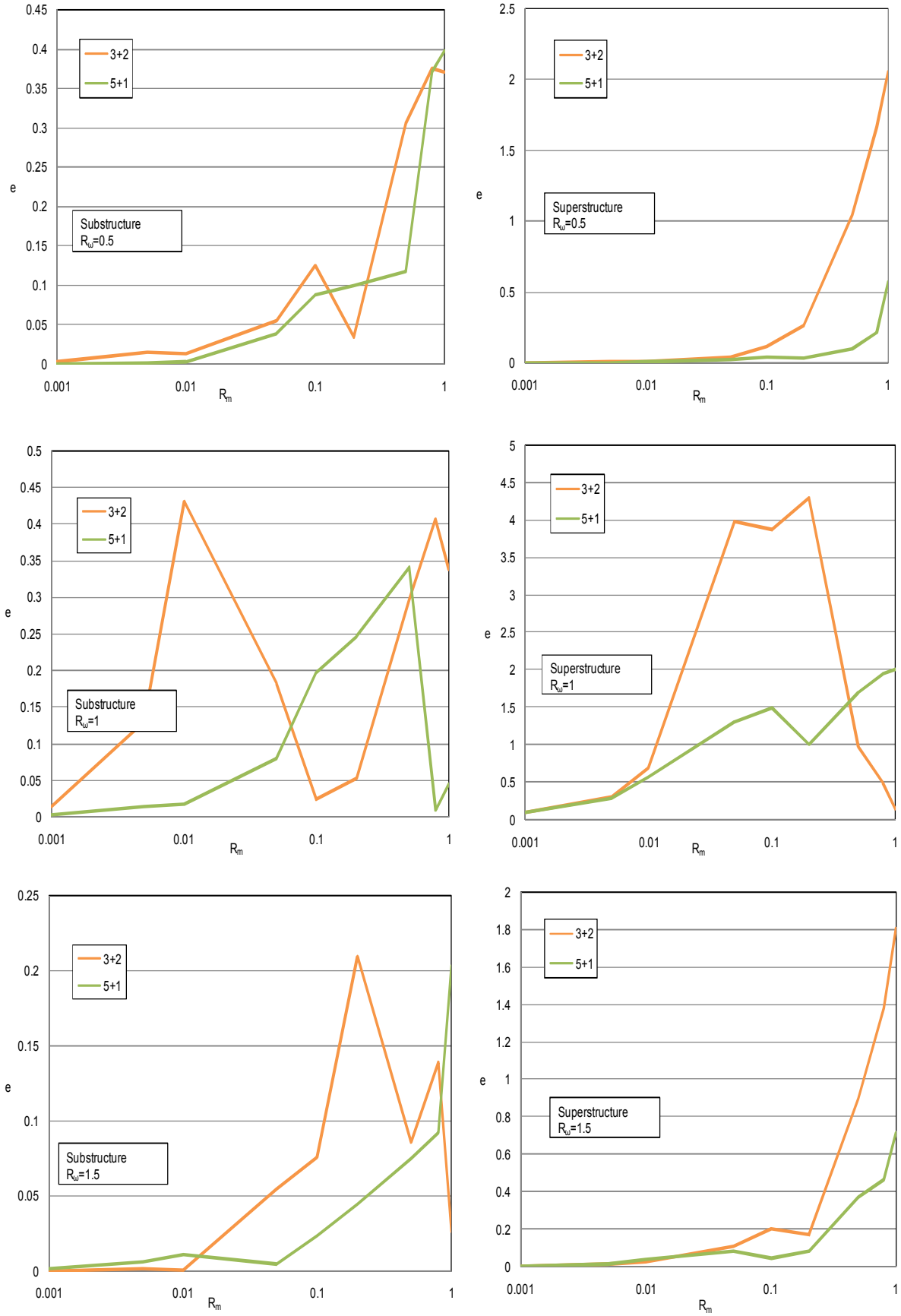
Εικ. 3.55: Προφίλ EPDPT σφάλματος, λ=2



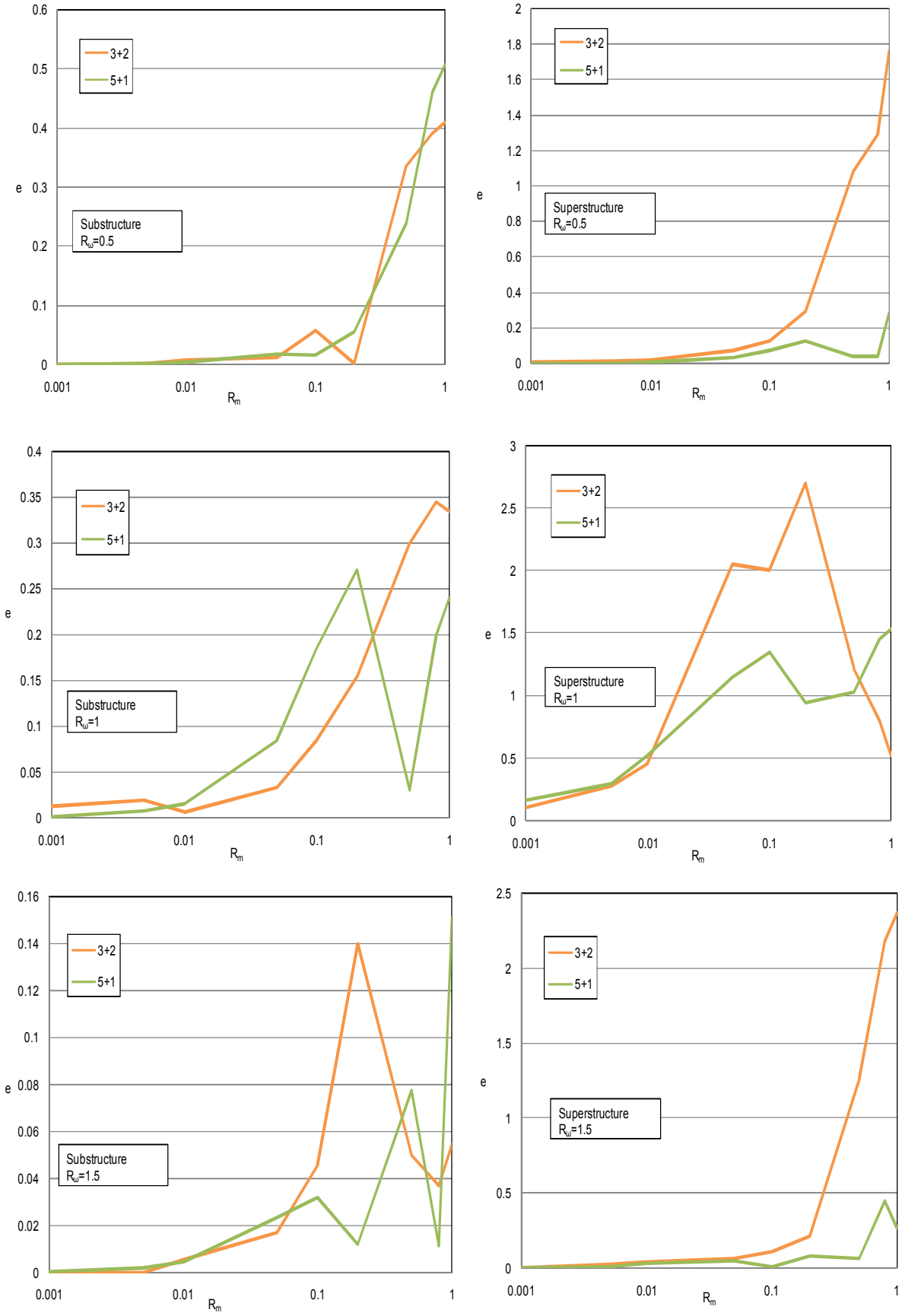
Εικ. 3.56: Προφίλ EPDPT σφάλματος, λ=3



Εικ. 3.57: Προφίλ MEDPT σφάλματος



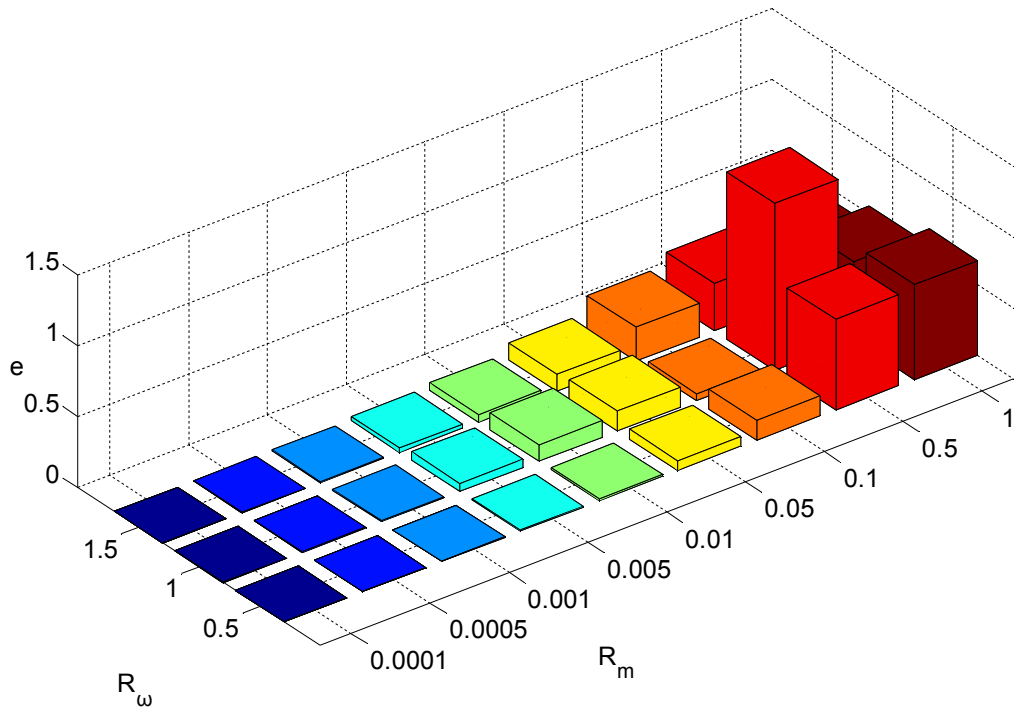
Εικ. 3.58: Προφίλ MEPDPT σφάλματος, λ=2



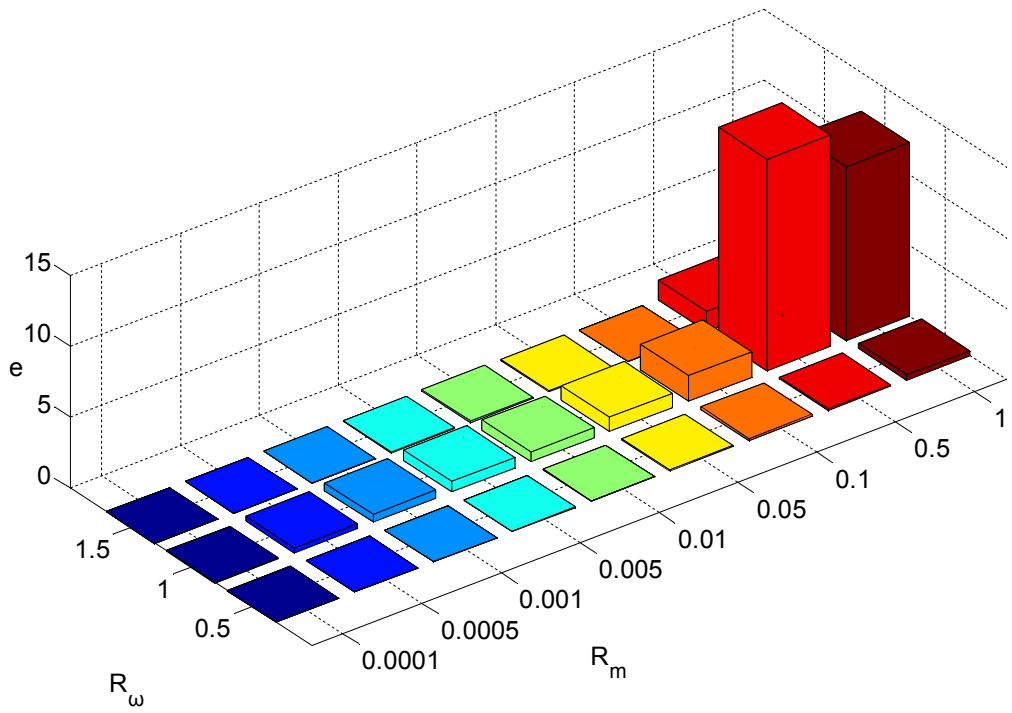
Εικ. 3.59: Προφίλ MEPDPT σφάλματος, λ=3

Από τα παραπάνω παραδείγματα φαίνεται ότι γενικά, μέχρι την τιμή του λόγου μαζών $R_m = 0.01$, η διαδικασία της αποσύζευξης όταν η διέγερση είναι η καταγραφή Athens, δίνει σφάλματα αποσύζευξης τα οποία είναι μικρότερα από 30%, σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, δηλαδή ελαστικό και ελαστοπλαστικό υπόβαθρο, και κανονική και τροποποιημένη διαδικασία. Εξαίρεση είναι η περίπτωση του συντονισμού υποβάθρου και υπερκατασκευής, όταν δηλαδή $R_\omega = 1$, οπότε και παρατηρείται σφάλμα αποσύζευξης πολλές φορές μεγαλύτερο του 30%, σε πολύ μικρούς λόγους μαζών, μικρότερους και από $R_m = 0.01$.

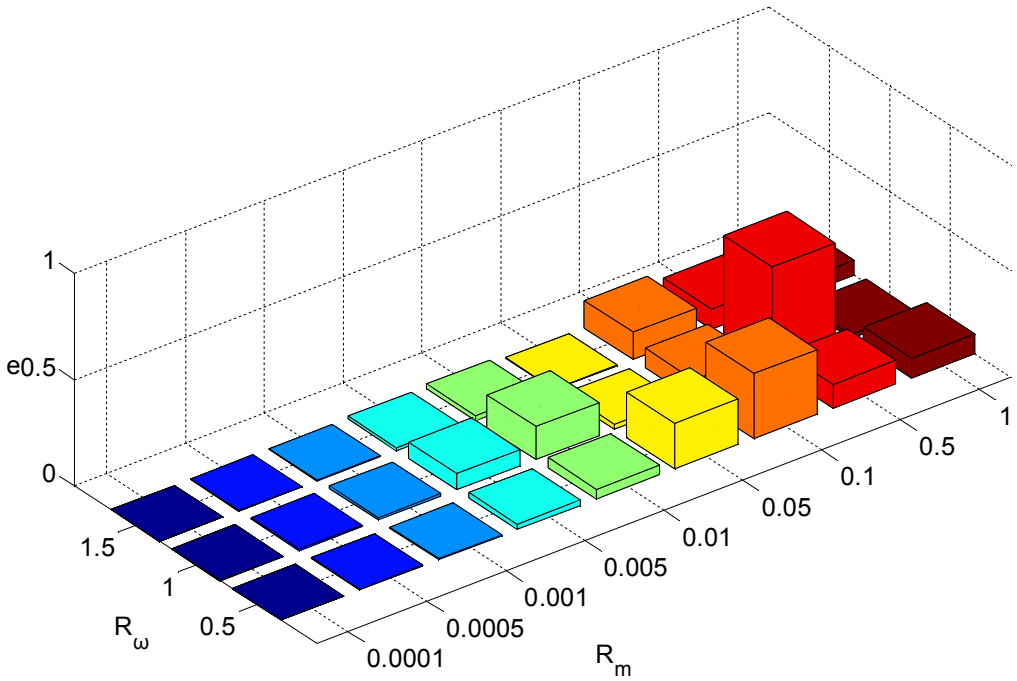
Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι κατανομές των σφαλμάτων για την περίπτωση της κατασκευής 5+1 και με τη μορφή τρισδιάστατων ραβδογραμμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι κατανομές σφάλματος υποβάθρου και υπερκατασκευής από την EPDPT διαδικασία για $\lambda=2$ στις Εικ. 3.60 και 3.61 αντίστοιχα, και από την MEPDPT διαδικασία για $\lambda=2$ στις Εικ. 3.62 και 3.63.



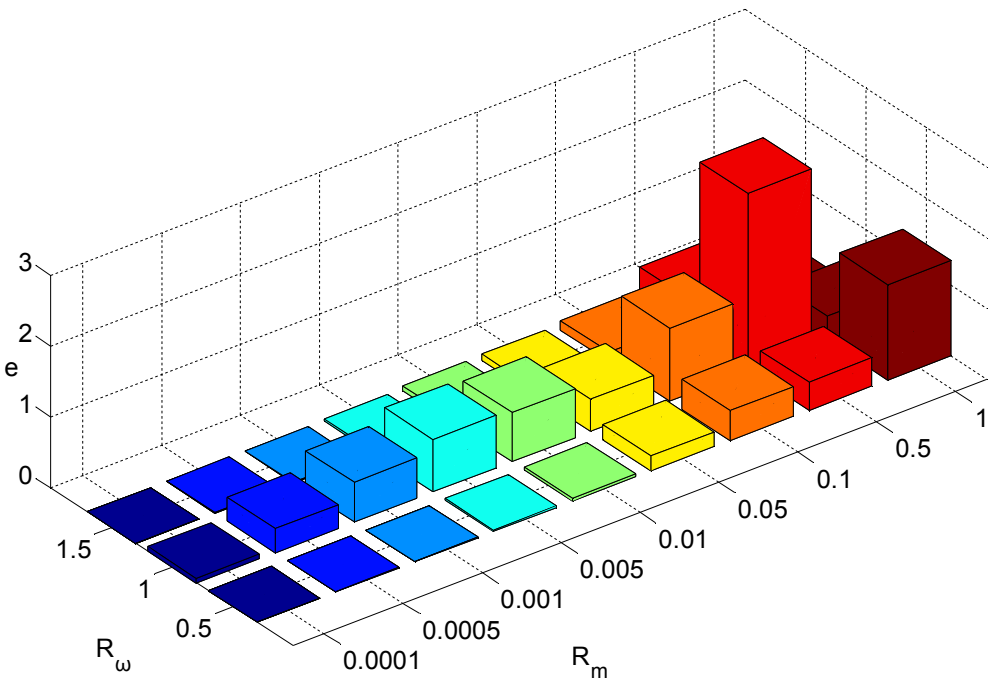
Εικ. 3.60: Σφάλμα υποβάθρου από ανάλυση EPDPT, λ=2



Εικ. 3.61: Σφάλμα υπερκατασκευής από ανάλυση EPDPT, λ=2

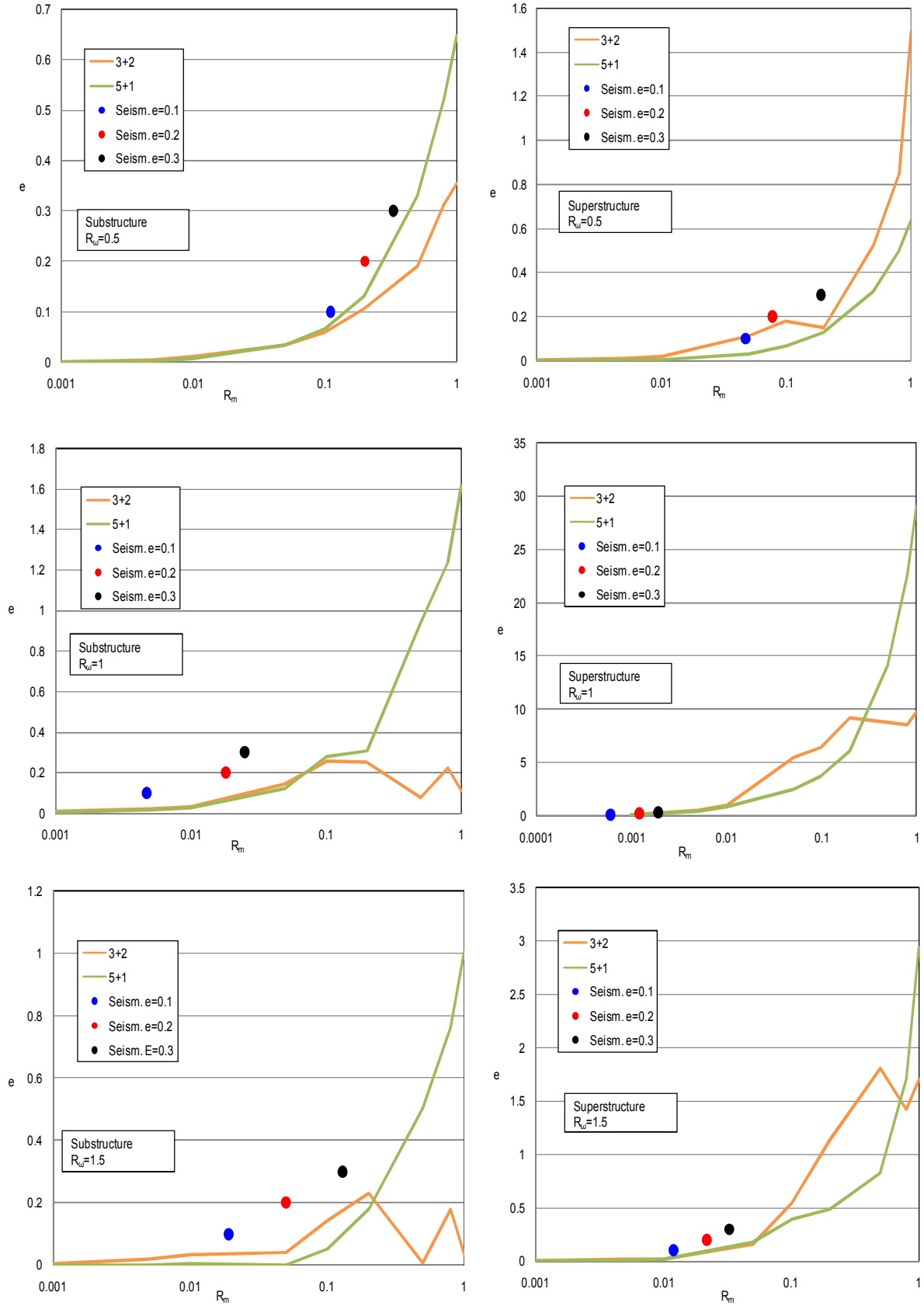


Εικ. 3.62: Σφάλμα υποβάθρου από ανάλυση MEPDPT, λ=2

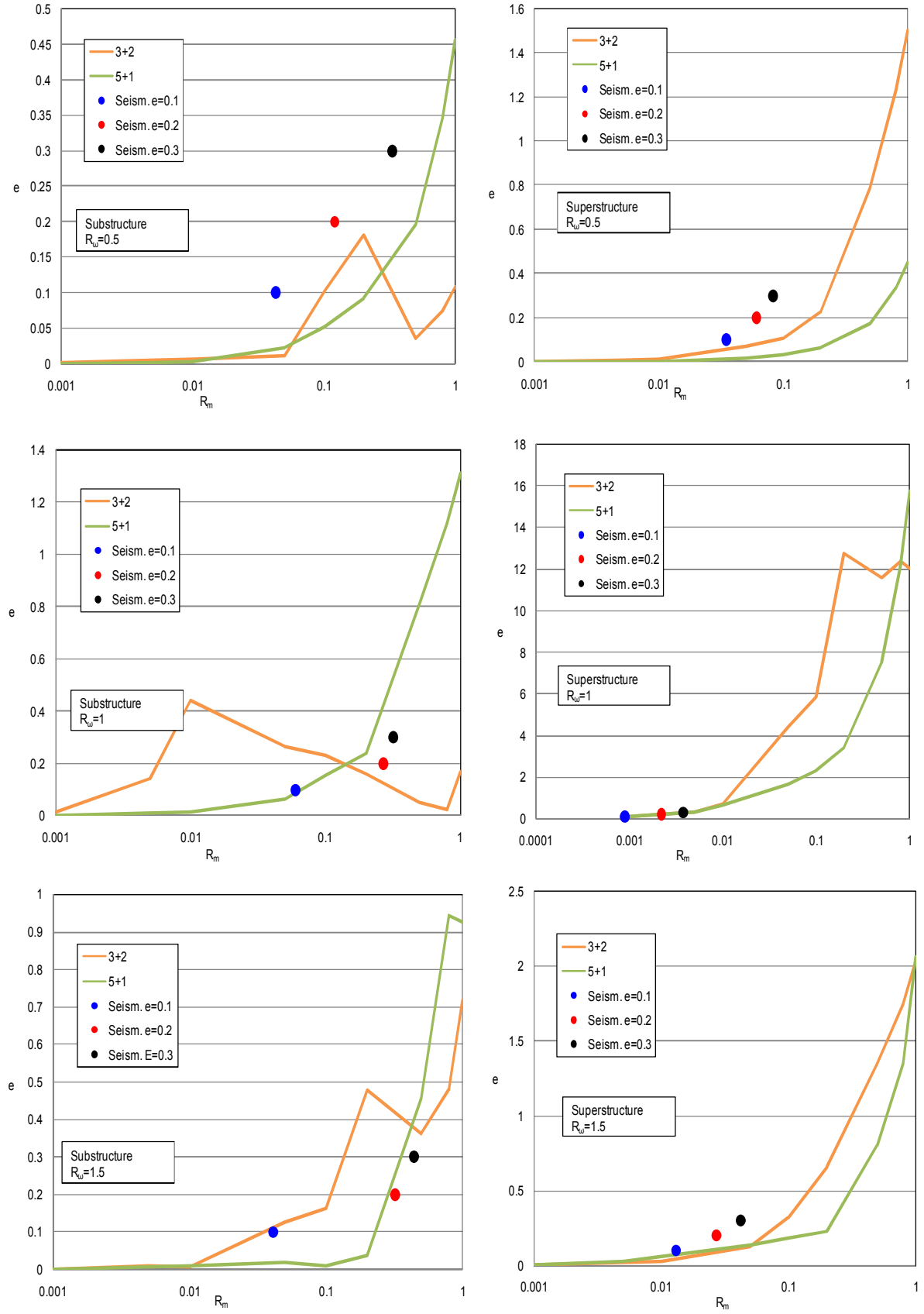


Εικ. 3.63: Σφάλμα υπερκατασκευής από ανάλυση MEPDPT, λ=2

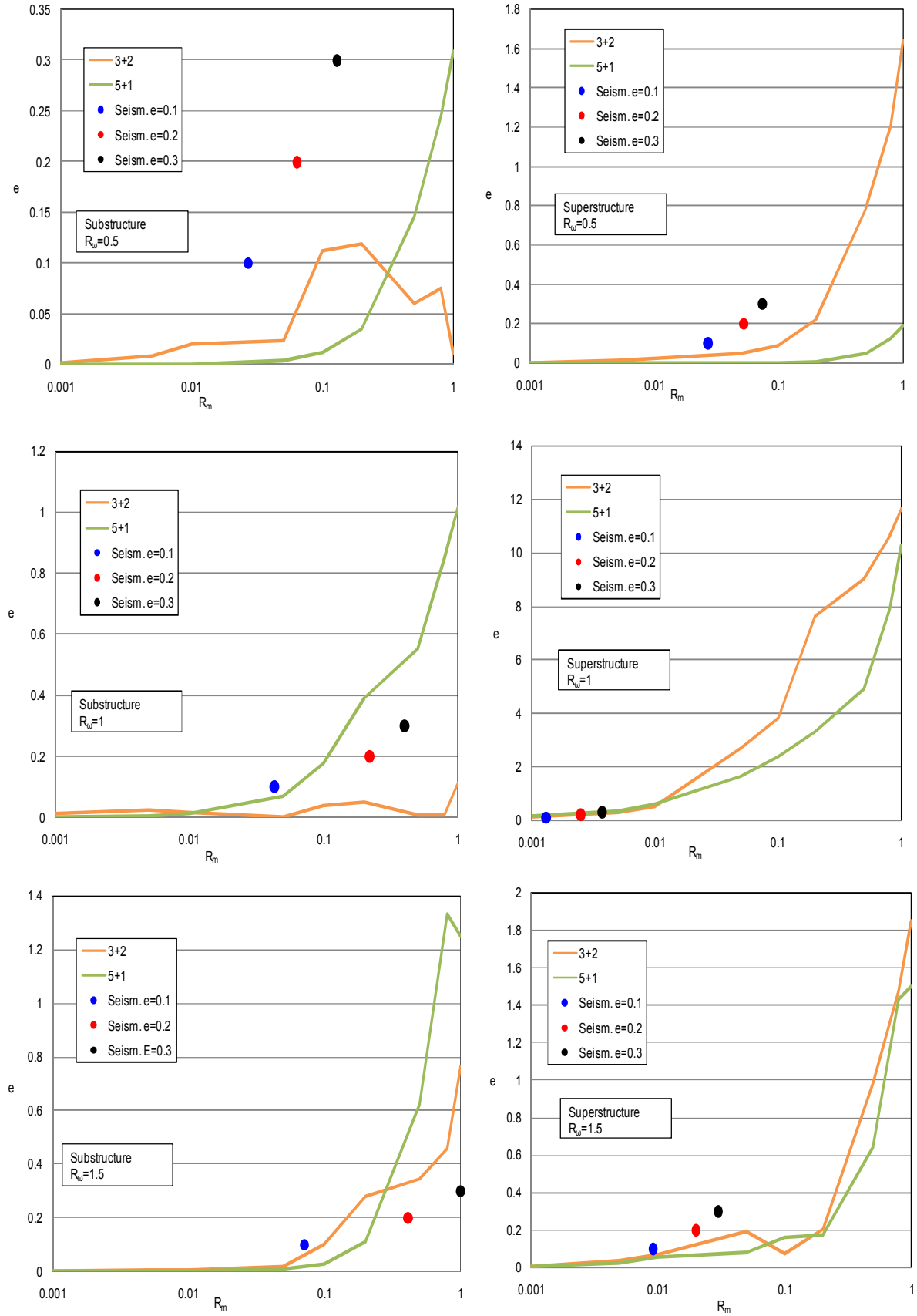
Ακολούθως, γίνεται σύγκριση μεταξύ των περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών αποσύζευξης και των προφίλ των σφαλμάτων αποσύζευξης που προκύπτουν από τις παραπάνω εφαρμογές. Έτσι, για τις υπό μελέτη διαμορφώσεις μικτών κατασκευών, γίνεται σύγκριση των προφίλ σφάλματος που αντιστοιχούν από τις ελαστικές και ελαστοπλαστικές αναλύσεις τροποποιημένης και κανονικής διαδικασίας αποσύζευξης, με τις θέσεις που οι αντίστοιχες περιβάλλουσες καμπύλες σεισμικών διεγέρσεων δίνουν σφάλματα $10\%, 20\%, 30\%$, στην αντίστοιχη περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m). Οι θέσεις αυτές που ορίζονται από τις σεισμικές καμπύλες αποσύζευξης, σημειώνονται με τελείες, οι οποίες πάλι έχουν την αντιστοιχία χρωμάτων: μπλε για σφάλμα 10%, κόκκινο για 20% και μαύρο για 30%. Στην Εικ. 3.64 φαίνεται η σύγκριση του προφίλ του σφάλματος αποσύζευξης των κατασκευών από την EDPT ανάλυση σε σύγκριση τις EDPT σεισμικές περιβάλλουσες, στην Εικ. 3.65 η σύγκριση του σφάλματος από την EPDPT ανάλυση και τις σεισμικές για τιμή του λόγου $\lambda = 2$ και στην Εικ. 3.66 η σύγκριση του σφάλματος από την EPDPT ανάλυση με τις σεισμικές για $\lambda = 3$, για υπόβαθρο και υπερκατασκευή. Για την περίπτωση της τροποποιημένης αποσύζευξης, η σύγκριση των MEDPT αναλύσεων γίνεται στην Εικ. 3.67, των MEPDPT αναλύσεων για $\lambda = 2$ στην Εικ. 3.68 και τέλος η σύγκριση των MEPDPT αναλύσεων για $\lambda = 3$ στην Εικ. 3.69.



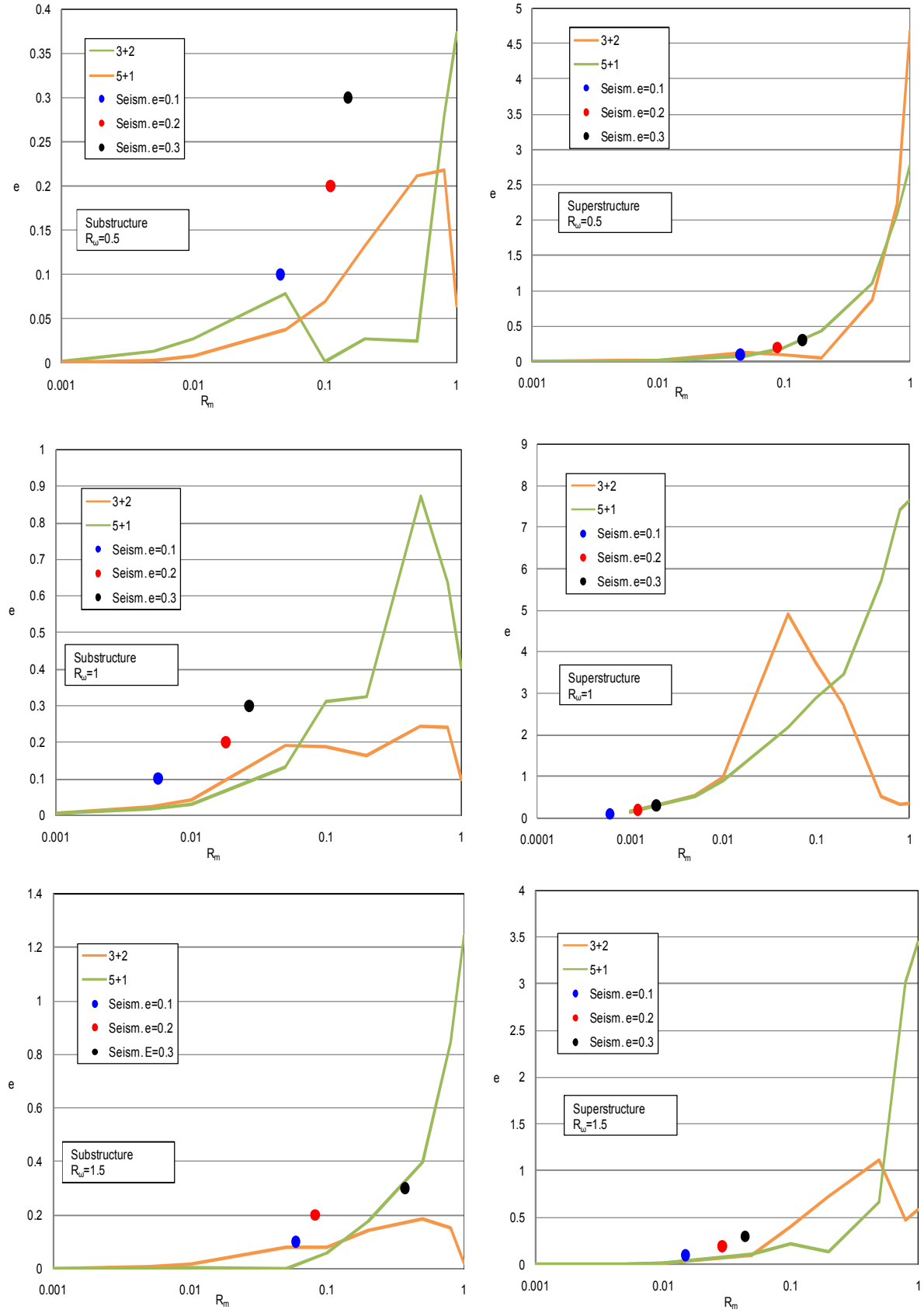
Εικ. 3.64:Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών και σφάλματος αποσύζευξης από EDPT αναλύσεις



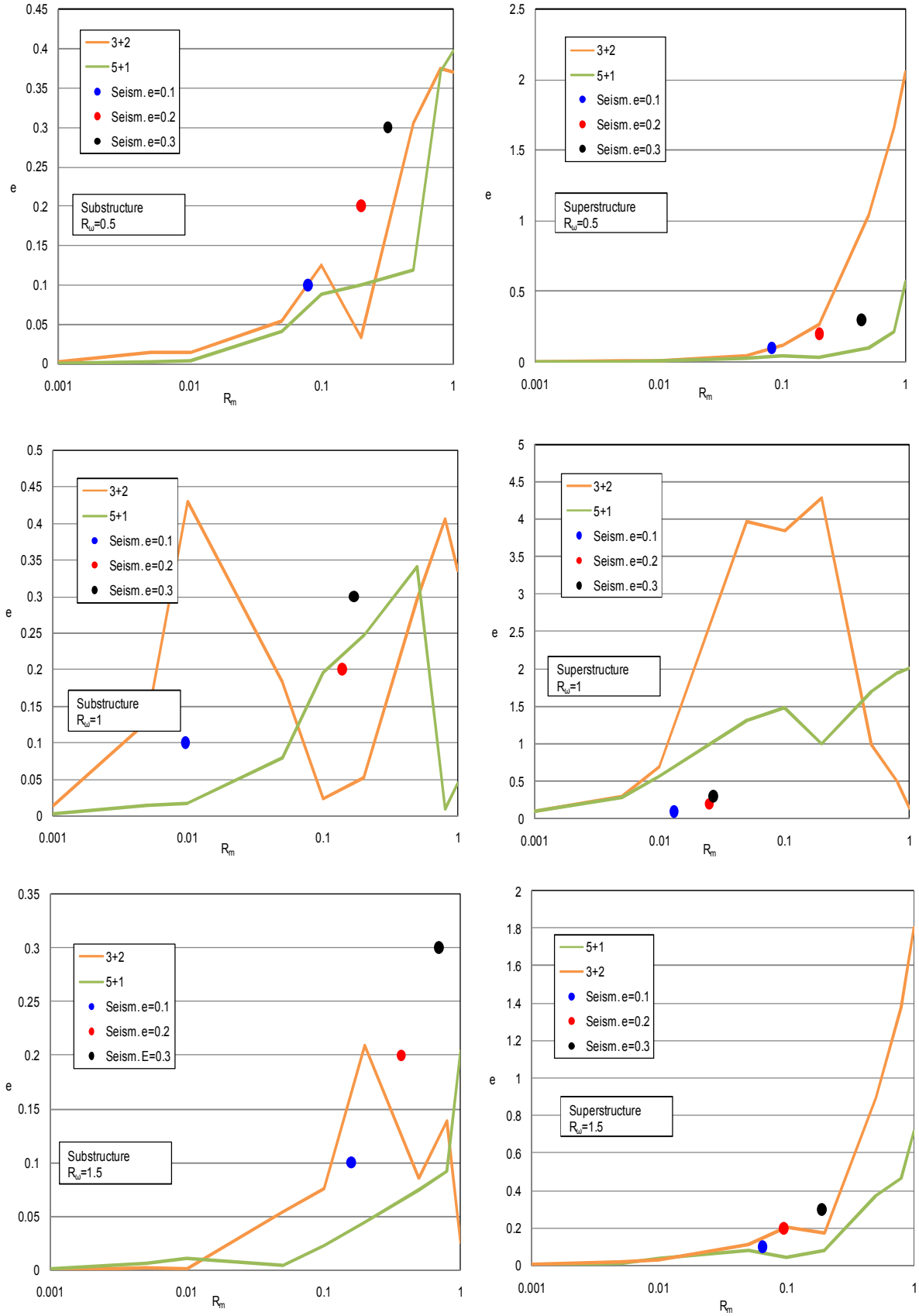
Εικ. 3.65:Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών και σφάλματος αποσύζευξης από EPDPT αναλύσεις με λ=2



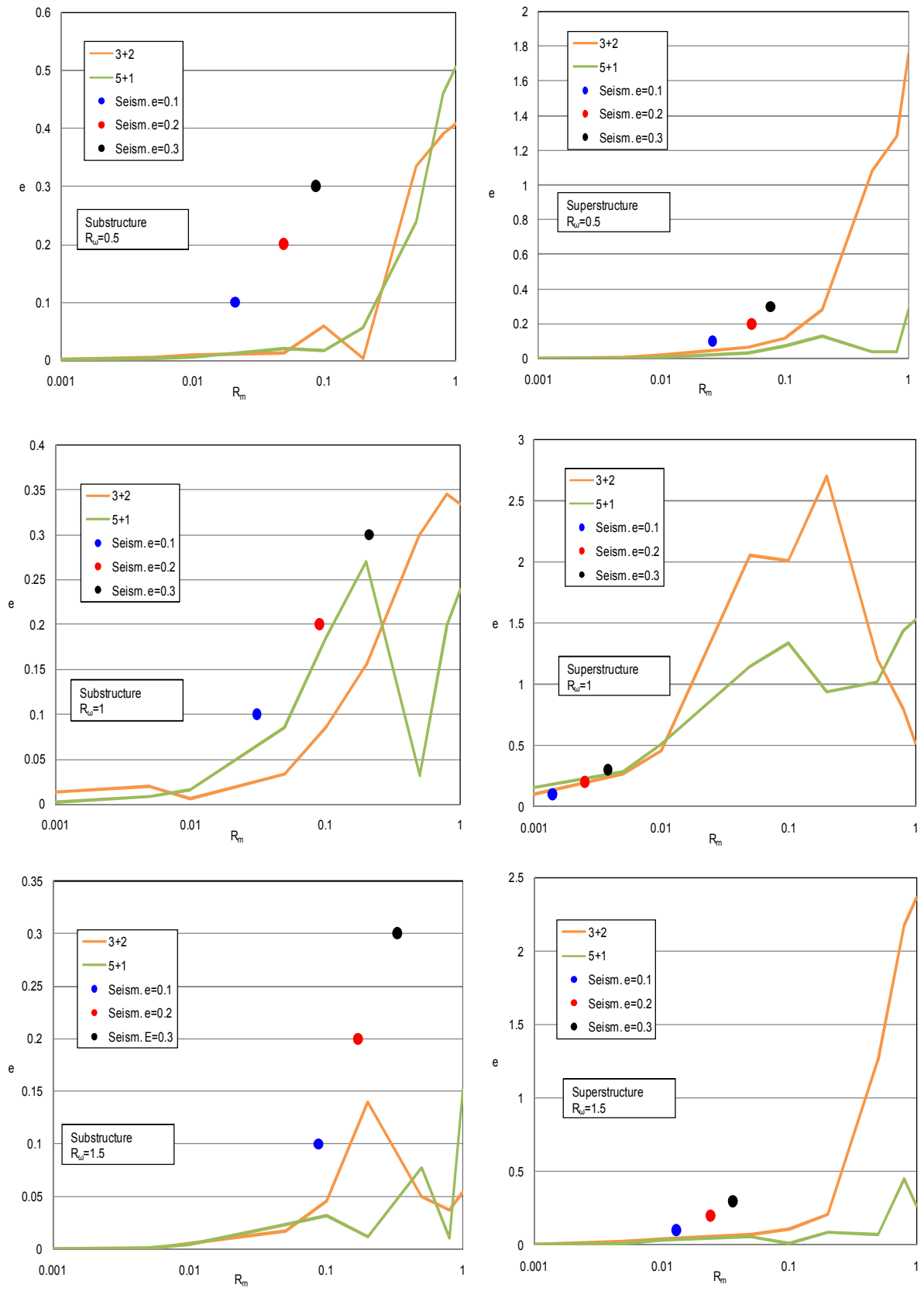
Εικ. 3.66:Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών και σφάλματος αποσύζευξης για EPDPT αναλύσεις με λ=3



Εικ. 3.67:Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών και σφάλματος αποσύζευξης για MEDPT αναλύσεις



Εικ. 3.68:Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών και σφάλματος αποσύζευξης για MEPDPT αναλύσεις με λ=2



Εικ. 3.69:Σύγκριση περιβαλλουσών σεισμικών καμπυλών και σφάλματος αποσύζευξης για MEPDPT αναλύσεις με λ=3

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι οι περιβάλλουσες σεισμικές καμπύλες, δεν καταφέρνουν σε κάθε περίπτωση να προβλέψουν με συντηρητικό τρόπο το σφάλμα αποσύζευξης μιας πολυβάθμιας κατασκευής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων που εξετάζονται, οι περιβάλλουσες καμπύλες όντως προβλέπουν σφάλμα αποσύζευξης μεγαλύτερο από της ανάλυσης, αφού οι τελείες των σεισμικών περιβαλλουσών είναι πάνω από την καμπύλη που δίνει το προφίλ σφάλματος αποσύζευξης της 3+2 και της 5+1 κατασκευής. Αυτό είναι και το ζητούμενο από τις σεισμικές καμπύλες αποσύζευξης, αφού προκύπτουν από τα μέγιστα σφάλματα, με σκοπό να δημιουργήσουν μια συντηρητική περιβάλλουσα καμπυλών αποσύζευξης.

Εξαίρεση είναι η περίπτωση του συντονισμού, στην οποία δεν γίνεται συντηρητική πρόβλεψη του σφάλματος, και κάποιες περιπτώσεις ελαστοπλαστικών αναλύσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μετάβαση από την πολυβάθμια κατασκευή στην ισοδύναμη διβάθμια, δεν είναι αποτελεσματική, με αποτέλεσμα και η σύγκριση μεταξύ καμπυλών αποσύζευξης διβάθμιου ταλαντωτή και σφάλματος από τις εφαρμογές να μη είναι η αναμενόμενη. Ο λόγος είναι ότι η μετάβαση από την πολυβάθμια κατασκευή στη διβάθμια, αν και διευκολύνει πολύ τη μελέτη του σφάλματος αποσύζευξης, αγνοεί την αλληλεπίδραση των ανώτερων ιδιομορφών. Μάλιστα, όταν η συμπεριφορά του υποβάθρου είναι μη γραμμική, η συσχέτιση μεταξύ διβάθμιου, από το οποίο προκύπτουν οι καμπύλες αποσύζευξης, και πολυβάθμιου είναι ακόμα πιο ασθενής. Όταν δε η διέγερση είναι σεισμική, έχει δηλαδή πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, είναι πολύ πιθανό να δίνει σημαντική ενίσχυση σε κάποια από τις ανώτερες ιδιομορφές των δύο τμημάτων, οπότε η πρόβλεψη από τια καμπύλες αποσύζευξης του διβάθμιου αποδυναμώνεται περαιτέρω. Κυρίως όμως, η ασθενής συσχέτιση εντοπίζεται σε αρκετά μεγάλους λόγους μαζών, εκεί όπου μάλλον η αποσυζευγμένη ανάλυση αποφεύγεται. Αντίθετα, στην περιοχή μικρών λόγων μάζας όπου οι καμπύλες αποσύζευξης προβλέπουν σφάλματα μικρότερα από 10%, το σφάλμα που προκύπτει από τις εφαρμογές είναι όντως σε τόσο χαμηλά επίπεδα, με εξαίρεση τις περιπτώσεις συντονισμού μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών υποβάθρου και υπερκατασκευής.

3.20 Προσαρτήματα κατά ΕΑΚ [2] και EC8 [3]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, οι ισχύοντες κανονισμοί δεν έχουν διατάξεις οι οποίες να αναφέρονται στην ανάλυση των μικτών κατασκευών με τρόπο εύκολο στην εφαρμογή. Άλλωστε, αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο οι περισσότεροι μελετητές καταλήγουν στην υιοθέτηση συντηρητικών παραμέτρων για την απόσβεση και την πλαστιμότητα, τις οποίες εφαρμόζουν στο σύνολο της κατασκευής. Οι διατάξεις του ΕΑΚ [2] για τα προσαρτήματα, ή οι εντελώς αντίστοιχες του EC8, είναι κοντά σε μια λογική αποσυζευγμένης ανάλυσης, και έχουν ως στόχο τον προσδιορισμό των σεισμικών εντατικών μεγεθών μιας υπερκατασκευής με αποσυζευγμένο τρόπο, χωρίς δηλαδή να είναι αναγκαίο να γίνει ανάλυση ολόκληρης της κατασκευής.

Κατά τον ΕΑΚ [2], προσάρτημα θεωρείται κατασκευή ή τμήμα κατασκευής, η οποία δεν αποτελεί οργανικό μέρος του σκελετού. Ο ορισμός αυτός αμέσως, κάνει τις διατάξεις του κανονισμού ακατάλληλες για εφαρμογή σε μικτές κτιριακές κατασκευές. Ακολούθως όμως, γίνεται μια διερεύνηση της ισχύος των κανονιστικών διατάξεων περί προσαρτημάτων, σε μικτές διβάθμιες κατασκευές, προκειμένου να διαπιστωθεί η ισχύς τους σε ένα εύρος λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών.

Ο ΕΑΚ [2] προβλέπει ότι η σεισμική δύναμη που δρα σε ένα προσάρτημα δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\varepsilon W \gamma}{q} \tag{3.54}$$

όπου W το βάρος του προσαρτήματος, γ ο συντελεστή σπουδαιότητας και q ένας μειωτικός συντελεστής ο οποίος εκφράζει τη δυνατότητα του προσαρτήματος για ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Ο σεισμικός συντελεστής ε δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \alpha\beta\left(1 + \frac{z}{H}\right) \tag{3.55}$$

όπου:

$$\alpha = \frac{A}{g} \tag{3.56}$$

και:

$$\beta = \frac{2}{1+\left(1-\frac{T}{T_p}\right)^2} \geq 1 \tag{3.57}$$

με A την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, T τη ιδιοπερίοδο του προσαρτήματος, T_p την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του υποβάθρου, z τη στάθμη στήριξης του προσαρτήματος και H το ύψος του κτιρίου.

Εν προκειμένω, γίνεται η μελέτη υπερκατασκευών θεωρούμενων ως προσαρτήματα, οι οποίες εδράζονται στην ανώτατη στάθμη του υποβάθρου, και διεγείρονται από μέγιστη εδαφική επιτάχυνση: $A = 0.36g$, όπως στις σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιούνται. Επίσης, με σκοπό να γίνει η μελέτη σε όρους ιδιοσυχνοτήτων αντί ιδιοπεριόδων, ο λόγος των ιδιοπεριόδων αντικαθίσταται με τον αντίστροφο του λόγου ιδιοσυχνοτήτων. Έτσι, ο συντελεστής ε γίνεται:

$$\varepsilon = \frac{0.36g}{g}\frac{2}{1+\left(1-\frac{1}{R_\omega}\right)^2}\left(1+\frac{H}{H}\right) \Rightarrow$$

$$\varepsilon = 0.36\frac{4}{1+\left(1-\frac{1}{R_\omega}\right)^2} \tag{3.58}$$

Γίνεται η παραδοχή ότι η υπερκατασκευή έχει συντελεστή σπουδαιότητας μονάδα και παραμένει ελαστική, κατά συνέπεια η σεισμική δύναμη της εξίσωσης (3.54) γίνεται:

$$F = \varepsilon W \Rightarrow$$

$$M_s a_s = \varepsilon M_s g \Rightarrow$$

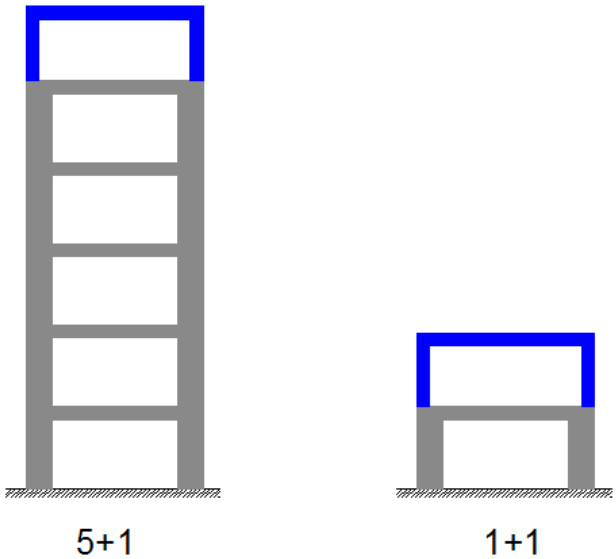
$$a_s = \varepsilon g \Rightarrow$$

$$a_s = 0.36 \frac{4}{1+\left(1-\frac{1}{R_\omega}\right)^2} g \Rightarrow$$

$$\frac{a_s}{0.36g} = z_s = \frac{4}{1+\left(1-\frac{1}{R_\omega}\right)^2} \tag{3.59}$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο αποκτάται μια έκφραση σύμφωνα με τις διατάξεις του ΕΑΚ [2], για την ενίσχυση της εδαφικής διέγερσης, στην περίπτωση που η υπερκατασκευή θεωρηθεί σαν προσάρτημα. Παρατηρείται ότι η έκφραση αυτή είναι ανεξάρτητη του λόγου μαζών και εξαρτάται μόνο από το λόγο ιδιοσυχνοτήτων. Ακολούθως, συγκρίνεται η έκφραση (3.59) με την εδαφική ενίσχυση που προκύπτει από αναλύσεις χρονοϊστορίας μικτών διβάθμιων κατασκευών οι οποίες υποβάλλονται στις δέκα σεισμικές καταγραφές.

Για το σκοπό αυτό, μορφώνονται ελαστικά πολυβάθμια προσομοιώματα τα οποία αποτελούνται α) από υπόβαθρο με 5 βαθμούς ελευθερίας και μονοβάθμια υπερκατασκευή, και β) μονοβάθμιο υπόβαθρο και μονοβάθμια υπερκατασκευή, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.70. Τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά ποικίλουν, ώστε οι λόγοι ιδιοσυχνοτήτων και μαζών, λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη ιδιομορφή του υποβάθρου, να καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο συνδυασμών. Έτσι, οι λόγοι ιδιοσυχνοτήτων λαμβάνουν τις τιμές: $R_\omega = \{0.1:3\}$, και οι λόγοι μαζών: $R_m = \{0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5\}$. Το κάθε ένα από τα προσομοιώματα, κατασκευάζεται με τα ZL στοιχεία στο OS [124], και η απόσβεση σε κάθε στάθμη υλοποιείται, όπως προηγουμένως, με τις σχέσεις (3.8) και (3.10), λαμβάνοντας ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης 5% για κάθε στάθμη του υποβάθρου και 2% για την υπερκατασκευή.

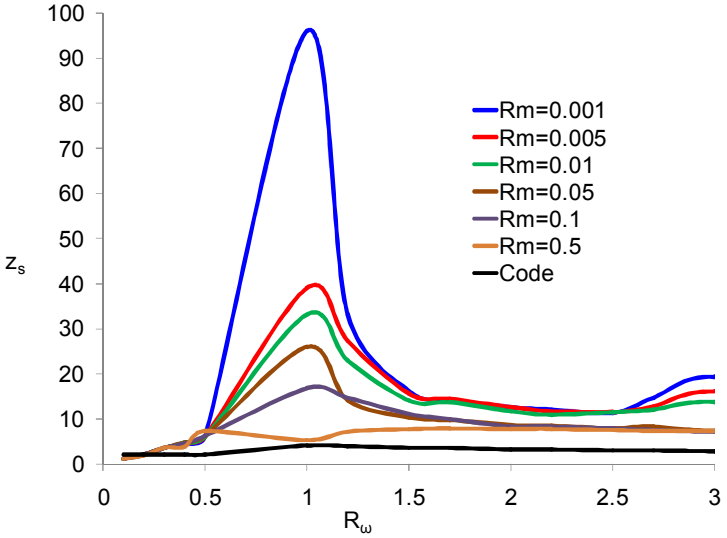


Εικ. 3.70: Διαμορφώσεις μικτών κατασκευών στις οποίες η υπερκατασκευή αναλύεται ως προσάρτημα.

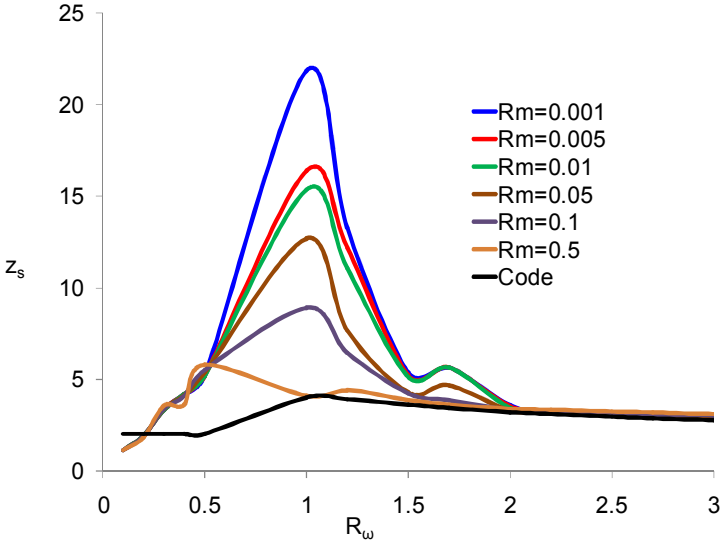
Τα προσομοιώματα, υποβάλλονται σε κάθε μια από τις δέκα σεισμικές διεγέρσεις, και από κάθε ανάλυση λαμβάνεται η χρονοϊστορία των απολύτων επιταχύνσεων στην κορυφή της υπερκατασκευής. Το απόλυτο μέγιστο της χρονοϊστορίας αυτής διαιρείται με το μέγιστο της εδαφικής επιτάχυνσης, ώστε να προκύψει αριθμητικά η μέγιστη ενίσχυση, όπως φαίνεται στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$z_s = \frac{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_s\right|\right)}{\max\left(\left|\ddot{x}_g\right|\right)} \tag{3.60}$$

Για κάθε λόγο μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, καταγράφονται οι ενισχύσεις από τις δέκα καταγραφές και καταγράφεται η μέγιστη, οπότε προκύπτει η περιβάλλουσα των σεισμικών ενισχύσεων στην υπερκατασκευή, θεωρούμενη ως προσάρτημα. Ακολούθως, η περιβάλλουσα των ενισχύσεων, συγκρίνεται με την ενίσχυση που προβλέπει ο ΕΑΚ [2], όπως φαίνεται στην Εικ. 3.71 για την περίπτωση του πολυβάθμιου υποβάθρου, και στην Εικ. 3.72 για την περίπτωση του μονοβάθμιου υποβάθρου.



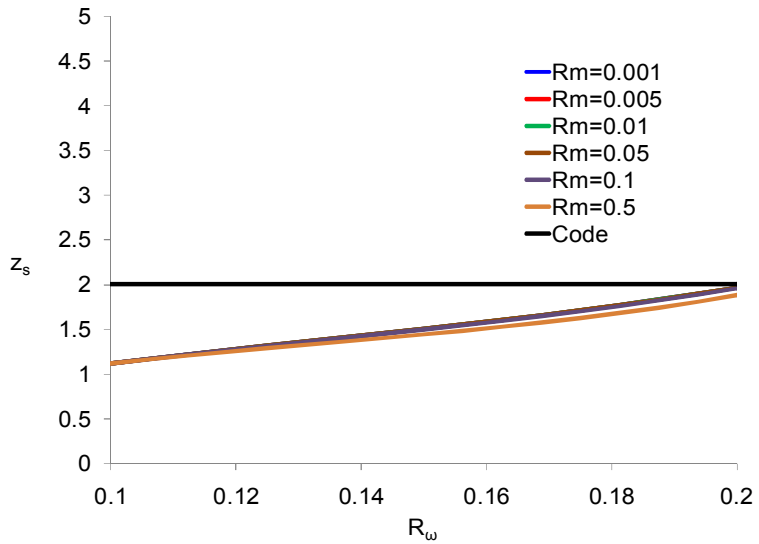
Εικ. 3.71: Σύγκριση ενίσχυσης εδαφικής επιτάχυνσης μεταξύ κανονισμών και περιβάλλουσας σεισμικών διεγέρσεων για διάφορους λόγους μαζών, για την περίπτωση της κατασκευής 5+1



Εικ. 3.72: Σύγκριση ενίσχυσης εδαφικής επιτάχυνσης μεταξύ κανονισμών και περιβάλλουσας σεισμικών διεγέρσεων για διάφορους λόγους μαζών, για την περίπτωση της κατασκευής 1+1

Όσον αφορά την περίπτωση της κατασκευής με πενταβάθμιο υπόβαθρο και μονοβάθμια υπερκατασκευή, η πρόβλεψη της ενίσχυσης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης από τις κανονιστικές σχέσεις είναι ικανοποιητική στους μικρούς λόγους R_ω, μικρότερους από 0,2, για όλες τις τιμές του λόγου μαζών, όπως φαίνεται και στην Εικ. 3.73 η οποία προκύπτει εστιάζοντας στην εν λόγω περιοχή της Εικ. 3.71, ενώ στην περιοχή των μεγάλων λόγων ιδιοσυχνοτήτων, όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος μαζών τόσο καλύτερη είναι η πρόβλεψη του κανονισμού. Όταν ο λόγος ιδιοσυχνοτήτων γίνεται ίσος με τη μονάδα, τότε η ενίσχυση εξαρτάται πιο έντονα από

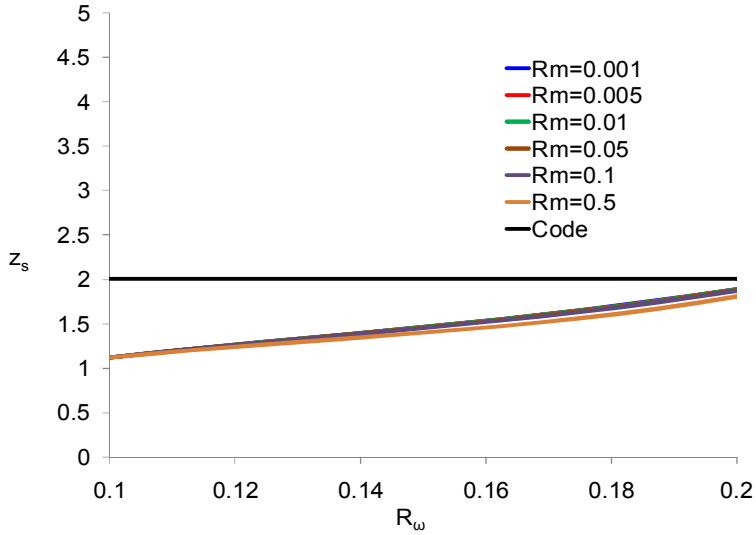
το λόγο μαζών, και μάλιστα στους μικρούς λόγους μαζών υπάρχει μεγαλύτερη διάσταση μεταξύ της κανονιστικής πρόβλεψης και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.



Εικ. 3.73: Σύγκριση ενίσχυσης εδαφικής επιτάχυνσης μεταξύ κανονισμών και περιβάλλουσας σεισμικών διεγέρσεων για διάφορους λόγους μαζών, για την περίπτωση της κατασκευής 5+1 στην περιοχή των μικρών λόγων ιδιοσυχνοτήτων

Στην περίπτωση της διβάθμιας κατασκευής, η εικόνα που προκύπτει από τη σύγκριση των κανονιστικών σχέσεων και των αναλύσεων είναι ανάλογη, αν και οι διαφορές είναι αισθητά μικρότερες. Έτσι, υπάρχει πάλι ικανοποιητική πρόβλεψη για τις περιπτώσεις των μεγάλων και των μικρών λόγων ιδιοσυχνοτήτων, όπως φαίνεται πάλι από την αντίστοιχη εστίαση στην Εικ. 3.74, ενώ στην περίπτωση που $R_\omega = 1$ προκύπτουν και πάλι μεγάλες διαφορές, οι οποίες μειώνονται όσο μεγαλώνει ο λόγος μαζών.

Και στις δύο περιπτώσεις κτιρίων, διβάθμιου και εξαβάθμιου, η ύπαρξη ενός υποβάθρου και μιας υπερκατασκευής σε συντονισμό, και μάλιστα με τη μάζα της υπερκατασκευής να είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του υποβάθρου, συνεπάγεται ιδιομορφές ταλάντωσης οι οποίες δίνουν πολύ έντονες μετακινήσεις στην ελαφριά υπερκατασκευή. Κατά συνέπεια η ενίσχυση της εδαφικής διέγερσης είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προτείνουν οι κανονισμοί.



Εικ. 3.74: Σύγκριση ενίσχυσης εδαφικής επιτάχυνσης μεταξύ κανονισμών και περιβάλλουσας σεισμικών διεγέρσεων για διάφορους λόγους μαζών, για την περίπτωση της κατασκευής 1+1 στην περιοχή των μικρών λόγων ιδιοσυχνοτήτων

Η εδαφική ενίσχυση, εξαρτάται και από το λόγο μαζών των δύο τμημάτων, ειδικά στην περιοχή του συντονισμού. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τις καμπύλες αποσύζευξης, οι οποίες πέρα από το λόγο ιδιοσυχνοτήτων εξαρτώνται και από το λόγο μαζών, όπως έχει αναφερθεί και από τους Chen & Wu [65]. Η αδυναμία των κανονιστικών σχέσεων να προβλέψουν την εδαφική ενίσχυση, οφείλεται κυρίως στο ότι αγνοούν τη σχέση των μαζών υπερκατασκευής και υποβάθρου, και είναι ιδιαίτερα εμφανής στην περιοχή του συντονισμού. Στην περιοχή των δύσκαμπτων υπερκατασκευών, δηλαδή για μεγάλες τιμές R_ω, η πρόβλεψη της ενίσχυσης είναι μέτρια, στην περίπτωση της 5+1 κατασκευής, ή και πολύ καλή, στην περίπτωση της 1+1 κατασκευής. Στην περιοχή όμως των εύκαμπτων υπερκατασκευών, εκεί άλλωστε όπου τοποθετούνται και οι περισσότερες κατασκευές που εμπίπτουν στον ορισμό του προσαρτήματος, οι κανονιστικές σχέσεις είναι υπέρ της ασφαλείας, και προσφέρονται για μια προκαταρκτική εκτίμηση της σεισμικής δράσης στην υπερκατασκευή.

3.21 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης μικτών κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα. Η μελέτη πραγματοποιείται σε διβάθμιους ταλαντωτές, με το σκεπτικό ότι αυτοί μπορούν να αποτελέσουν απεικόνιση οποιασδήποτε πολυβάθμιας μικτής κατασκευής, με τον κάθε βαθμό ελευθερίας να αντιστοιχεί και σε ένα τμήμα της πολυβάθμιας κατασκευής. Αρχικά συγκρίνονται αναλυτικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία με αριθμητικές αναλύσεις, και με δεδομένη τη συμφωνία των δύο προσεγγίσεων ακολουθούν επεκτάσεις της διαδικασίας αποσύζευξης βασισμένες σε αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης.

Σε πρώτο στάδιο η αποσύζευξη μελετάται ελαστικά, υπό αρμονική και σεισμικές διεγέρσεις και κατασκευάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες αποσύζευξης, στόχος των οποίων είναι να δίνουν μια εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Ακολούθως, εισάγεται μια τροποποίηση στη διαδικασία αποσύζευξης των ελαστικών διβάθμιων φορέων, και προκύπτουν και πάλι οι καμπύλες αποσύζευξης, αρμονικές και σεισμικές. Η αριθμητική προσέγγιση, σε αντίθεση με την αναλυτική, επιτρέπει και τη θεώρηση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Η μη γραμμικότητα εντοπίζεται στο υπόβαθρο, και εκτελείται η διαδικασία αποσύζευξης κανονικά και τροποποιημένα, και παράγονται οι ελαστοπλαστικές καμπύλες αποσύζευξης για διάφορα επίπεδα αντοχής υποβάθρου.

Οι καμπύλες αποσύζευξης που προκύπτουν για το διβάθμιο ισοδύναμο ταλαντωτή, δοκιμάζονται σε πραγματικές πολυβάθμιες κατασκευές, με σκοπό να διαπιστωθεί αν όντως μπορούν να προβλέψουν συντηρητικά το σφάλμα της αποσύζευξης. Το αποτέλεσμα είναι ότι σε γενικές γραμμές υπάρχει δυνατότητα οι καμπύλες να αποτελέσουν μια προκαταρκτική εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης, ειδικά σε χαμηλούς λόγους μάζας. Τέλος, γίνεται μελέτη των κανονιστικών διατάξεων για τα προσαρτήματα, οι οποίες συμβαδίζουν με τη λογική μιας αποσυζευγμένης διαδικασίας ανάλυσης, και εκτιμάται το πεδίο που μπορούν οι διατάξεις αυτές να εφαρμοστούν.

4

Ισοδύναμοι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης

4.1 Γενικά

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, η αποσύζευξη στην ανάλυση των μικτών καθ' ύψος κατασκευών ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα στην πρόβλεψη της απόκρισης του κάθε τμήματος της κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να εκτελείται συζευγμένη ανάλυση, οπότε τίθεται το ζήτημα του σχηματισμού του μικτού μητρώου απόσβεσης. Αντ' αυτού, συχνά στην πράξη η ανάλυση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη έναν ενιαίο συντελεστή ιξώδους απόσβεσης, ο οποίος κατά κανόνα είναι ο συντηρητικότερος των δύο που υπάρχουν στην κατασκευή, στην προκειμένη περίπτωση 2%. Το αποτέλεσμα είναι ότι προκύπτουν αποτελέσματα εντατικών μεγεθών που δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα και, αναλόγως με τη διαμόρφωση της κατασκευής, μπορεί να είναι πολύ συντηρητικά.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, στο κεφάλαιο αυτό αναζητώνται ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης. Οι συντελεστές αυτοί είναι ιδιομορφικοί, αποδίδεται δηλαδή σε κάθε μια από τις ιδιομορφές της μικτής κατασκευής συγκεκριμένος συντελεστής απόσβεσης. Οι συντελεστές αυτοί, επιχειρείται να διατυπωθούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια συνηθισμένη διαδικασία ανάλυσης και σχεδιασμού. Έτσι, στην περίπτωση που επιλέγεται η συζευγμένη ανάλυση, αντί αυτή να γίνει με την πραγματική κατανομή της απόσβεσης ή με συντηρητική θεώρηση ενός ενιαίου συντελεστή απόσβεσης, γίνεται με μια ισοδύναμη θεώρηση που προκύπτει από τους ιδιομορφικούς αυτούς συντελεστές. Προφανώς, η χρήση αυτών των συντελεστών αντί της πραγματικής κατανομής, συνεπάγεται σφάλμα στην πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών, όμως το σφάλμα αυτό είναι αρκετά μικρό.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να υπολογιστούν οι ισοδύναμοι αυτοί συντελεστές, και να διερευνηθεί το σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση τους στην ανάλυση των μικτών κατασκευών. Κατά την ανάλυση οι κατασκευές θεωρούνται

ελαστικές, παραδοχή που συνάδει με τη μελετητική πρακτική για την πλειονότητα των κατασκευών του τύπου αυτού. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω των μιγαδικών ιδιομορφών της κατασκευής. Ακολούθως, εφαρμόζονται σε μια συνηθισμένη ιδιομορφική ανάλυση με πραγματικούς όρους, και εξετάζεται το σφάλμα που προκύπτει από την εφαρμογή τους. Μέσω τους σφάλματος αυτού διαπιστώνεται αν είναι δυνατή η χρήση τους στην ανάλυση πραγματικών κατασκευών.

4.2 Μητρώο απόσβεσης μικτής κατασκευής

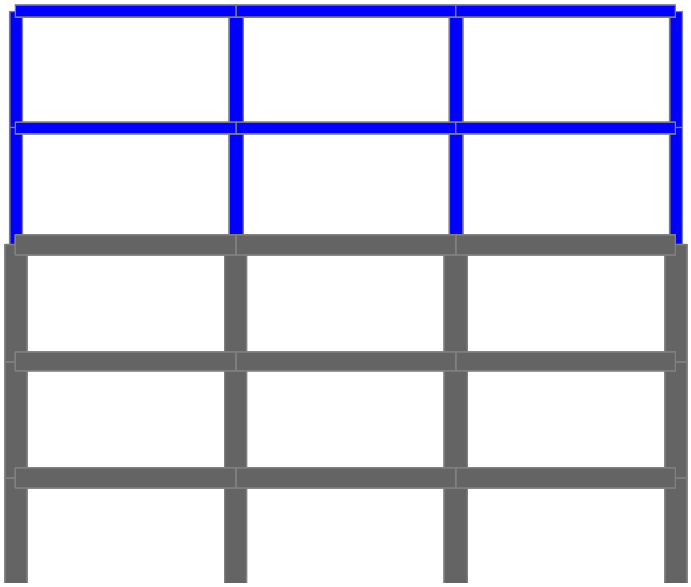
Σε μια κατασκευή n βαθμών ελευθερίας η οποία αποτελείται από ένα μόνο υλικό, η κατασκευή του μητρώου απόσβεσης κατά Rayleigh, ή αλλιώς αναλογικού μητρώου απόσβεσης, είναι αρκετά απλή. Με βάση πειραματικές δοκιμές προκύπτουν τιμές για το συντελεστή απόσβεσης ζ του κάθε υλικού, οι οποίες αποδίδονται σαν αποσβέσεις των ιδιομορφών της κατασκευής. Κάνοντας μια ιδιομορφική ανάλυση προκύπτουν οι n ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, και επιλέγονται οι δύο χαρακτηριστικές ω_i και ω_j, συνήθως η πρώτη και η δεύτερη ή η πρώτη και αυτή στην οποία επιτυγχάνεται ποσοστό συμμετοχής μάζας 90%, στις οποίες αποδίδεται συντελεστής απόσβεσης ζ. Ακολούθως, υπολογίζονται οι συντελεστές a_0 και a_1 οι οποίοι πολλαπλασιάζουν τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.1). Ακολούθως το μητρώο απόσβεσης προκύπτει από τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, σύμφωνα με την εξίσωση (4.2).

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \tag{4.1}$$

$$\mathbf{C} = a_0\mathbf{M} + a_1\mathbf{K} \tag{4.2}$$

Στην ειδική περίπτωση όμως της μικτής κατασκευής του τύπου της Εικ. 4.1, στην οποία με γκρι απεικονίζεται το τμήμα από σκυρόδεμα και με μπλε το τμήμα από χάλυβα, ο παραπάνω υπολογισμός δεν είναι εφικτός, διότι δε μπορεί να αποδοθεί σε κάθε ιδιομορφή μια τιμή συντελεστή απόσβεσης. Στην περίπτωση αυτή, η κατασκευή χωρίζεται σε δύο τμήματα, όπως έχει περιγραφεί στο Κεφ. 3, στο υπόβαθρο p που αποτελείται εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα και στην υπερκατασκευή s που

αποτελείται μόνο από χάλυβα. Η συνεισφορά του κάθε τμήματος της κατασκευής στα συνολικά μητρώα δυσκαμψίας, μάζας και απόσβεσης, διαστάσεων όλα $n \times n$, αποτυπώνεται στην εξίσωση (4.3), όπου με $\mathbf{X}$ συμβολίζεται η συμμετοχή του κοινού βαθμού ελευθερίας.



Εικ. 4.1: Μικτή πολυβάθμια κατασκευή

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{conc} & & \\ & \mathbf{X} & \\ & & \mathbf{K}_{steel} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{conc} & & \\ & \mathbf{X} & \\ & & \mathbf{M}_{steel} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{conc} & & \\ & \mathbf{X} & \\ & & \mathbf{C}_{steel} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Ακολούθως σχηματίζονται τα μητρώα $\mathbf{M}^p$, $\mathbf{M}^s$ και $\mathbf{K}^p$, $\mathbf{K}^s$, διαστάσεων και αυτά $n \times n$, τα οποία ορίζονται όπως στις εξισώσεις (4.4) και (4.5). Με $\mathbf{X}_{conc}$ και με $\mathbf{X}_{steel}$ συμβολίζεται η συμβολή των κοινών βαθμών ελευθερίας στα εν λόγω μητρώα.

$$\mathbf{M}^p = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{conc} & & \\ & \mathbf{X}_{conc} & \\ & & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}^s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{X}_{steel} & \\ & & \mathbf{M}_{steel} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

$$\mathbf{K}^p = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{conc} & & \\ & \mathbf{X}_{conc} & \\ & & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{X}_{steel} & \\ & & \mathbf{K}_{steel} \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

Τα μητρώα αυτά προστιθέμενα σχηματίζουν τα συνολικά μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.6).

$$\mathbf{K}^p + \mathbf{K}^s = \mathbf{K}, \quad \mathbf{M}^p + \mathbf{M}^s = \mathbf{M} \tag{4.6}$$

Προκειμένου να κατασκευαστεί το μικτό μητρώο απόσβεσης, πρέπει πρώτα να εκτελεστεί μια απλή ιδιομορφική ανάλυση της πλήρους κατασκευής, ώστε να προκύψουν οι n ιδιομορφές της. Εκλέγονται δύο χαρακτηριστικές ιδιομορφές της κατασκευής ω_k και ω_m, και ακολούθως υπολογίζονται για το κάθε ξεχωριστό τμήμα οι τιμές των συντελεστών Rayleigh όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.7), χρησιμοποιώντας τις ιδιοσυχνότητες ω_k και ω_m που αντιστοιχούν στη συνολική κατασκευή, και το συντελεστή απόσβεσης ζ_i που αντιστοιχεί στο υλικό του συγκεκριμένου τμήματος. Εν προκειμένω, χρησιμοποιείται για το σκυρόδεμα $\zeta_p = 5\%$ και για το χάλυβα $\zeta_s = 2\%$.

$$\begin{Bmatrix} a_{0,i} \\ a_{1,i} \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta_i}{\omega_k + \omega_m} \begin{Bmatrix} \omega_k \omega_m \\ 1 \end{Bmatrix}, i = s, p \tag{4.7}$$

Όπως και τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, έτσι και το τελικό μητρώο απόσβεσης μπορεί να χωριστεί σε δύο ξεχωριστά μητρώα διαστάσεων $n \times n$ όπως στην εξίσωση (4.8) στα οποία πάλι με $\mathbf{X}_{conc}$ και με $\mathbf{X}_{steel}$ συμβολίζεται η συμβολή του κοινού βαθμού ελευθερίας στο συνολικό μητρώο απόσβεσης.

$$\mathbf{C}^p = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{conc} & & \\ & \mathbf{X}_{conc} & \\ & & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{X}_{steel} & \\ & & \mathbf{C}_{steel} \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Το κάθε ένα από αυτά τα μητρώα απόσβεσης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των συντελεστών που προκύπτουν από την εξίσωση (4.7) με τα αντίστοιχα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας:

$$\mathbf{C}^i = a_{0,i}\mathbf{M}^i + a_{1,i}\mathbf{K}^i, i = s, p \tag{4.9}$$

Πάλι, το άθροισμα των δύο μητρώων δίνει το τελικό μητρώο απόσβεσης της μικτής κατασκευής, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.10).

$$\mathbf{C}^p + \mathbf{C}^s = \mathbf{C} \tag{4.10}$$

Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται το μητρώο απόσβεσης μιας μικτής κατασκευής. Το επιπλέον κόστος σε σχέση με τη διαδικασία μορφοποίησης του μητρώου απόσβεσης

μιας κανονικής κατασκευής είναι πολύ μικρό, αφού το βασικό κομμάτι της διαδικασίας που είναι ο υπολογισμός των ιδιομορφών γίνεται και στις δύο περιπτώσεις. Από εκεί και πέρα, η όλη διαδικασία είναι θέμα διαφορετικού χειρισμού πινάκων, το οποίο γίνεται εύκολα.

4.3 Κλασσική ιδιομορφική ανάλυση

Η συνηθισμένη προσέγγιση στην ανάλυση μιας πολυβάθμιας κατασκευής είναι η εύρεση των ιδιομορφών της και η ανάλυση της κάθε μιας ξεχωριστά ως μονοβάθμιου ταλαντωτή. Έτσι, μια πολυβάθμια κατασκευή περιγράφεται από την εξίσωση κίνησης (4.11), όπου με $\mathbf{M}$ συμβολίζεται το μητρώο μάζας, με $\mathbf{C}$ το μητρώο απόσβεσης, με $\mathbf{K}$ το μητρώο δυσκαμψίας, όλα διαστάσεων $n \times n$. Το διάνυσμα $\{y\}$ δίνει τις σχετικές ως προς το έδαφος μετατοπίσεις, και είναι διαστάσεων $n \times 1$, το διάνυσμα $\mathbf{r}$ είναι μοναδιαίο διαστάσεων $n \times 1$ και αυτό, και $\ddot{x}_g$ είναι η εδαφική κίνηση. Μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση του συστήματος αυτού, προϋποθέτει την επίλυση της εξίσωσης (4.12) ως προς τις ιδιοσυχνότητες ω_i, $(i = 1,2,...n)$, και ακολούθως της εξίσωσης (4.13) προκειμένου να βρεθούν τα ιδιοδιανύσματα.

$$\mathbf{M}\{\ddot{y}\} + \mathbf{C}\{\dot{y}\} + \mathbf{K}\{y\} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_g \tag{4.11}$$

$$\left|\mathbf{K} - \mathbf{M}\omega_i^2\right| = 0, i = 1,2,...n \tag{4.12}$$

$$\mathbf{K}\Phi_i = \omega_i^2\mathbf{M}\Phi_i \tag{4.13}$$

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν από τις (4.12) και (4.13) είναι τέτοιες, ώστε τα κανονικοποιημένα μητρώα της εξίσωσης (4.14) να είναι διαγώνια.

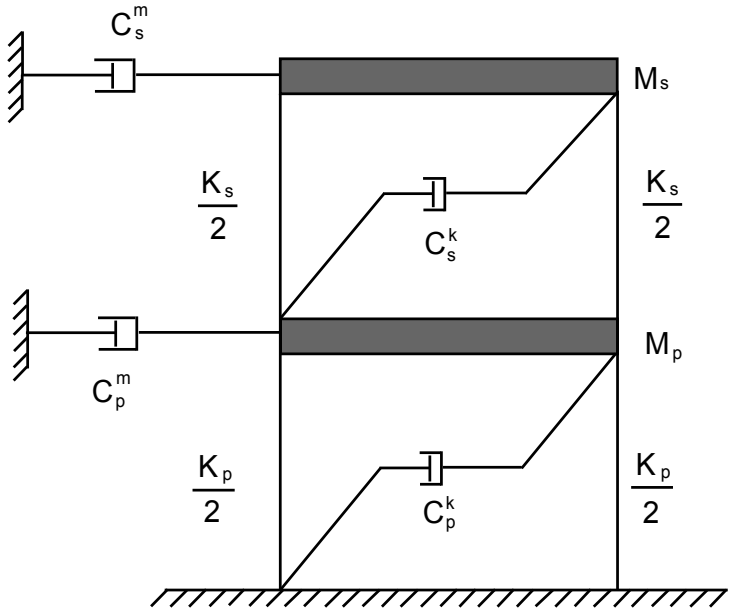
$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{K}\mathbf{\Phi} \quad \& \quad \bar{\mathbf{M}} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{M}\mathbf{\Phi} \tag{4.14}$$

Όσον αφορά το μητρώο απόσβεσης, αν αυτό είναι αναλογικό και προκύπτει όπως στις εξισώσεις (4.1) και (4.2), τότε και αυτό θα γίνει διαγώνιο όταν κανονικοποιηθεί με αντίστοιχο τρόπο, όπως δηλαδή στην εξίσωση (4.15). Αν όμως η κατασκευή είναι μικτή τότε το μητρώο απόσβεσης προκύπτει από τις εξισώσεις (4.3) ως (4.10), και η

αδιαστατοποίηση της (4.15) δεν το κάνει διαγώνιο, με αποτέλεσμα οι ιδιομορφικές εξισώσεις να μην είναι αποζευγμένες.

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi} \tag{4.15}$$

Για παράδειγμα, εξετάζεται μια διβάθμια κατασκευή η οποία σχηματικά απεικονίζεται όπως φαίνεται στην Εικ. 4.2. Εν προκειμένω υποτίθεται ότι η δυσκαμψία των σταθμών p και s είναι 20000kN / m, και η μάζα της κάθε στάθμης είναι 20MGr, οπότε τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας δίνονται από τις εξισώσεις (4.16) και (4.17).



Εικ. 4.2: Σχηματική αναπαράσταση μικτής διβάθμιας κατασκευής

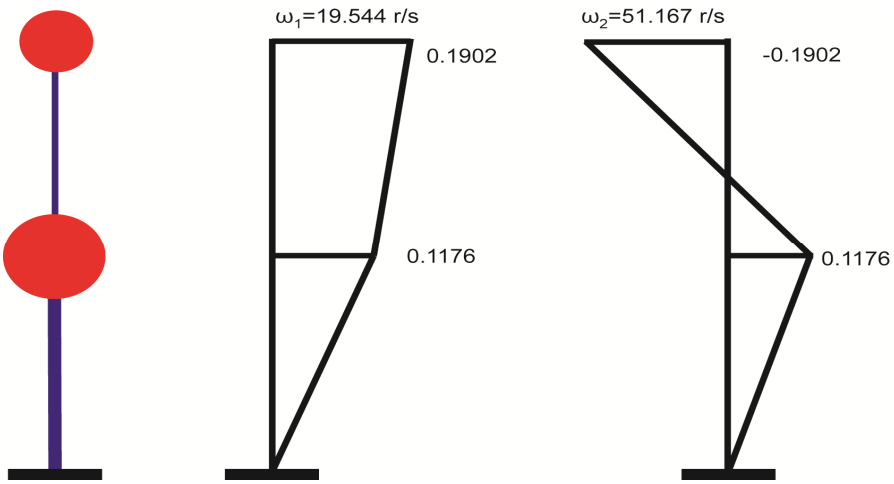
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_p + K_s & -K_s \\ -K_s & K_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40000 & -20000 \\ -20000 & 20000 \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

Μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση στην κατασκευή αυτή, όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (4.12) και (4.13), δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα σε όρους ιδιοσυχνοτήτων και ιδιοδιανυσμάτων, τα οποία απεικονίζονται και στην Εικ. 4.3.

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 19.544 \\ 51.1667 \end{Bmatrix} \tag{4.18}$$

$$\mathbf{\Phi} = \left[\{\Phi_1\} \quad \{\Phi_2\}\right] = \begin{bmatrix} 0.1176 & -0.1902 \\ 0.1902 & 0.1176 \end{bmatrix} \tag{4.19}$$



Εικ. 4.3: Ιδιοσυχνότητες και ιδιοδιανύσματα διβάθμιας κατασκευής

Τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας όντως διαγωνιοποιούνται όταν κανονικοποιηθούν με το μητρώο των ιδιοδιανυσμάτων:

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{K}\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 382 & 0 \\ 0 & 2618 \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{M}\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

Αν η κατασκευή αποτελείται από ένα μόνο υλικό, για παράδειγμα σκυρόδεμα με $\zeta = 5\%$, τότε από την εξίσωση (4.1) οι συντελεστές a_0 και a_1 παίρνουν τις τιμές της (4.22) και το μητρώο απόσβεσης από την εξίσωση (4.2) θα διαμορφωθεί όπως στην (4.23).

$$a_0 = 1.4142, a_1 = 0.0014 \tag{4.22}$$

$$\mathbf{C} = a_0\mathbf{M} + a_1\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 84.8528 & -28.2843 \\ -28.2843 & 56.5685 \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

Το μητρώο αυτό, όταν κανονικοποιηθεί με το μητρώο των ιδιοδιανυσμάτων γίνεται διαγώνιο, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{C}\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1.9544 & 0 \\ 0 & 5.1167 \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

Επιστρέφοντας στη γενική περίπτωση του n-βάθμιου συστήματος, και θεωρώντας ότι η συνολική απόκριση της κατασκευής προκύπτει από τη χρονοϊστορία $q_i(t), i = 1...n$ της απόκρισης της κάθε ιδιομορφής, η συνολική απόκριση μπορεί πλέον να γραφεί όπως στην εξίσωση (4.25) κατασκευάζοντας τον πίνακα **q** από τα επιμέρους διανύσματα – γραμμές των ιδιομορφικών αποκρίσεων.

$$\{y\} = \mathbf{\Phi q} \tag{4.25}$$

Τώρα, η εξίσωση (4.11) μπορεί να γραφεί ως:

$$\mathbf{M\Phi\ddot{q}} + \mathbf{C\Phi\dot{q}} + \mathbf{K\Phi q} = -\mathbf{Mr}\ddot{x}_g \Rightarrow$$

$$\mathbf{\Phi}^T\mathbf{M\Phi\ddot{q}} + \mathbf{\Phi}^T\mathbf{C\Phi\dot{q}} + \mathbf{\Phi}^T\mathbf{K\Phi q} = -\mathbf{\Phi}^T\mathbf{Mr}\ddot{x}_g \Rightarrow$$

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T\mathbf{Mr}\ddot{x}_g \tag{4.26}$$

Πλέον, αφού όλοι οι πίνακες είναι διαγώνιοι, μπορεί η εξίσωση (4.26) να αποζευχθεί σε n ξεχωριστές εξισώσεις, μία για την κάθε ιδιομορφή:

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\Gamma_i\ddot{x}_g, i = 1,2...n \tag{4.27}$$

όπου ω_i η ιδιοσυχνότητα της υπό μελέτη ιδιομορφής, Γ_i ο συντελεστής συμμετοχής της, ο οποίος δίνεται από την (4.28), και ζ_i ο συντελεστής απόσβεσης που αποδίδεται στην ιδιομορφή και προκύπτει την εξίσωση (4.29).

$$\Gamma_i = \frac{\Phi_i^T\mathbf{Mr}}{\Phi_i^T\mathbf{M}\Phi_i}, i = 1,2...n \tag{4.28}$$

$$\zeta_i = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_i} + \frac{a_1}{2}\omega_i, i = 1,2...n \tag{4.29}$$

Ουσιαστικά δηλαδή, από δύο βασικές ιδιομορφές της κατασκευής, συνήθως την πρώτη και αυτήν στην οποία επιτυγχάνεται συμμετοχή μεγαλύτερη από 90% της μάζας, στις οποίες αποδίδεται απόσβεση αυτή του υλικού, προκύπτουν οι συντελεστές a_0 και a_1. Από αυτούς κατασκευάζεται το μητρώο απόσβεσης, και τέλος υπολογίζονται τα ποσοστά απόσβεσης των υπολοίπων ιδιομορφών. Αυτά τα

ποσοστά χρησιμοποιούνται στην αποσυζευγμένη ιδιομορφική εξίσωση (4.27) προκειμένου να προκύψει η απόκριση της ιδιομορφής.

Αντίθετα, στην περίπτωση που η κατασκευή αποτελείται από δύο υλικά, η στάθμη p από σκυρόδεμα με $\zeta_p = 5\%$ και η στάθμη s με $\zeta_s = 2\%$, τότε από τις εξισώσεις (4.3) ως (4.10) υπολογίζονται οι συντελεστές a_0 και a_1 για κάθε υλικό, και το μικτό μητρώο απόσβεσης, τα οποία παίρνουν τις τιμές που φαίνονται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$a_{0,p} = 1.4142, a_{1,p} = 0.0014 \tag{4.30}$$

$$a_{0,s} = 0.5657, a_{1,s} = 0.00056 \tag{4.31}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 67.8823 & -11.3137 \\ -11.3137 & 22.6274 \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

Πλέον το μητρώο απόσβεσης δε διαγωνιοποιείται αν κανονικοποιηθεί με τις ιδιομορφές που προκύπτουν από την κλασσική ιδιομορφική ανάλυση:

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1.2508 & 0.7589 \\ 0.7589 & 3.2747 \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν είναι εφικτή η αποσύζευξη της μητρωικής εξίσωσης (4.26) εφ' όσον το κανονικοποιημένο μητρώο απόσβεσης δεν είναι διαγώνιο. Κατά συνέπεια, μεταβαίνοντας από την εξίσωση (4.26) στην εξίσωση (4.27) θα πρέπει να παραλείπονται οι μη διαγώνιοι όροι, κάτι που οδηγεί σε σφάλμα στην ανάλυση.

4.4 Μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση

Οι κατασκευές με μικτό μητρώο απόσβεσης, δεδομένου ότι η κλασσική ιδιομορφική ανάλυση δεν οδηγεί σε απόζευξη των ιδιομορφών, αναλύονται σε μιγαδικές ιδιομορφές. Προκειμένου να γίνει αυτό, η εξίσωση κίνησης (4.11) μετατρέπεται σε διαμόρφωση χώρου – κατάστασης, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{A}\{\dot{u}\} + \mathbf{B}\{u\} = \{F\}\ddot{x}_g \tag{4.34}$$

όπου:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{M}\\ \mathbf{M} & \mathbf{C}\end{bmatrix},\quad \mathbf{B}=\begin{bmatrix}-\mathbf{M} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{K}\end{bmatrix},\quad F=\begin{Bmatrix}\mathbf{0}\\ -\mathbf{Mr}\end{Bmatrix},\quad u=\begin{Bmatrix}\dot{y}\\ y\end{Bmatrix} \tag{4.35}$$

Η ιδιομορφική εξίσωση πλέον παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{B}\Phi_i=-s_i\mathbf{A}\Phi_i,\ i=1,2,\ldots 2n \tag{4.36}$$

όπου με s_i συμβολίζονται οι ιδιοτιμές και με Φ_i τα ιδιοδιανύσματα, τα οποία είναι πλέον μιγαδικά, και το φανταστικό τους μέρος υποδηλώνει διαφορά φάσης στην ταλάντωση. Το πλήθος τους είναι $2n$, αφού και οι πίνακες $\mathbf{A}$ και $\mathbf{B}$ είναι διαστάσεων $2n\times 2n$, οι μισές όμως είναι συζυγείς των υπολοίπων. Επομένως, ουσιαστικά πάλι το σύστημα κινείται με βάση n ιδιομορφές. Ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης της κάθε ιδιομορφής δίνεται από την εξίσωση (4.37) και είναι σε πραγματική μορφή. Προφανώς οι συζυγείς ιδιοτιμές δίνουν ίδιους συντελεστές απόσβεσης.

$$\zeta_i=\frac{-\mathrm{Re}(s_i)}{|s_i|},\ i=1,2,\ldots 2n \tag{4.37}$$

Εν προκειμένω, στο παράδειγμα που αναλύθηκε προηγουμένως στην περίπτωση της μικτής απόσβεσης με το μητρώο απόσβεσης της εξίσωσης (4.32), οι πίνακες της εξίσωσης (4.37) γίνονται:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 20 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 20\\ 20 & 0 & 67.8823 & -11.3137\\ 0 & 20 & -11.3137 & 22.6274\end{bmatrix} \tag{4.38}$$

$$\mathbf{B}=\begin{bmatrix}-20 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -20 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 40000 & -20000\\ 0 & 0 & -20000 & 20000\end{bmatrix} \tag{4.39}$$

$$F=\begin{Bmatrix}0\\ 0\\ -20\\ -20\end{Bmatrix} \tag{4.40}$$

Από την εξίσωση (4.36) προκύπτουν οι ακόλουθες ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα, οι οποίες ανά δύο είναι συζυγείς. Έτσι, ναι μεν τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής

ανάλυσης είναι 2n το πλήθος, ουσιαστικά όμως οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι n, όσοι δηλαδή και οι βαθμοί ελευθερίας της κατασκευής:

$$s = \begin{Bmatrix} 0.0016 + 0.0511j \\ 0.0016 - 0.0511j \\ 0.0006 + 0.0195j \\ 0.0006 - 0.0195j \end{Bmatrix}, j = \sqrt{-1} \tag{4.41}$$

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} -0.6156 + 0.0066j & -0.6156 - 0.0066j & 0.9894 + 0.0106j & 0.9894 - 0.0106j \\ -0.9959 - 0.0041j & -0.9959 + 0.0041j & -0.6111 + 0.0172j & -0.6111 - 0.0172j \\ 0.0013 + 0.0315j & 0.0013 - 0.0315j & -0.0004 - 0.0193j & -0.0004 + 0.0192j \\ 0.0014 + 0.0509j & 0.0014 - 0.0509j & 0.0007 + 0.0119j & 0.0007 - 0.0119j \end{bmatrix}, j = \sqrt{-1} \tag{4.42}$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ιδιομορφικές αποσβέσεις είναι ίδιες:

$$\zeta_1 = \zeta_2 = 0.032 \tag{4.43}$$

αφού και οι δύο βαθμοί ελευθερίας έχουν τα ίδια δυναμικά χαρακτηριστικά.

Έτσι, κάνοντας πάλι τη θεώρηση:

$$\mathbf{u} = \mathbf{\Phi q} \tag{4.44}$$

όπου στον πίνακα **q** είναι συγκεντρωμένες όλες οι χρονοϊστορίες των 2n ιδιομορφών, η εξίσωση (4.34) γίνεται:

$$\mathbf{A\Phi\dot{q}} + \mathbf{B\Phi q} = \{F\}\ddot{x}_g \Rightarrow$$

$$\mathbf{\Phi}^T\mathbf{A\Phi\dot{q}} + \mathbf{\Phi}^T\mathbf{B\Phi q} = \mathbf{\Phi}^T\{F\}\ddot{x}_g \tag{4.45}$$

Τα αδιαστατοποιημένα μητρώα $\bar{\mathbf{A}}$ και $\bar{\mathbf{B}}$, όπως φαίνονται στις εξισώσεις (4.46) και (4.47), πάλι έχουν στοιχεία τα οποία ανά δύο είναι συζυγή. Πλέον, δεν είναι διαγώνια, εξακολουθούν όμως να οδηγούν σε απόζευξη των ιδιομορφικών εξισώσεων, οι οποίες παίρνουν τη μορφή που φαίνεται στην εξίσωση (4.48), όπου με Γ_i συμβολίζεται ο συντελεστής συμμετοχής της i ιδιομορφής, ο οποίος υπολογίζεται από την (4.49).

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{A} \mathbf{\Phi} \Rightarrow$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & -0.1793+2.7937j & 0 & 0 \\ -0.1793-2.7937j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0676+1.0546j \\ 0 & 0 & -0.0676-1.0546j & 0 \end{bmatrix} \cdots, \; j = \sqrt{-1} \tag{4.46}$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{B} \mathbf{\Phi} \Rightarrow$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 & -54.7615-1.753j & 0 & 0 \\ -54.7615+1.753j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -54.0357-1.7299j \\ 0 & 0 & -54.0357+1.7299j & 0 \end{bmatrix} \cdots, \; j = \sqrt{-1} \tag{4.47}$$

$$\dot{q}_i + s_i q_i = \Gamma_i \ddot{x}_g, \; i = 1, 2, \ldots 2n \tag{4.48}$$

$$\Gamma_i = \frac{\Phi_i^T \{F\}}{\Phi_i^T \mathbf{A} \Phi_i}, \; i = 1, 2 \ldots 2n \tag{4.49}$$

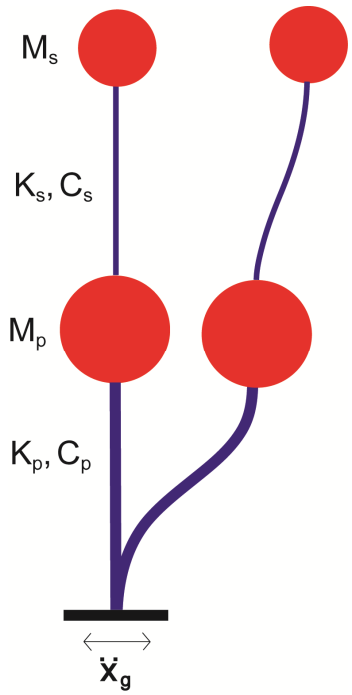
Έτσι, το σύστημα των ιδιομορφικών εξισώσεων της μικτής κατασκευής είναι πλέον αποζευγμένο και μπορεί να επιλυθεί η κάθε ιδιομορφή ξεχωριστά. Σε περίπτωση που γίνει φασματική ανάλυση, ο κανόνας συνδυασμού των μεγίστων, ο οποίος συνδυάζει τα εν γένει ασύγχρονα μέγιστα των ιδιομορφών μεταξύ τους, πρέπει να τροποποιηθεί, αφού πλέον υπάρχει και διαφορά φάσης στην κίνηση των βαθμών ελευθερίας μέσα στην ίδια ιδιομορφή.

Η παραπάνω διαδικασία, ενώ είναι αρκετά απλή όταν πρόκειται για ένα απλό διβάθμιο, όπως στην προκειμένη περίπτωση, είναι αρκετά δύσκολο, έως αδύνατον, να εφαρμοστεί σε μελέτες πολυβάθμιων κατασκευών που πραγματοποιούνται με εμπορικό λογισμικό. Για το λόγο αυτό, συνήθως υιοθετείται σε τέτοιες περιπτώσεις ενιαία συντηρητική τιμή για το συντελεστή απόσβεσης ίση με 2%. Σε αρκετές

περιπτώσεις, όπως άλλωστε και στη συγκεκριμένη περίπτωση του διβάθμιου που εξετάστηκε εδώ, η τιμή αυτή απέχει αρκετά από την τελική ιδιομορφική απόσβεση που προκύπτει από την ορθή μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής.

4.5 Ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης μικτής κατασκευής στην βιβλιογραφία

Η εργασία των Huang et al. [109] κινείται στην κατεύθυνση της εξαγωγής ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης για μικτές κατασκευές. Μάλιστα, προχωρούν και αυτοί σε αντικατάσταση των πολυβάθμιων μικτών κατασκευών με ισοδύναμες διβάθμιες, για τις οποίες υπολογίζουν ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης με δύο τρόπους, αναλυτικά και αριθμητικά. Κατά την αναλυτική μέθοδο που προτείνουν, αγνοούν τους μη διαγώνιους όρους και παράγουν σχέσεις υπολογισμού των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης. Η σχέση που προτείνουν, για τη διβάθμια κατασκευή της Εικ. 4.4, με ιδιοσυχνότητες σε κάθε στάθμη που δίνονται από την εξίσωση (4.50), και με απόσβεση $\zeta_p = 5\%$ & $\zeta_s = 2\%$ παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (4.51), όπου με M_i συμβολίζεται η μάζα της εν λόγω ιδιομορφής.



Εικ. 4.4: Ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_i}{M_i}}, i = s,p \tag{4.50}$$

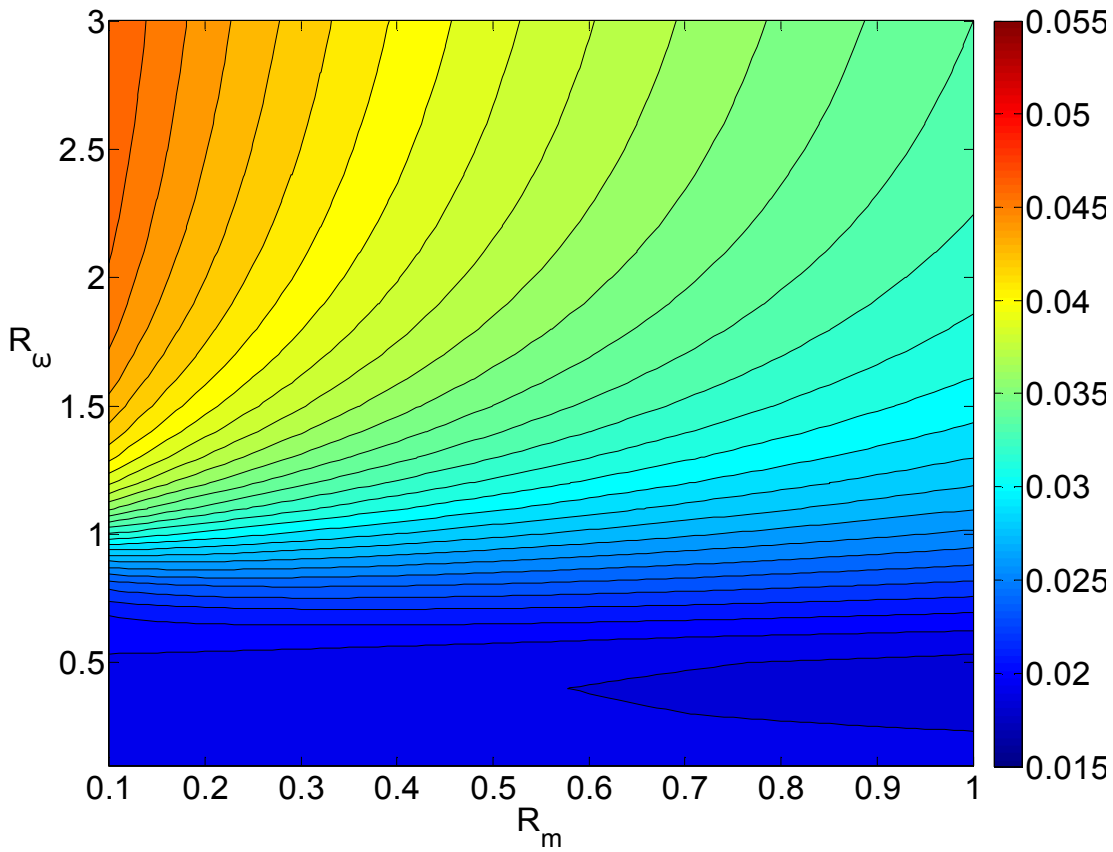
$$\zeta_i = \frac{1}{\frac{\omega_i}{\omega_s}\frac{M_i}{M_s}}\left[\left(1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_s}\right)^2\right)^2 \frac{\omega_p}{\omega_s}\frac{M_p}{M_s}\zeta_p \ldots \right.$$
$$\left. + \left(\left(1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_s}\right)^2\right)^2 - 2\left(1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_s}\right)^2\right)+1\right)\zeta_s\right], i = 1,2 \tag{4.51}$$

Η μελέτη των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης με βάση την εργασία των Huang et al. [109] για το διβάθμιο της Εικ. 4.4 εκτελείται για μια ποικιλία δυναμικών χαρακτηριστικών. Αρχικά, γίνεται η παραδοχή ότι το υπόβαθρο έχει μάζα ίση με 20Mgr και ιδιοπερίοδο ίση με 0.2s. Ακολούθως, ορίζονται οι λόγοι μαζών και ιδιοσυχνοτήτων ως το πηλίκο του αντίστοιχου χαρακτηριστικού της υπερκατασκευής προς αυτό του υποβάθρου όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.52), κατ' αντιστοιχία δηλαδή με τον ορισμό των Chen και Wu [65]. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά όλων των διβάθμιων ταλαντωτών του επιπέδου (R_ω, R_m).

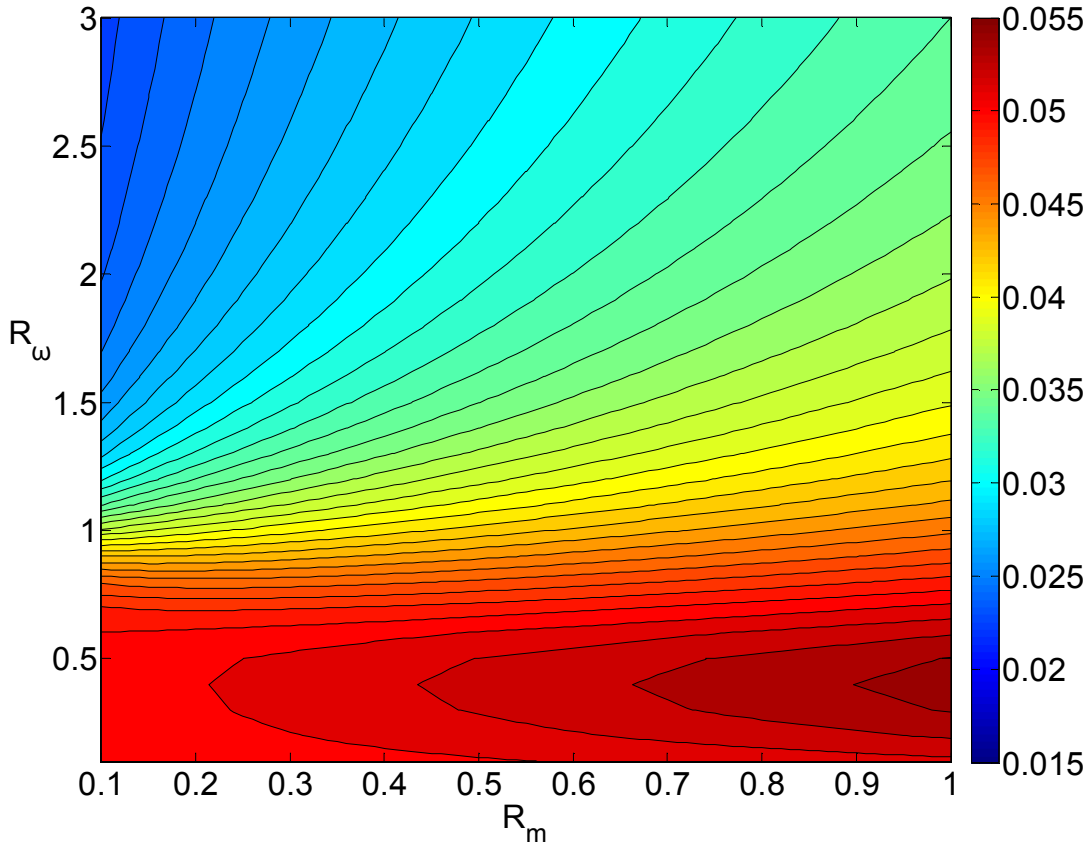
$$R_m = \frac{M_s}{M_p}, R_\omega = \frac{\omega_s}{\omega_p} \tag{4.52}$$

Με δεδομένα τα δυναμικά χαρακτηριστικά του κάθε διβάθμιου ταλαντωτή, μορφώνονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.53), εκτελείται η κλασσική ιδιομορφική ανάλυση της εξίσωσης (4.12), και υπολογίζονται οι ιδιομορφικές μάζες κατά την εξίσωση (4.14). Με τον τρόπο αυτό, ορίζονται όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην εξίσωση (4.51), και για κάθε διβάθμιο ταλαντωτή προκύπτουν οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης κατά Huang et al. [109]. Αποκτώνται έτσι οι κατανομές των ιδιομορφικών αποσβέσεων, και απεικονίζονται στην Εικ. 4.5 για την πρώτη και στην Εικ. 4.6 για τη δεύτερη ιδιομορφή.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_p & -K_s \\ -K_s & K_p + K_s \end{bmatrix} \tag{4.53}$$



Εικ. 4.5: Απόσβεση 1^{ης} ιδιομορφής διβάθμιου μικτού ταλαντωτή κατά Huang et al. [109]



Εικ. 4.6: Απόσβεση 2^{ης} ιδιομορφής διβάθμιου μικτού ταλαντωτή κατά Huang et al. [109]

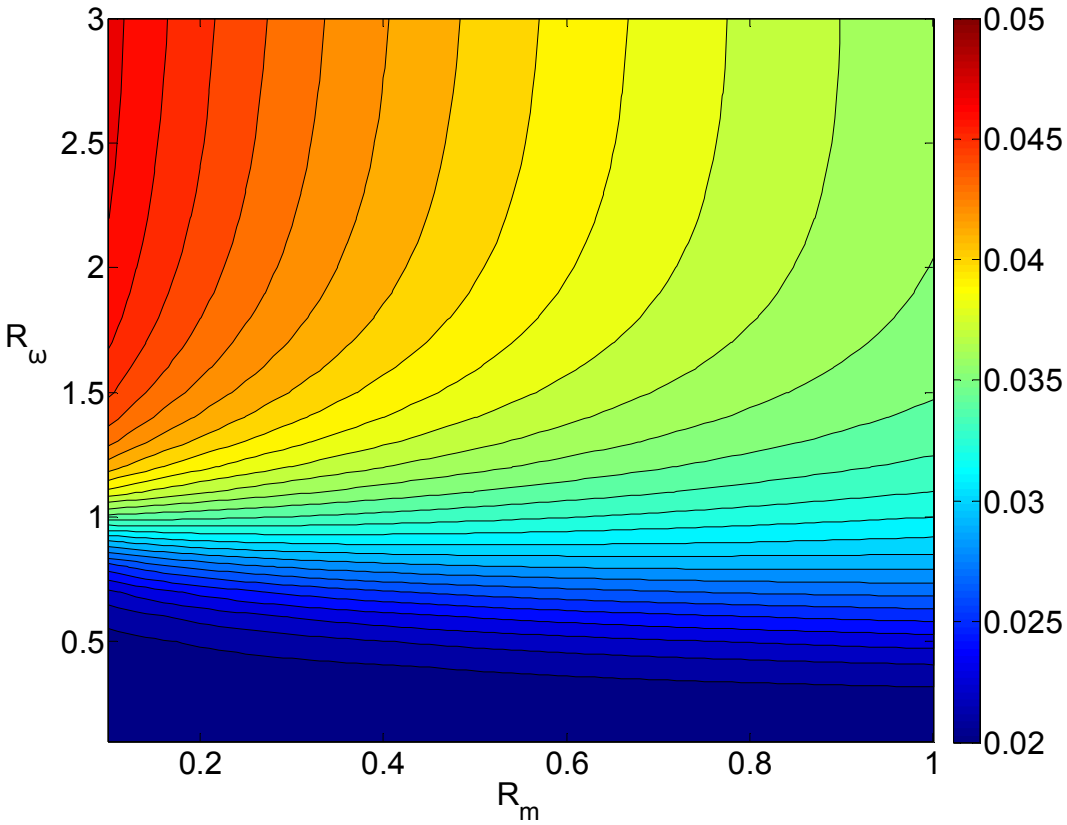
4.6 Ισοδύναμοι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης μικτής κατασκευής από μιγαδικές ιδιομορφές

Όπως και στην περίπτωση της αποσύζευξης, η μελέτη των μικτών κατασκευών με σκοπό την εύρεση ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης γίνεται σε έναν ισοδύναμο διβάθμιο φορέα, όπως αυτός της Εικ. 4.4. Στόχος πάλι είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων γενικότερης φύσης, και όχι η κατά περίπτωση μελέτη πολυβάθμιων κατασκευών. Ο κάθε βαθμός ελευθερίας έχει χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν στο τμήμα πολυβάθμιας κατασκευής που καλείται να αντιπροσωπεύσει. Έτσι, η στάθμη p έχει απόσβεση $\zeta_p = 5\%$ και η στάθμη s έχει απόσβεση $\zeta_s = 2\%$, κατά αντιστοιχία με το υπόβαθρο από σκυρόδεμα και την υπερκατασκευή από χάλυβα.

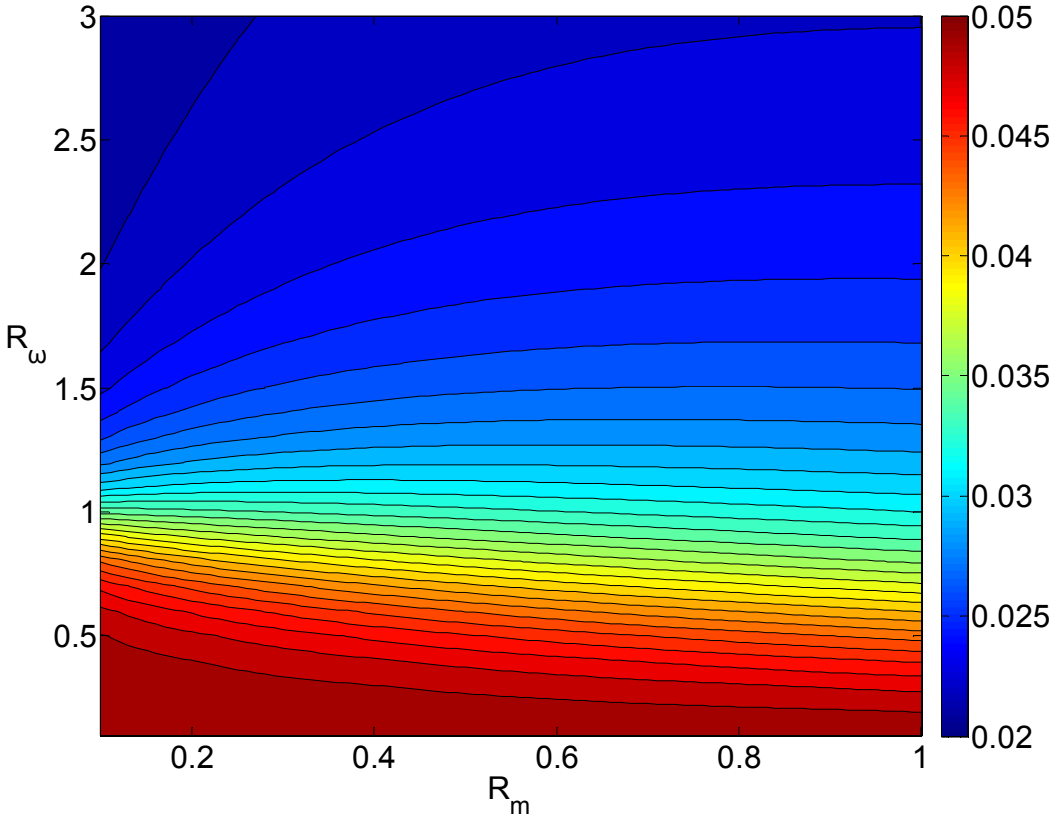
Ως βάση για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του διβάθμιου προσομοιώματος, χρησιμοποιείται ένα υπόβαθρο το οποίο πάλι έχει μάζα 20Mgr και ιδιοπερίοδο 0.2s, ένας ταλαντωτής δηλαδή ο οποίος βρίσκεται στο πλατό ενός τυπικού κανονιστικού φάσματος, και επιτρέπει και τη σύγκριση με τους αντίστοιχους συντελεστές των Huang et al. [109]. Με βάση αυτό το υπόβαθρο, και με δεδομένους λόγους μαζών και ιδιοσυχνοτήτων όπως ορίζονται στην εξίσωση (4.52) και τον ορισμό των ιδιοσυχνοτήτων της κάθε στάθμης όπως στην εξίσωση (4.50), μπορούν να υπολογιστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά όλων των διβάθμιων ταλαντωτών, και να μορφωθούν μητρώα του τύπου της εξίσωσης (4.53)

Έχοντας τις μάζες και τις δυσκαμψίες του διβάθμιου ταλαντωτή, και με δεδομένες τις αποσβέσεις της κάθε στάθμης, $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$, κατασκευάζεται το μητρώο απόσβεσης, όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (4.3) ως (4.10), προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μη κανονική κατανομή της απόσβεσης καθ' ύψος. Εν τέλει, προκύπτουν όλα τα δυναμικά χαρακτηριστικά, δηλαδή μάζες, δυσκαμψίες και αποσβέσεις, ενός διβάθμιου ταλαντωτή, όπως αυτός της Εικ. 4.2.

Ακολούθως, με βάση τη διαδικασία της εύρεσης των μιγαδικών ιδιομορφών που παρουσιάστηκε προηγουμένως, υπολογίζονται τα μιγαδικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά, και από τις ιδιοτιμές υπολογίζονται οι τιμές των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, σύμφωνα με την εξίσωση (4.37), η κατανομή των οποίων φαίνεται στην Εικ. 4.7 για την πρώτη και στην Εικ. 4.8 για τη δεύτερη ιδιομορφή.

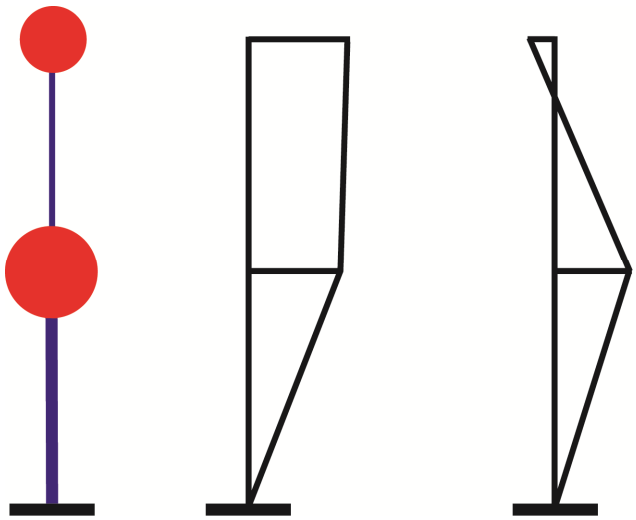


Εικ. 4.7: Συντελεστής απόσβεσης 1ης ιδιομορφής

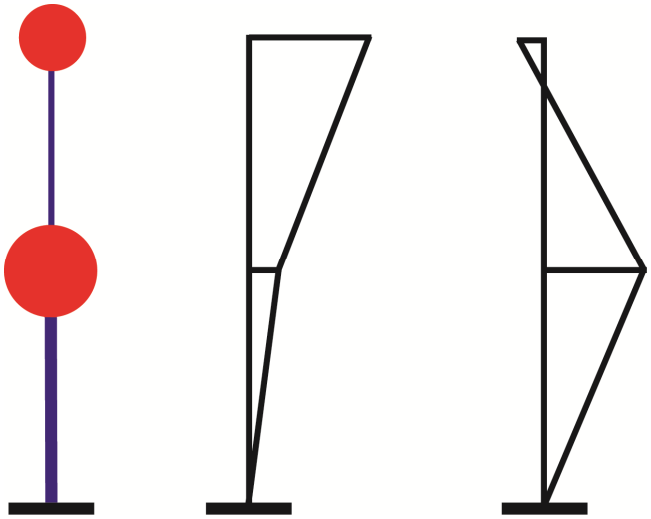


Εικ. 4.8: Συντελεστής απόσβεσης 2ης ιδιομορφής

Η κατανομή των συντελεστών απόσβεσης σχετίζεται με την κίνηση του διβάθμιου φορέα. Έτσι, στην περιοχή των μεγάλων τιμών του λόγου ιδιοσυχνοτήτων, εκεί δηλαδή όπου η υπερκατασκευή είναι κατά πολύ πιο δύσκαμπτη σε σχέση με το υπόβαθρο, η κίνηση είναι εντονότερη στη στάθμη p, όπως φαίνεται και στην Εικ. 4.9 από τις ιδιομορφές μιας κατασκευής η οποία βρίσκεται σε αυτήν την περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m). Αντίθετα, μια κατασκευή με μικρό λόγο ιδιοσυχνοτήτων έχει ιδιομορφές του σχήματος της Εικ. 4.10.



Εικ. 4.9: Ιδιομορφές διβάθμιας κατασκευής με μεγάλο λόγο ιδιοσυχνοτήτων



Εικ. 4.10: Ιδιομορφές διβάθμιας κατασκευής με μικρό λόγο ιδιοσυχνοτήτων

Έτσι, στην πρώτη περίπτωση της Εικ. 4.9, που το R_ω είναι μεγάλο, η κίνηση του διβάθμιου συστήματος γίνεται κυρίως στη στάθμη p επειδή η υπερκατασκευή είναι πολύ δύσκαμπτη, με αποτέλεσμα η πρώτη ιδιομορφή να έχει απόσβεση πολύ κοντά σε αυτήν του υποβάθρου, δηλαδή στο 5%. Η δεύτερη ιδιομορφή πρέπει να δώσει

μετατόπιση αντίθετου προσήμου στις δύο στάθμες, και με δεδομένη τη μεγάλη μετατόπιση της στάθμης p δίνει έντονη κίνηση και στην s με αποτέλεσμα η απόσβεση να πλησιάζει το 2%. Αντίθετα, στην περίπτωση της Εικ. 4.10, που το R_ω είναι μικρό, η κίνηση του διβάθμιου γίνεται κυρίως στη στάθμη s η οποία είναι πολύ εύκαμπτη, και ως εκ τούτου η απόσβεση της πρώτης ιδιομορφής είναι πολύ κοντά σε αυτήν σε αυτήν της υπερκατασκευής, δηλαδή στο 2%. Πάλι, η δεύτερη ιδιομορφή πρέπει να δώσει μετατόπιση αντίθετης φοράς στις δύο στάθμες, και με δεδομένη τη μεγάλη μετατόπιση της s δίνει έντονη κίνηση στη στάθμη p, οπότε το τελικό ποσοστό απόσβεσης είναι κοντά στο 5%.

Η κατανομή των ιδιομορφικών τιμών ισοδύναμης απόσβεσης που φαίνεται στις Εικ. 4.7 και 4.8, έχει προκύψει από τις μιγαδικές ιδιομορφικές αναλύσεις διβάθμιων ταλαντωτών, οι οποίοι κατασκευάζονται με οδηγό του λόγους ιδιοσυχνοτήτων και δυσκαμψιών και με βάση το μονοβάθμιο υπόβαθρο το οποίο έχει μάζα 20Mgr και ιδιοπερίοδο 0.2s. Δεδομένου όμως ότι τα χαρακτηριστικά της υπερκατασκευής ρυθμίζονται αναλογικά από τους λόγους R_ω και R_m, τα τελικά αποτελέσματα του κάθε σημείου του επιπέδου εξαρτώνται από τους λόγους αυτούς και μόνο, και όχι από τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου. Κατά συνέπεια, οι κατανομές των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης στο επίπεδο (R_ω, R_m) παραμένουν οι ίδιες, ανεξάρτητα από το υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η διαμόρφωση της υπερκατασκευής.

4.7 Σύγκριση ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης

Οι μορφές που έχουν οι δύο διαφορετικές κατανομές των αποσβέσεων, αυτή δηλαδή που προκύπτει από την μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση της παρούσας εργασίας και αυτή που προκύπτει από την αναλυτική διαδικασία των Huang et al. [109], είναι αρκετά όμοιες μεταξύ τους. Και η αναλυτική προσέγγιση δίνει αποσβέσεις οι οποίες είναι μεγαλύτερες στους μεγάλους λόγους ιδιοσυχνοτήτων και μικρότερες στα μικρά R_ω για την πρώτη ιδιομορφή. Αντίστοιχα, για τη δεύτερη ιδιομορφή, και οι δύο προσεγγίσεις δίνουν τις μεγάλες τιμές απόσβεσης στα μικρά R_ω και τις μικρές τιμές απόσβεσης στον αντίποδα. Η τιμές όμως που προκύπτουν διαφέρουν ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις. Η πιο χαρακτηριστική διαφορά είναι ότι στις χαμηλές τιμές των

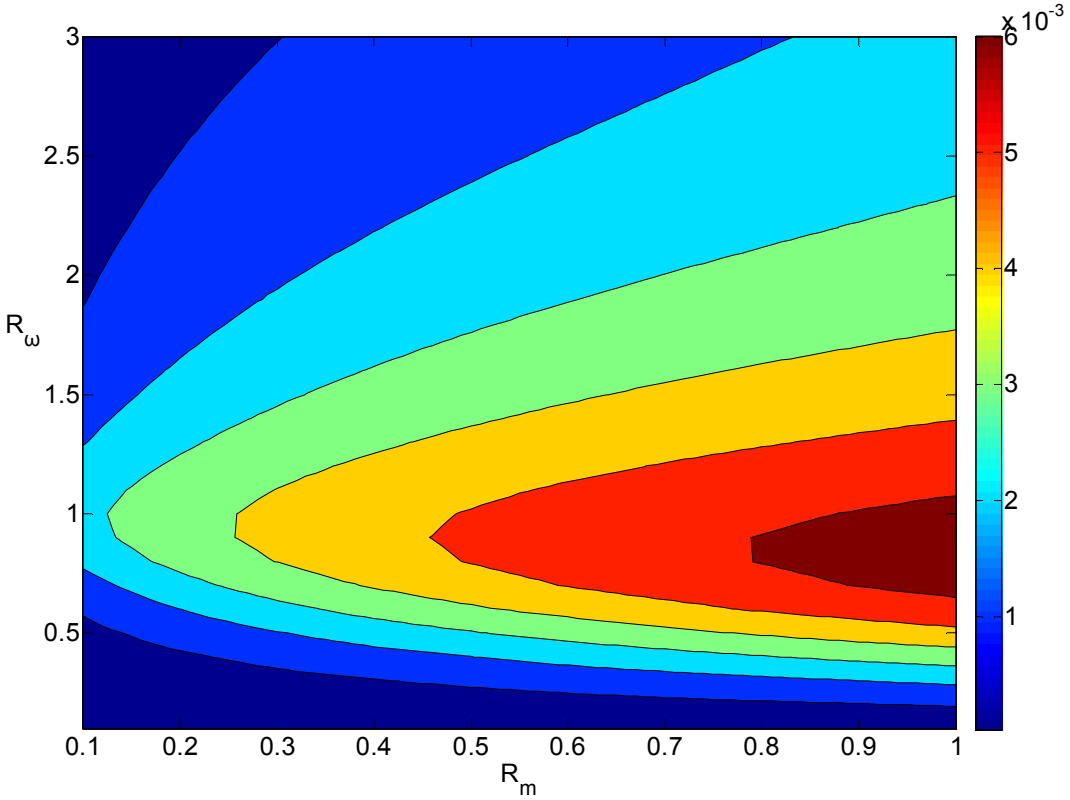
λόγων ιδιοσυχνοτήτων παρατηρείται στις τιμές που δίνουν οι Huang et al. μια περιοχή με διαφορετικό σχήμα "ισοϋψών" απόσβεσης, και στην κατανομή της πρώτης και στης δεύτερης ιδιομορφής. Μάλιστα, ενώ οι ιδιομορφικές αποσβέσεις που προκύπτουν από τις μιγαδικές ιδιομορφές δεν ξεπερνούν τις τιμές 2% και 5%, οι συντελεστές απόσβεσης των Huang et al. [109], στη συγκεκριμένη περιοχή φτάνουν το 1.5% για την πρώτη και το 5.5% για τη δεύτερη ιδιομορφή.

Αναλυτικότερα, προκειμένου να προκύψει μια τάξη μεγέθους της διαφοράς των δύο προσεγγίσεων, για κάθε σημείο του επιπέδου με συντεταγμένες (R_ω, R_m) υπολογίζεται η διαφορά στην εκτιμώμενη τιμή της ιδιομορφικής απόσβεσης από την μιγαδική ανάλυση και από τους Huang et al. [109], όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.54), για κάθε μια από τις δύο ιδιομορφές, και σε κανονικοποιημένη μορφή στην εξίσωση (4.55).

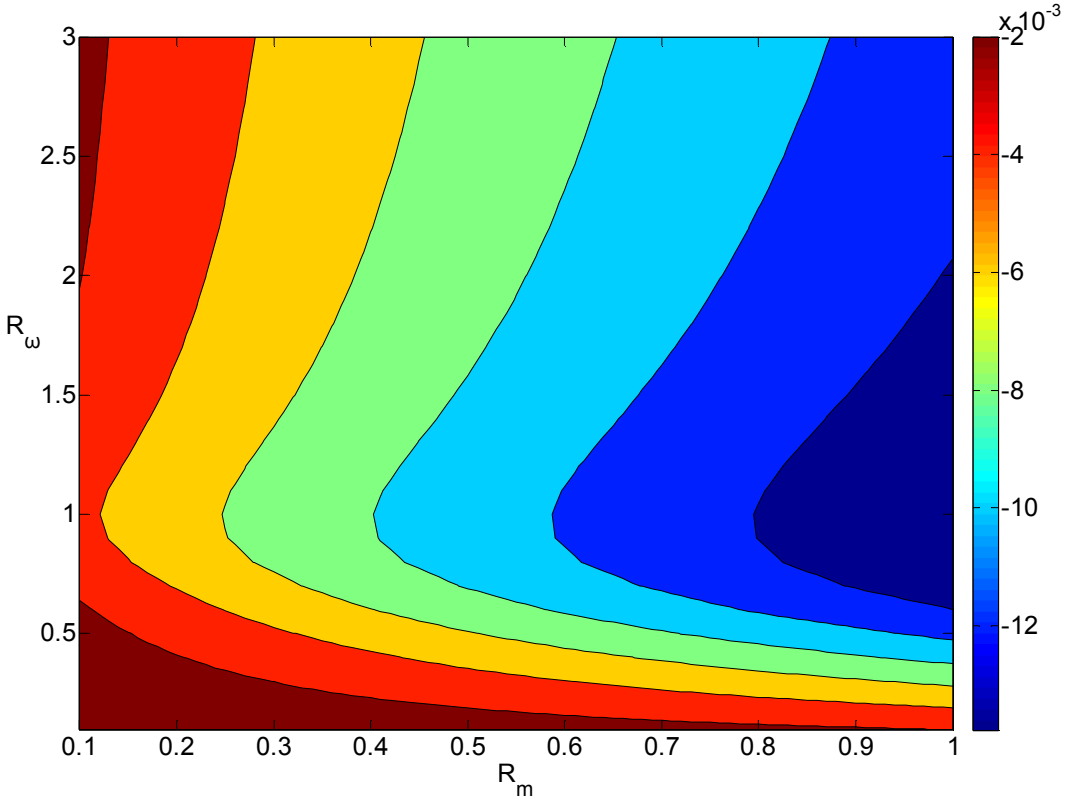
$$\delta_i(R_\omega, R_m) = \zeta_i^{complex}(R_\omega, R_m) - \zeta_i^{anal.}(R_\omega, R_m),\ i = 1,2 \tag{4.54}$$

$$\delta_i'(R_\omega, R_m) = \frac{\zeta_i^{complex}(R_\omega, R_m) - \zeta_i^{anal.}(R_\omega, R_m)}{\zeta_i^{complex}(R_\omega, R_m)},\ i = 1,2 \tag{4.55}$$

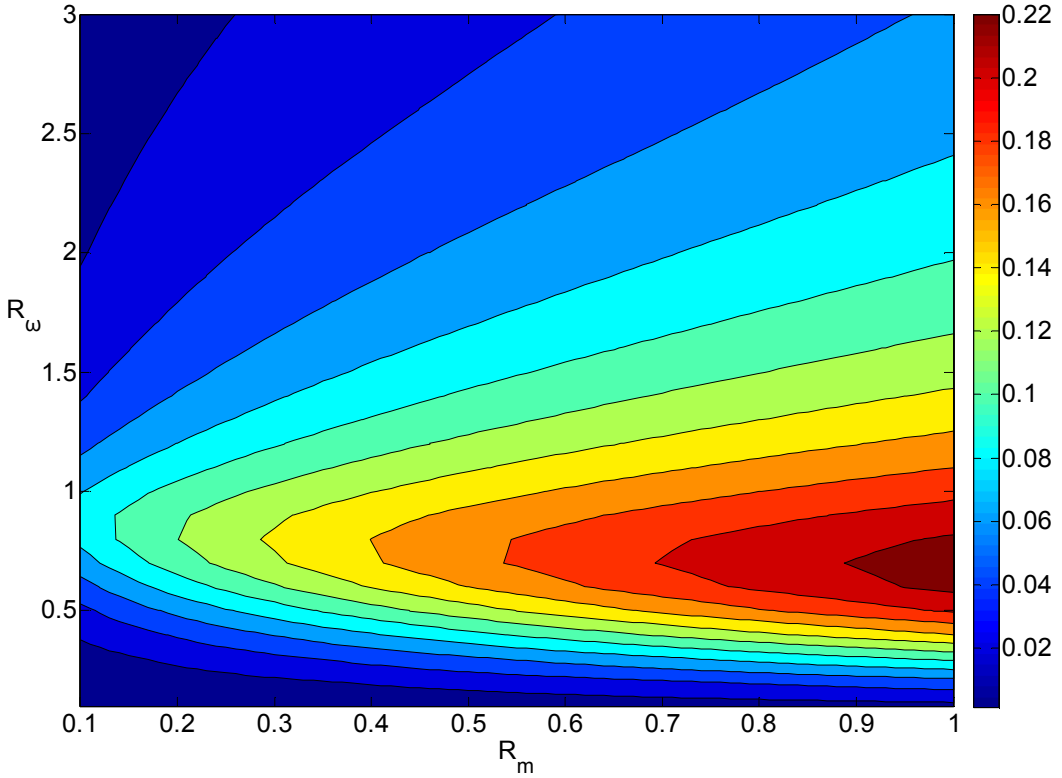
Η διαφορά των δύο κατανομών στο επίπεδο (R_ω, R_m), απεικονίζεται στις Εικ. 4.11 και 4.12 για την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή, και στην κανονικοποιημένη της μορφή στις Εικ. 4.13 και 4.14. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο θεωρήσεις είναι αρκετά μεγάλη, σε συγκεκριμένες περιοχές του επιπέδου (R_ω, R_m), δηλαδή για συγκεκριμένες διβάθμιες κατασκευές, φτάνει και το 45%. Ενδεικτικά, για μια διβάθμια κατασκευή με λόγω ιδιοσυχνοτήτων $R_\omega = 0.8$ και λόγο μαζών $R_m = 1$, οι Huang et al. [109] προβλέπουν απόσβεση ίση με $\zeta_1 = 2.27\%$, ενώ με τις μιγαδικές ιδιοτιμές προκύπτει $\zeta_1 = 2.9\%$, διαφορά σχεδόν ίση με 22% σύμφωνα με την εξίσωση (4.55). Αντίστοιχα για τη δεύτερη ιδιομορφή, για μια διβάθμια κατασκευή με λόγο ιδιοσυχνοτήτων $R_\omega = 3$ και λόγο μαζών $R_m = 1$, οι Huang et al. [109] προβλέπουν απόσβεση ίση με $\zeta_2 = 3.4\%$, ενώ με από τις μιγαδικές ιδιοτιμές προκύπτει $\zeta_2 = 2.3\%$, διαφορά μεγαλύτερη του 45% σύμφωνα με την εξίσωση (4.55). Ανάμεσα στις δύο, η κατανομή των ιδιομορφικών αποσβέσεων που προκύπτει από την μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση θεωρείται ορθή, αφού η αναλυτική προσέγγιση των Huang et al. [109] παραβλέπει τους μη διαγώνιους όρους του μητρώου απόσβεσης, αγνοεί δηλαδή τους όρους που δημιουργούν το πρόβλημα της ανάλυσης των μικτών κατασκευών.



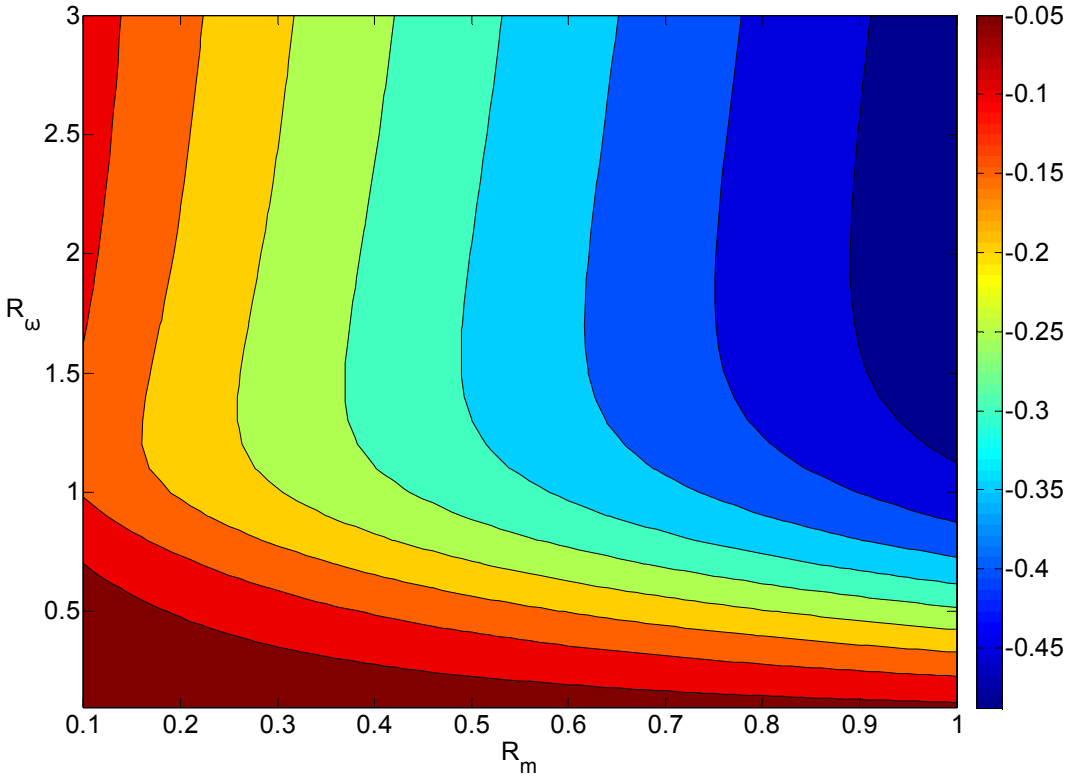
Εικ. 4.11: Διαφορά κατανομής δ_1 μεταξύ μιγαδικών και αναλυτικών συντελεστών απόσβεσης 1ης ιδιομορφής



Εικ. 4.12: Διαφορά κατανομής δ_2 μεταξύ μιγαδικών και αναλυτικών συντελεστών απόσβεσης 2ης ιδιομορφής



Εικ. 4.13: Κανονικοποιημένη διαφορά δ_1' κατανομής μεταξύ μιγαδικών και αναλυτικών συντελεστών απόσβεσης $1^{ης}$ ιδιομορφής



Εικ. 4.14: Κανονικοποιημένη δ_2' διαφορά κατανομής μεταξύ μιγαδικών και αναλυτικών συντελεστών απόσβεσης $2^{ης}$ ιδιομορφής

4.8 Αξιοποίηση των μιγαδικών συντελεστών ιδιομορφικής απόσβεσης

Δεδομένου ότι η εκτέλεση μιας μιγαδικής ιδιομορφικής ανάλυσης στην καθημερινή μελετητική πρακτική είναι μάλλον δύσκολο να γίνει, οι πίνακες της κατανομής της ιδιομορφικής απόσβεσης μπορούν να υποκαταστήσουν τη διαδικασία αυτή. Έτσι, επιχειρείται ένας συγκερασμός μεταξύ των αποτελεσμάτων της μιγαδικής ιδιομορφικής ανάλυσης και της κλασσικής ιδιομορφικής ανάλυσης, η οποία μπορεί να εκτελεστεί από τα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού.

Πιο συγκεκριμένα, για ένα τυχαίο διβάθμιο σύστημα, όπως αυτό της Εικ. 4.4, με συντελεστές απόσβεσης $\zeta_p = 5\%$ & $\zeta_s = 2\%$, και με δεδομένες τις μάζες M_i και τις δυσκαμψίες K_i της κάθε στάθμης i, υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες υποβάθρου και υπερκατασκευής, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (4.50), και ακολούθως οι λόγοι ιδιοσυχνοτήτων και μαζών από την εξίσωση (4.52). Οι λόγοι αυτοί ουσιαστικά είναι και οι συντεταγμένες της κατασκευής στο επίπεδο (R_ω, R_m), πράγμα που σημαίνει ότι από τα διαγράμματα των Εικ. 4.7 και 4.8, μπορούν να εξαχθούν οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης για το συγκεκριμένο διβάθμιο σύστημα, χωρίς να γίνει η μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση.

Στην ορθή προσέγγιση της μιγαδικής ιδιομορφικής ανάλυσης, η εξίσωση κίνησης μιας μικτής διβάθμιας κατασκευής, της οποίας τα μιγαδικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά, ιδιοτιμές s, ιδιοδιανύσματα $\{\Phi\}$ και συντελεστές συμμετοχής Γ, έχουν υπολογιστεί όπως στις εξισώσεις (4.34) ως (4.37), αναλύεται σε ιδιομορφικές εξισώσεις κίνησης, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.44) και (4.45). Στη συνέχεια, η εξίσωση κίνησης αναλύεται σε 2n το πλήθος αποζευγμένες ιδιομορφικές εξισώσεις κίνησης, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.48) και (4.49). Η χρονοϊστορία της ιδιομορφικής απόκρισης $q_i(t)$ αποκτάται από την χρονική ολοκλήρωση της (4.48), όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$q_i(t) = \Gamma_i e^{-s_i t}\left[\int e^{-s_i t}\ddot{x}_g(t)dt + \Lambda_i\right] \tag{4.56}$$

όπου με Λ_i συμβολίζονται οι αρχικές συνθήκες. Έχοντας τη χρονοϊστορία των ιδιομορφικών αποκρίσεων, με μια απλή σύνθεση υπολογίζεται το διάνυσμα $\{u\}$:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{\Phi q}(t) \tag{4.57}$$

και αυτόματα οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή:

$$\mathbf{u}(t) = \begin{Bmatrix} \dot{y}(t) \\ y(t) \end{Bmatrix} \tag{4.58}$$

Ακολούθως, επιστρέφοντας στην αρχική εξίσωση κίνησης (4.11), υπολογίζονται και οι επιταχύνσεις. Στην παραπάνω ακολουθία βημάτων, στην οποία αξιοποιούνται πλήρως οι μιγαδικές ιδιομορφές, δε γίνεται χρήση των συντελεστών απόσβεσης, γιατί το μητρώο $\mathbf{C}$ περιέχεται στο μητρώο $\mathbf{A}$, και κατά συνέπεια η απόσβεση λαμβάνεται υπόψη στις ιδιοτιμές και στα ιδιοδιανύσματα. Η διαδικασία αυτή, όπως και η διαδικασία υπολογισμού των μιγαδικών ιδιομορφών, είναι επίπονη και δύσκολη στην εφαρμογή της, αφού περιλαμβάνει και διαδικασίες όπως η χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης (4.56), ενώ αν προτιμηθεί η φασματική ανάλυση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τροποποιημένοι κανόνες συνδυασμού μεγίστων.

Αντ' αυτού, στην παρούσα εργασία, οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης χρησιμοποιούνται σε μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση. Έτσι, για την κατασκευή της Εικ. 4.4, με γνωστά δυναμικά χαρακτηριστικά, υπολογίζονται, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης. Έπειτα, αντί να γίνει χρήση των μιγαδικών ιδιομορφών, επιλύονται οι κλασσικές ιδιομορφικές εξισώσεις και υπολογίζονται ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα, όπως στις εξισώσεις (4.12) και (4.13). Αυτές προφανώς δε διαγωνιοποιούν το μητρώο απόσβεσης, παρ' όλα αυτά η διαδικασία ιδιομορφικής ανάλυσης συνεχίζεται κανονικά.

Έτσι, επιλύεται η εξίσωση (4.27) χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συμμετοχής της (4.28) και τους συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τα διαγράμματα των Εικ. 4.7 και 4.8. Τέλος, οι χρονοϊστορίες ιδιομορφικής απόκρισης $q_i(t)$ πολλαπλασιάζουν τα ιδιοδιανύσματα Φ_i προκειμένου να προκύψει η προσεγγιστική απόκριση σε όρους μετατοπίσεων:

$$\{y'(t)\} = \mathbf{\Phi q}(t) \tag{4.59}$$

Για τις ανάγκες της εργασίας και προκειμένου να υπολογιστεί τα σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση των κλασσικών ιδιομορφών στη θέση των μιγαδικών, η

επίπονη μιγαδική ανάλυση αντικαθίσταται από μια πλήρη ανάλυση χρονοϊστορίας της εξίσωσης κίνησης (4.11), και με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η αναλυτική χρονική ολοκλήρωση της (4.56), ενώ τα αποτελέσματα είναι πάλι ορθά. Έτσι, με γνωστά τα μητρώα μάζας, δυσκαμψίας και μικτής απόσβεσης, και με δεδομένη εδαφική διέγερση, είναι δυνατόν να υπολογιστεί με αριθμητικό τρόπο η ορθή χρονοϊστορία απόκρισης $\{y(t)\}$απ' ευθείας από την (4.11), οπότε και προκύπτει ο ακόλουθος υπολογισμός του σφάλματος σε όρους μετατοπίσεων:

$$e_i^{disp} = \frac{\max\left(\left|y_i(t)\right|\right) - \max\left(\left|y_i'(t)\right|\right)}{\max\left(\left|y_i(t)\right|\right)}, i = s,p \tag{4.60}$$

Από τα αποτελέσματα της ορθής ανάλυσης και της προσεγγιστικής σε όρους επιταχύνσεων, γίνεται μετάβαση σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, όπως στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\left\{\bar{\ddot{y}}(t)\right\} = \left\{\ddot{y}(t)\right\} + \ddot{x}_g(t)\mathbf{r} \tag{4.61}$$

$$\left\{\bar{\ddot{y}}'(t)\right\} = \left\{\ddot{y}'(t)\right\} + \ddot{x}_g(t)\mathbf{r} \tag{4.62}$$

οπότε η εκτίμηση του σφάλματος σε όρους απολύτων επιταχύνσεων είναι:

$$e_i^{accl} = \frac{\max\left(\left|\bar{\ddot{y}}_i(t)\right|\right) - \max\left(\left|\bar{\ddot{y}}_i'(t)\right|\right)}{\max\left(\left|\bar{\ddot{y}}_i(t)\right|\right)}, i = s,p \tag{4.63}$$

Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η προσεγγιστική ανάλυση μιας μικτής διβάθμιας κατασκευής, χρησιμοποιώντας τους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τη μιγαδική ανάλυση, και προκύπτει η εκτίμηση του σφάλματος σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων.

4.9 Υπολογιστική εφαρμογή διαδικασίας εκτίμησης σφάλματος

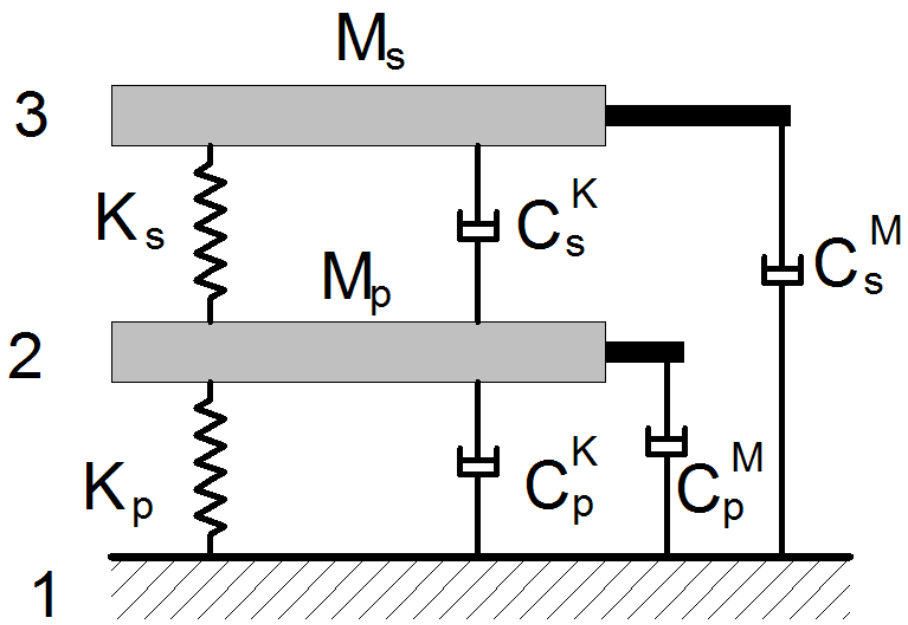
Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων για την εκτίμηση του σφάλματος από τη χρήση των ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης στην παρούσα εργασία

γίνεται αριθμητικά με ελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Επιλέγεται πάλι για το υπόβαθρο ο ίδιος μονοβάθμιος ταλαντωτής με μάζα 20Mgr και ιδιοπερίοδο 0.2s, ο οποίος για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) αποτελεί τη βάση για να υπολογιστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της υπερκατασκευής σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.50) και (4.52). Για κάθε ένα από τα διβάθμια συστήματα του επιπέδου, και δεδομένου ότι οι αποσβέσεις σε κάθε στάθμη είναι $\zeta_p = 5\%, \zeta_s = 2\%$, μορφώνεται το μητρώο απόσβεσης, όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (4.3) ως (4.10). Προκύπτουν τότε πλήρως τα χαρακτηριστικά ενός φορέα του τύπου της Εικ. 4.2, ο οποίος σε κάθε ξεχωριστό τμήμα του έχει απόσβεση τύπου Rayleigh, στο σύνολο όμως δε μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει αναλογική απόσβεση. Στο διβάθμιο αυτό σύστημα, οι αποσβεστήρες C_i^m παίρνουν τις τιμές τους από τα στοιχεία ενός πίνακα που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό $a_{0,i}\mathbf{M}^i$ και οι αποσβεστήρες C_i^k παίρνουν τις τιμές τους από τα στοιχεία ενός πίνακα ο οποίος προκύπτει από το γινόμενο $a_{1,i}\mathbf{K}^i$.

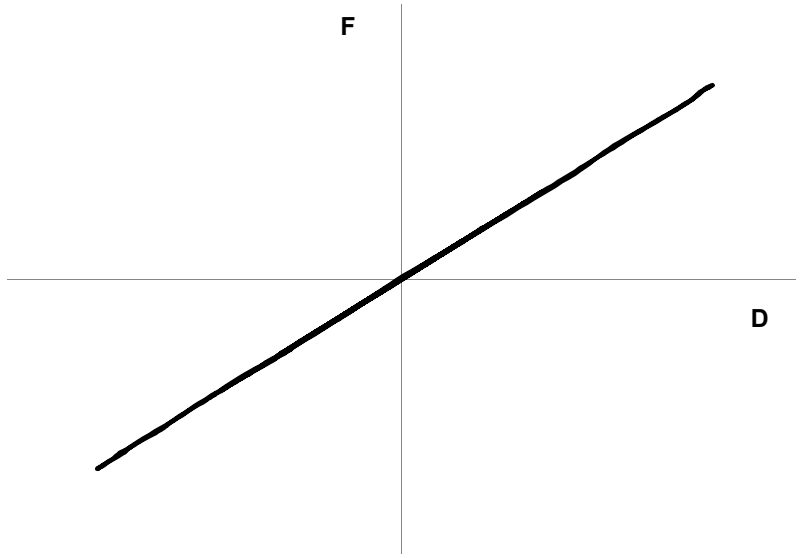
Προκειμένου να αναλυθούν αριθμητικά τα διβάθμια προσομοιώματα επιλέγεται πάλι το λογισμικό Opensees (OS) [124]. Το διβάθμιο προσομοίωμα της Εικ. 4.2 υλοποιείται με τα στοιχεία μηδενικού μήκους ZeroLength (ZL), με τα οποία είναι δυνατόν να αποδοθούν σε κάθε βαθμό ελευθερίας απ' ευθείας χαρακτηριστικά, όπως δυσκαμψία και απόσβεση, χωρίς να ορίζονται γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τώρα, το μητρώο απόσβεσης που πρέπει να υλοποιηθεί είναι τύπου Rayleigh, επομένως υπάρχει απόσβεση που σχετίζεται και με την απόλυτη ως προς το έδαφος κίνηση του κάθε βαθμού ελευθερίας, πέρα από την απόσβεση η οποία σχετίζεται με τη σχετική κίνηση της κάθε στάθμης σε σχέση με την υποκείμενη. Για αυτό το λόγο το υπολογιστικό προσομοίωμα παίρνει τη μορφή της Εικ. 4.15. Ορίζονται τρεις κόμβοι από τους οποίους ο πρώτος είναι πλήρως δεσμευμένος, και οι άλλοι δύο έχουν ελεύθερη την κίνηση κατά μόνο μία διεύθυνση, αυτήν της εδαφικής κίνησης. Στους κόμβους 2 και 3, αποδίδονται και οι μάζες της κάθε στάθμης.

Τα στοιχεία ZL χρησιμοποιούνται τόσο για την απόδοση δυσκαμψίας όσο και για την απόδοση απόσβεσης. Έτσι, με δύο ZL στοιχεία, τα οποία έχουν ιδιότητες μόνο δυσκαμψίας και που συνδέουν τους κόμβους 1 με 2 και 2 με 3 υλοποιούνται οι δυσκαμψίες υποβάθρου και υπερκατασκευής, αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά είναι δίνουν ελαστική δυσκαμψία, και υλοποιούν γραμμικό ελαστικό νόμο υλικού, όπως

φαίνεται όπως φαίνεται από το βρόχο δύναμης (F) – μετατόπισης (D) στην Εικ. 4.16, και κατά συνέπεια δε μπορούν να υλοποιήσουν απόσβεση.



Εικ. 4.15: Υπολογιστικό προσομοίωμα στο Opensees



Εικ. 4.16: Γραμμική ελαστική συμπεριφορά στοιχείων ZL που υλοποιούν τη δυσκαμψία κάθε στάθμης

Άλλα δύο στοιχεία ZL, τα οποία έχουν αυτήν τη φορά ιδιότητες μόνο απόσβεσης, υλοποιούν την απόσβεση η οποία σχετίζεται με τη σχετική κίνηση των σταθμών, και συνδέουν πάλι τους κόμβους 1 με 2 και 2 με 3. Τέλος, προκειμένου να υλοποιηθεί η απόσβεση η οποία σχετίζεται με την κίνηση του κάθε βαθμού ελευθερίας ως προς το έδαφος, προστίθενται άλλα δύο ZL στοιχεία με χαρακτηριστικά απόσβεσης, τα οποία συνδέουν τους κόμβους 2 και 3 με τον κόμβο 1, δηλαδή το έδαφος.

Η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως προκειμένου να εκτιμηθεί το σφάλμα από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης που προκύπτουν από τη μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση σε μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, προϋποθέτει τη χρονική ανάλυση μονοβάθμιων ταλαντωτών, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις ιδιομορφές της διβάθμιας κατασκευής. Η κατασκευή των μονοβάθμιων προσομοιωμάτων στο OS [124] γίνεται εύκολα μετά από την υλοποίηση του διβάθμιου προσομοιώματος. Ουσιαστικά, προκειμένου να κατασκευαστεί το μονοβάθμιο προσομοίωμα της κάθε ιδιομορφής, αυτό που πρέπει να γίνει είναι να αφαιρεθούν ZL στοιχεία και κόμβοι από το διβάθμιο προσομοίωμα. Έτσι, παραμένουν οι μόνο δύο κόμβοι, από τους οποίους ο ένας είναι πλήρως δεσμευμένος και ο άλλος έχει ελεύθερη την κίνηση μόνο κατά τη διεύθυνση της εδαφικής διέγερσης. Οι κόμβοι συνδέονται με ένα ZL στοιχείο που έχει χαρακτηριστικά δυσκαμψίας όπως στην Εικ. 4.16, και με άλλο ένα με χαρακτηριστικά μόνο απόσβεσης, οπότε προσομοιώνεται ο μονοβάθμιος ταλαντωτής, του οποίου η κίνηση περιγράφεται από την εξίσωση ιδιομορφικής κίνησης (4.27). Τα αρχεία εισαγωγής δεδομένων στο OS [124] για το διβάθμιο και το μονοβάθμιο ταλαντωτή, με ονομασία zl2_damping.tcl και zl1_damping.tcl, παρατίθενται στο παράρτημα της διατριβής.

Προκειμένου να υπολογιστεί το σφάλμα σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις (4.60) και (4.63), γίνεται καταγραφή της απόκρισης των κόμβων των προσομοιωμάτων του OS [124] σε όρους μετατοπίσεων και σχετικών επιταχύνσεων και αποθηκεύονται σε αντίστοιχα αρχεία. Ακολούθως, στις επιταχύνσεις που καταγράφηκαν προστίθεται χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης εδαφικής επιτάχυνσης, και με τον τρόπο αυτό, όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (4.61) και (4.62), αποκτώνται οι χρονοϊστορίες των απολύτων επιταχύνσεων, οπότε είναι δυνατός πλέον ο υπολογισμός του σφάλματος και σε όρους επιταχύνσεων.

4.10 Σφάλμα υπό αρμονικές διεγέρσεις

Το σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης στην εργασία αυτή μελετάται σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη

διέγερση στην κατασκευή. Κάτι τέτοιο εκ πρώτης όψεως φαίνεται άτοπο, αφού η απόσβεση μιας κατασκευής είναι εγγενής ιδιότητά της και δεν εξαρτάται από την εδαφική διέγερση. Όμως εδώ η ορθά υπολογισμένη απόσβεση από τις μιγαδικές ιδιομορφές χρησιμοποιείται σε μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, οπότε το σφάλμα που προκύπτει εξαρτάται από το πόσο διεγείρεται η κάθε ιδιομορφή από την επιβαλλόμενη διέγερση. Η διερεύνηση γίνεται πάλι σε διβάθμιους ταλαντωτές, οι οποίοι μπορούν να αναχθούν σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές με αντιστοίχιση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών τους, και οι οποίοι αντιστοιχούν σε όλους τους συνδυασμούς λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων του επιπέδου (R_ω, R_m).

Αρχικά γίνεται μια πρώτη διερεύνηση του προκύπτοντος σφάλματος, χρησιμοποιώντας αρμονική διέγερση σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή της κατασκευής. Η επιλογή αυτή γίνεται με στόχο η ενίσχυση της πρώτης ιδιομορφής του διβάθμιου ταλαντωτή να είναι η μέγιστη δυνατή. Για το σκοπό αυτό, σε κάθε σημείο του επιπέδου αρχικά κατασκευάζεται ο αντίστοιχος διβάθμιος ταλαντωτής με βάση τους λόγους ιδιοσυχνοτήτων και μαζών, και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του υποβάθρου με μάζα 20Mgr και ιδιοπερίοδο 0.2s. Για κάθε ένα από τα προκύπτοντα διβάθμια συστήματα γίνεται η κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, η οποία χρησιμοποιείται για την προσεγγιστική χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, και σε συντονισμό με την ιδιοπερίοδο της πρώτης ιδιομορφής κατασκευάζεται μια αρμονική εδαφική διέγερση πλάτους $1m/s^2$, και διάρκειας 40 κύκλων, προκειμένου να προκύψει η μέγιστη δυνατή ενίσχυση. Η αρμονική εδαφική επιτάχυνση (Ground Acceleration) φαίνεται στην Εικ. 4.17.

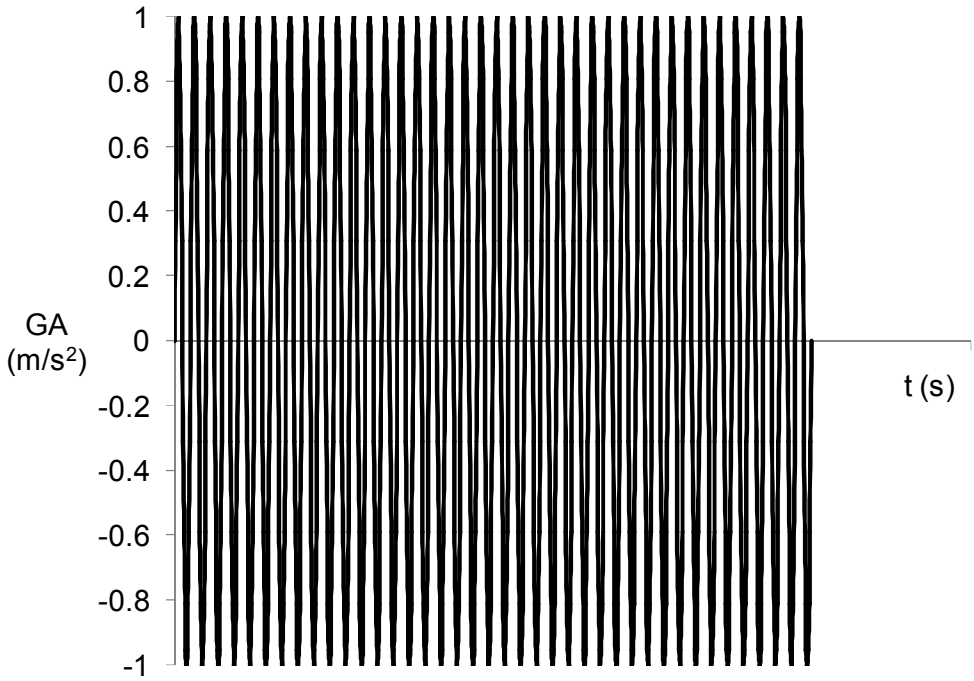
Πέρα από τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου σφάλματος σε όρους μετατοπίσεων και απολύτων επιταχύνσεων, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.60) και (4.63), γίνεται υπολογισμός και του αθροίσματος των απολύτων τιμών τους καθώς και της νόρμας τους. Τα σφάλματα αυτά στην παρούσα εργασία ονομάζονται e_1 και e_2, και υπολογίζονται όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (4.64) ως (4.67) σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων. Τα e_1 και e_2 μπορούν να πάρουν μόνο θετικές τιμές εξ' ορισμού, και έχουν το μειονέκτημα ότι είναι συντηρητικές εκτιμήσεις, ειδικά το e_1. Σκοπός τους όμως είναι να αποτελέσουν ένα μοναδικό κριτήριο για το σφάλμα σε ολόκληρη τη διβάθμια κατασκευή από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης.

$$e_1^{disp} = \left| e_p^{disp} + e_s^{disp} \right| \tag{4.64}$$

$$e_1^{accl} = \left| e_p^{accl} + e_s^{accl} \right| \tag{4.65}$$

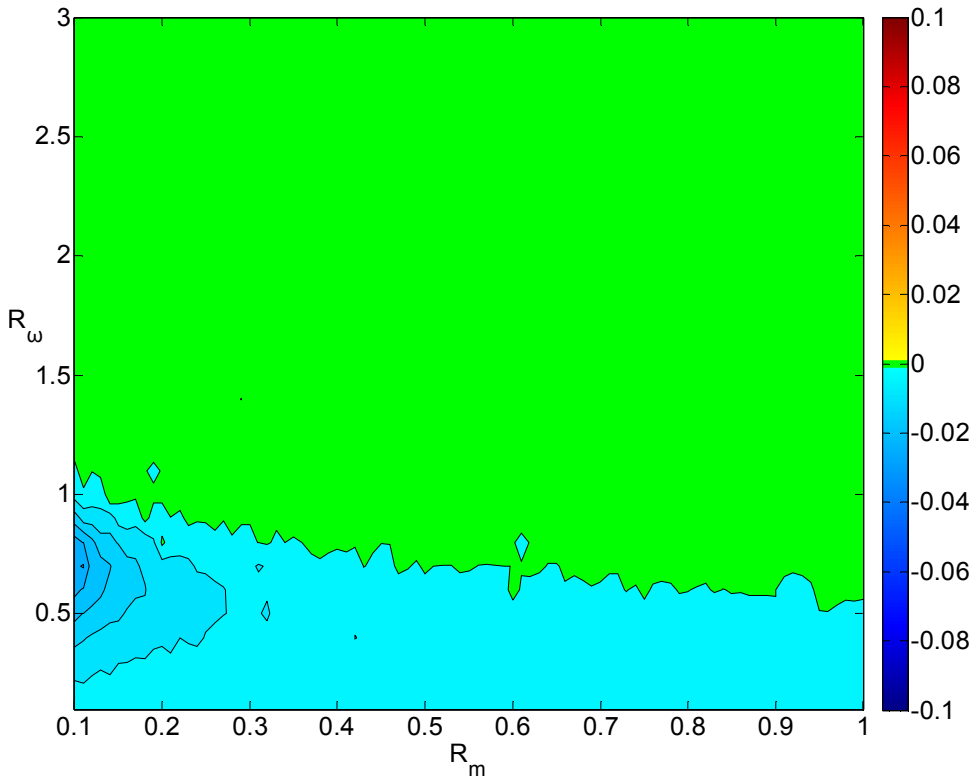
$$e_2^{disp} = \sqrt{\left(e_p^{disp}\right)^2 + \left(e_s^{disp}\right)^2} \tag{4.66}$$

$$e_2^{accl} = \sqrt{\left(e_p^{accl}\right)^2 + \left(e_s^{accl}\right)^2} \tag{4.67}$$

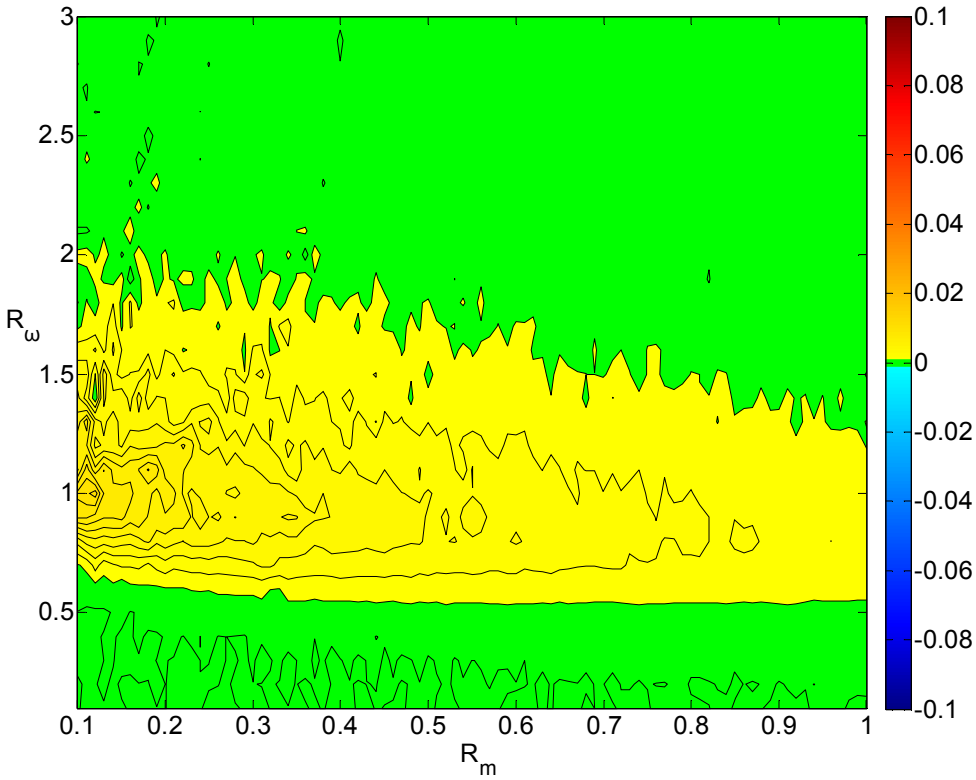


Εικ. 4.17: Αρμονική εδαφική διέγερση σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή

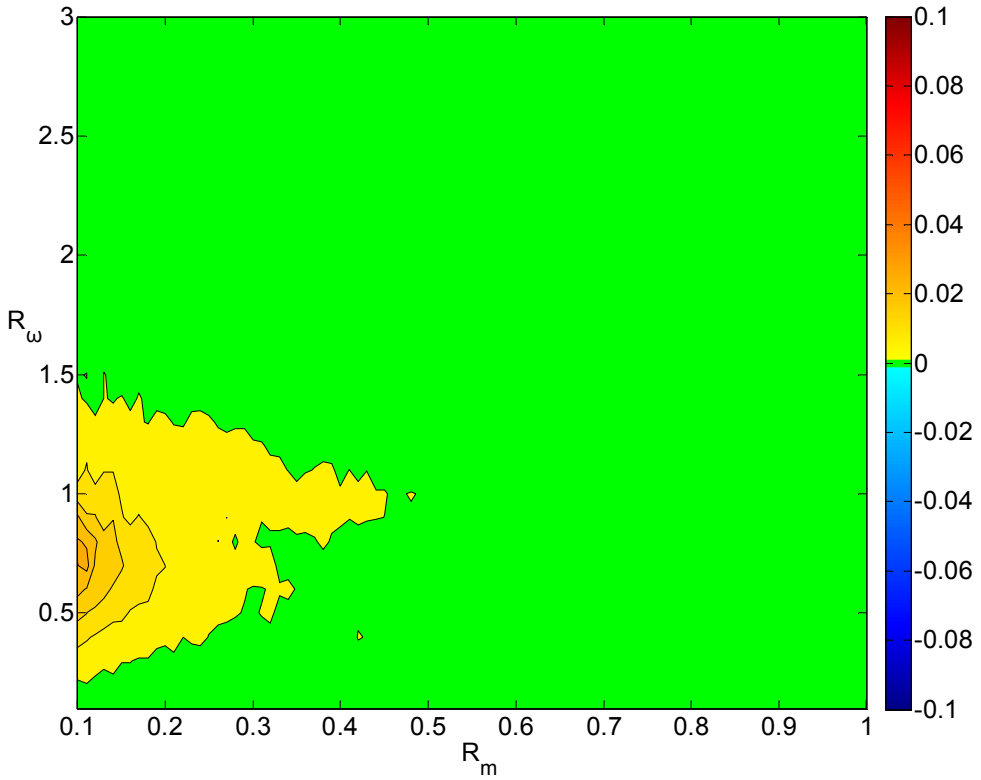
Στις Εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι κατανομές των σφαλμάτων στο επίπεδο (R_ω, R_m) από τη χρήση των ιδιομορφικών αποσβέσεων σε κατασκευές υπό αρμονική σε συντονισμό διέγερση. Συγκεκριμένα, στις Εικ. 4.18 ως 4.21 απεικονίζονται τα σφάλματα σε όρους μετατοπίσεων, και στις Εικ. 4.22 ως 4.25 τα σφάλματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, με τη χρωματική κλίμακα να διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι άμεσα αντιληπτό το πρόσημο του σφάλματος, άρα και η υπερεκτίμηση ή η υποεκτίμηση της απόκρισης. Παρά το ότι τα e_1 και e_2 παίρνουν μόνο θετικές τιμές, η χρωματική κλίμακα διατηρείται η ίδια ώστε να επιτρέπεται η σύγκριση.



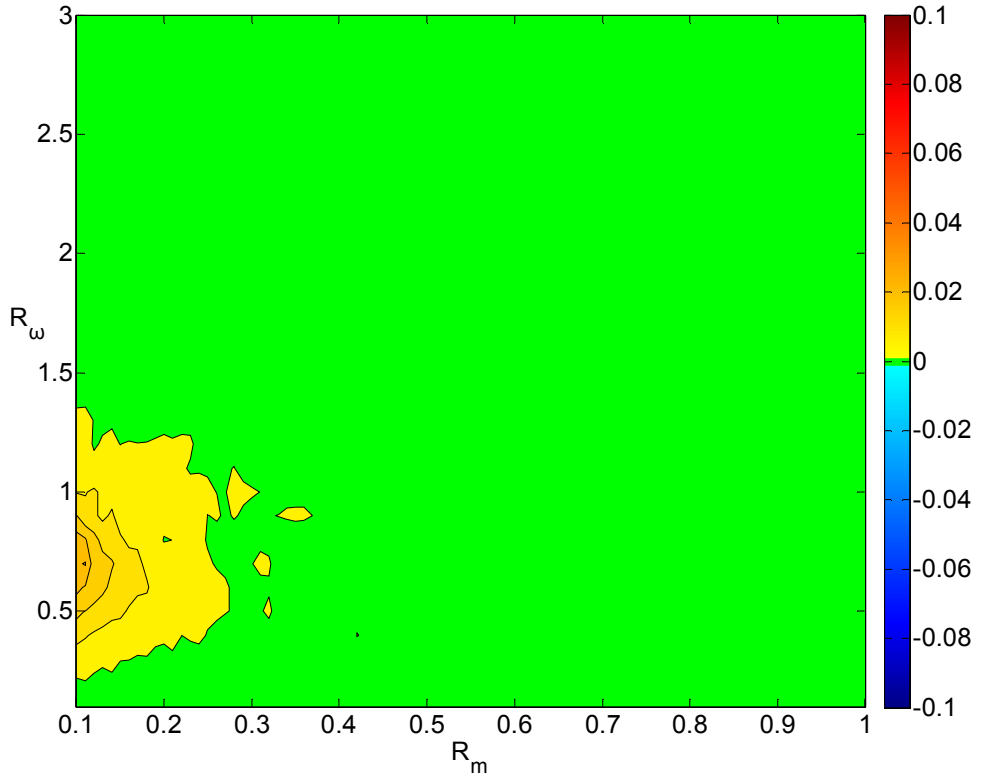
Εικ. 4.18: Σφάλμα μετατοπίσεων e_p^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



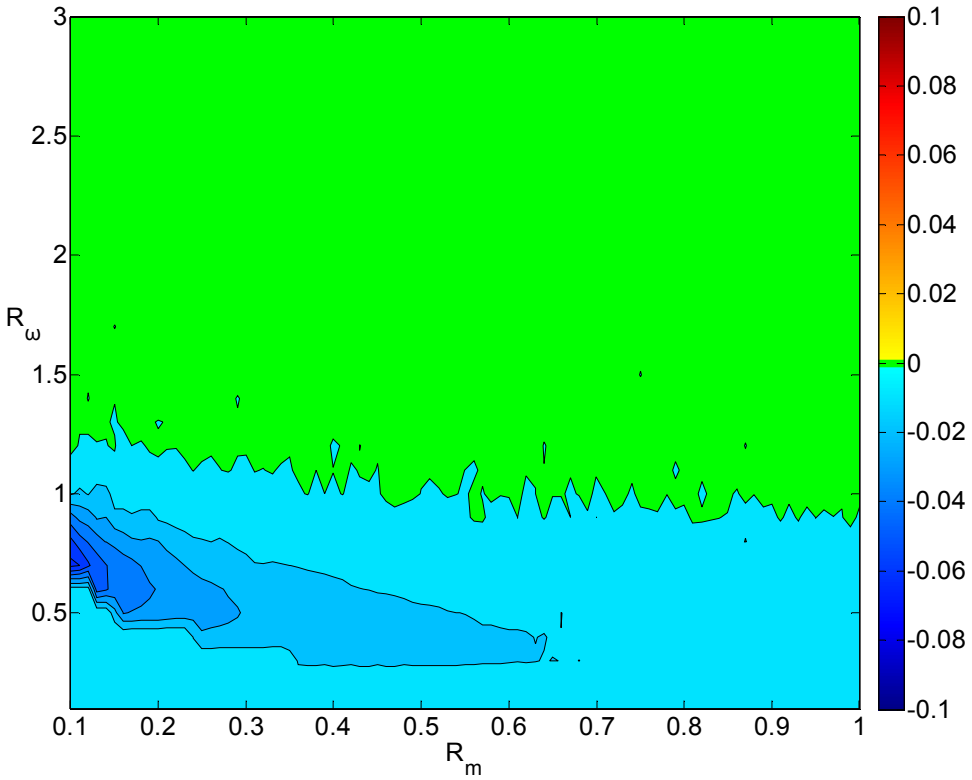
Εικ. 4.19: Σφάλμα μετατοπίσεων e_s^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



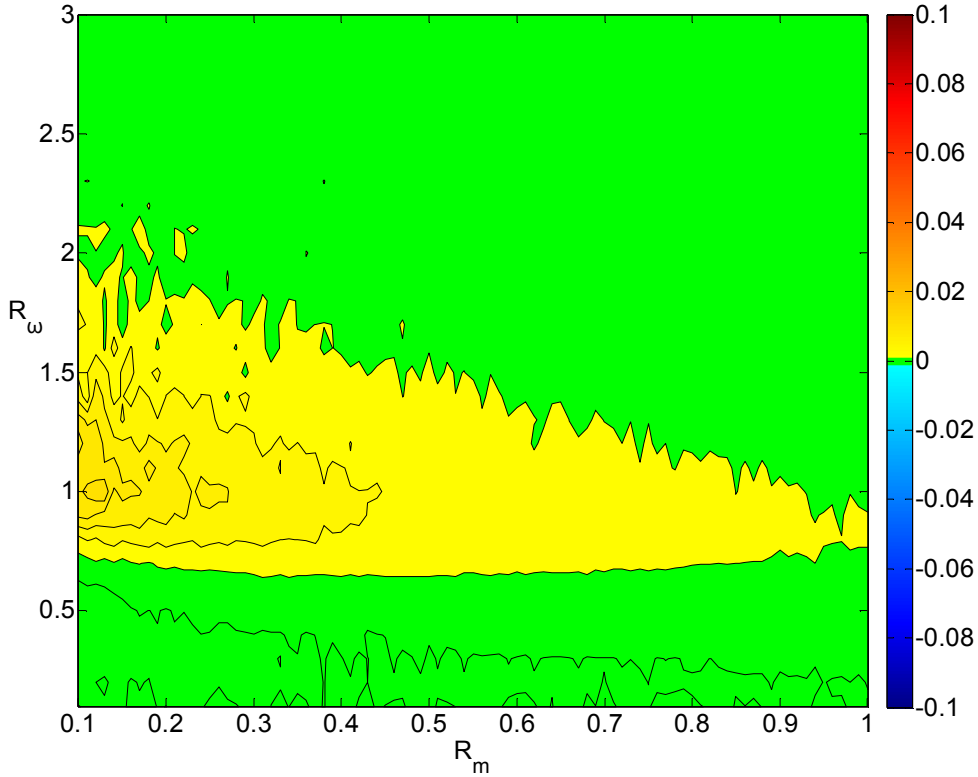
Εικ. 4.20: Σφάλμα μετατοπίσεων e_1^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



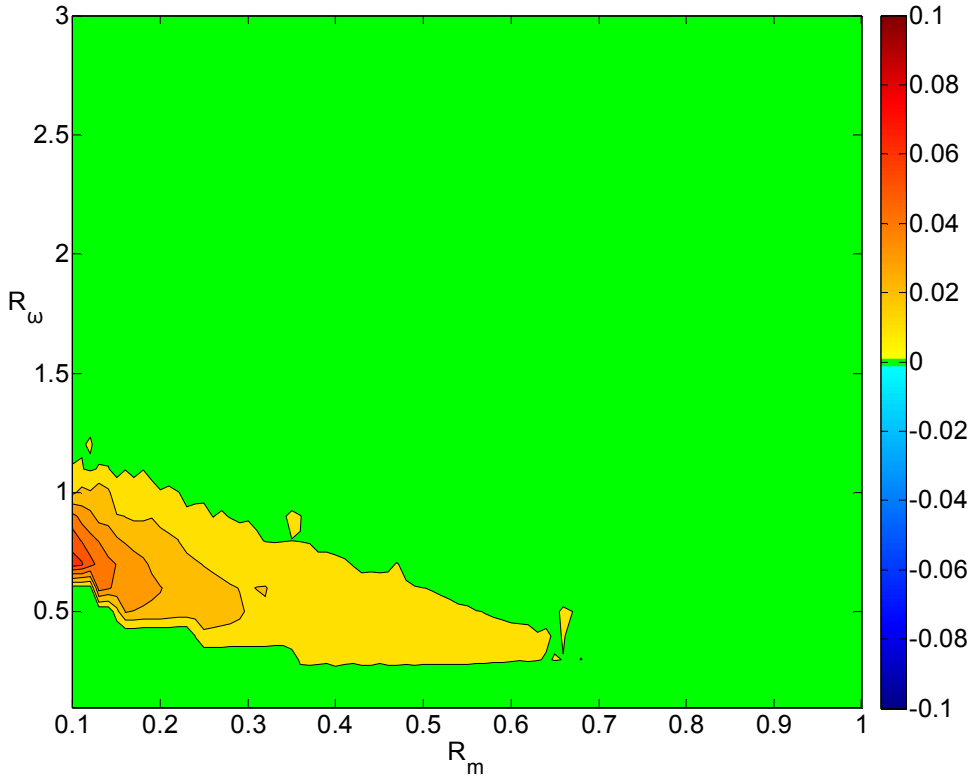
Εικ. 4.21: Σφάλμα μετατοπίσεων e_2^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



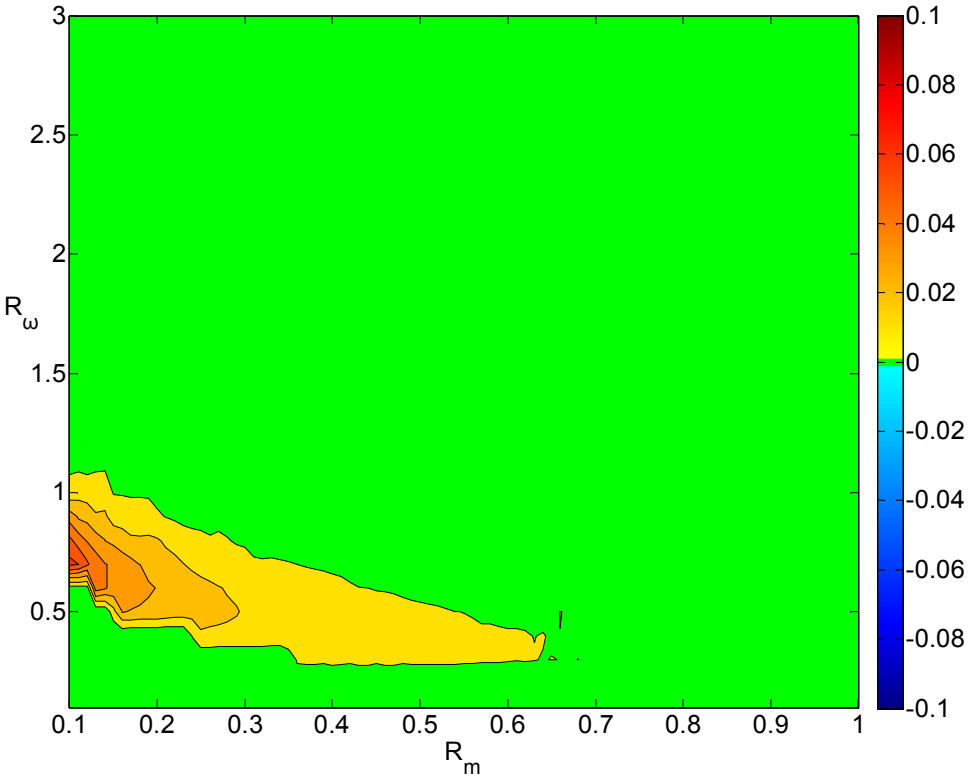
Εικ. 4.22: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_p^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



Εικ. 4.23: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_s^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



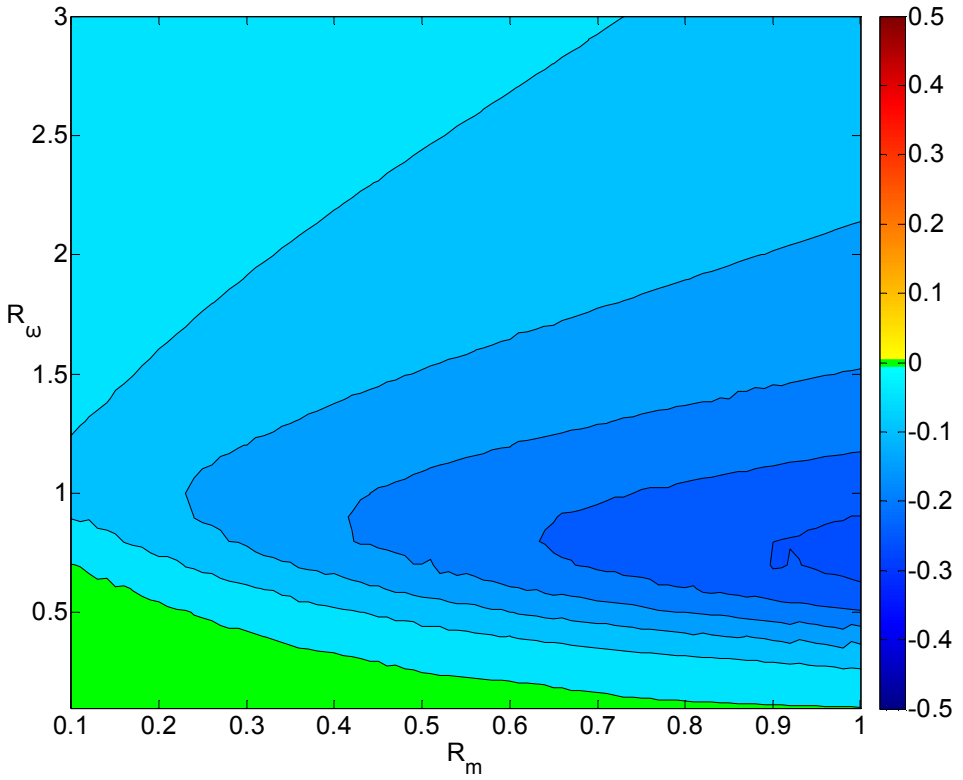
Εικ. 4.24: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_1^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση



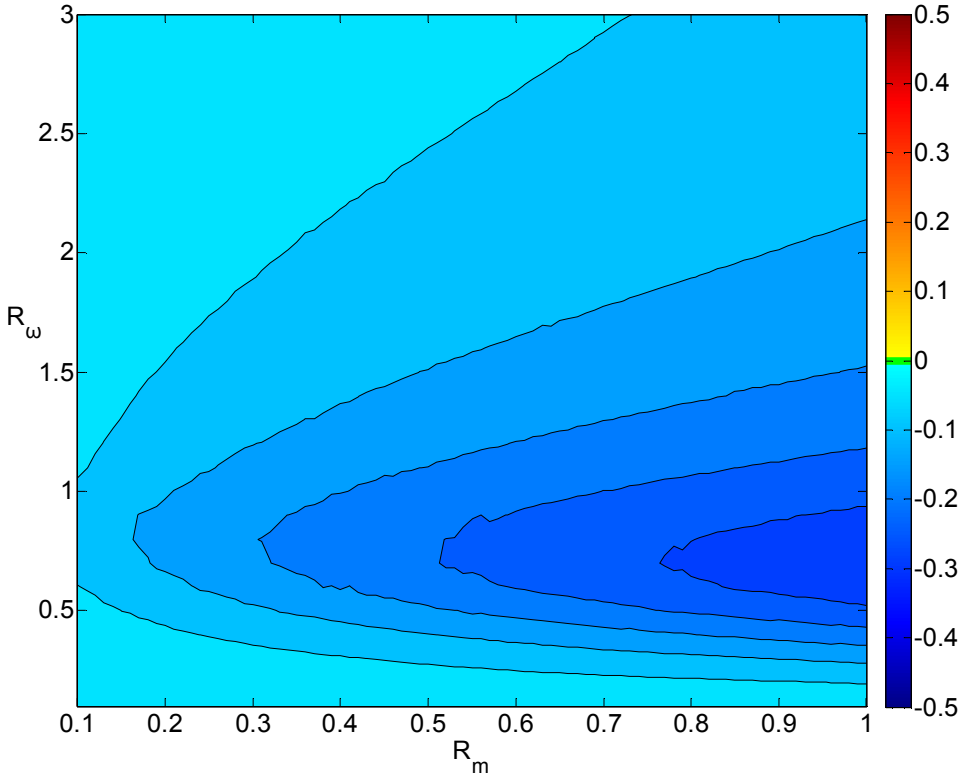
Εικ. 4.25: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_2^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω Εικ. 4.18 ως 4.25, τα σφάλματα που προκύπτουν από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης που υπολογίζονται από μιγαδική ανάλυση, σε μια συνηθισμένη ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας, είναι πολύ μικρά. Συγκεκριμένα, σε περιορισμένες μόνο περιοχές του επίπεδου (R_ω, R_m) το σφάλμα φτάνει το 10%, ενώ στην πλειονότητα των συνδυασμών των λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, στην πλειονότητα δηλαδή των κατασκευών, το σφάλμα είναι πολύ μικρό. Αυτό στις παραπάνω εικόνες απεικονίζεται με πράσινο χρώμα που υποδηλώνει σχεδόν μηδενικό σφάλμα. Μάλιστα, παρατηρείται μια συστηματική συμπεριφορά όσον αφορά το σφάλμα στην κάθε στάθμη. Έτσι, στη στάθμη p τα χρώματα είναι πράσινο και αποχρώσεις του μπλε, που σημαίνει από τον ορισμό του σφάλματος ότι η προσεγγιστική διαδικασία δίνει λίγο μεγαλύτερα μεγέθη απόκρισης, ενώ στη στάθμη s τα χρώματα είναι πράσινο και αποχρώσεις του κόκκινου που σημαίνει ότι η προσεγγιστική διαδικασία δίνει λίγο μικρότερα μεγέθη απόκρισης. Βέβαια, τα σφάλματα e_1 και e_2 εξ' ορισμού είναι μόνο θετικά, και για το λόγο αυτό τα χρώματα είναι πράσινο και αποχρώσεις του κόκκινου.

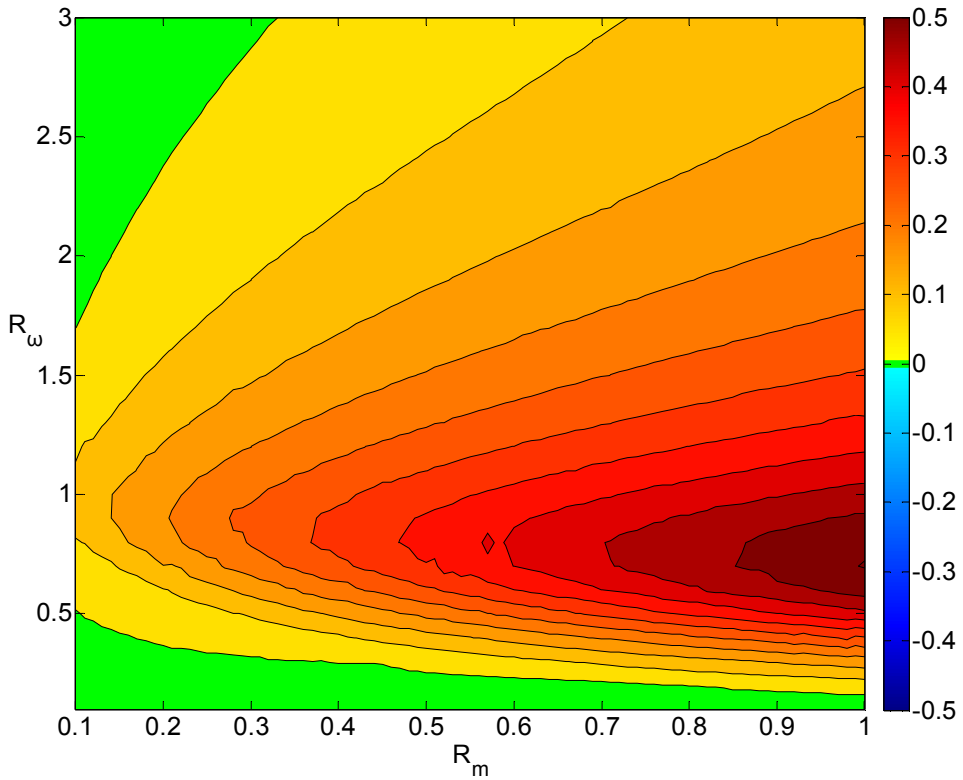
Ακολούθως, στην ίδια διαδικασία υποβάλλονται οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης που προτείνουν οι Huang et al. Συγκεκριμένα, σε κάθε διβάθμιο σύστημα του επιπέδου (R_ω, R_m) που έχει κατασκευαστεί με την παραπάνω διαδικασία, αντιστοιχίζονται οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης από την κατανομή των Εικ. 4.5 και 4.6, για την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή αντίστοιχα, αφού υπολογιστούν τα ιδιομορφικά μεγέθη από μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση. Το κάθε διβάθμιο υποβάλλεται σε μια αρμονική διέγερση σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στην Εικ. 4.17, και γίνεται μια πλήρης ανάλυση χρονοϊστορίας, με το μικτό μητρώο απόσβεσης, από την οποία αποκτάται η ορθή απόκριση σε κάθε στάθμη, και ακολούθως δύο ιδιομορφικές κλασσικές αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιώντας του συντελεστές των Huang et al., οπότε και προκύπτουν οι προσεγγιστικές αποκρίσεις των δύο σταθμών. Τέλος, υπολογίζεται το σφάλμα από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, όπως στις εξισώσεις (4.60) και (4.63), και (4.64) ως (4.67), και οι αντίστοιχες κατανομές στο επίπεδο των λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων φαίνονται στις Εικ. 4.26 ως 4.33.



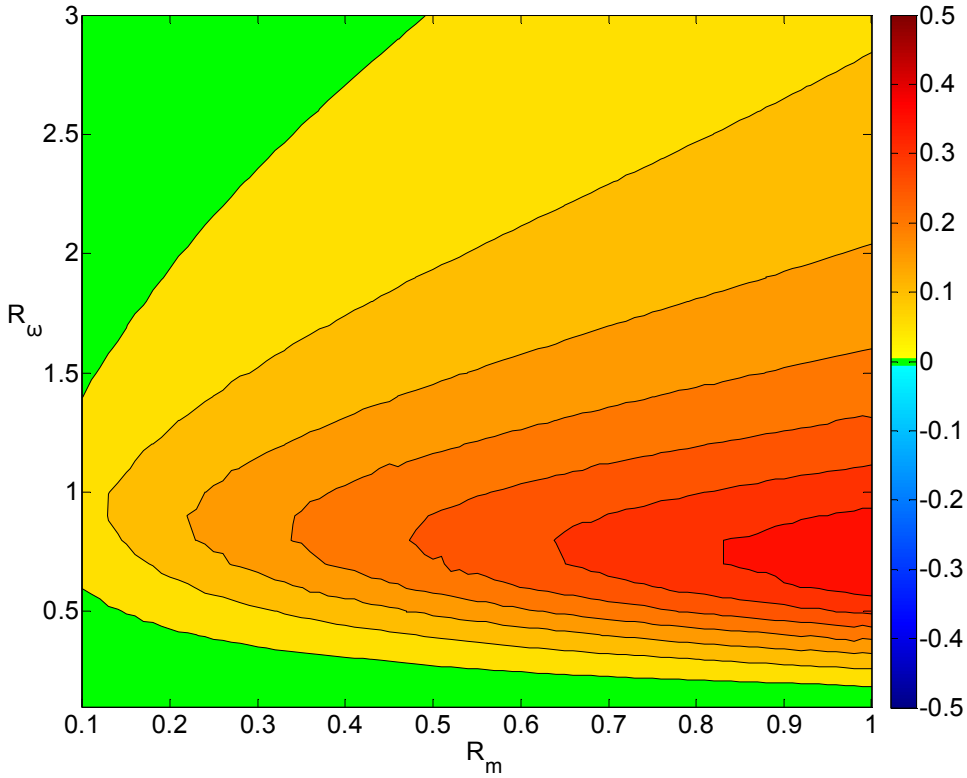
Εικ. 4.26: Σφάλμα μετατοπίσεων e_p^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



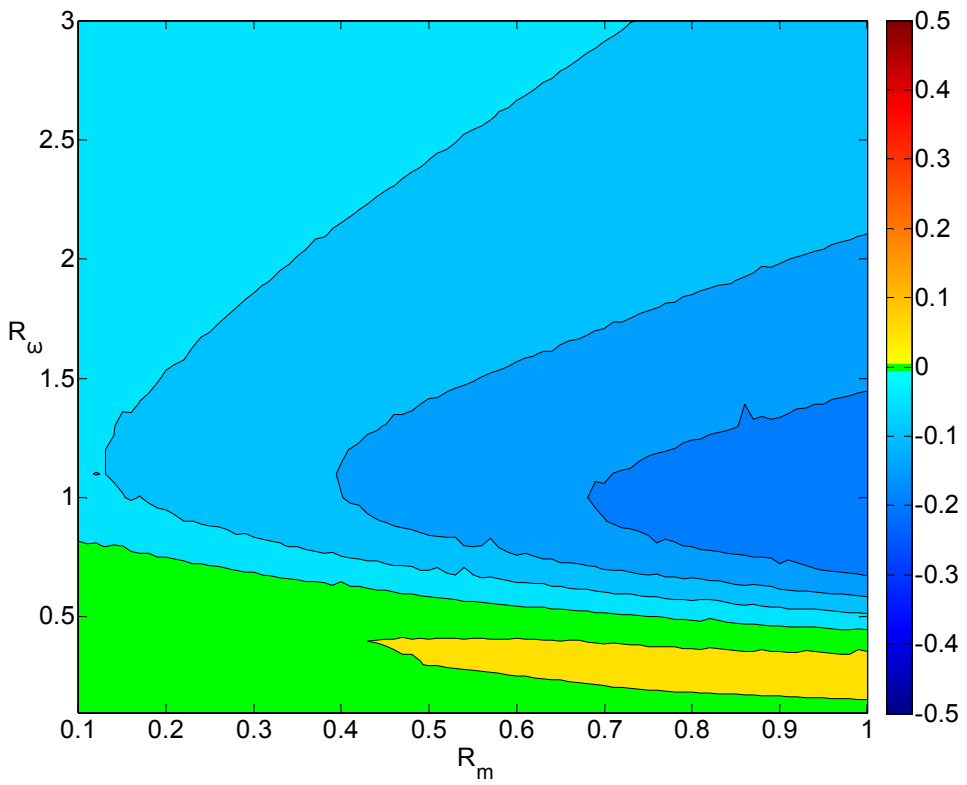
Εικ. 4.27: Σφάλμα μετατοπίσεων e_s^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



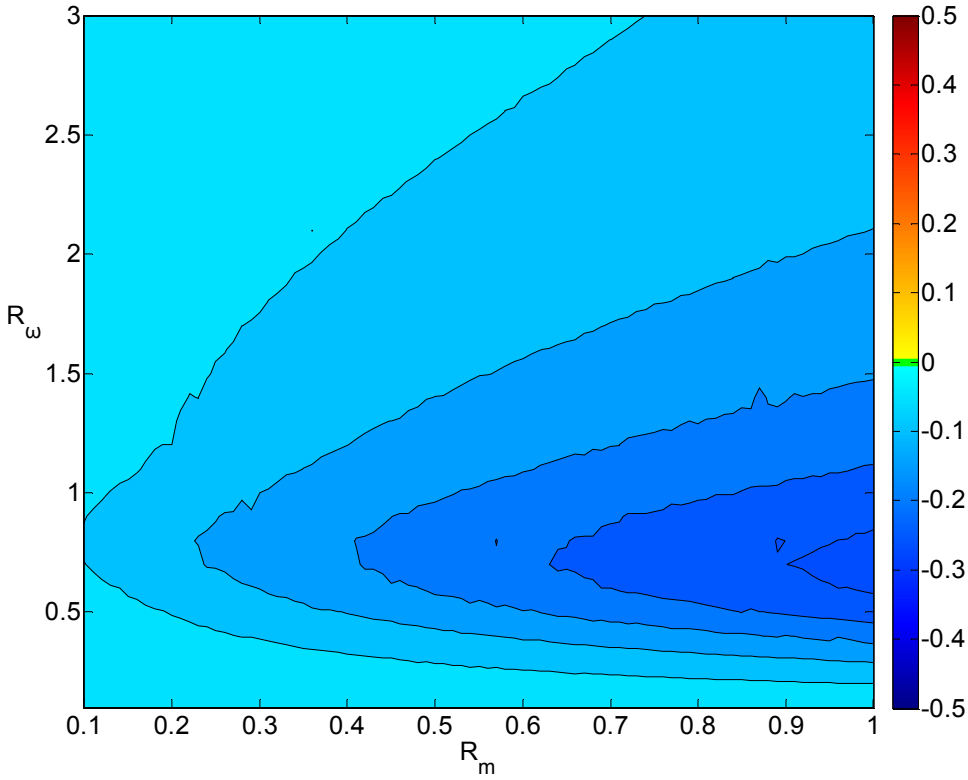
Εικ. 4.28: Σφάλμα μετατοπίσεων e_1^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



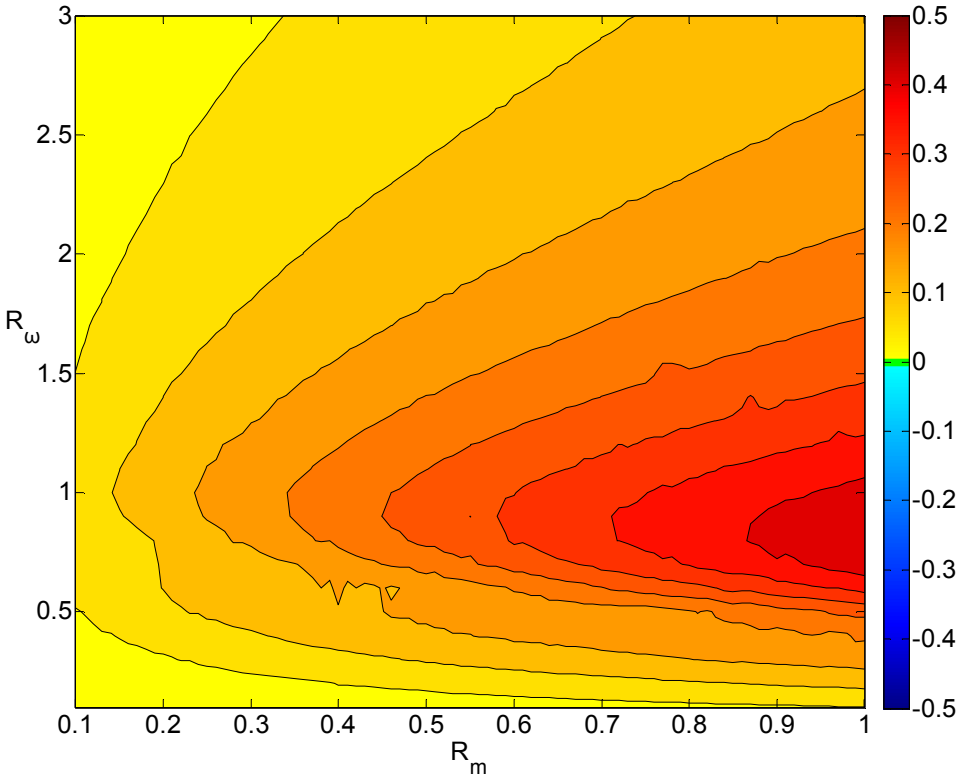
Εικ. 4.29: Σφάλμα μετατοπίσεων e_2^{disp} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



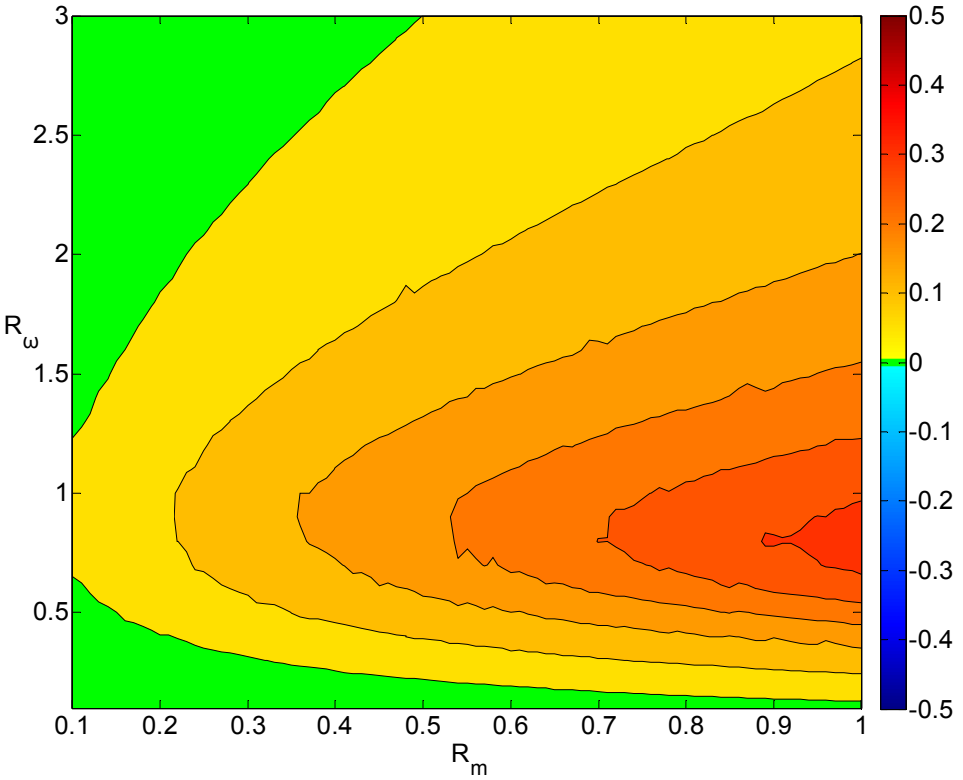
Εικ. 4.30: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_p^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



Εικ. 4.31: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_s^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



Εικ. 4.32: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_1^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al



Εικ. 4.33: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_2^{accl} από αρμονική σε συντονισμό διέγερση με ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης από Huang et al

Τα σφάλματα που προκύπτουν από τη χρήση των συντελεστών απόσβεσης της αναλυτικής διαδικασίας των Huang et al. είναι σαφώς μεγαλύτερα. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις των απλών σφαλμάτων e_p και e_s σε όρους μετατοπίσεων και απολύτων επιταχύνσεων, το σφάλμα πλησιάζει το 30% ή και 40%, ενώ είναι πολύ περιορισμένη η περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m) που οι τιμές του σφάλματος είναι σχεδόν μηδενικές. Μάλιστα, οι τιμές τους είναι σχεδόν παντού αρνητικές, πράγμα που σημαίνει ότι η προσεγγιστική ανάλυση με τους ιδιομορφικούς συντελεστές δίνει μεγαλύτερα μεγέθη απόκρισης. Στα σύνθετα σφάλματα e_1 και e_2, πάλι λόγω του ορισμού τους, οι τιμές είναι αποκλειστικά θετικές και μεγαλύτερες και πλησιάζουν το 50%.

Η διαφορά στα σφάλματα των δύο διαδικασιών οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης. Έτσι, στην αναλυτική διαδικασία των Huang et al. οι μη διαγώνιοι όροι του μητρώου απόσβεσης αγνοούνται στη διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών απόσβεσης. Αντίθετα, στην διαδικασία της εργασίας αυτής, λαμβάνεται υπόψη το πλήρες μητρώο απόσβεσης, εξάγονται οι συντελεστές απόσβεσης από την ορθή μιγαδική ανάλυση, και ακολουθεί η προσεγγιστική χρήση τους σε μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας. Το αποτέλεσμα είναι οι αποκρίσεις των σταθμών που προκύπτουν να πλησιάζουν την πραγματική συμπεριφορά της διβάθμιας κατασκευής.

4.11 Σφάλμα υπό σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις

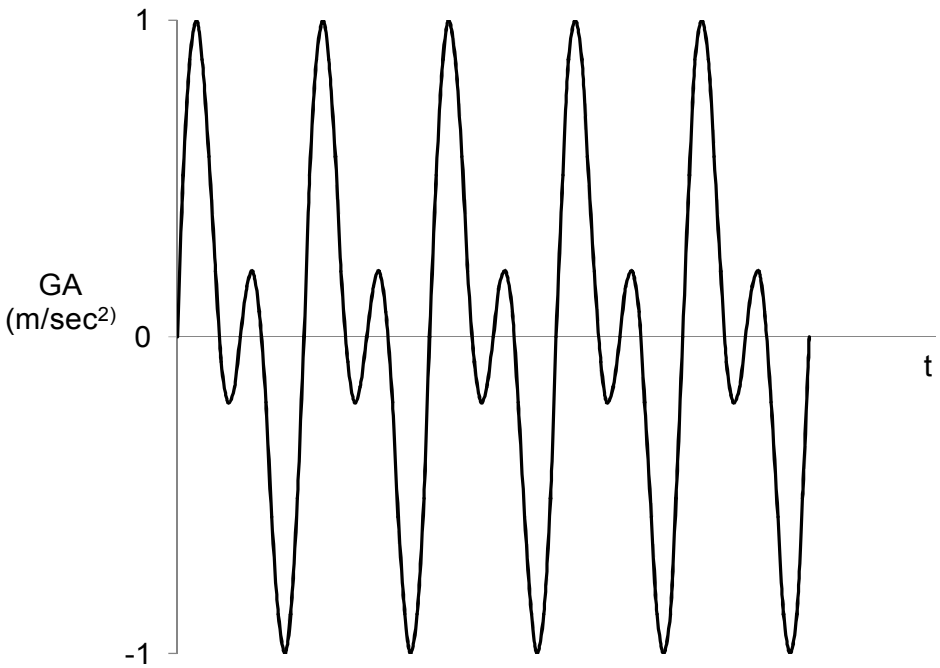
Προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας ισοδύναμης ιδιομορφικής ανάλυσης των μικτών κατασκευών, γίνεται αντικατάσταση της αρμονικής σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή διέγερσης με μια σύνθετη αρμονική διέγερση η οποία λαμβάνει υπόψη και διεγείρει και τις δύο ιδιομορφές. Σκοπός είναι να προκύψει μια διαφορετική διέγερση της ισοδύναμης διβάθμιας κατασκευής, και να διερευνηθεί το σφάλμα στην εκτίμηση της απόκρισης των δύο σταθμών.

Πάλι για κάθε μία από τις προηγούμενες κατασκευές του επίπεδου (R_ω, R_m) γίνεται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση και εξάγονται τα χαρακτηριστικά της κατασκευής

σε όρους ιδιοσυχνοτήτων, ιδιοδιανυσμάτων και ποσοστών συμμετοχής της κάθε ιδιομορφής, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις (4.12), (4.13) και (4.28). Έχοντας τις δύο ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, παράγονται δύο ημιτονοειδείς διεγέρσεις, η κάθε μια σε συντονισμό με την κάθε ιδιομορφή. Οι δύο αυτές διεγέρσεις πολλαπλασιάζονται με τον αντίστοιχο συντελεστή συμμετοχής και προστίθενται, και το άθροισμα διαιρείται με το απόλυτο μέγιστό του ώστε να προκύψει η τελική εδαφική διέγερση με πλάτος μονάδα:

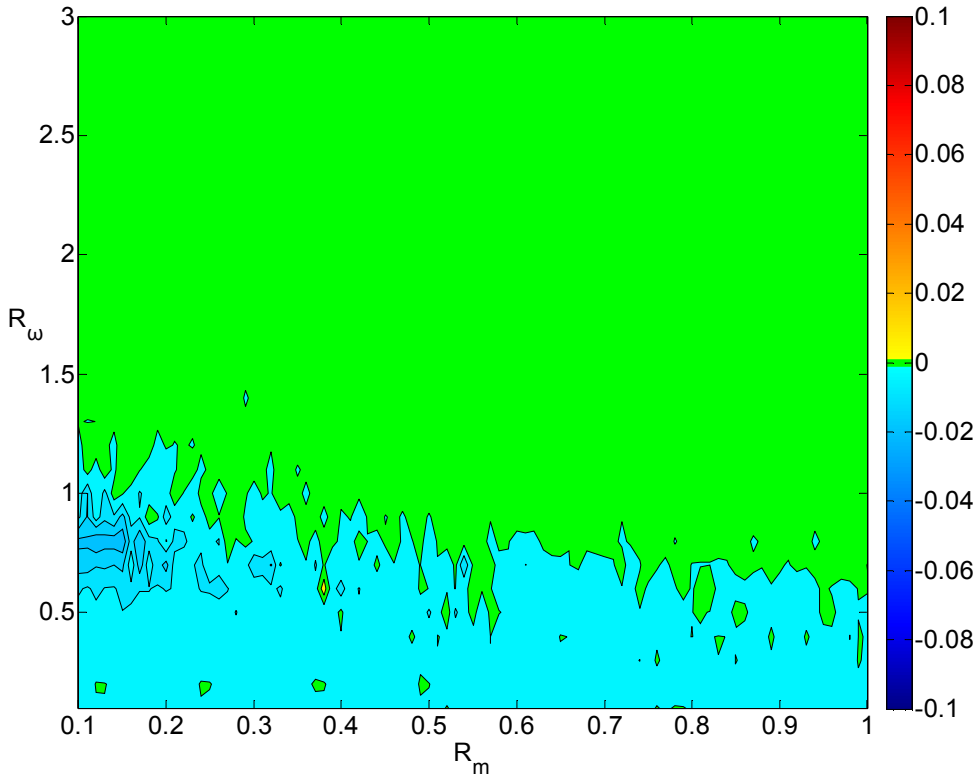
$$\ddot{x}_g(t) = \frac{\sum_i \Gamma_i \sin(\omega_i t)}{\max\left(\left|\sum_i \Gamma_i \sin(\omega_i t)\right|\right)}, i = 1,2 \tag{4.68}$$

Το αποτέλεσμα είναι μια σύνθετη αρμονική διέγερση, η οποία λαμβάνει υπόψη της και τις δύο ιδιομορφές, την κάθε μια ανάλογα με το συντελεστή συμμετοχής της για το κάθε διβάθμιο του επιπέδου (R_ω, R_m), και η οποία έχει τη μορφή της Εικ. 4.34.

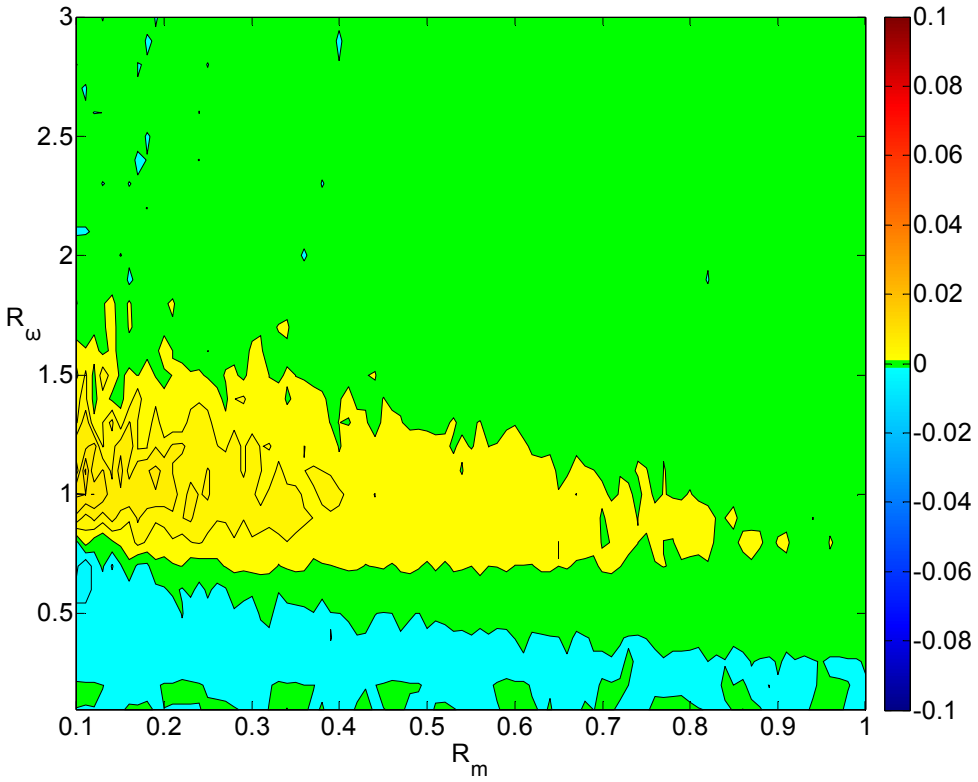


Εικ. 4.34: Σύνθετη αρμονική διέγερση

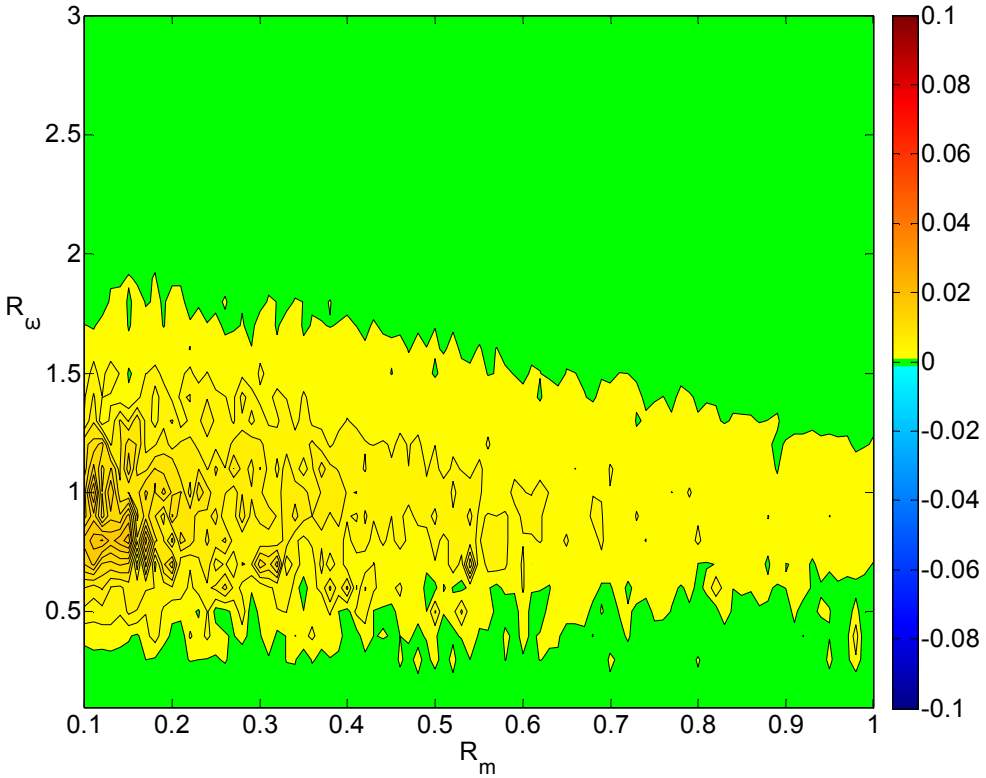
Πάλι για κάθε σημείο του επιπέδου γίνεται η ορθή και η προσεγγιστική ανάλυση που περιγράφηκε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας τις κατανομές απόσβεσης των Εικ. 4.7 και 4.8, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα χρησιμοποιείται ως διέγερση η σύνθετη αρμονική. Οι κατανομές σφάλματος που προκύπτουν φαίνονται στις Εικ. 4.35 ως 4.42, σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων.



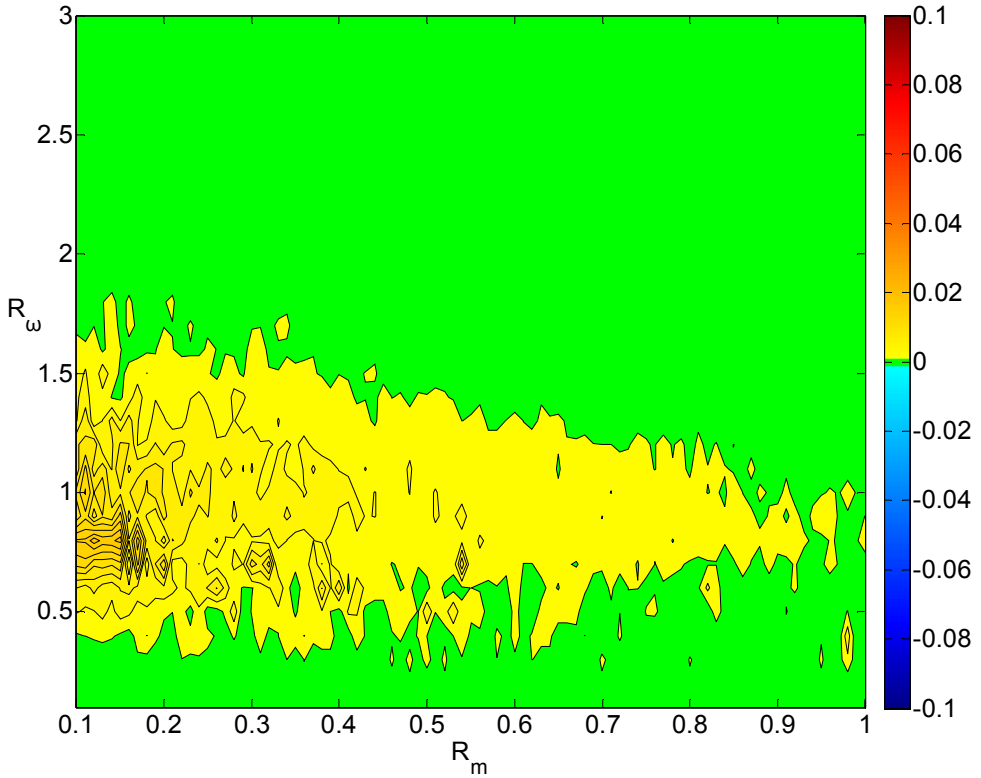
Εικ. 4.35: Σφάλμα μετατοπίσεων e_p^{disp} από σύνθετη αρμονική διέγερση



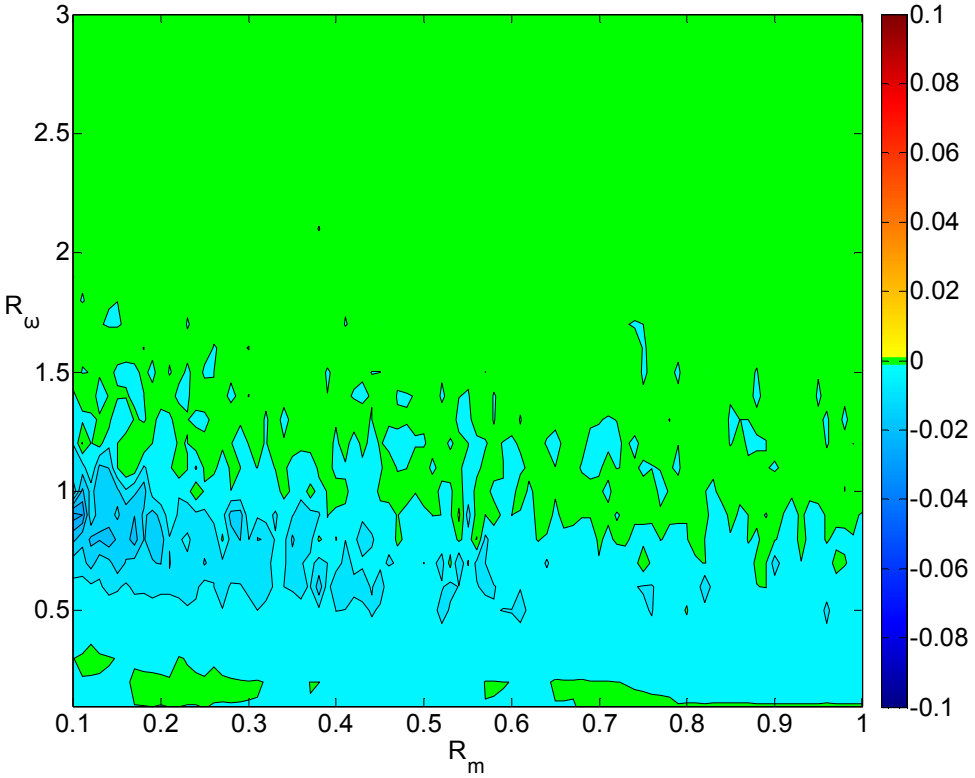
Εικ. 4.36: Σφάλμα μετατοπίσεων e_s^{disp} από σύνθετη αρμονική διέγερση



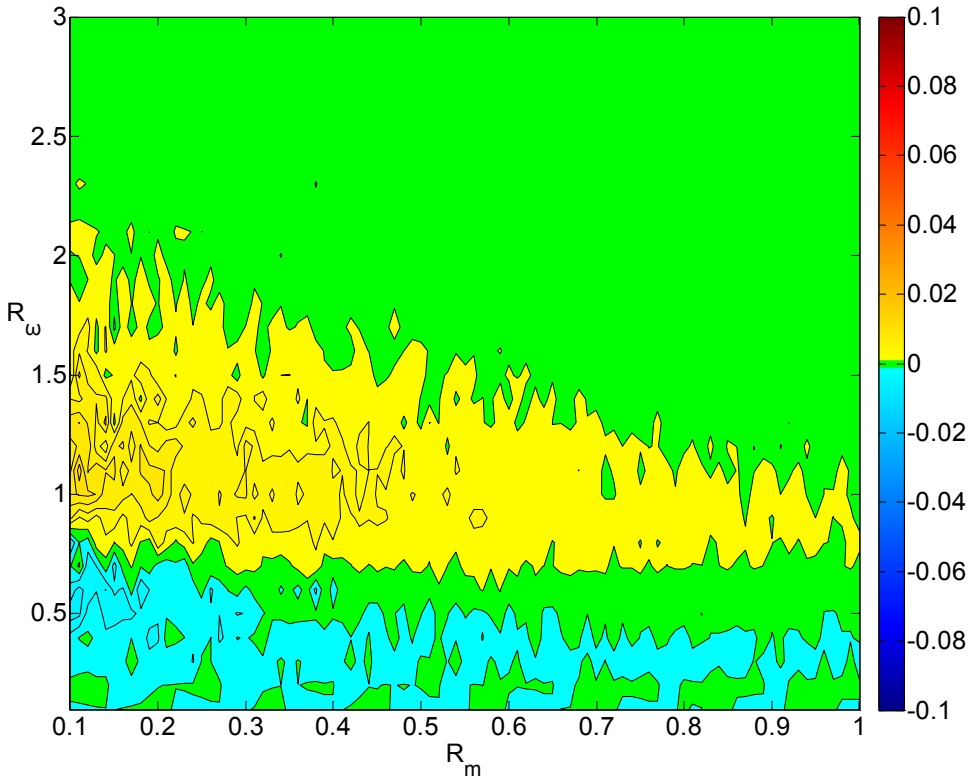
Εικ. 4.37: Σφάλμα μετατοπίσεων e_1^{disp} από σύνθετη αρμονική διέγερση



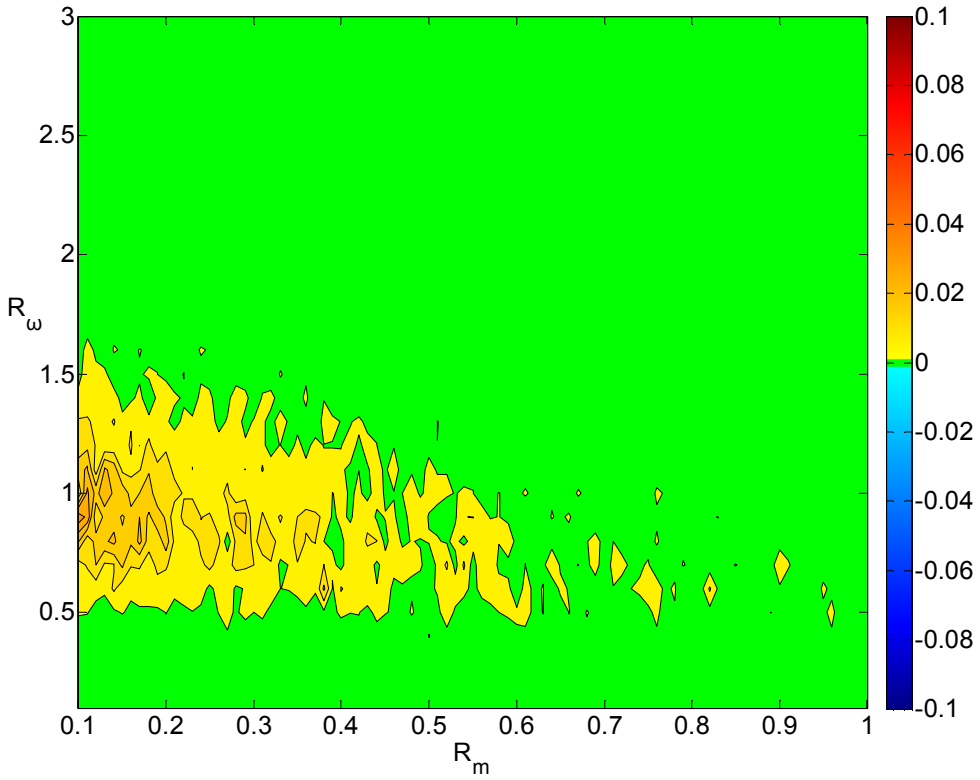
Εικ. 4.38: Σφάλμα μετατοπίσεων e_2^{disp} από σύνθετη αρμονική διέγερση



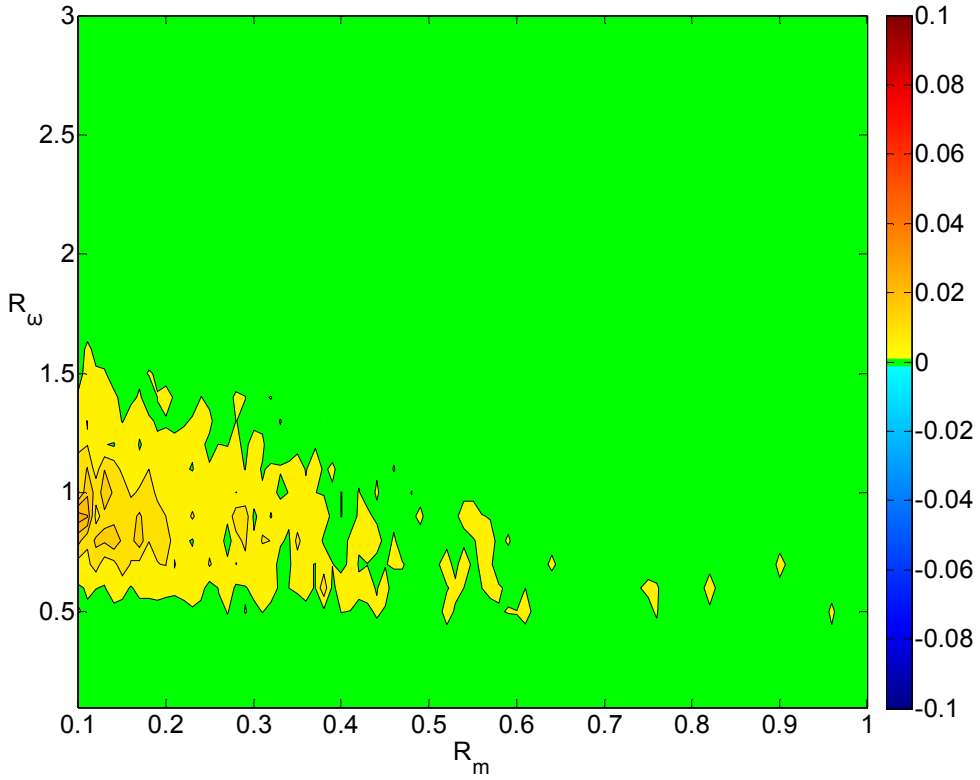
Εικ. 4.39: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_p^{accl} από σύνθετη αρμονική διέγερση



Εικ. 4.40: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_s^{accl} από σύνθετη αρμονική διέγερση



Εικ. 4.41: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_1^{accl} από σύνθετη αρμονική διέγερση



Εικ. 4.42: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_2^{accl} από σύνθετη αρμονική διέγερση

Στις παραπάνω Εικόνες, πάλι το πράσινο χρώμα υποδηλώνει σχεδόν μηδενικό σφάλμα, οι αποχρώσεις του κόκκινου σημαίνουν θετικές τιμές σφάλματος, δηλαδή υποεκτίμηση της απόκρισης από την προσεγγιστική ανάλυση, και οι αποχρώσεις του μπλε σημαίνουν αρνητικές τιμές σφάλματος, δηλαδή υπερεκτίμηση της απόκρισης από την προσεγγιστική διαδικασία, ενώ τα σφάλματα e_1 και e_2 λόγω ορισμού παίρνουν μόνο θετικές τιμές.

Η χρήση της σύνθετης αρμονικής διέγερσης δίνει σφάλματα της ίδιας τάξης μεγέθους με την απλή αρμονική σε συντονισμό διέγερση. Έτσι, και στις παραπάνω εικόνες, μεγάλο μέρος του επιπέδου (R_ω, R_m) έχει πράσινο χρώμα, υποδηλώνοντας έτσι ότι για τους συνδυασμούς αυτούς των λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων το σφάλμα από την ανάλυση κατασκευών που προσομοιώνονται με τους ισοδύναμους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης και που υπόκεινται σε σύνθετη αρμονική διέγερση είναι σχεδόν μηδενικό. Πέραν των περιοχών αυτών, υπάρχουν πάλι άλλες ζώνες του επιπέδου στις οποίες προκύπτει σφάλμα, το οποίο όμως δεν ξεπερνά το 10%.

Η διαφορά που προκύπτει τώρα είναι ότι δεν υπάρχει συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του σφάλματος, όπως στην περίπτωση της απλής αρμονικής σε συντονισμό διέγερσης. Αντίθετα, όπως φαίνεται στις Εικ. 4.36 και 4.40 που απεικονίζουν το σφάλμα μετατοπίσεων και απολύτων επιταχύνσεων της στάθμης s, η προσεγγιστική ανάλυση με τους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης οδηγεί σε άλλες περιπτώσεις σε υποεκτίμηση και σε άλλες σε υπερεκτίμηση της απόκρισης. Το γεγονός ότι τώρα η διέγερση διεγείρει έντονα και τις δύο ιδιομορφές τις κατασκευής, σε συνδυασμό με το σχήμα της ιδιομορφικής παραμόρφωσης της κατασκευής σε κάθε συνδυασμό λόγων R_ω και R_m, σε κάθε μια δηλαδή διβάθμια κατασκευή, οδηγεί σε σφάλμα θετικό ή αρνητικό, ανάλογα με την τελική απόκριση της στάθμης s.

Και στις δύο περιπτώσεις αρμονικής διέγερσης που εξετάζονται, οι κατανομές των σφαλμάτων μετατοπίσεων και επιταχύνσεων είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Αυτό εκ πρώτης όψεως είναι άτοπο, αφού για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή ιδιοσυχνότητας ω, τα μέγιστα των απολύτων επιταχύνσεων συνδέονται με τα μέγιστα των μετατοπίσεων με το τετράγωνο της ιδιοσυχνότητας:

$$\bar{a}_{max} = \omega^2 d_{max} \tag{4.69}$$

Αυτό όμως στις μικτές διβάθμιες κατασκευές δεν ισχύει, γιατί αφ' ενός προϋποθέτει μικρή και αναλογική απόσβεση, πράγμα που στην προκειμένη περίπτωση δεν ισχύει, και αφ' ετέρου, αν υποτεθεί ότι ισχύει για κάθε μια από τις δύο ιδιομορφές, δεν ισχύει και για το σύνολο της κατασκευής, αφού τα μέγιστα των ιδιομορφών δεν συμβαίνουν ταυτόχρονα. Μάλιστα, στην προκειμένη περίπτωση που η κατασκευή έχει μιγαδικές ιδιομορφές, με το φανταστικό μέρος του κάθε ιδιοδιανύσματος να υποδηλώνει διαφορά φάσης στην κίνηση, η χρονική σύνδεση των μεγίστων των δύο ιδιομορφών είναι ακόμα πιο δύσκολη, και κατά συνέπεια η εξίσωση (4.69) δεν ισχύει.

Ο τρόπος που υπολογίζεται το σφάλμα της κάθε στάθμης σε όρους μετατοπίσεων και απολύτων επιταχύνσεων από τις εξισώσεις (4.60) και (4.63) είναι αδιαστατοποιημένος. Αυτό έχει σαν συνέπεια, η αλλαγή του πλάτους των διεγέρσεων να μην επιφέρει αλλαγή στην κατανομή του σφάλματος, αφού για κάθε διβάθμια κατασκευή με συγκεκριμένα R_ω και R_m, αριθμητής και παρονομαστής στην εξίσωση υπολογισμού του σφάλματος μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο. Συγκεκριμένα, οι κατανομές του σφάλματος των Εικ. 4.18 ως 4.25, και των Εικ. 4.35 ως 4.42 επιβεβαιώνονται και με τη χρήση των δύο αρμονικών διεγέρσεων, όταν αυτές κανονικοποιηθούν ώστε να έχουν μέγιστο πλάτος ίσο με 0.36g.

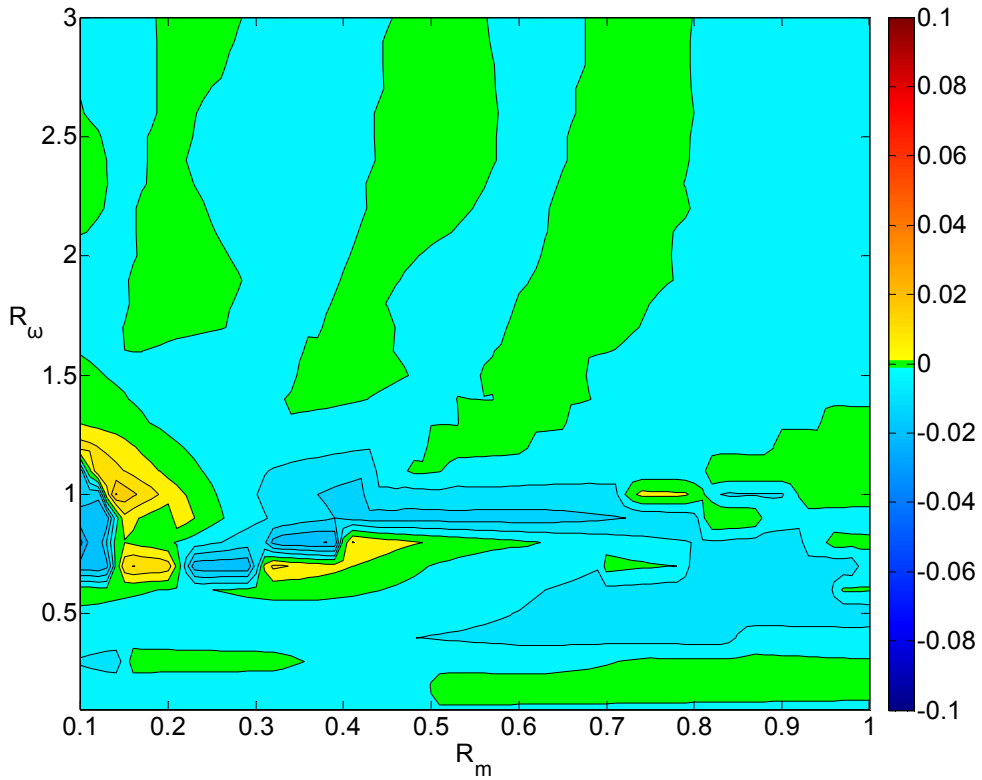
Και στις δύο περιπτώσεις εδαφικής διέγερσης, απλή αρμονική σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή και σύνθετη αρμονική, το σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης είναι μικρό, για όλες τις κατασκευές που αντιστοιχούν στα σημεία του επιπέδου (R_ω, R_m), για όλες τις κατασκευές δηλαδή ενδιαφέροντος πολιτικού μηχανικού. Οι δύο αυτοί τύποι διεγέρσεων χρησιμοποιήθηκαν γιατί λόγω του συντονισμού τους, με την πρώτη ή και με τις δύο ιδιομορφές, είναι αυτοί που μπορούν να μεγιστοποιήσουν τα σφάλμα στην εκτίμηση της απόκρισης της κατασκευής. Έτσι, δεδομένου ότι το σφάλμα αυτό κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, ενθαρρύνεται η χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης που προκύπτουν από τη μιγαδική διαδικασία ανάλυση και σε σεισμικές διεγέρσεις προκειμένου να διερευνηθεί το σφάλμα που προκύπτει και σε αυτές τις περιπτώσεις φόρτισης.

4.12 Σφάλμα υπό σεισμικές διεγέρσεις

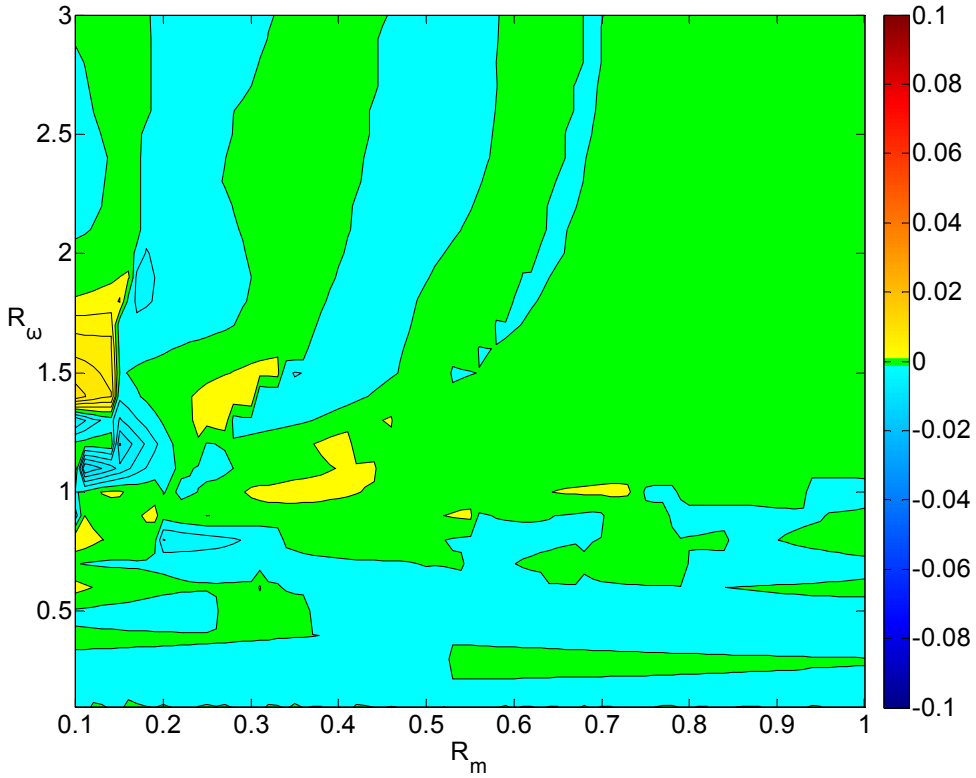
Με δεδομένα τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα από τη δοκιμή των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης των Εικ. 4.7 και 4.8 σε διβάθμια συστήματα υπό αρμονικές διεγέρσεις, ακολουθεί η διερεύνησή τους σε περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων. Η διερεύνηση γίνεται για διβάθμιες κατασκευές οι οποίες πάλι καλύπτουν όλους τους συνδυασμούς λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων του επιπέδου (R_ω, R_m). Προκειμένου να κατασκευαστούν, υιοθετείται πάλι το υπόβαθρο με μάζα 20Mgr και ιδιοπερίοδο 0.2s, που βρίσκεται στο πλατό του κανονιστικού φάσματος, και με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της στάθμης p ρυθμίζονται τα χαρακτηριστικά του διβάθμιου με τους λόγους R_ω και R_m.

Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι δέκα σεισμικές καταγραφές που έχουν παρουσιαστεί στην ενότητα 2.9, και που χρησιμοποιήθηκαν και στη μελέτη της απόσυζευξης. Το κάθε διβάθμιο σύστημα του επιπέδου υποβάλλεται σε κάθε μία καταγραφή και κατά την ορθή ανάλυση, στην οποία εκτελείται η πλήρης ανάλυση χρονοϊστορίας με το μικτό μητρώο απόσβεσης, και κατά την προσεγγιστική κλασσική ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας, στην οποία χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι με τα R_ω και R_m της κατασκευής ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης από την μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση. Το σφάλμα που προκύπτει υπολογίζεται σε όρους μετατοπίσεων από την εξίσωση (4.60) και σε όρους επιταχύνσεων από την εξίσωση (4.63). Τέλος, πάλι προκειμένου να αποκτηθεί μια συνολική εικόνα για το σφάλμα του κάθε διβάθμιου με τη χρήση ενός μόνο κριτηρίου σφάλματος, υπολογίζονται και τα σφάλματα e_1 και e_2, σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, όπως περιγράφεται στις εξισώσεις (4.64) ως (4.67).

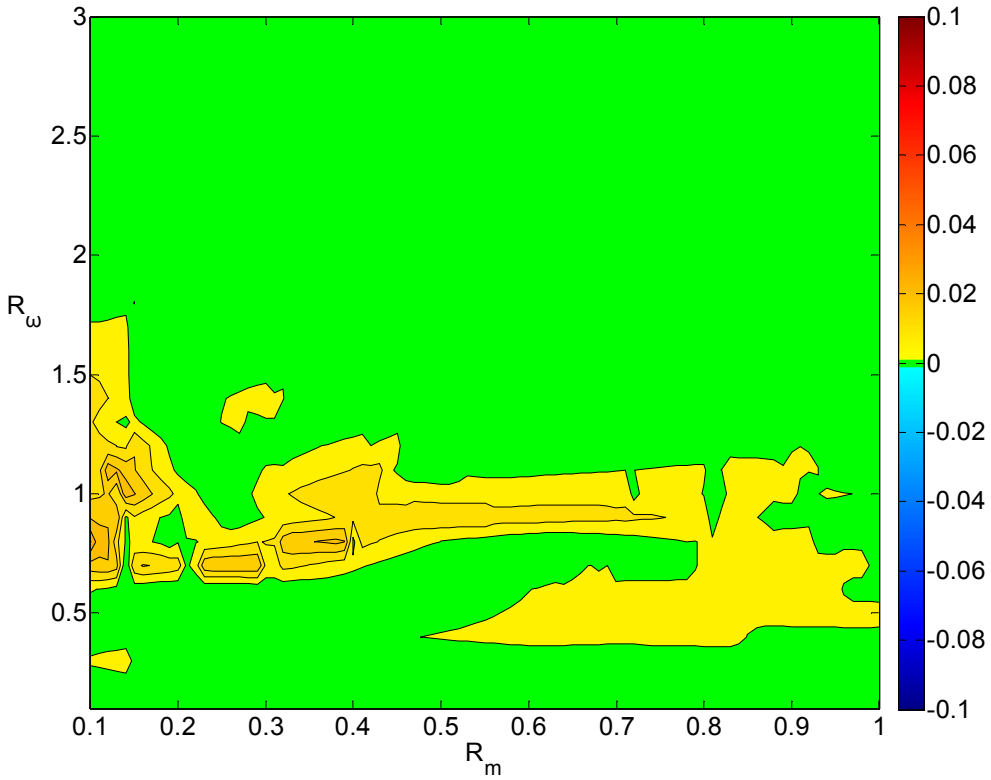
Στις Εικ. 4.43 ως 4.50 φαίνονται οι κατανομές των παραπάνω σφαλμάτων στις κατασκευές του επιπέδου (R_ω, R_m) όταν η διέγερση είναι αυτή του σεισμού του Northridge. Η χρωματική κλίμακα παραμένει η ίδια, πράγμα που σημαίνει ότι το πράσινο χρώμα υποδηλώνει σφάλμα σχεδόν μηδενικό, οι αποχρώσεις του κόκκινου υποδηλώνουν θετικές τιμές σφάλματος, άρα υποεκτίμηση της απόκρισης από την προσεγγιστική ανάλυση, και οι αποχρώσεις του μπλε σημαίνουν αρνητικές τιμές σφάλματος, δηλαδή υπερεκτίμηση της απόκρισης από την προσεγγιστική ανάλυση, σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.60) και (4.63).



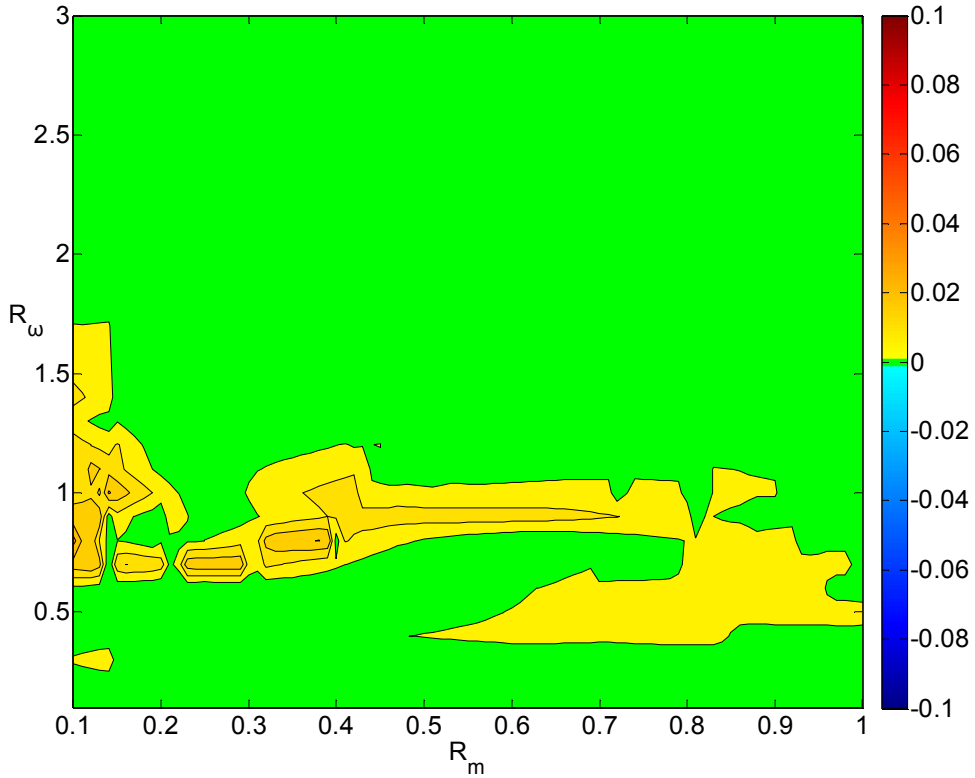
Εικ. 4.43: Σφάλμα μετατοπίσεων e_p^{disp} με διέγερση το Northridge



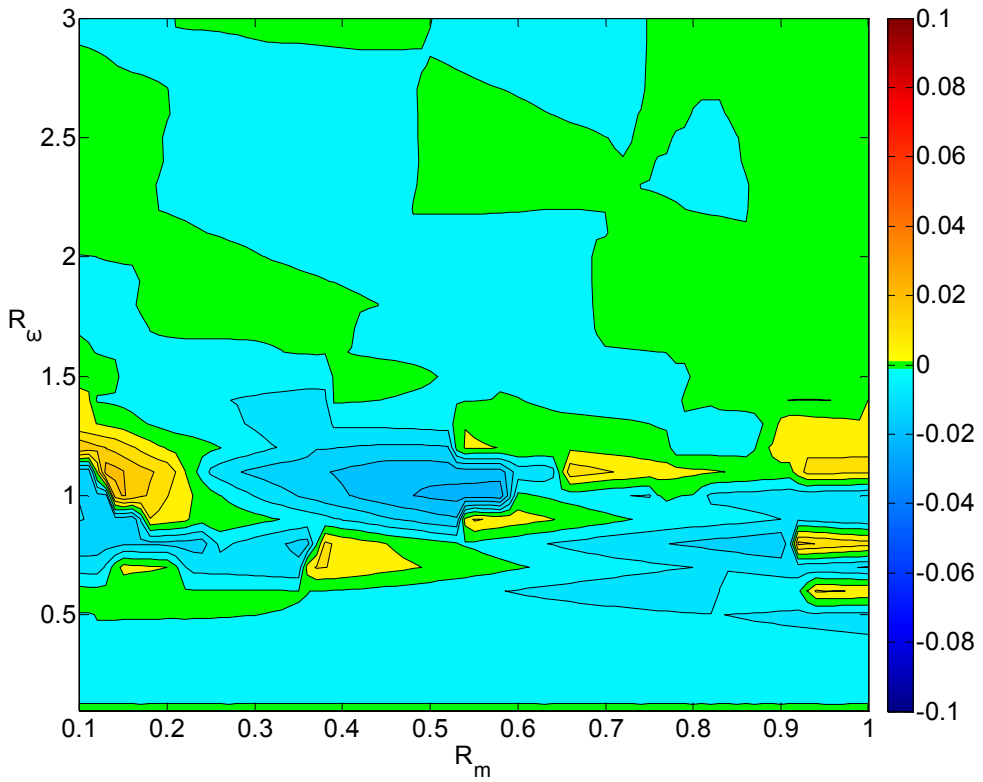
Εικ. 4.44: Σφάλμα μετατοπίσεων e_s^{disp} με διέγερση το Northridge



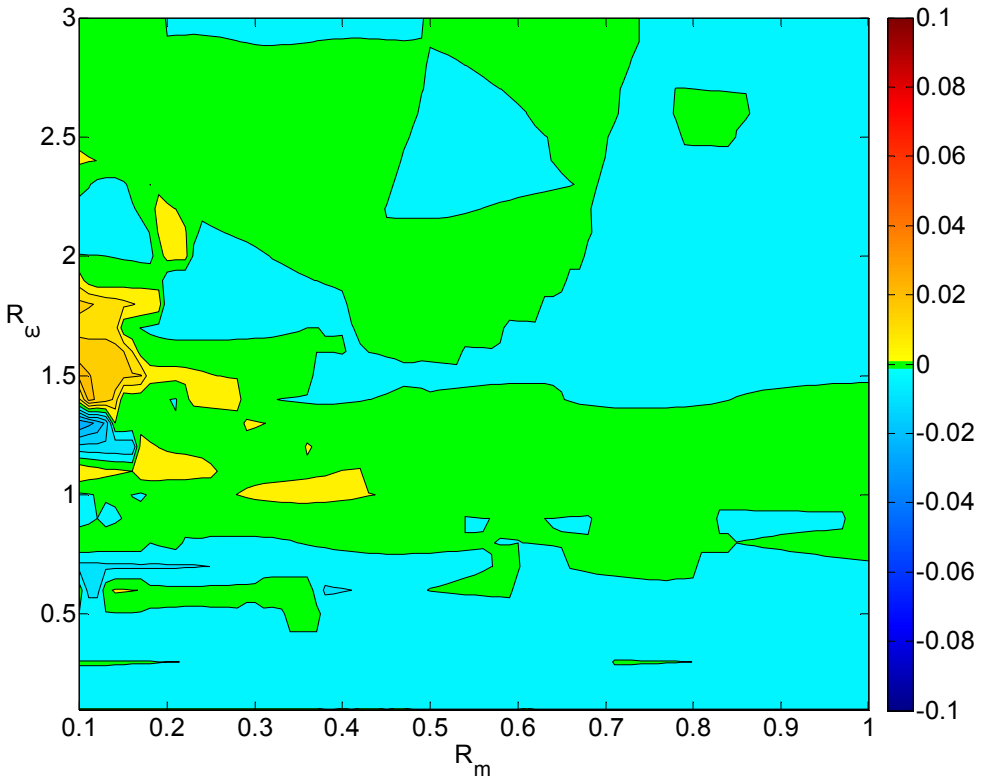
Εικ. 4.45: Σφάλμα μετατοπίσεων e_1^{disp} με διέγερση το Northridge



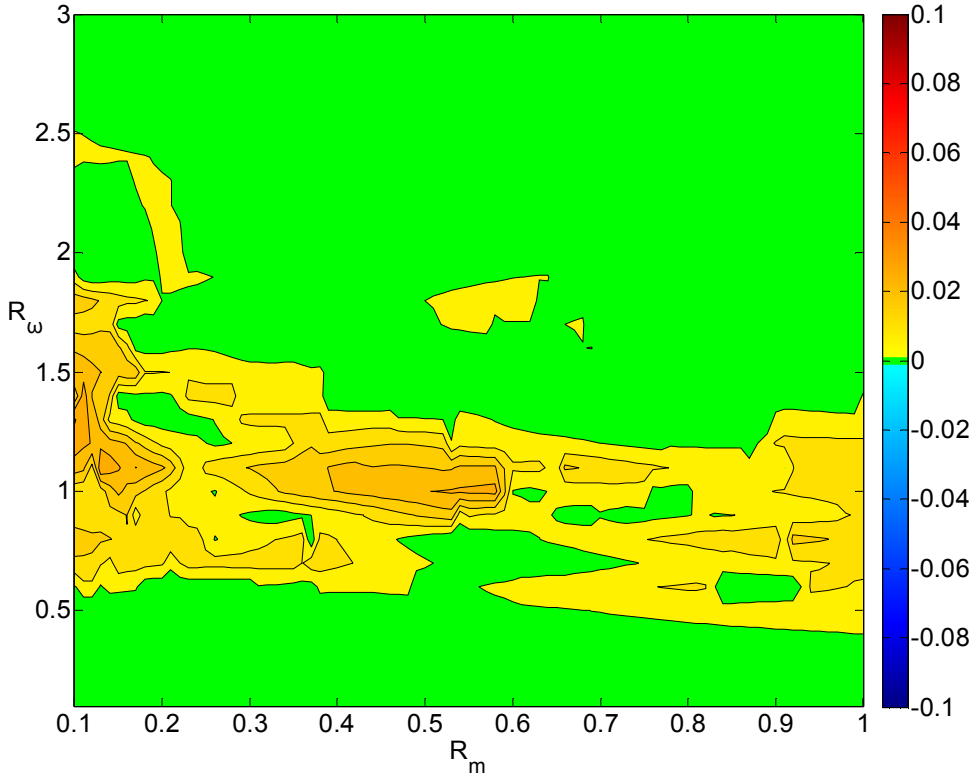
Εικ. 4.46: Σφάλμα μετατοπίσεων e_2^{disp} με διέγερση το Northridge



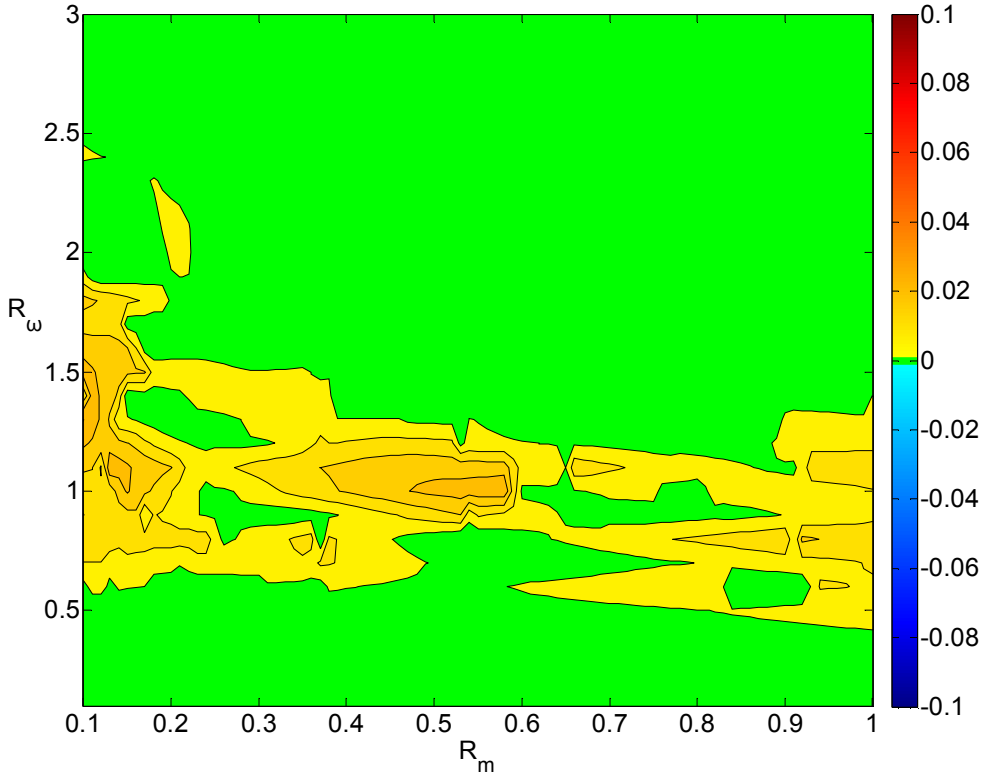
Εικ. 4.47: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_p^{accl} με διέγερση το Northridge



Εικ. 4.48: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_s^{accl} με διέγερση το Northridge



Εικ. 4.49: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_1^{accl} με διέγερση το Northridge



Εικ. 4.50: Σφάλμα απολύτων επιταχύνσεων e_2^{accl} με διέγερση το Northridge

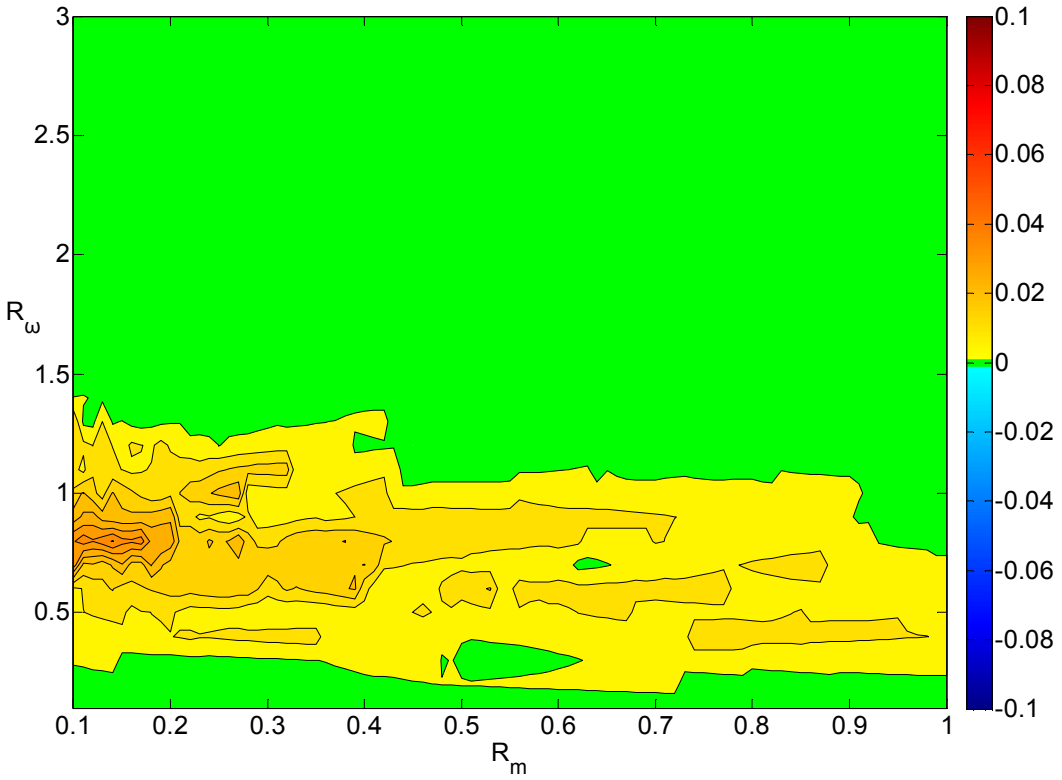
Οι κατανομές σφάλματος που φαίνονται στις Εικ. 4.43 ως 4.50 κυμαίνονται στα ίδια ή και σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτά των αρμονικών διεγέρσεων. Έτσι, για όλους τους συνδυασμούς λόγων R_ω και R_m, το σφάλμα που προκύπτει σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων είναι μικρότερο του 10%, ενώ σε μεγάλες περιοχές του επιπέδου (R_ω, R_m), τα σφάλματα είναι σχεδόν μηδενικά. Τώρα όμως, το πρόσημο των σφαλμάτων των σταθμών p και s δεν είναι σταθερό, ούτε έχει σαφή κατανομή στο επίπεδο όπως προηγουμένως, αλλά έχει εντελώς μη κανονική κατανομή. Αυτό οφείλεται στο ότι η σεισμική καταγραφή δεν ενισχύει ομοιόμορφα την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή των διβάθμιων ταλαντωτών του επιπέδου, όπως συνέβαινε μέχρι στιγμής με τις αρμονικές διεγέρσεις, με αποτέλεσμα, και ανάλογα με τα ιδιομορφικά σχήματα παραμόρφωσης, η υποεκτίμηση ή η υπερεκτίμηση της απόκρισης να μη συμβαίνει με συστηματικό τρόπο. Αυτό βέβαια δεν ισχύει για τα σφάλματα e_1 και e_2 που εξ' ορισμού είναι θετικά.

Για κάθε σημείο του επιπέδου, γίνεται η ορθή και η προσεγγιστική ανάλυση και με τις δέκα καταγραφές, και προκειμένου να προκύψουν γενικότερες κατανομές σφαλμάτων οι οποίες να περιλαμβάνουν και τις 10 καταγραφές, υπολογίζονται τα μέγιστα των απολύτων τιμών των σφαλμάτων των σταθμών p και s και τα μέγιστα των σφαλμάτων e_1 και e_2, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.70) και (4.71).

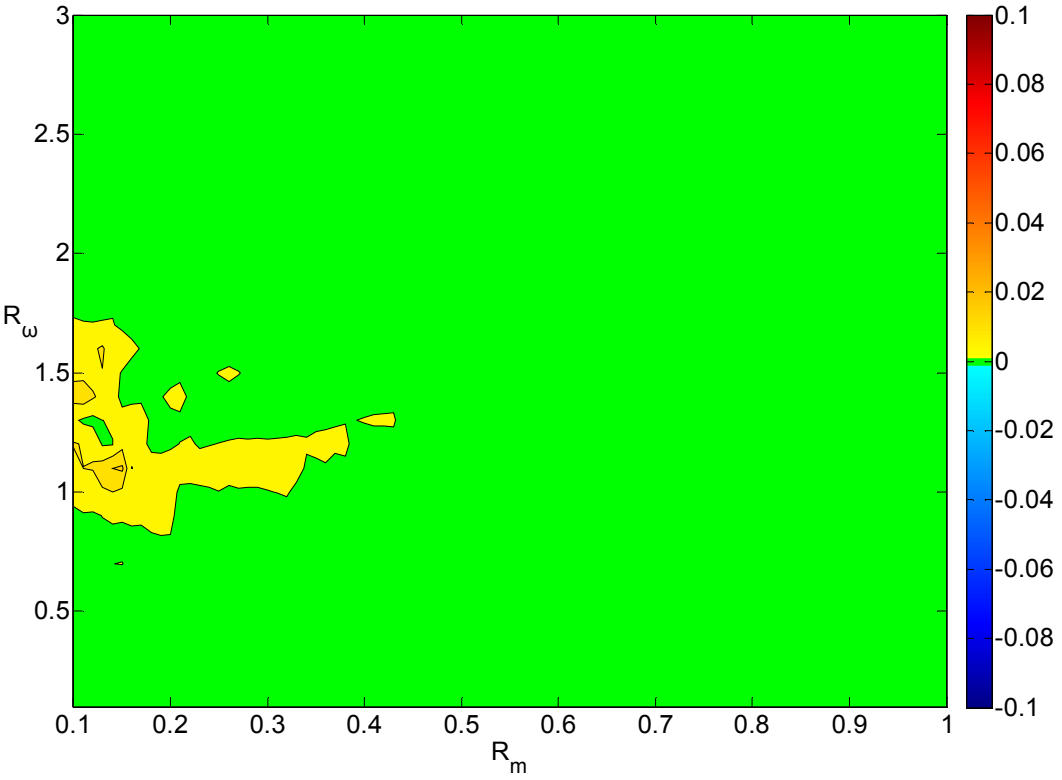
$$^{seism}e_i^{accl} = \max\left(\left|{}^{j}e_i^{accl}\right|\right), \quad ^{seism}e_i^{disp} = \max\left(\left|{}^{j}e_i^{disp}\right|\right), i = s,p \,/\, j = 1,2...10 \qquad (4.70)$$

$$^{seism}e_1^{accl} = \max\left({}^{j}e_1^{accl}\right), \quad ^{seism}e_2^{accl} = \max\left({}^{j}e_2^{accl}\right), j = 1,2...10 \qquad (4.71)$$

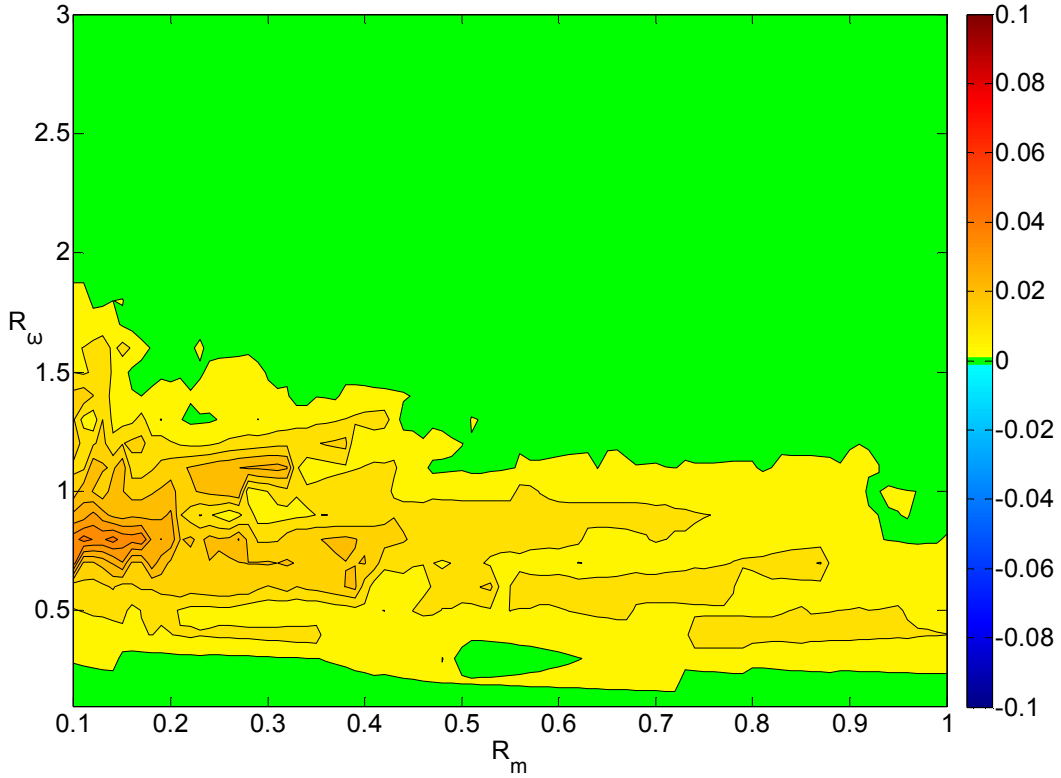
Με τον τρόπο αυτό, αποκτώνται οι περιβάλλουσες στο επίπεδο (R_ω, R_m) των κατανομών των σφαλμάτων που προκύπτουν από τις δέκα σεισμικές διεγέρσεις. Οι περιβάλλουσες αυτές, οι οποίες φαίνονται στις Εικ. 4.51 ως 4.58, λόγω του ορισμού τους, είναι οι δυσμενέστερες δυνατές καθώς για κάθε σημείο του επιπέδου ισούνται με τη μεγαλύτερη τιμή σφάλματος από τις δέκα επιμέρους. Οι κατανομές αυτές είναι μόνο θετικές, οπότε τα χρώματα που υπάρχουν τώρα είναι πράσινο, για σχεδόν μηδενικά σφάλματα, και αποχρώσεις του κόκκινου, και δεν υπάρχουν οι αποχρώσεις του μπλε. Και οι νέες αυτές κατανομές, αν και είναι συντηρητικές από τον τρόπο υπολογισμού τους, δίνουν αρκετά μικρά σφάλματα, μικρότερα από 10%, ενώ πάλι μεγάλες περιοχές του επιπέδου έχουν σχεδόν μηδενικό σφάλμα.



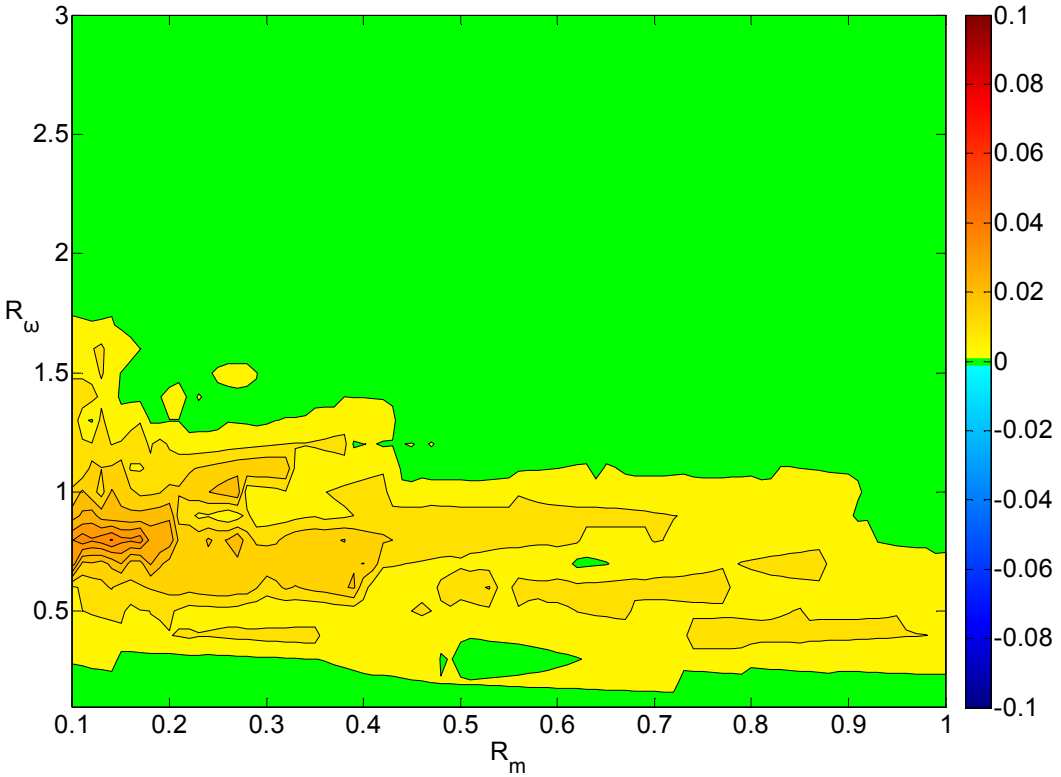
Εικ. 4.51: Περιβάλλουσα σφαλμάτων μετατοπίσεων e_p^{disp} από σεισμικές διεγέρσεις



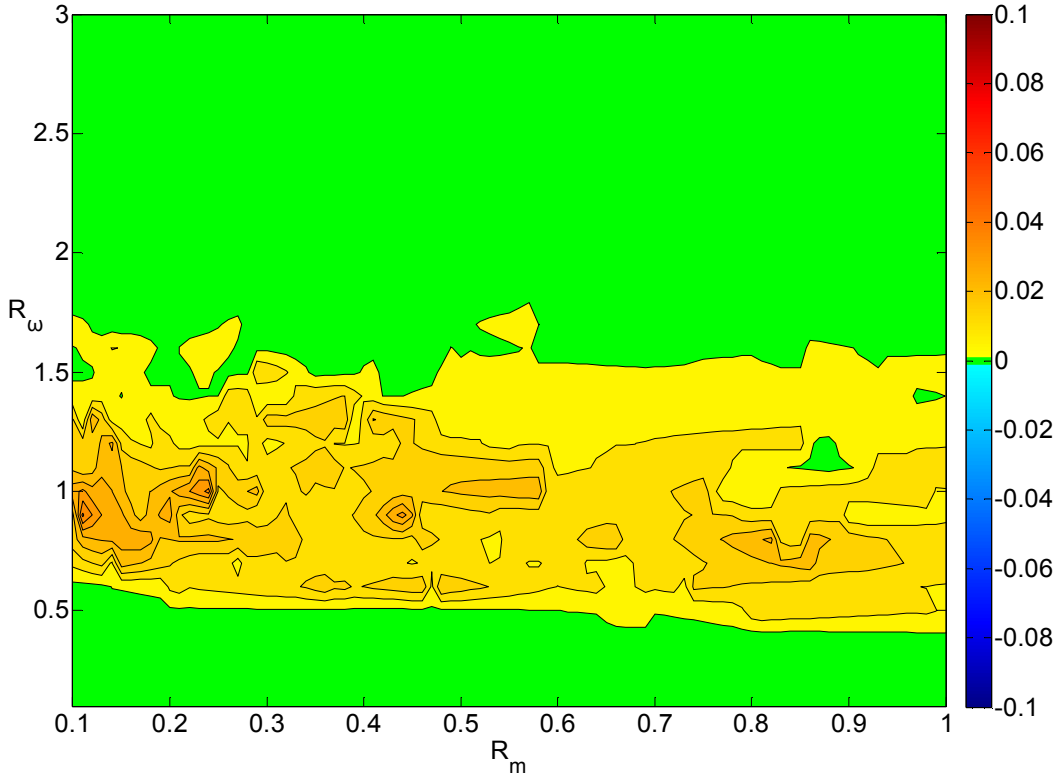
Εικ. 4.52: Περιβάλλουσα σφαλμάτων μετατοπίσεων e_s^{disp} από σεισμικές διεγέρσεις



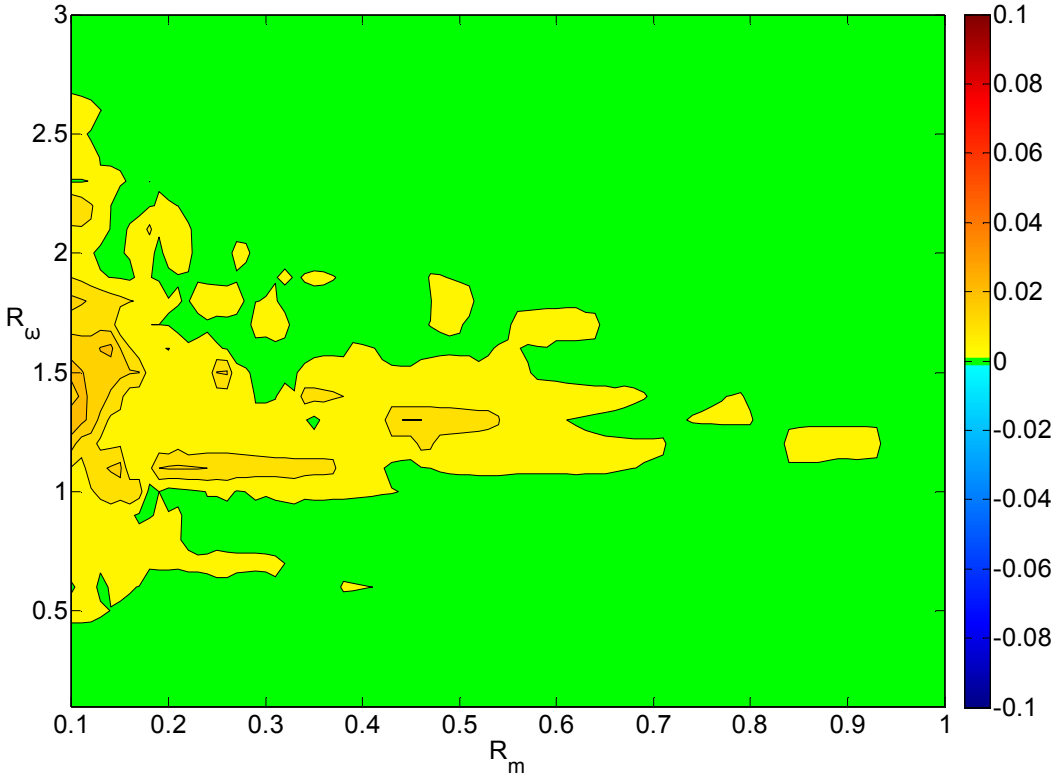
Εικ. 4.53: Περιβάλλουσα σφαλμάτων μετατοπίσεων e_1^{disp} από σεισμικές διεγέρσεις



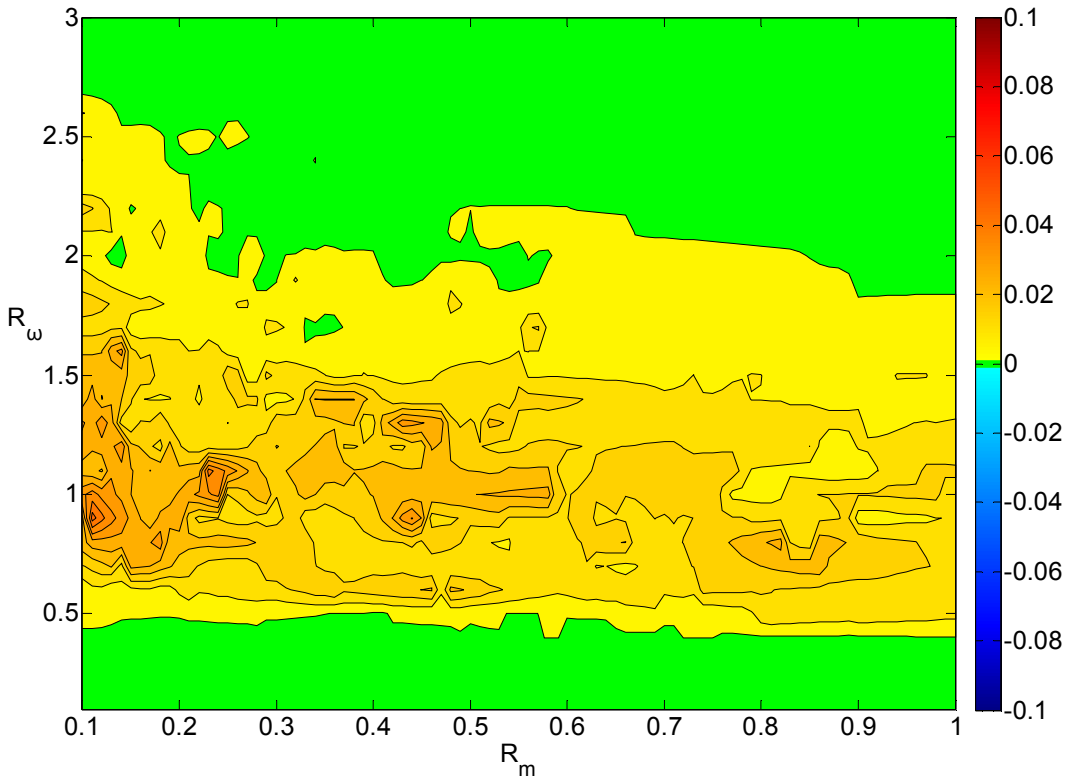
Εικ. 4.54: Περιβάλλουσα σφαλμάτων μετατοπίσεων e_2^{disp} από σεισμικές διεγέρσεις



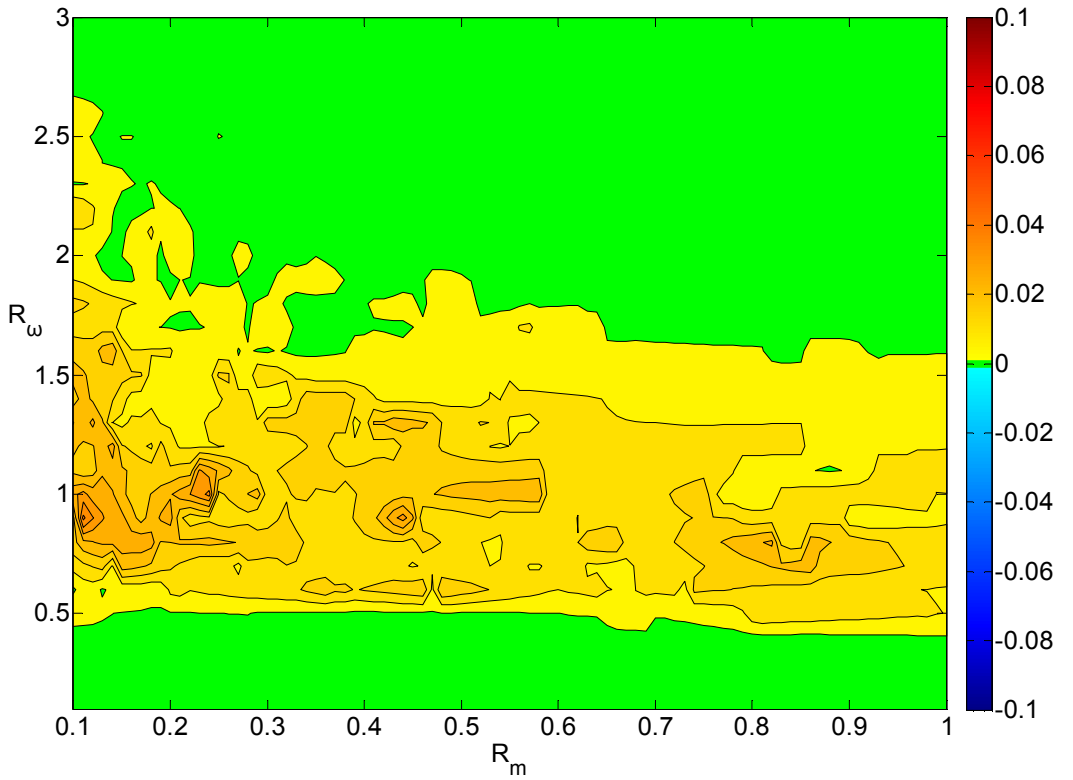
Εικ. 4.55: Περιβάλλουσα σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων e_p^{accl} από σεισμικές διεγέρσεις



Εικ. 4.56: Περιβάλλουσα σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων e_s^{accl} από σεισμικές διεγέρσεις



Εικ. 4.57: Περιβάλλουσα σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων e_1^{accl} από σεισμικές διεγέρσεις

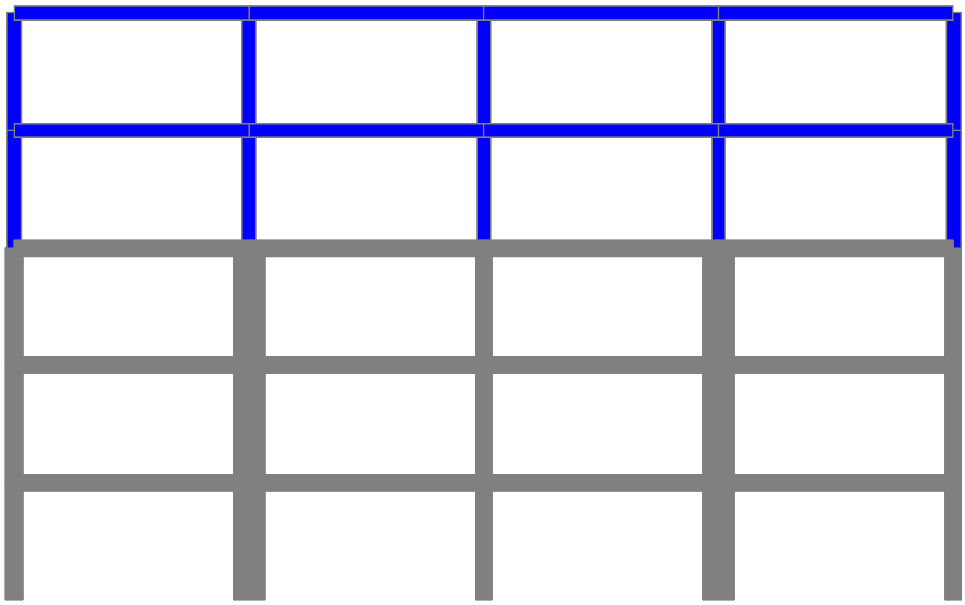


Εικ. 4.58: Περιβάλλουσα σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων e_2^{accl} από σεισμικές διεγέρσεις

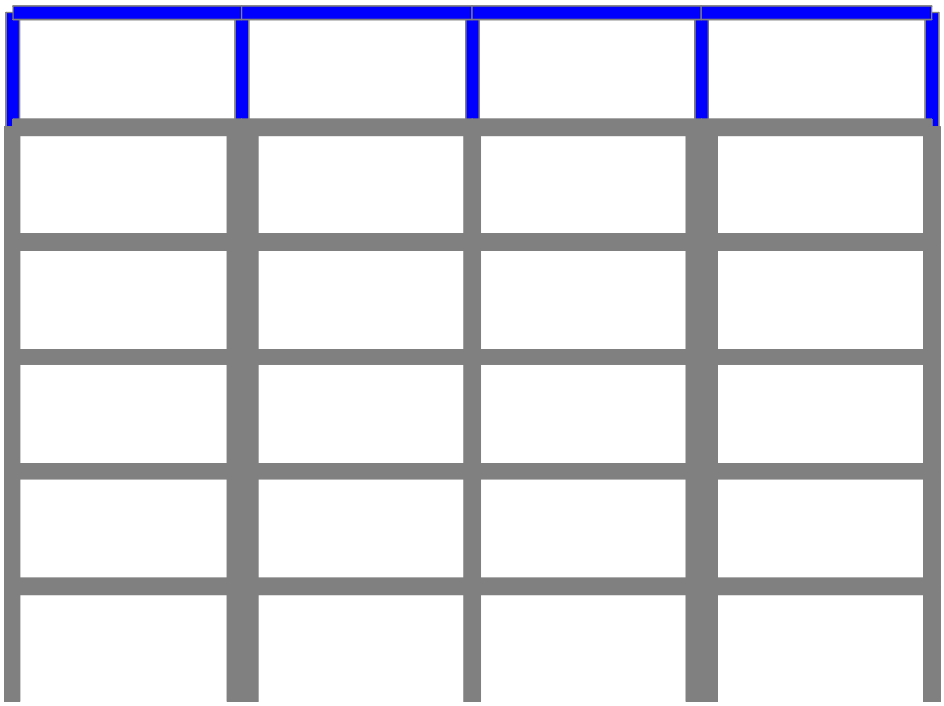
Η διερεύνηση του σφάλματος που προκύπτει από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης της μιγαδικής ανάλυσης σε κλασσική ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας, δείχνει ότι τα σφάλματα σε διβάθμιες κατασκευές είναι συστηματικά πολύ μικρά. Έτσι, είτε η διέγερση είναι αρμονική, απλή σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή ή σύνθετη ενισχύοντας και τις δύο ιδιομορφές, είτε σεισμική, όλοι οι τύποι σφάλματος που εξετάστηκαν δίνουν σφάλμα μικρότερο του 10%, ενώ σε πολλές περιπτώσεις συνδυασμού λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, το σφάλμα είναι σχεδόν μηδενικό. Έτσι, ενθαρρύνεται η απόπειρα εφαρμογής της παραπάνω διαδικασίας στην ανάλυση πολυβάθμιων κατασκευών, με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσο η μετάβαση από την πολυβάθμια κατασκευή στην ισοδύναμη διβάθμια δίνει μεγαλύτερο σφάλμα.

4.13 Εφαρμογές ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης

Οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τη μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση ακολούθως δοκιμάζονται σε πολυώροφα επίπεδα πλαίσια προκειμένου να διαπιστωθεί αν με την εφαρμογή τους προκύπτει ικανοποιητική εκτίμηση της πραγματικής απόσβεσης των κατασκευών αυτών. Συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο πλαίσια, ένα με 3 στάθμες από σκυρόδεμα και 2 στάθμες χάλυβα που φαίνεται στην Εικ. 4.59, και ένα με 5 στάθμες σκυρόδεμα και 1 στάθμη χάλυβα που φαίνεται στην Εικ. 4.60. Οι διαμορφώσεις αυτές επιλέγονται γιατί αποτελούν συνηθισμένες περιπτώσεις προσθήκης καθ' ύψος σε υφιστάμενες κατασκευές από σκυρόδεμα. Τις περισσότερες περιπτώσεις η προσθήκη αφορά έναν όροφο μεταλλικής κατασκευής, πράγμα που αντιστοιχεί στην 5+1 διαμόρφωση, ενώ η περίπτωση του 3+2 επιτρέπει και τον έλεγχο της υπόθεσης ότι το κάθε τμήμα της κατασκευής μπορεί να αντιπροσωπευθεί από την πρώτη του ιδιομορφή.



Εικ. 4.59: Πλαίσιο με 3 στάθμες από σκυρόδεμα και 2 στάθμες χάλυβα



Εικ. 4.60: Πλαίσιο με 5 στάθμες από σκυρόδεμα και 1 στάθμη χάλυβα

Πάλι η κάθε στάθμη θεωρείται ότι έχει πλάκες με πολύ μεγάλη δυσκαμψία στο επίπεδό τους, οπότε επιτυγχάνεται διαφραγματική λειτουργία. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η κάθε στάθμη έχει έναν μόνο βαθμό ελευθερίας κίνησης ελεύθερο και όλους τους άλλους δεσμευμένους. Κατά συνέπεια, τα πλαίσια των Εικ. 4.59 και 4.60 προσομοιώνονται στο OS [124] ορίζοντας έναν κόμβο σε κάθε στάθμη. Αυτός ο κόμβος έχει μία ελευθερία στη διεύθυνση της εδαφικής κίνησης, και όλους τους

άλλους δεσμευμένους. Ο κάθε κόμβος συνδέεται με τον υποκείμενο και τον υπερκείμενο με στοιχεία ZL τα οποία αποδίδουν τη συνολική δυσκαμψία της κάθε στάθμης του πλαισίου. Τέλος, προκειμένου να αποκτήσει το κάθε πλαίσιο απόσβεση της μορφής της Εικ. 4.2, χρησιμοποιούνται πάλι ZL στοιχεία τα οποία δίνουν μόνο απόσβεση, και αναλόγως συνδέουν την κάθε στάθμη με τις γειτονικές ή με τον κόμβο που αντιπροσωπεύει το έδαφος, και δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι του προσομοιώματος έχουν τον ίδιο γεωμετρικό τόπο, δεν υπάρχει πρόβλημα σύνδεσης οποιασδήποτε στάθμης με τον κόμβο του εδάφους, όπως φαίνεται στην Εικ. 4.15. Τα ZL στοιχεία που υλοποιούν την απόσβεση λαμβάνουν τις τιμές τους αφού εκτελεστεί η διαδικασία των εξισώσεων (4.3) ως (4.10) και υπολογιστούν οι όροι $a_0\mathbf{M}$ και $a_1\mathbf{K}$, κατά αντιστοιχία με το διβάθμιο της Εικ. 4.15.

Το κάθε πολυώροφο πλαίσιο αντιστοιχίζεται με σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) μέσω των χαρακτηριστικών της πρώτης ιδιομορφής του κάθε τμήματος. Έτσι, τα πλαίσια των Εικ. 4.59 και 4.60 χωρίζονται στα δύο ομοειδείς από άποψη υλικού κατασκευές και σε κάθε μια από αυτές γίνεται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση. Οι ιδιοσυχνότητες της πρώτης μορφής του κάθε τμήματος και οι ιδιομορφικές μάζες δίνουν τους λόγους ιδιοσυχνοτήτων και μαζών:

$$R_\omega = \frac{\omega_p^1}{\omega_s^1}, \quad R_m = \frac{M_p^1}{M_s^1} \tag{4.72}$$

Προκειμένου να ελεγχθούν οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης σε ένα αρκετά μεγάλο μέρος του επιπέδου (R_ω, R_m), επιλέγονται τρεις τιμές για το λόγο ιδιοσυχνοτήτων: $R_\omega = \{0.5, 1, 1.5\}$ και τέσσερις τιμές για το λόγο μαζών: $R_m = \{0.2, 0.5, 0.8, 1.0\}$, ώστε η κάθε τιμή του λόγου R_ω να σαρώνεται από αριστερά προς τα δεξιά. Η περιοχή του επιπέδου (R_ω, R_m) που ερευνάται αντιστοιχεί σε συσχέτιση δυναμικών χαρακτηριστικών υποβάθρου και υπερκατασκευής η οποία καλύπτει τις συνηθέστερες περιπτώσεις μικτών κατασκευών.

Η κάθε στάθμη του υποβάθρου από σκυρόδεμα έχει μάζα $200Mgr$ και δυσκαμψία ίση με $311623.56 kN/m$ κατά την οριζόντια μετακίνηση, χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν σε μεγέθη συνηθισμένης κτιριακής κατασκευής. Με δεδομένα αυτά τα χαρακτηριστικά υπολογίζονται με μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση η ιδιοσυχνότητα και η ιδιομορφική μάζα της πρώτης ιδιομορφής, και με δεδομένους τους λόγους R_ω και R_m

υπολογίζονται κάθε φορά η ιδιοσυχνότητα και η μάζα της πρώτης ιδιομορφής της υπερκατασκευής και με δοκιμές σε ένα συνηθισμένο λογισμικό στατικής ανάλυσης προκύπτει κάθε φορά η διαμόρφωση της υπερκατασκευής από χάλυβα.

Για την κάθε πολυβάθμια κατασκευή, 3+2 ή 5+1 σταθμών, και αφού ολοκληρωθεί η διαμόρφωση του φορέα και γίνει μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση η οποία δίνει τις ιδιοσυχνότητες ω, εκτιμώνται οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης από τις Εικ. 4.7 και 4.8. Οι τιμές αυτές της απόσβεσης αποδίδονται σε δύο ιδιομορφές του συνολικού πολυβάθμιου φορέα. Στην πρώτη, και στην ιδιομορφή n στην οποία επιτυγχάνεται το 90% της δρώσας μάζας της κατασκευής. Αποκτώνται έτσι οι τιμές των αποσβέσεων ζ_1 και ζ_n. Ακολούθως, η πολυβάθμια μικτή κατασκευή αντιμετωπίζεται σαν να έχει κανονική αναλογική απόσβεση, και υπολογίζονται οι συντελεστές a_0 και a_1 με βάση τις ιδιοσυχνότητες και τις αποσβέσεις των εν λόγω δύο ιδιομορφών:

$$a_0 = \frac{2\omega_1\omega_n\left(\omega_n\zeta_1 - \omega_1\zeta_n\right)}{\omega_n^2 - \omega_1^2} \tag{4.73}$$

$$a_1 = \frac{2\left(\omega_n\zeta_n - \omega_1\zeta_1\right)}{\omega_n^2 - \omega_1^2} \tag{4.74}$$

Με αυτόν τον τρόπο, και με δεδομένες τις μάζες και τις δυσκαμψίες της πλήρους κατασκευής, αυτό υπολογίζεται ένα αναλογικό μητρώο απόσβεσης όπως στην εξίσωση (4.2), θεωρείται δηλαδή ότι η κατασκευή έχει αναλογική απόσβεση και με δεδομένες τις τιμές των συντελεστών απόσβεσης για τις δύο ιδιομορφές υπολογίζεται κατά Rayleigh το μητρώο απόσβεσης. Τέλος, χρησιμοποιώντας πάλι ZL στοιχεία στο OS [124] μορφώνεται το προσομοίωμα που αντιπροσωπεύει την προσεγγιστική ανάλυση της κατασκευής.

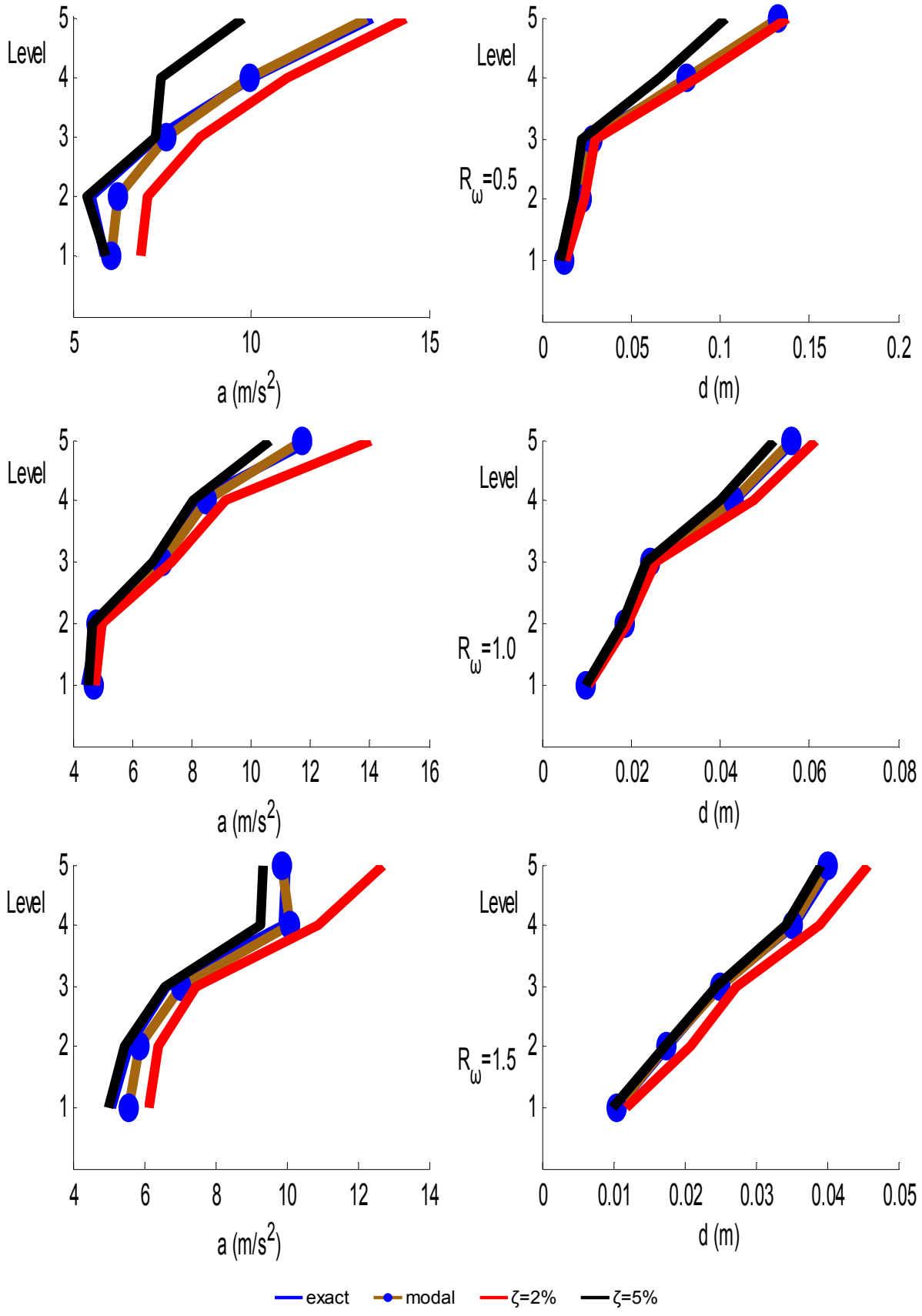
Πέρα από την ορθή και την προσεγγιστική ανάλυση με τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, για κάθε μια κατασκευή γίνονται και άλλες δύο αναλύσεις, μία με ενιαία απόσβεση 2% και μια με επίσης ενιαία απόσβεση 5%. Σκοπός είναι αφ' ενός να προκύψει μια εκτίμηση της περιβάλλουσας της απόκρισης της κάθε κατασκευής όταν η απόσβεση παίρνει τις ακραίες δυνατές τιμές της, και αφ' ετέρου να αξιολογηθεί η υπερεκτίμηση της απόκρισης από τη χρήση της ενιαίας συντηρητικής απόσβεσης 2% που είναι η μελετητική πρακτική για τις μικτές κατασκευές αυτού του τύπου. Προκειμένου να κατασκευαστεί το μητρώο απόσβεσης

για τις περιπτώσεις αυτές, οι αποσβέσεις ζ_1 και ζ_n λαμβάνουν την τιμή της εν λόγω ενιαίας απόσβεσης, οπότε οι εξισώσεις (4.73) και (4.74) υποβαθμίζονται στην εξίσωση (4.1). Τέλος, πάλι με τη χρήση της εξίσωσης (4.2) γίνεται ο υπολογισμός του μητρώου απόσβεσης με δεδομένα τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας της κάθε κατασκευής.

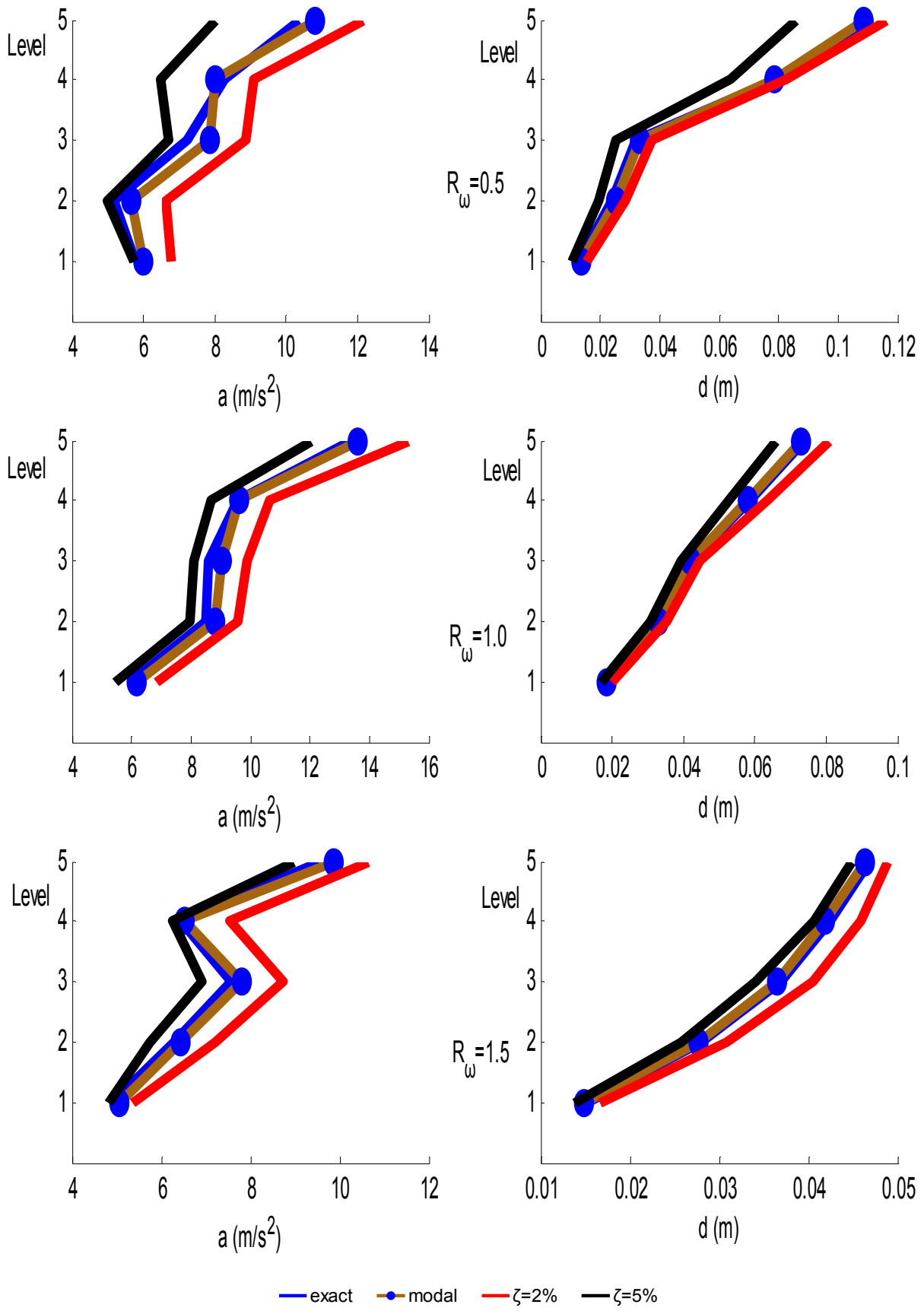
Όλες οι αναλύσεις, η ορθή και οι τρεις προσεγγιστικές, είναι αναλύσεις χρονοϊστορίας και τα προσομοιώματα των μικτών κατασκευών αναλύονται στο OS [124] με τη μέθοδο της σταθερής επιτάχυνσης του Newmark. Οι φασματικές αναλύσεις στην παρούσα φάση αποφεύγονται, προκειμένου να μην υπεισέλθει στην τελική αξιολόγηση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης το ενδεχόμενο σφάλμα από τον κανόνα συνδυασμού των μεγίστων των ιδιομορφικών αποκρίσεων. Η διέγερση που χρησιμοποιείται είναι η καταγραφή Athens. Λαμβάνονται αποτελέσματα σε κάθε στάθμη των κατασκευών σε όρους μετατοπίσεων y και απολύτων επιταχύνσεων $\ddot{\bar{y}}$ και σε κάθε στάθμη υπολογίζονται τα απόλυτα σφάλματα μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.75). Επίσης, προκειμένου το σφάλμα σε κάθε τμήμα της κατασκευής να μπορεί να απεικονιστεί με έναν μόνο αριθμό, υπολογίζεται και η νόρμα των σφαλμάτων των αντίστοιχων σταθμών. Τέλος, για να προκύψει εικόνα για το σύνολο της κατασκευής υπολογίζεται η νόρμα του σφάλματος όλων των σταθμών, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.76). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε προφίλ μέγιστης απόλυτης απόκρισης και προφίλ μέγιστου σφάλματος, καθώς και σε ραβδογράμματα νόρμας σφάλματος κάθε τμήματος και της συνολικής κατασκευής στις Εικ. 4.61 ως 4.76 για την κατασκευή με τις 3+2 στάθμες και στις Εικ. 4.77 ως 4.92 για την κατασκευή με τις 5+1 στάθμες.

$$e_i^{disp} = \left|\frac{\max\left(\left|y_i\right|\right) - \max\left(\left|y_i'\right|\right)}{\max\left(\left|y_i\right|\right)}\right|,\ e_i^{accl} = \left|\frac{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i\right|\right) - \max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i'\right|\right)}{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i\right|\right)}\right|, i = 1,2...\left(np + ns\right) \quad (4.75)$$

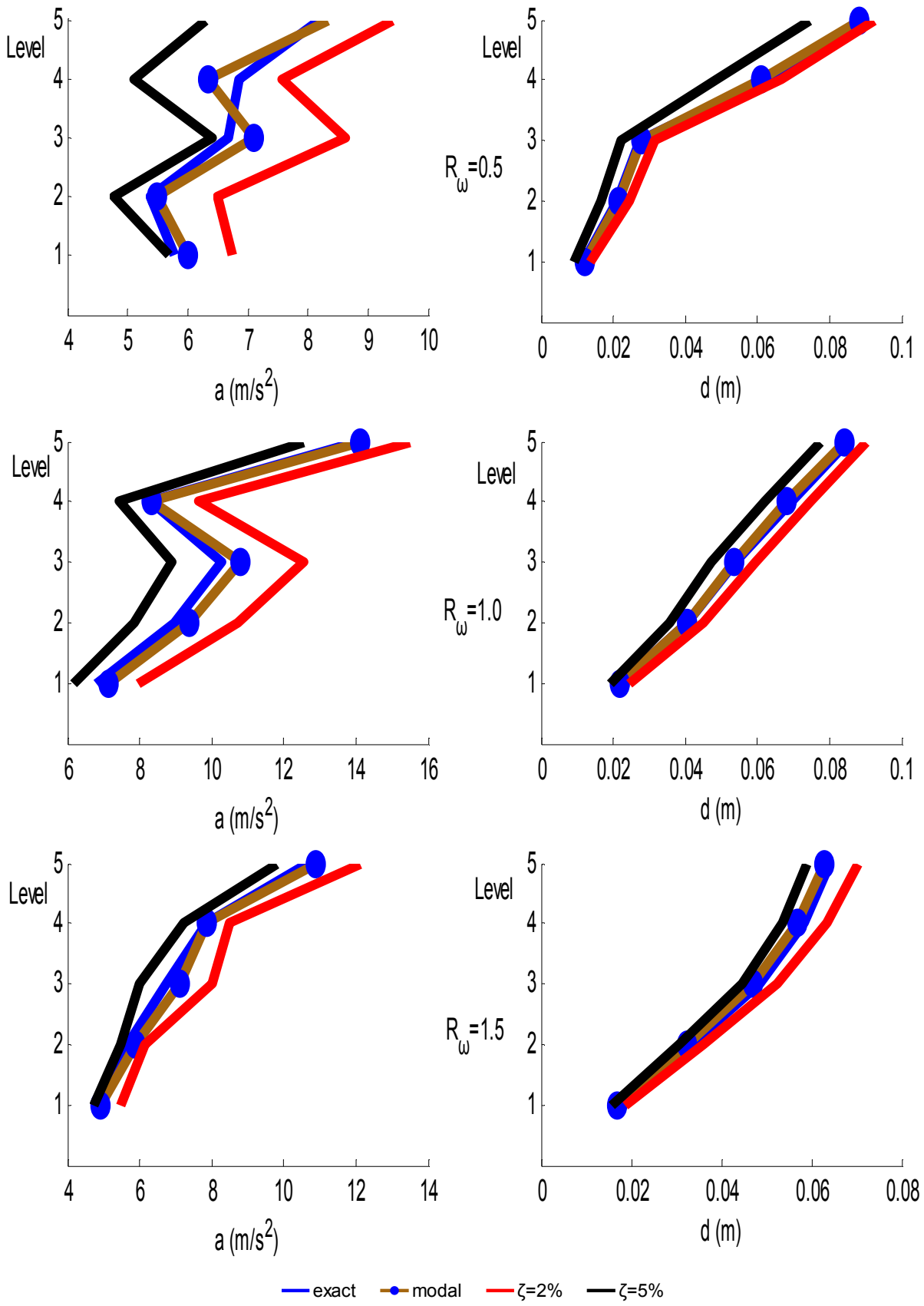
$$e_2^{disp} = \sqrt{\sum_1^n \left(e_i^{disp}\right)^2},\ e_2^{accl} = \sqrt{\sum_1^n \left(e_i^{accl}\right)^2},\ n = \left\{np / ns / np + ns\right\} \quad (4.76)$$



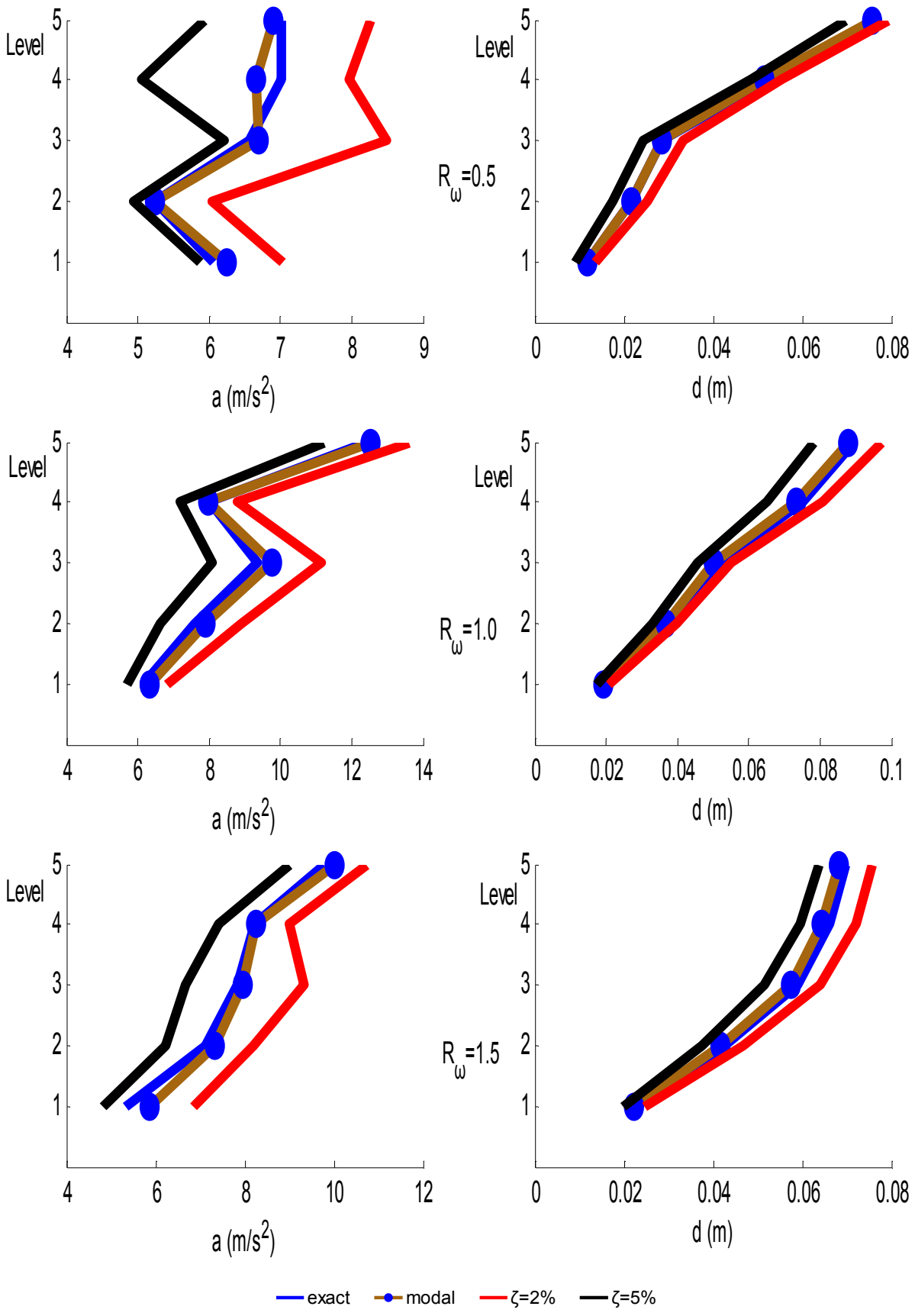
Εικ. 4.61: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.2



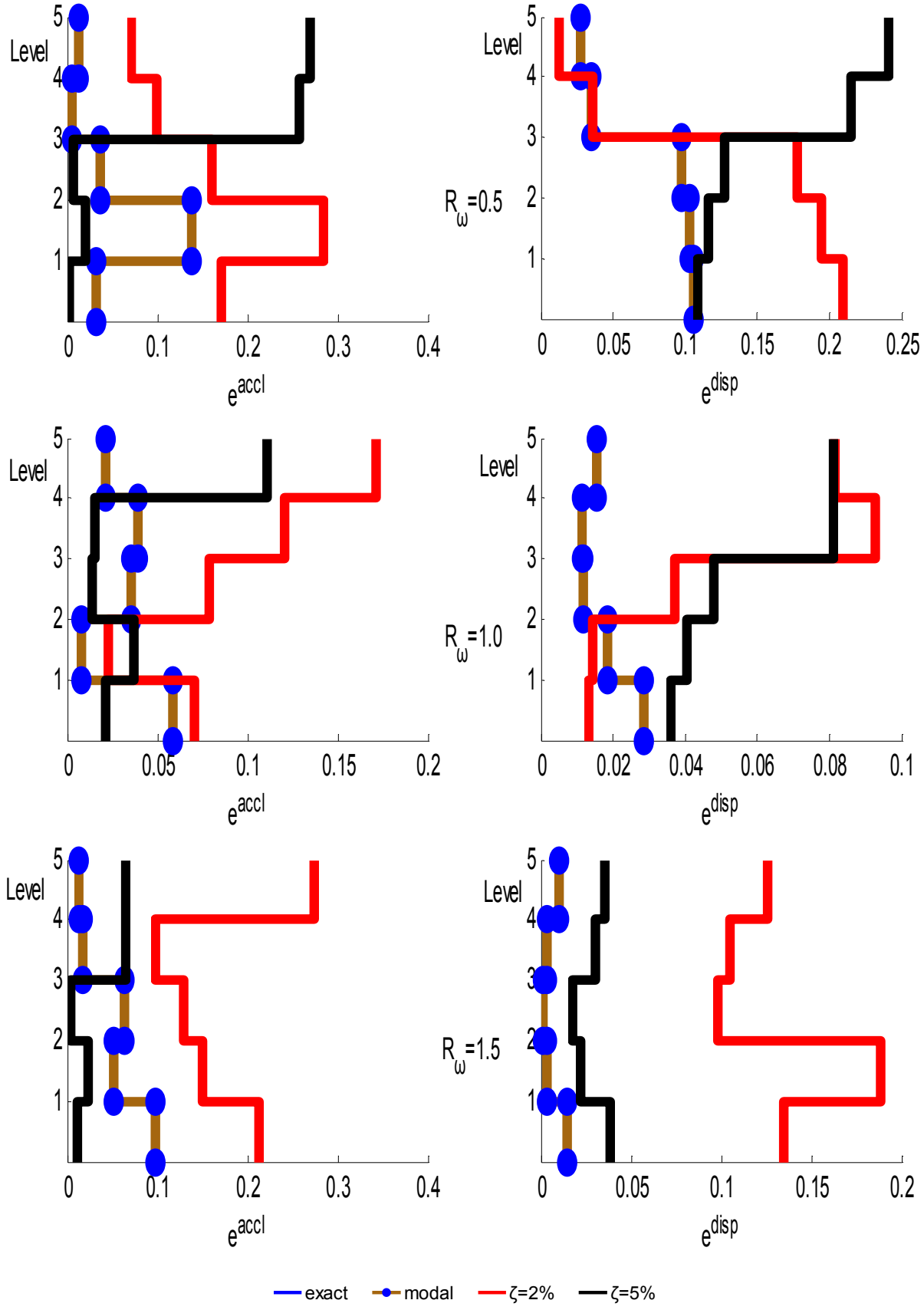
Εικ. 4.62: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.5



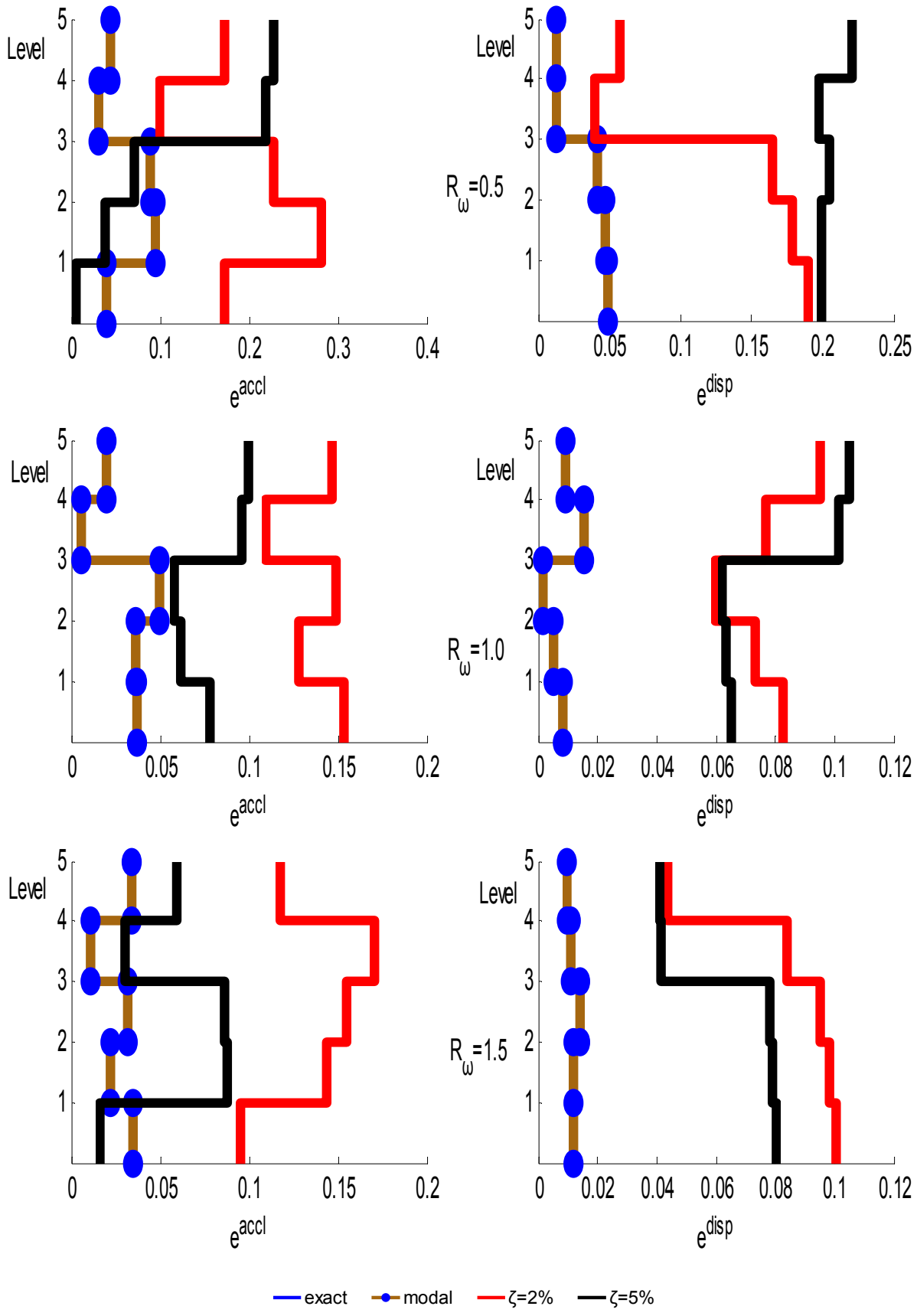
Εικ. 4.63: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.8



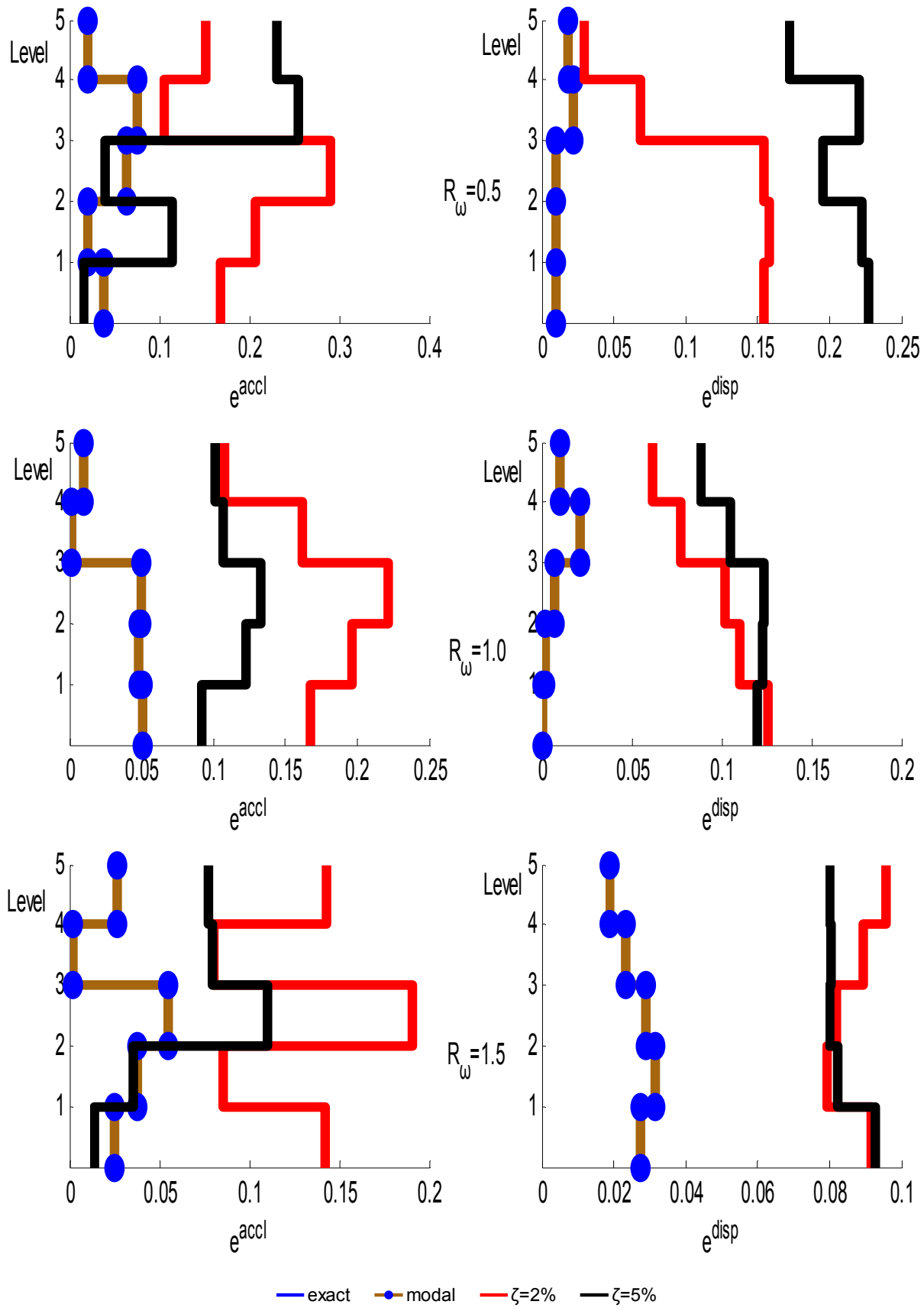
Εικ. 4.64: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=1



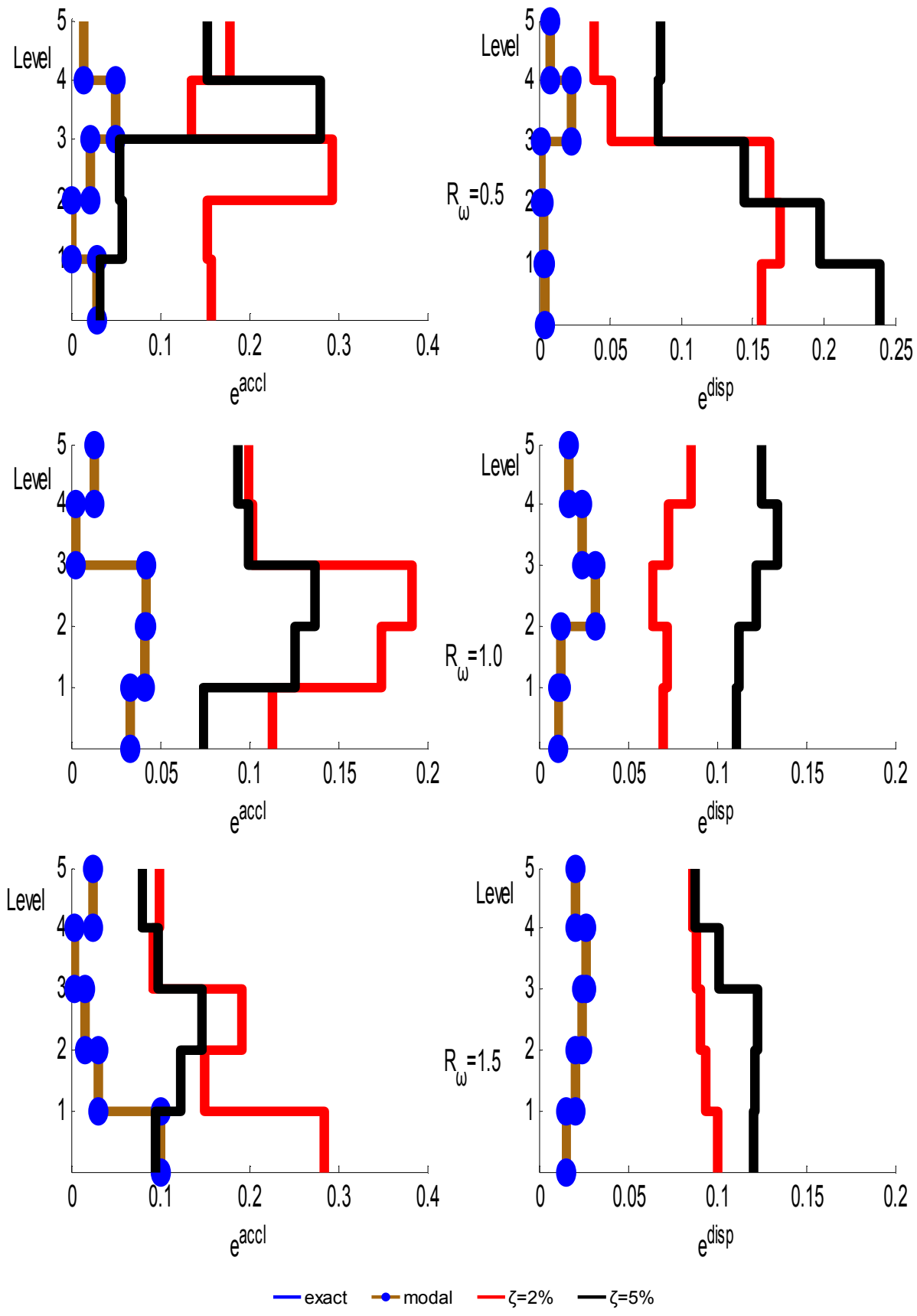
Εικ. 4.65: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.2



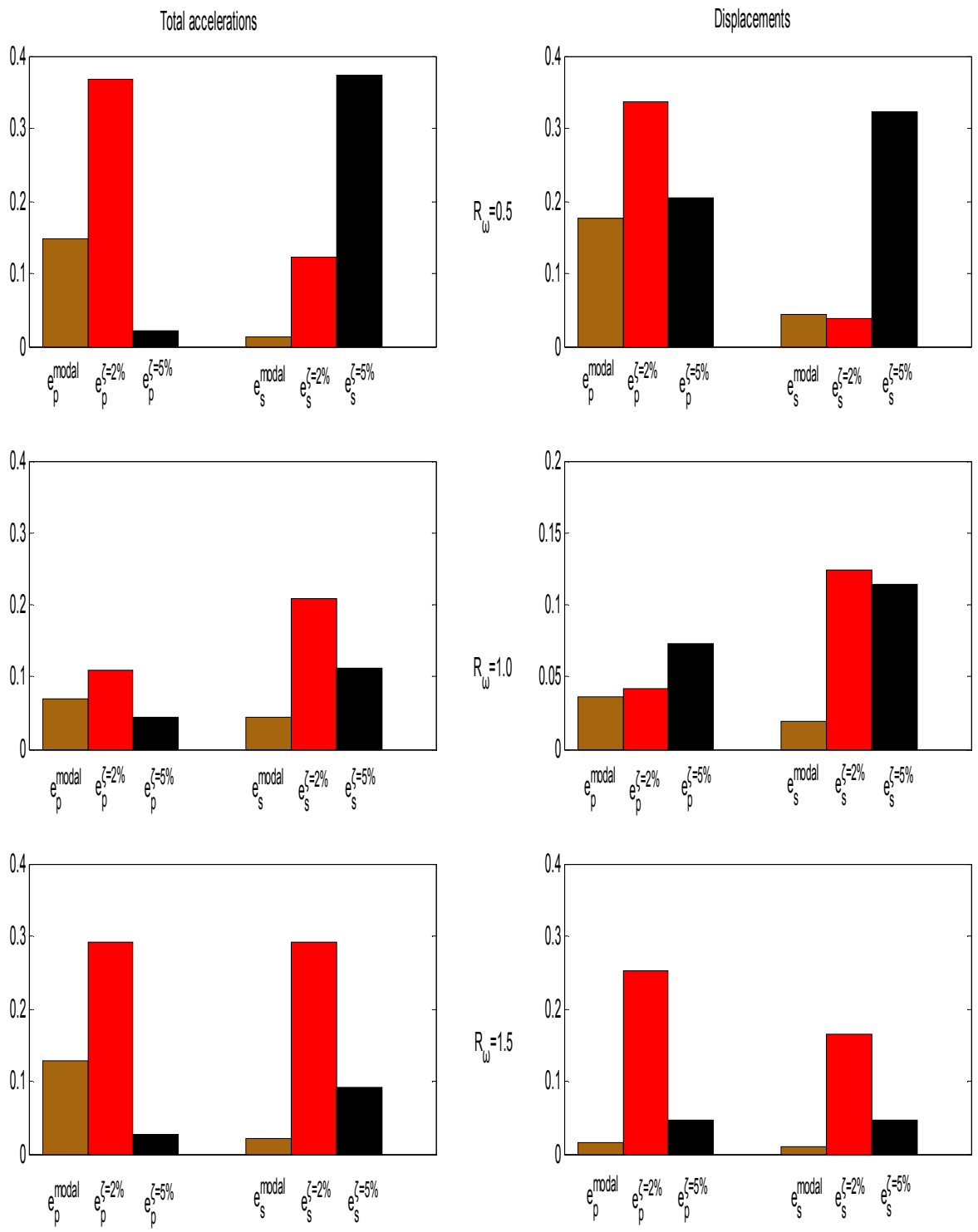
Εικ. 4.66: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.5



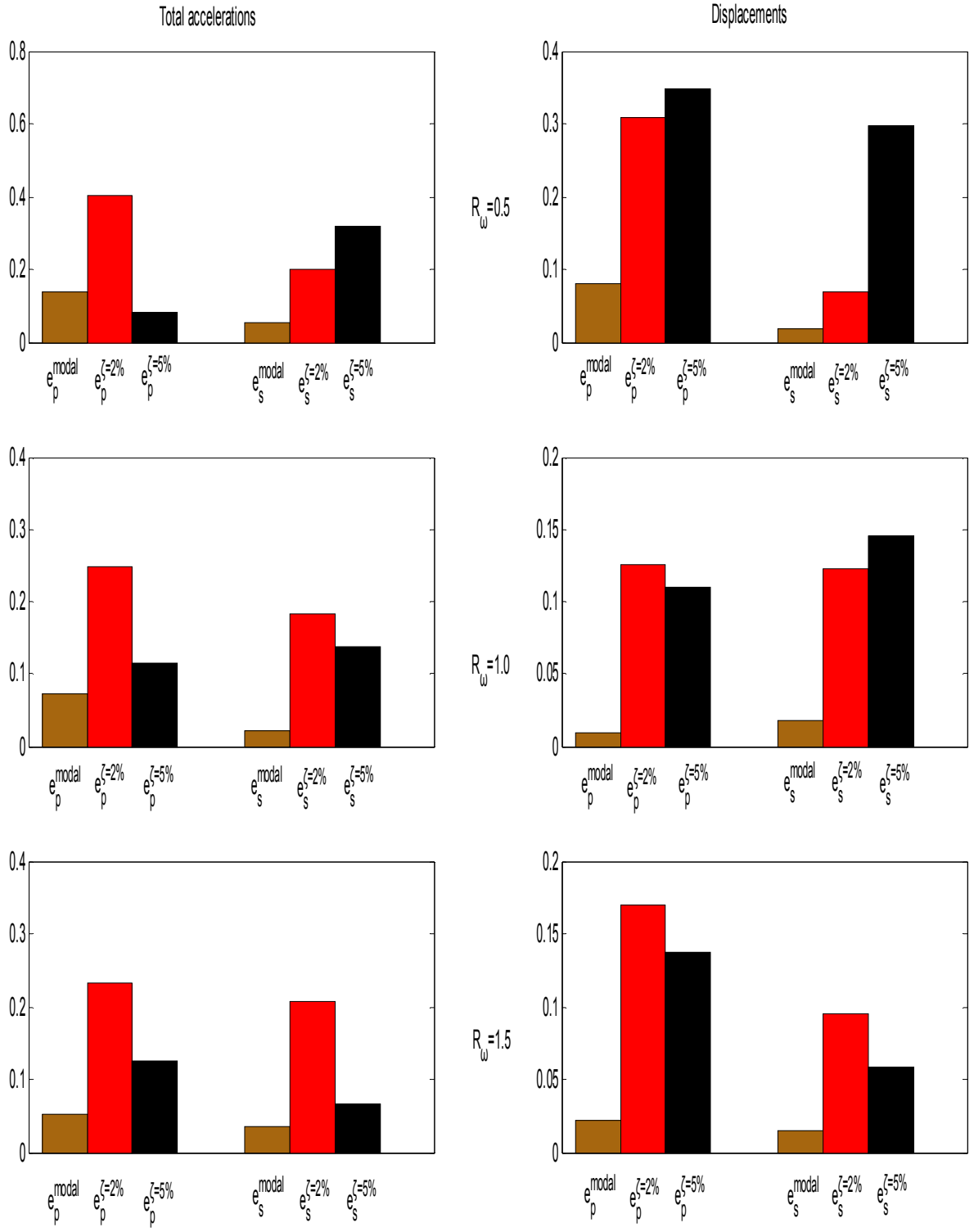
Εικ. 4.67: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.8



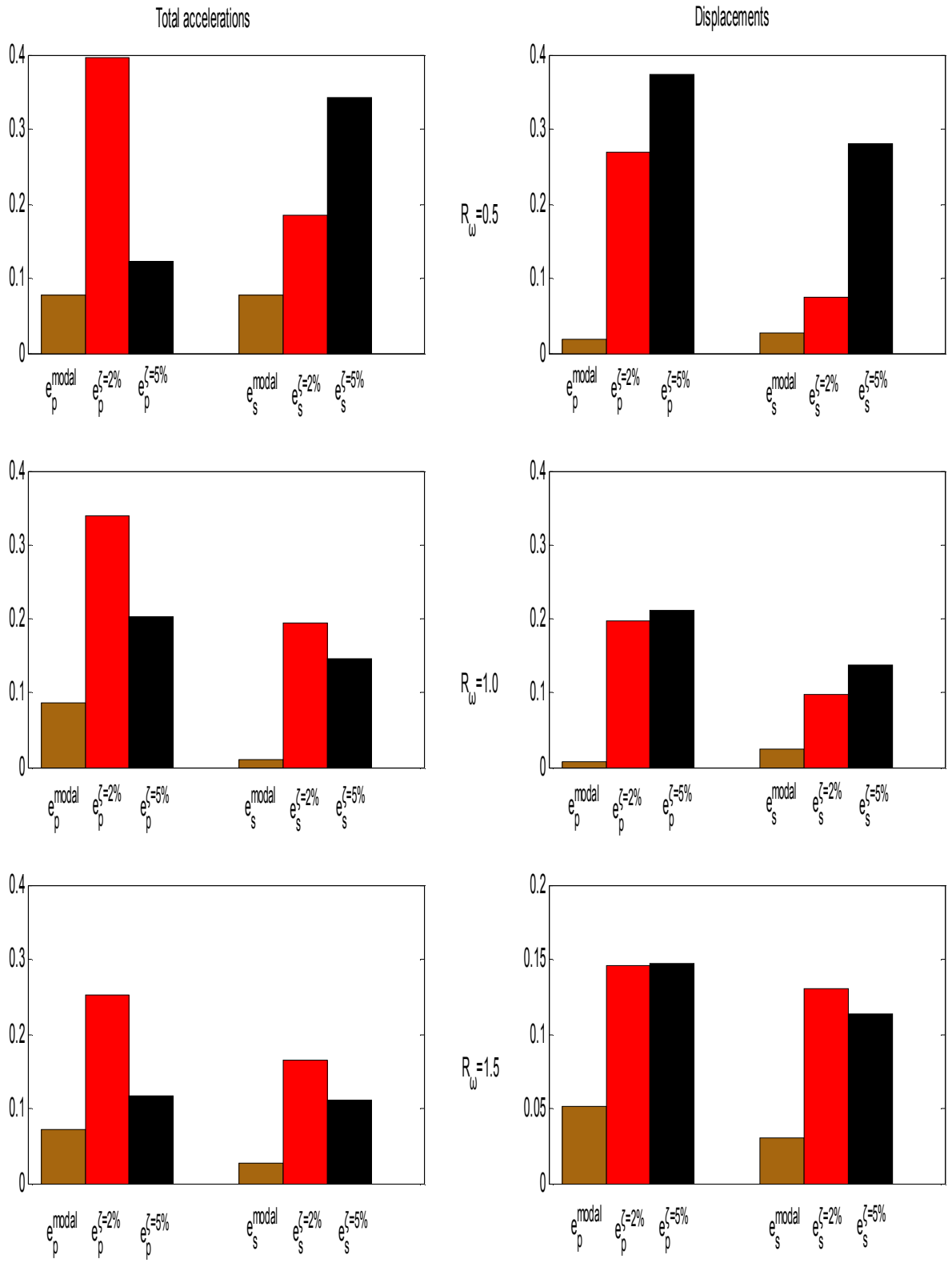
Εικ. 4.68: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=1



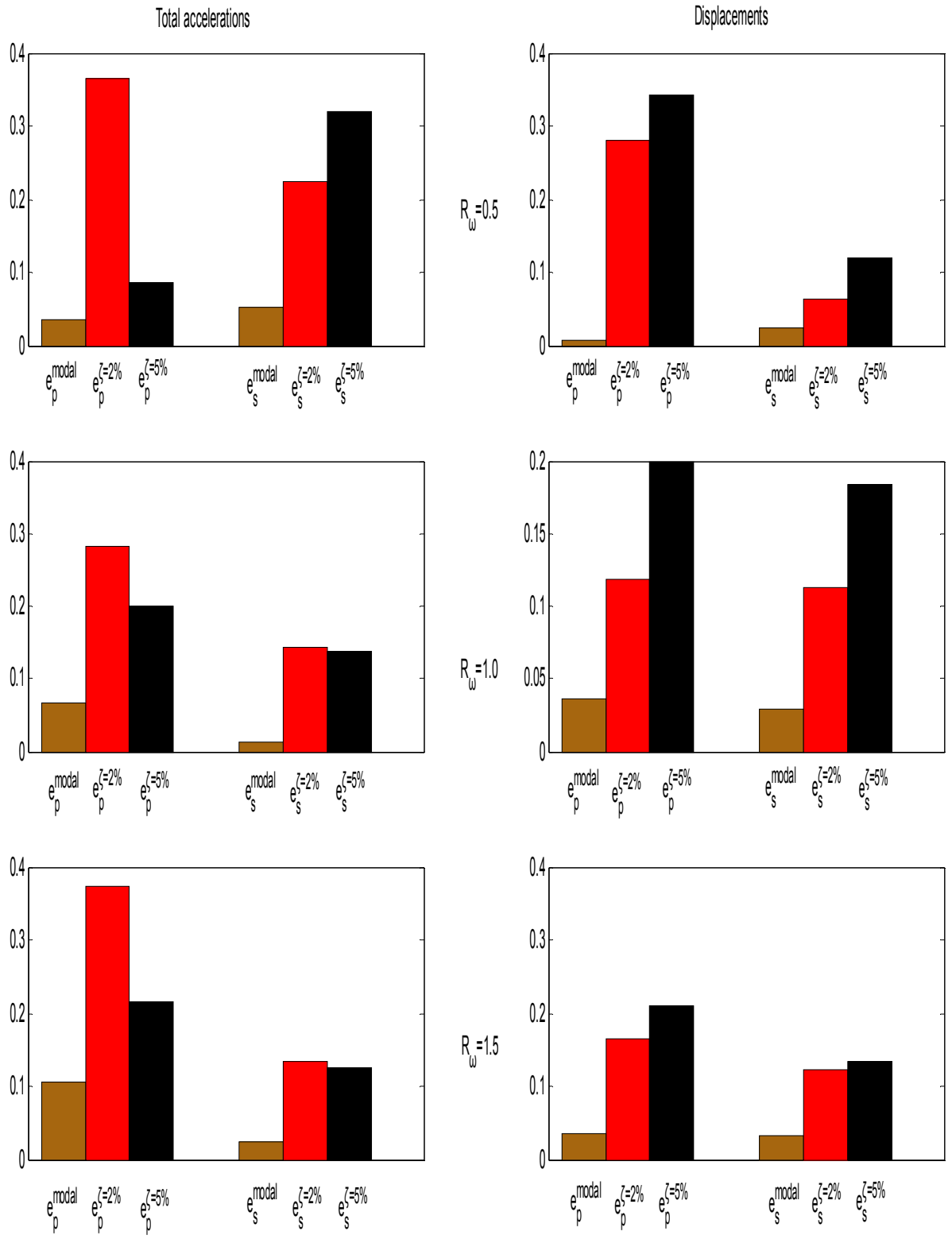
Εικ. 4.69: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.2



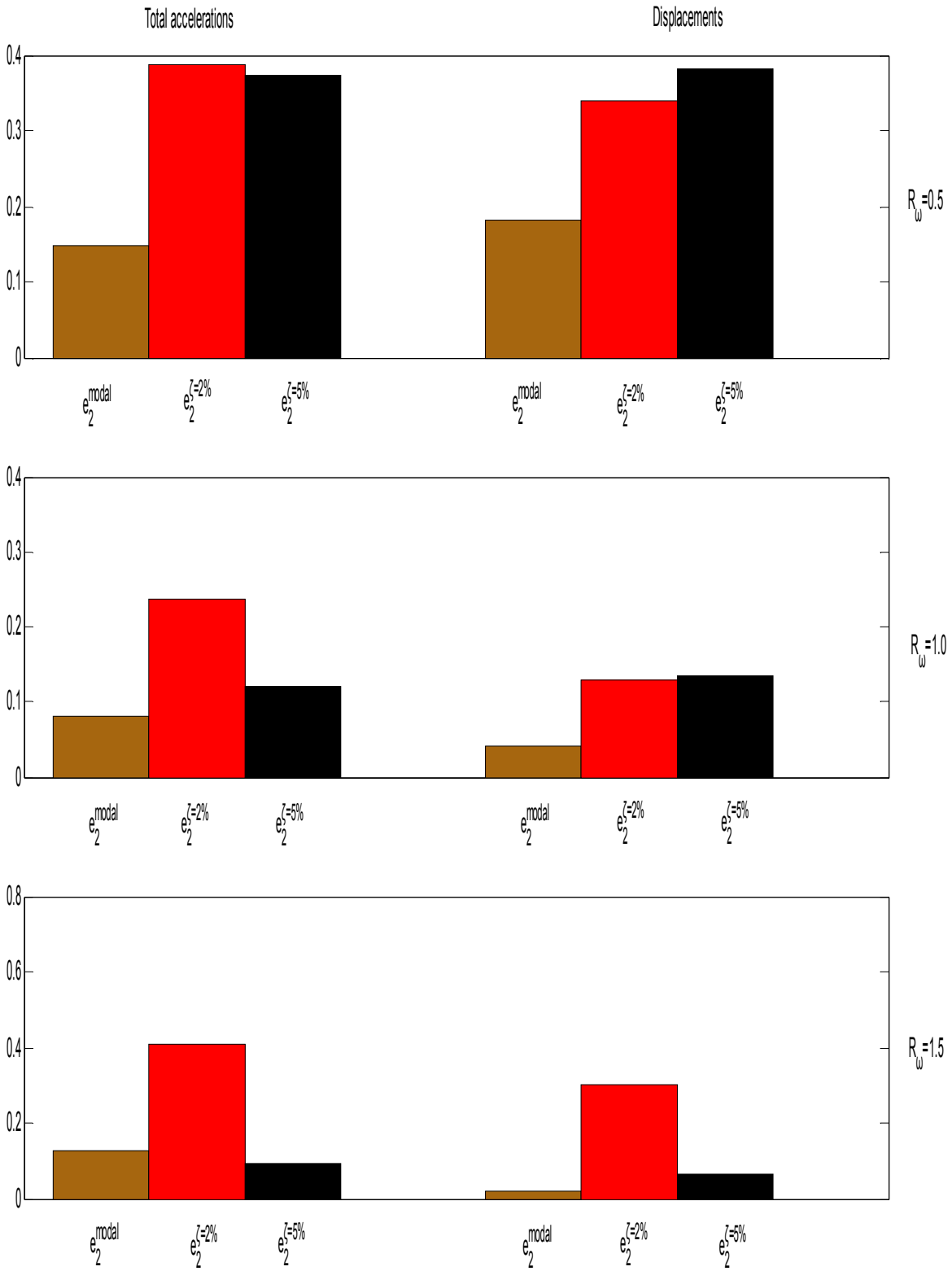
Εικ. 4.70: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.5



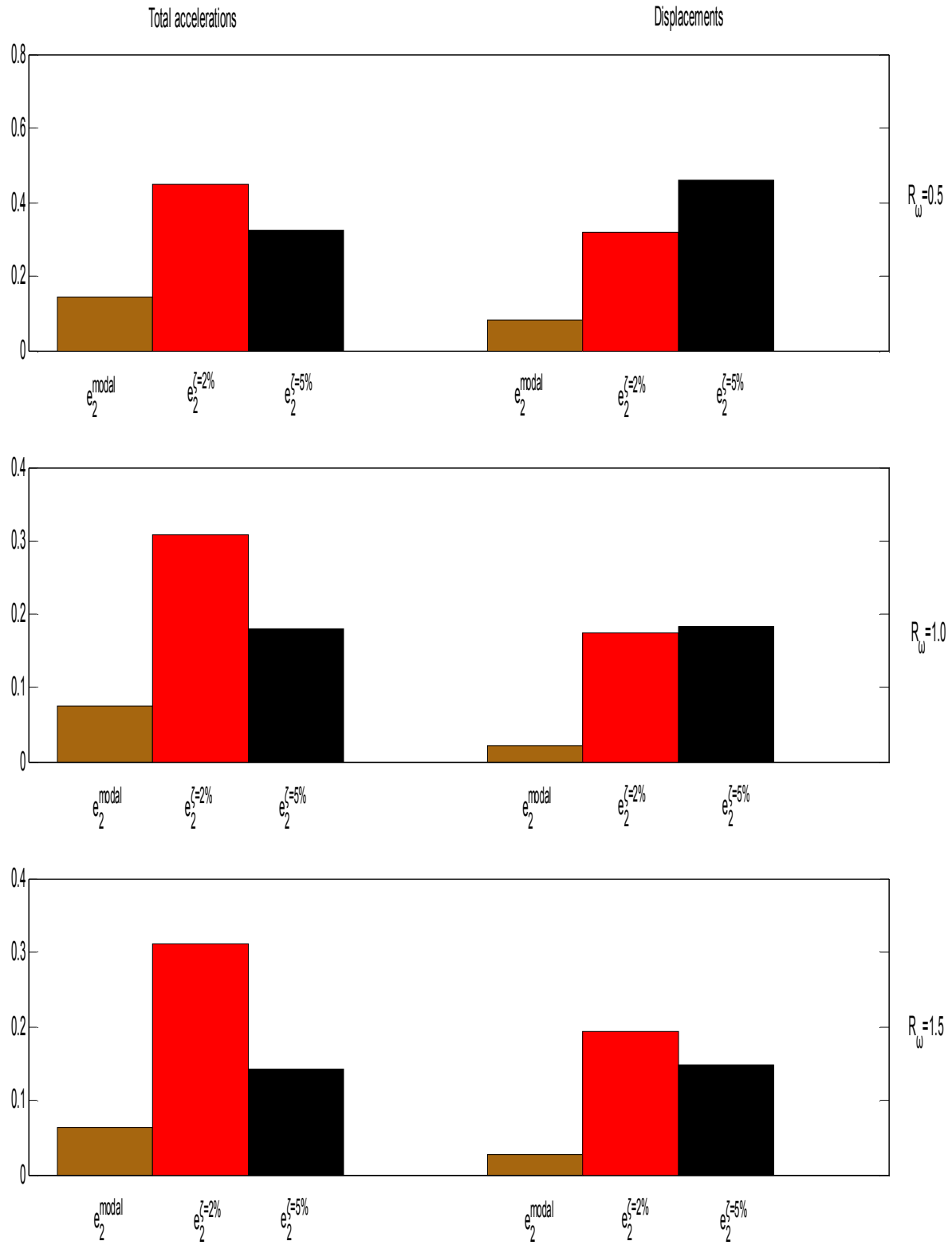
Εικ. 4.71: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.8



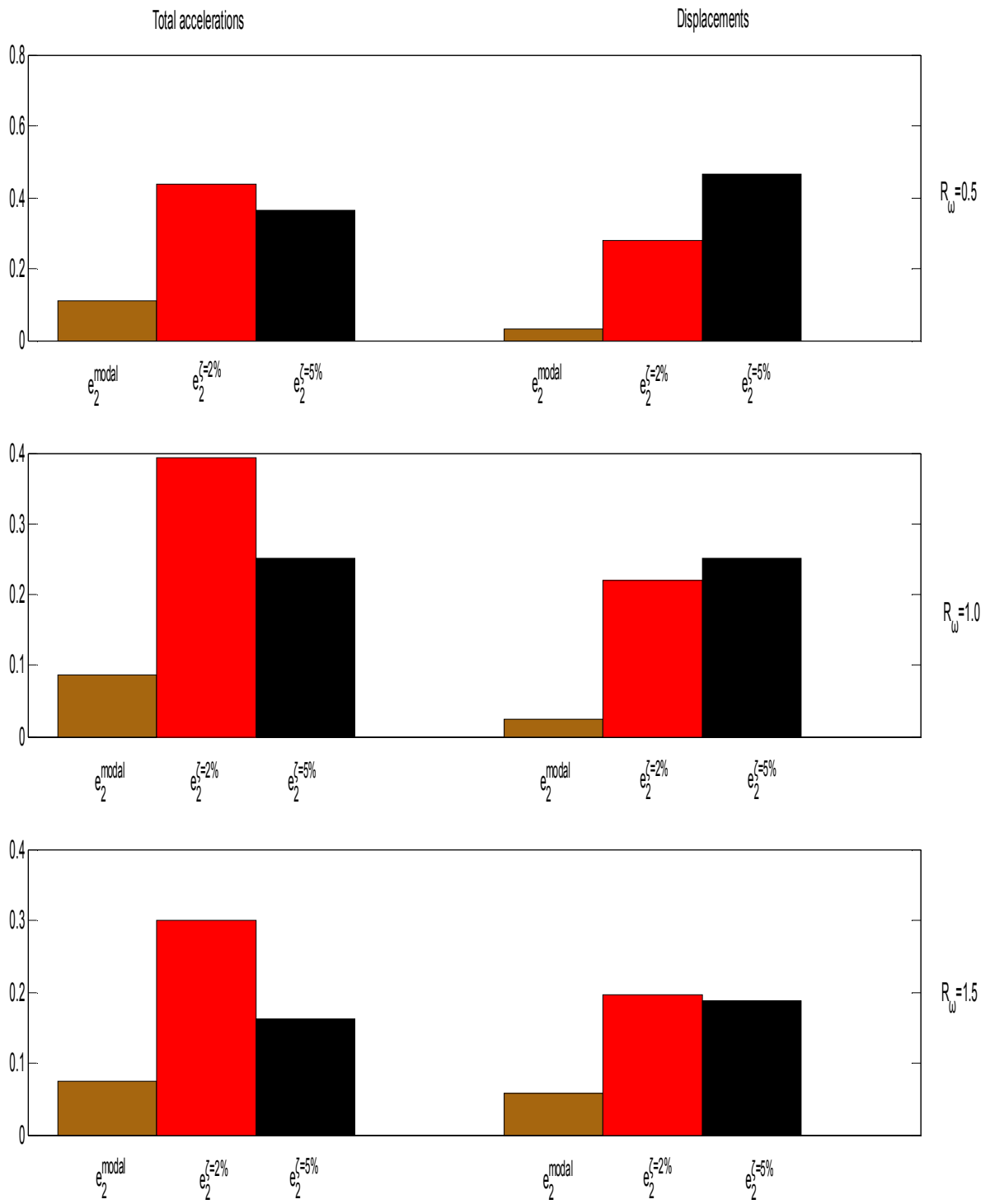
Εικ. 4.72: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=1



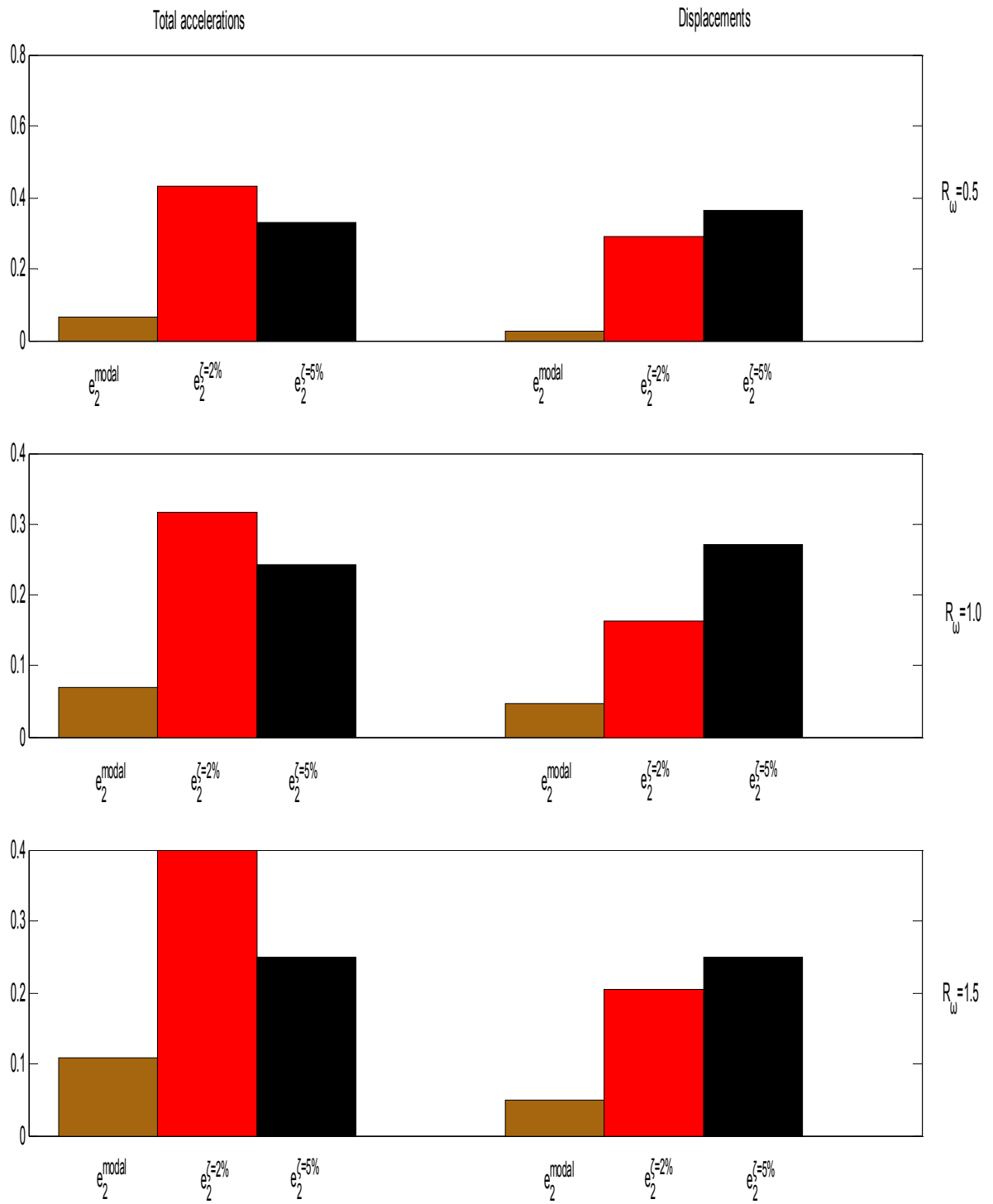
Εικ. 4.73: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.2



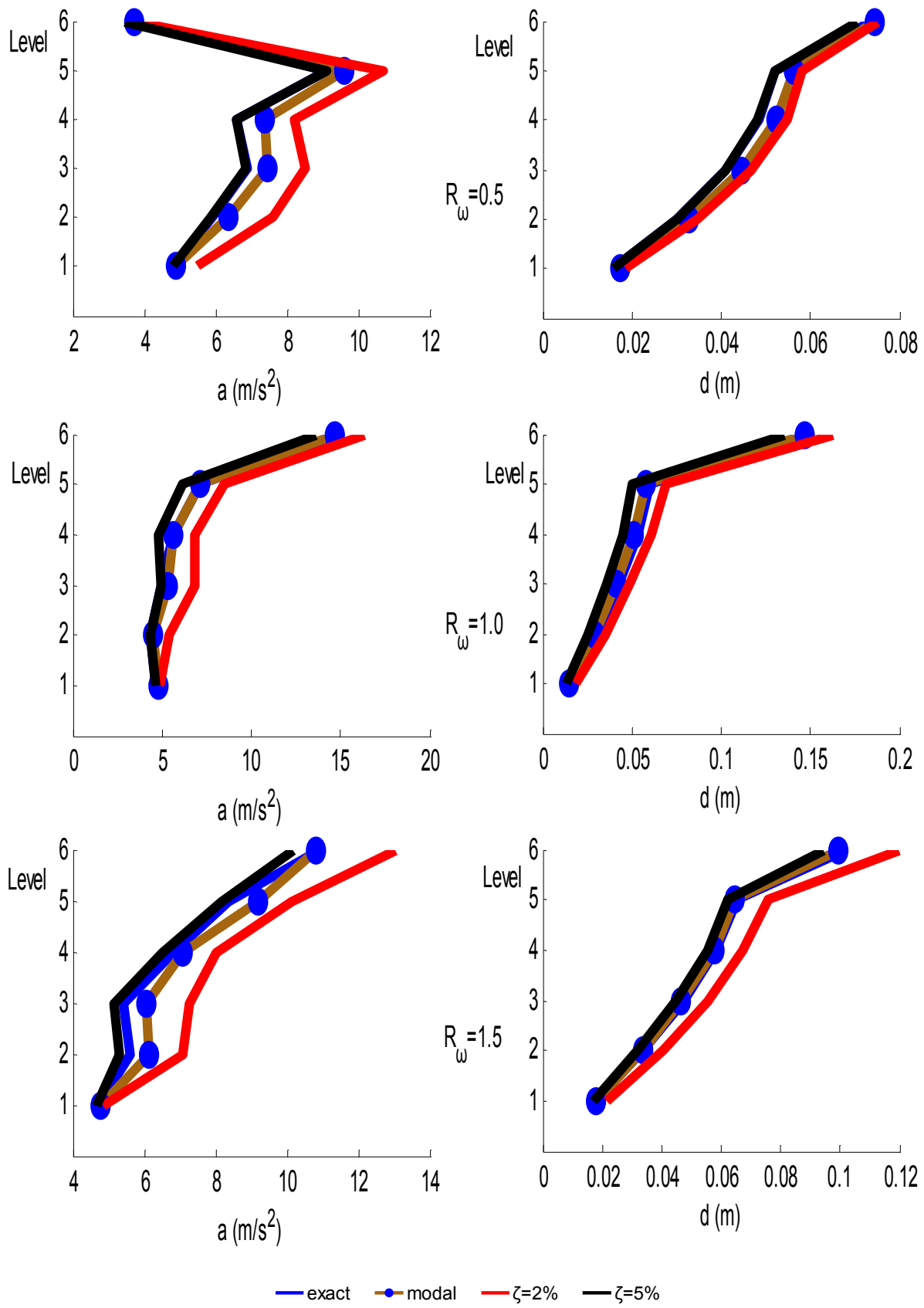
Εικ. 4.74: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.5



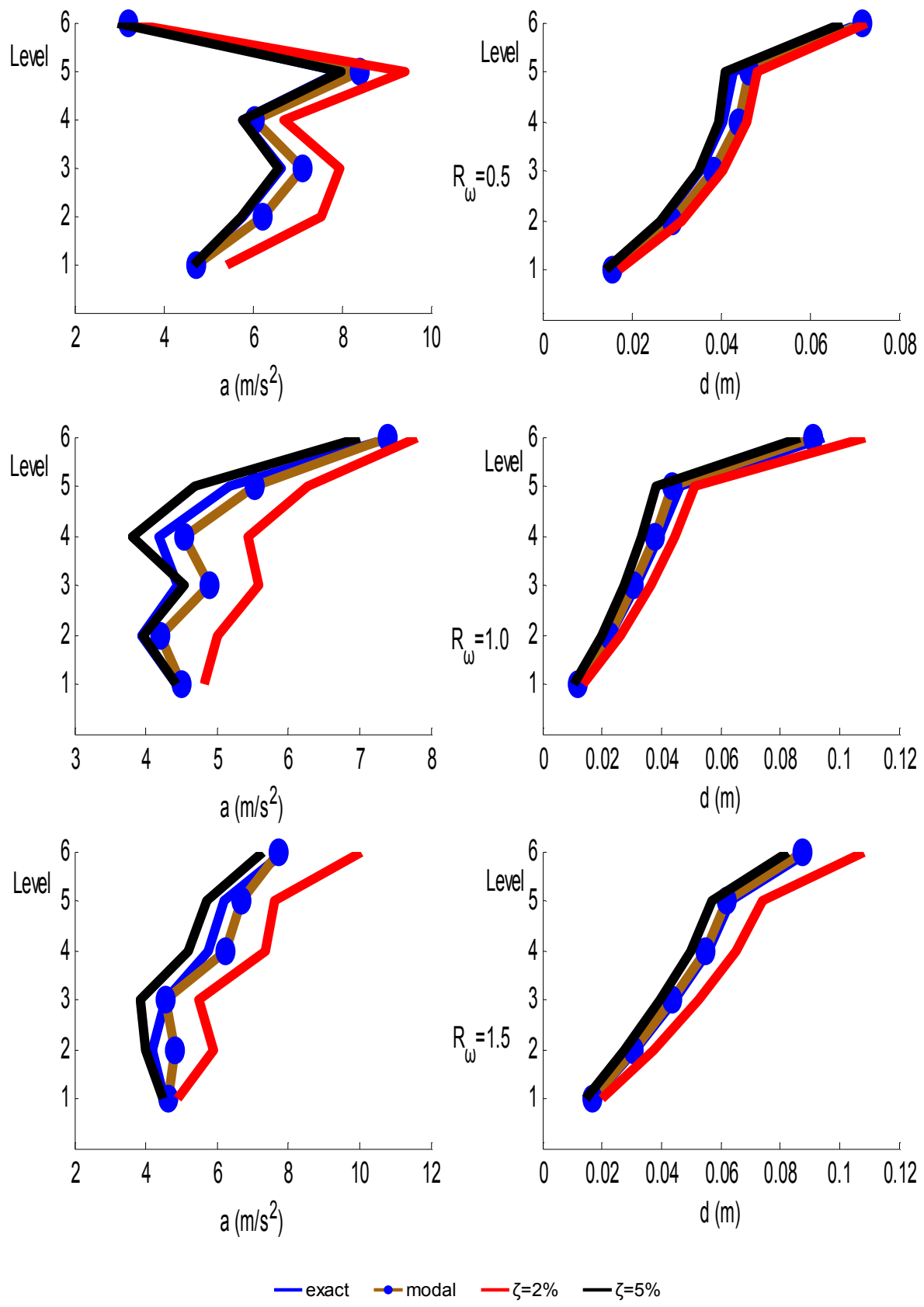
Εικ. 4.75: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.8



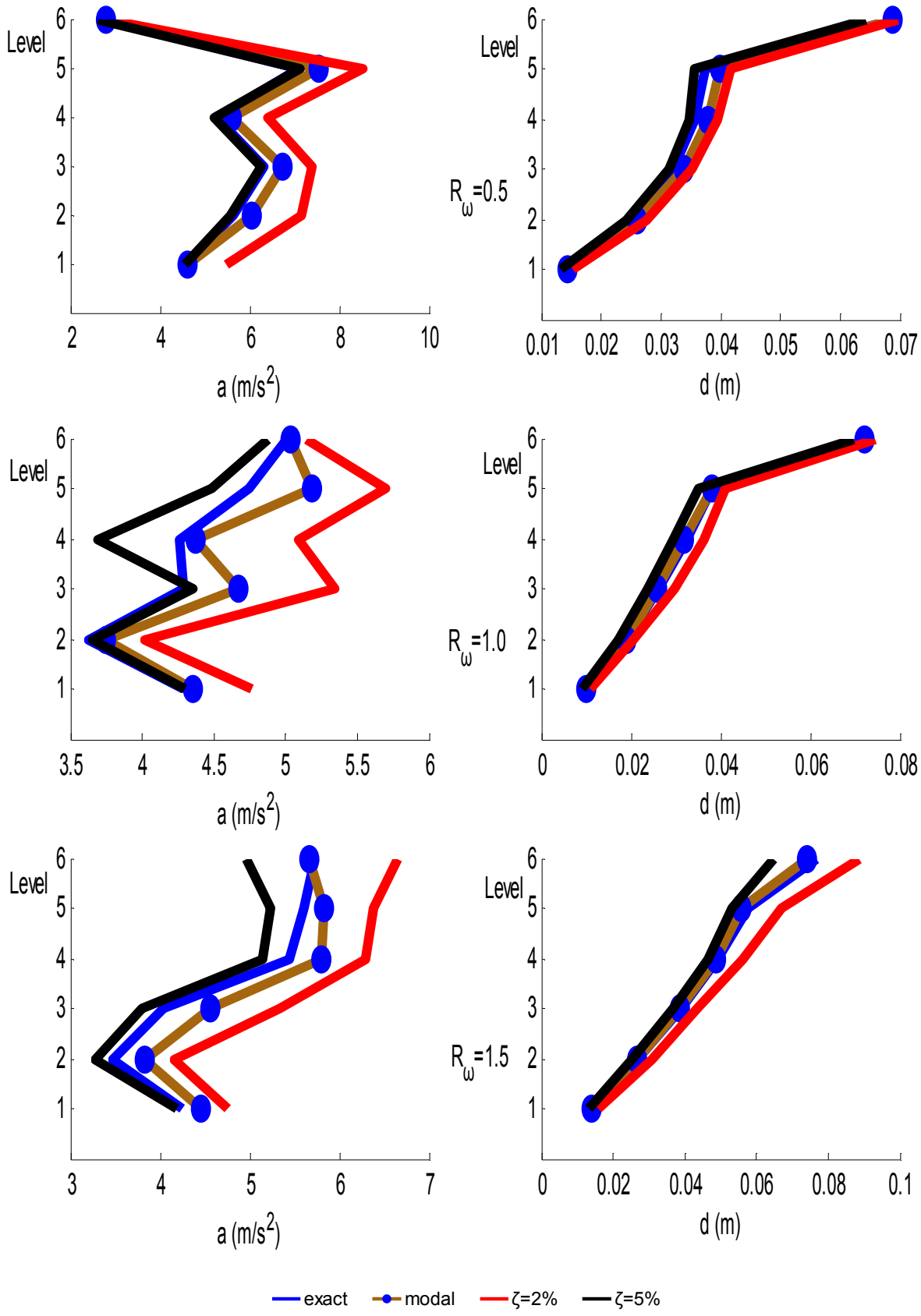
Εικ. 4.76: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=1



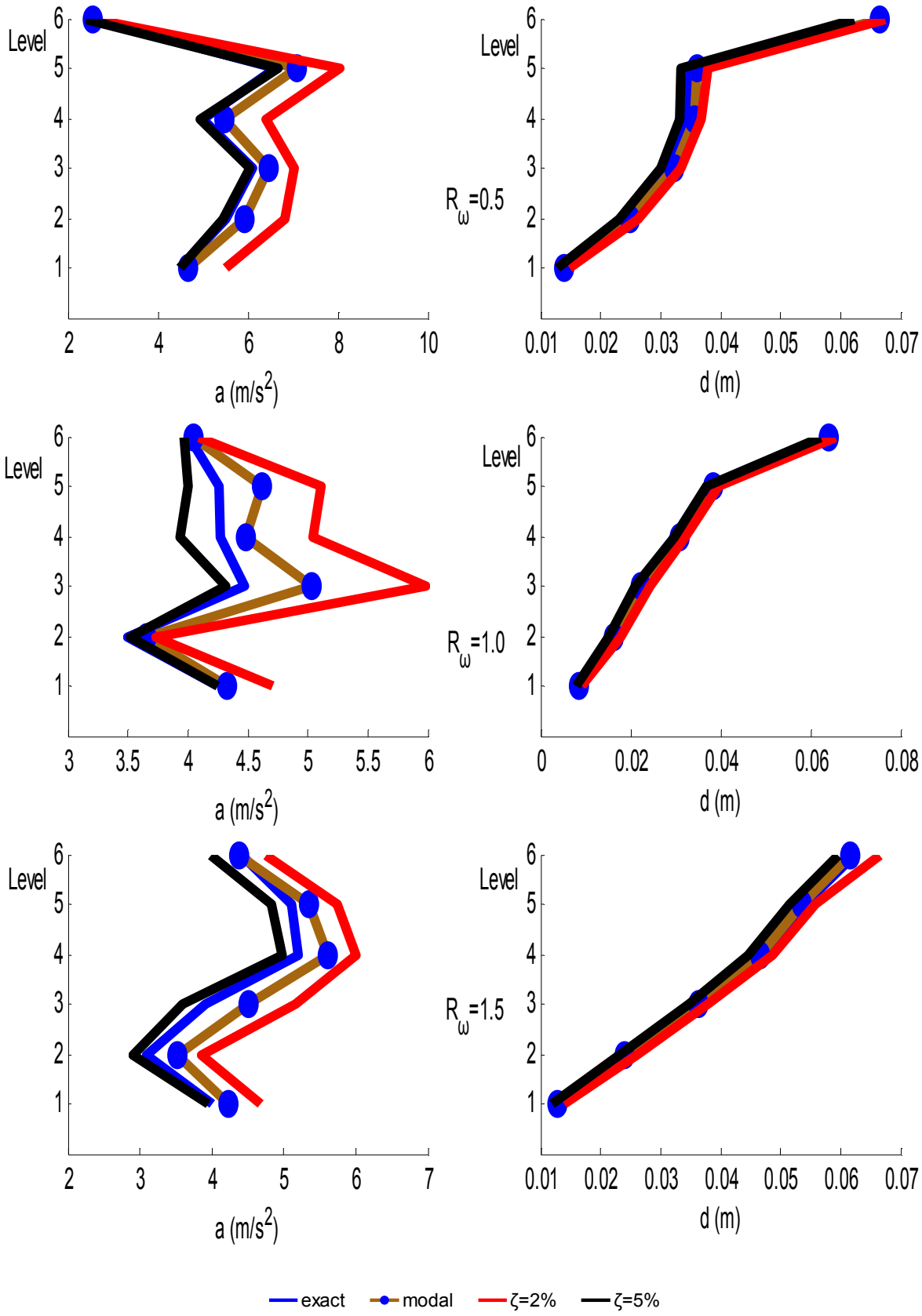
Εικ. 4.77: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.2



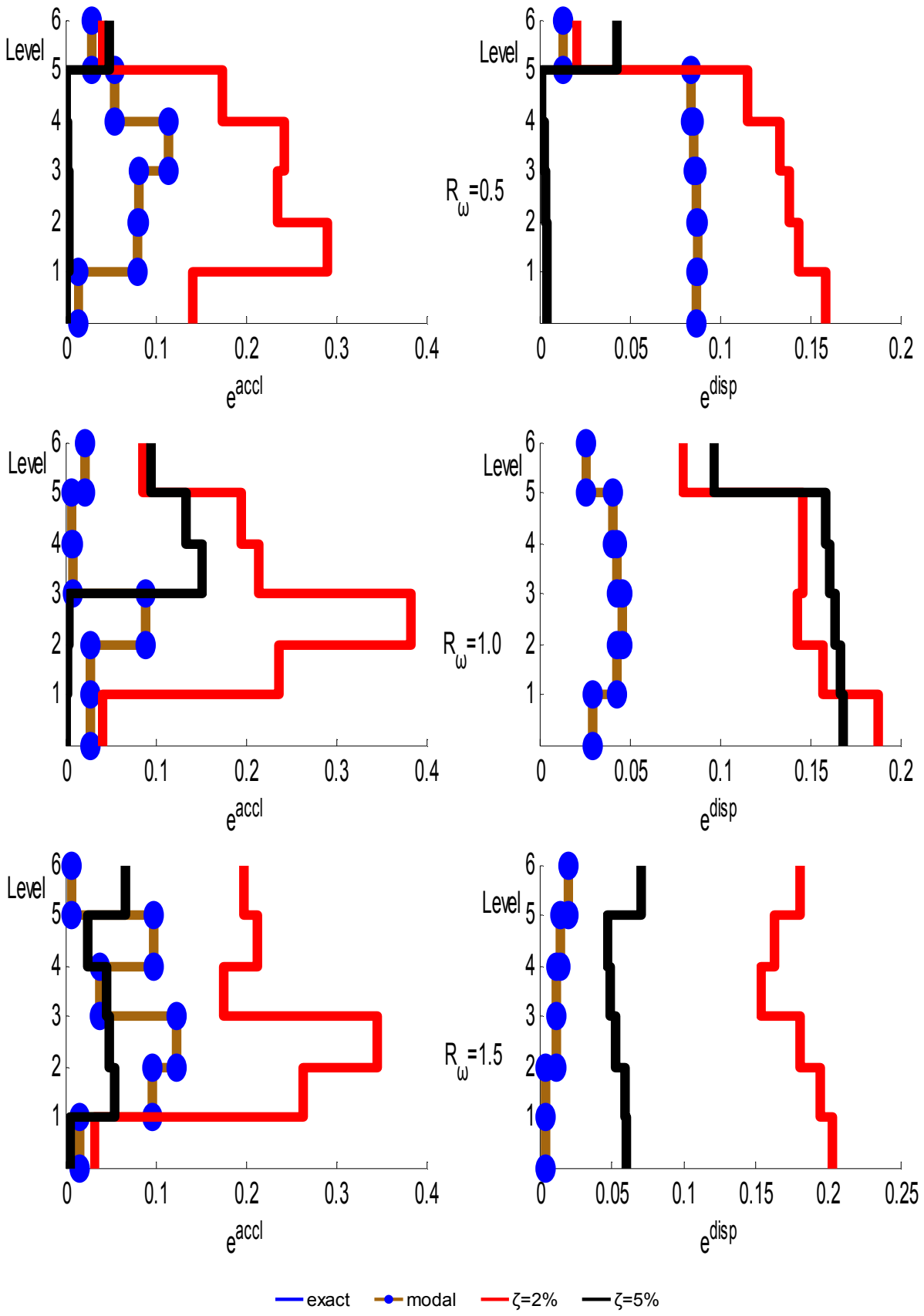
Εικ. 4.78: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.5



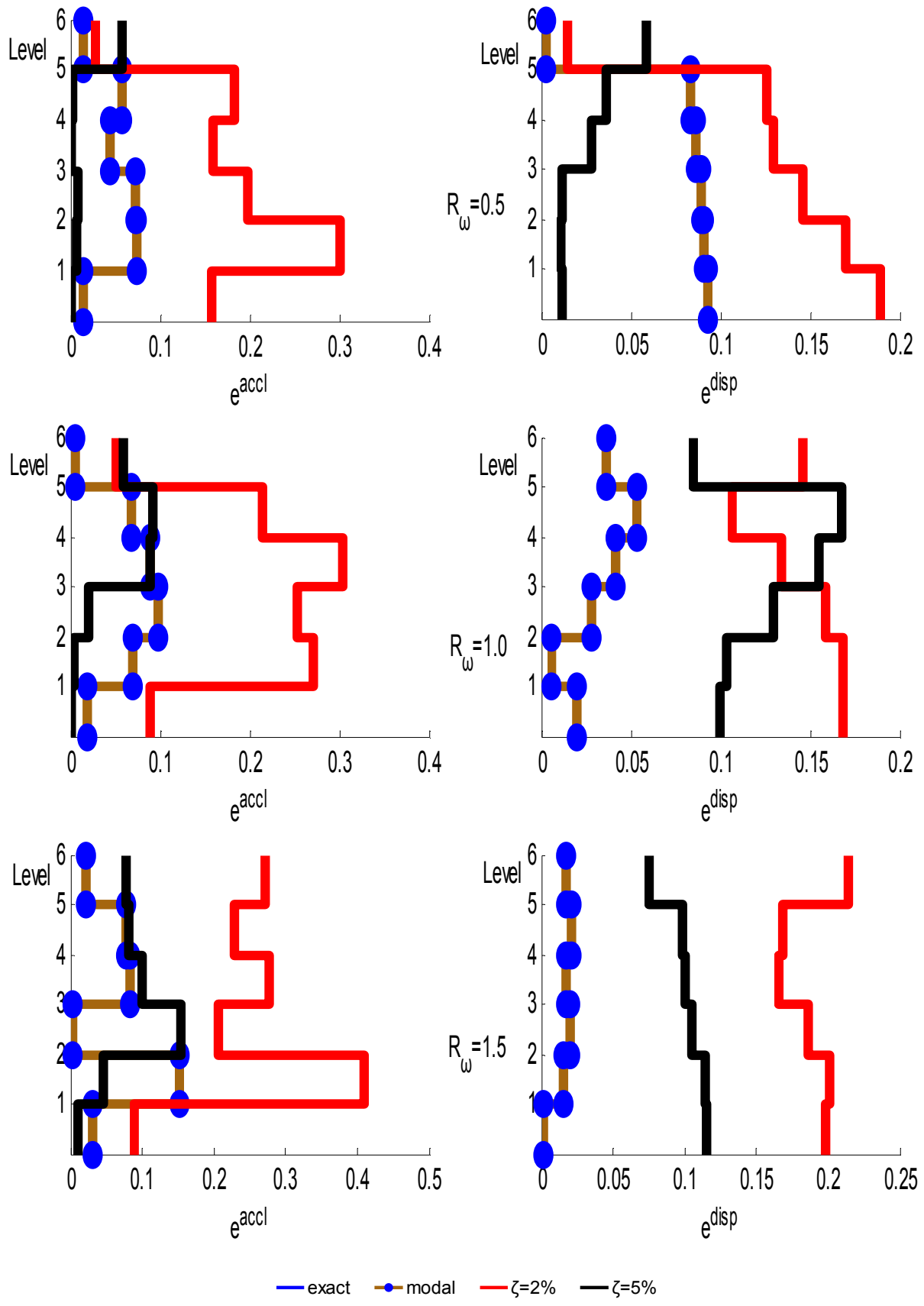
Εικ. 4.79: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.8



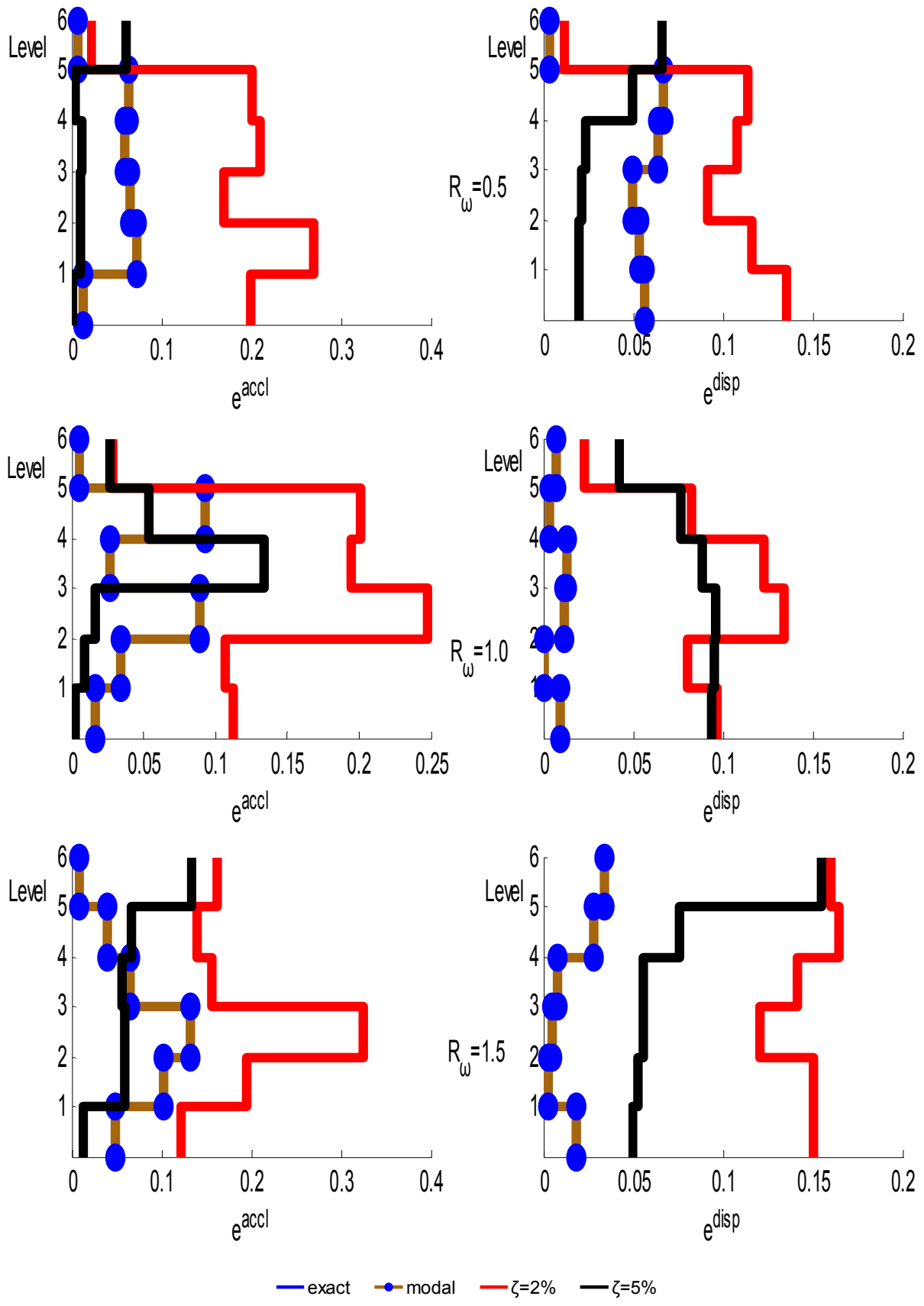
Εικ. 4.80: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=1



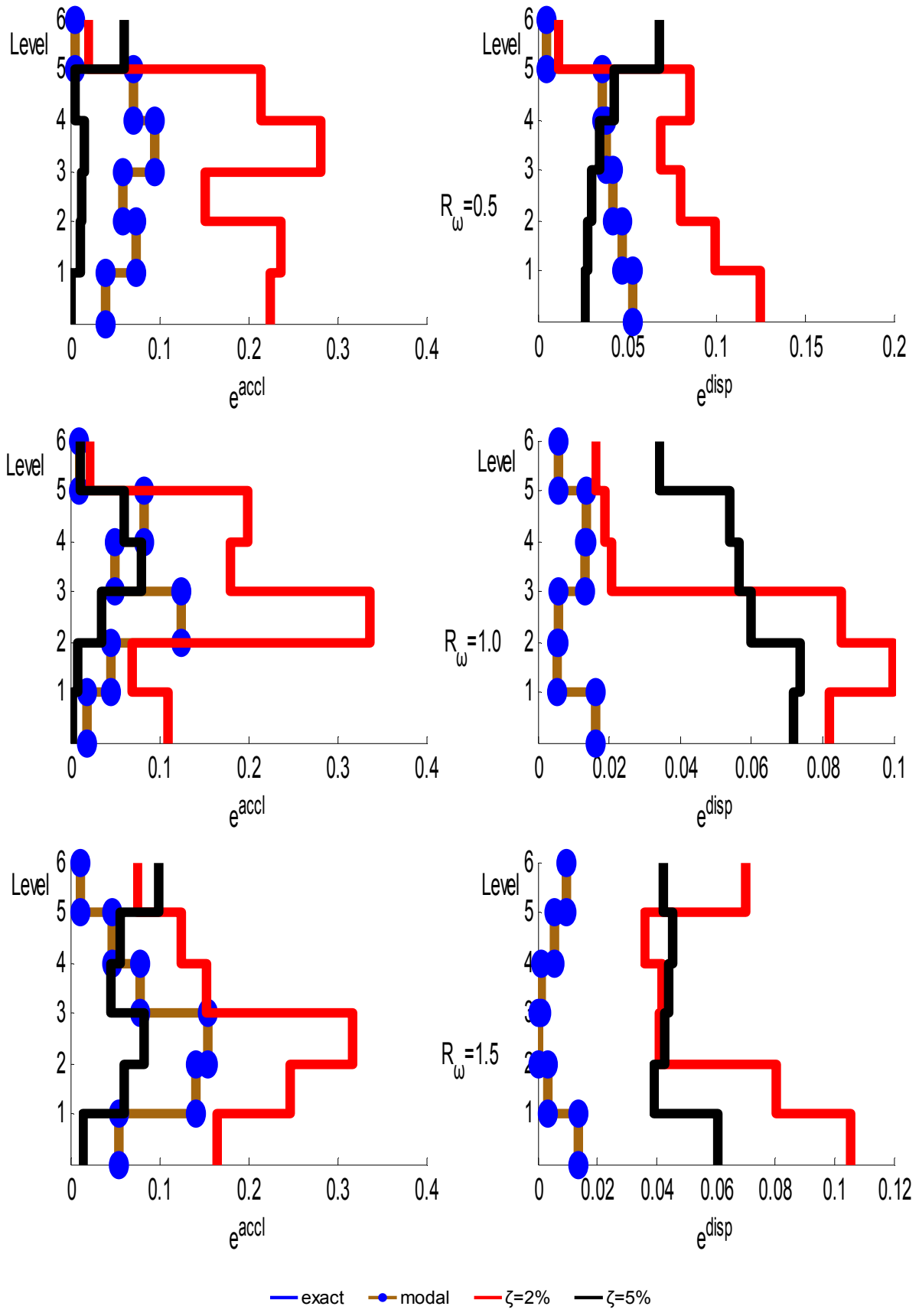
Εικ. 4.81: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.2



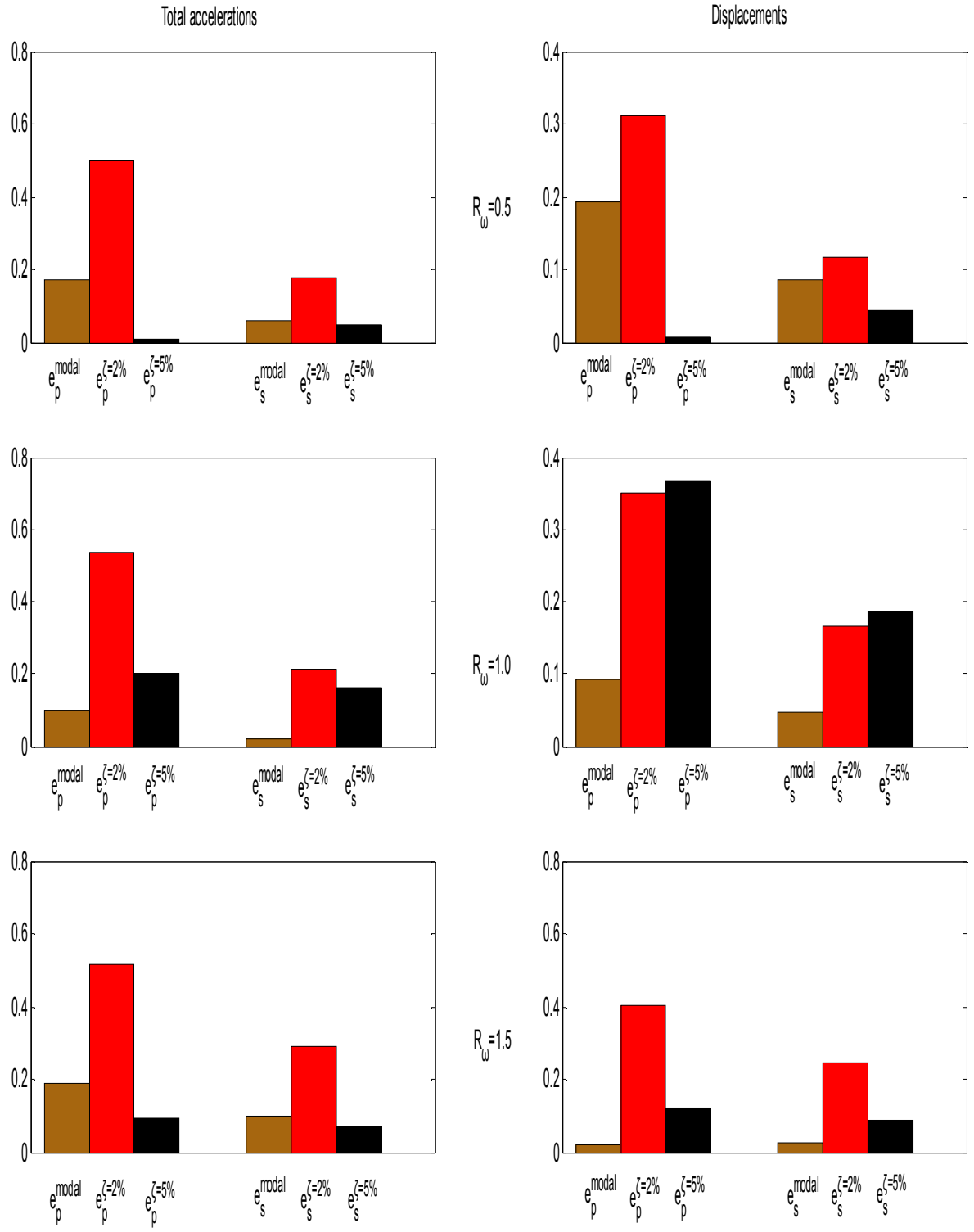
Εικ. 4.82: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.5



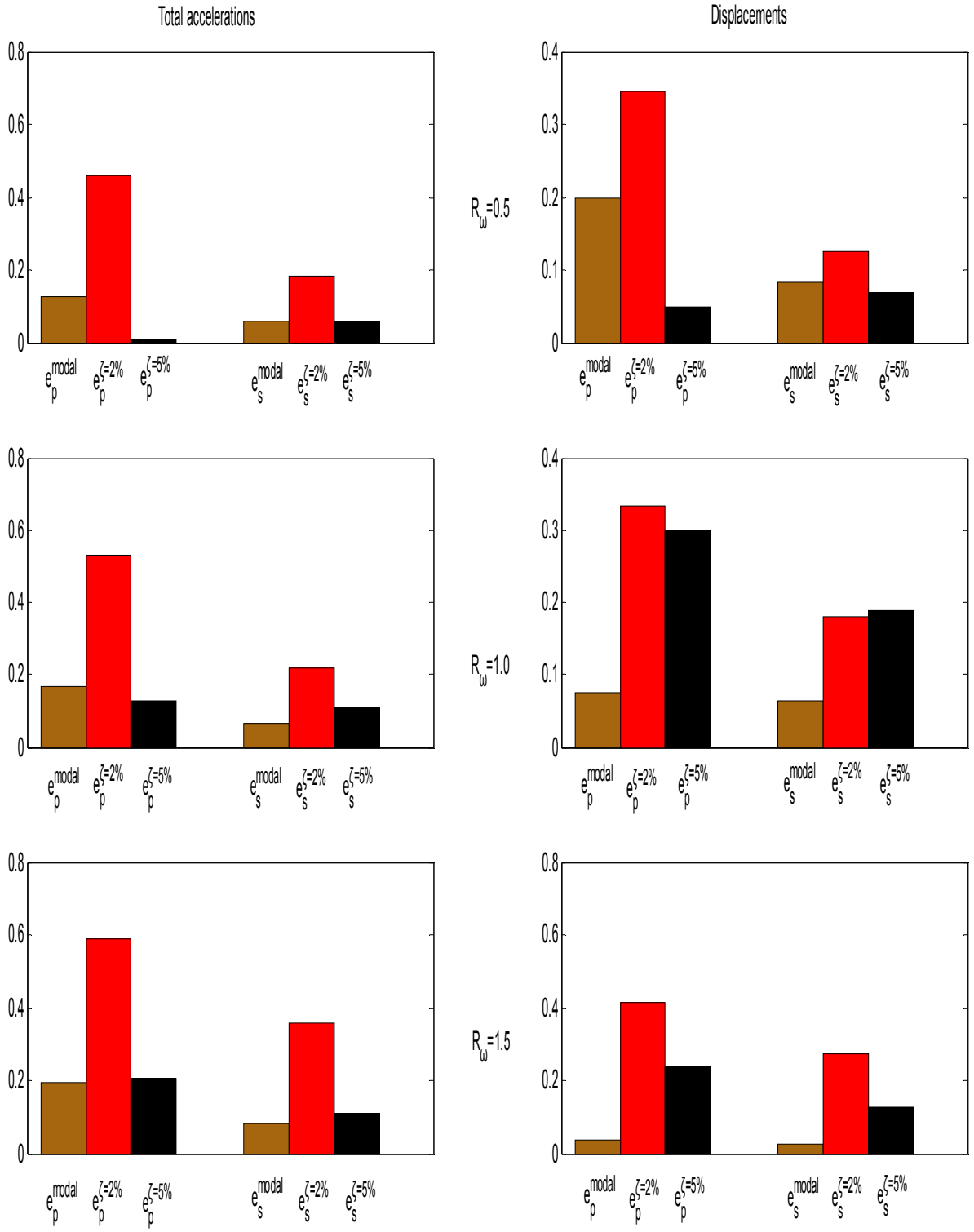
Εικ. 4.83: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.8



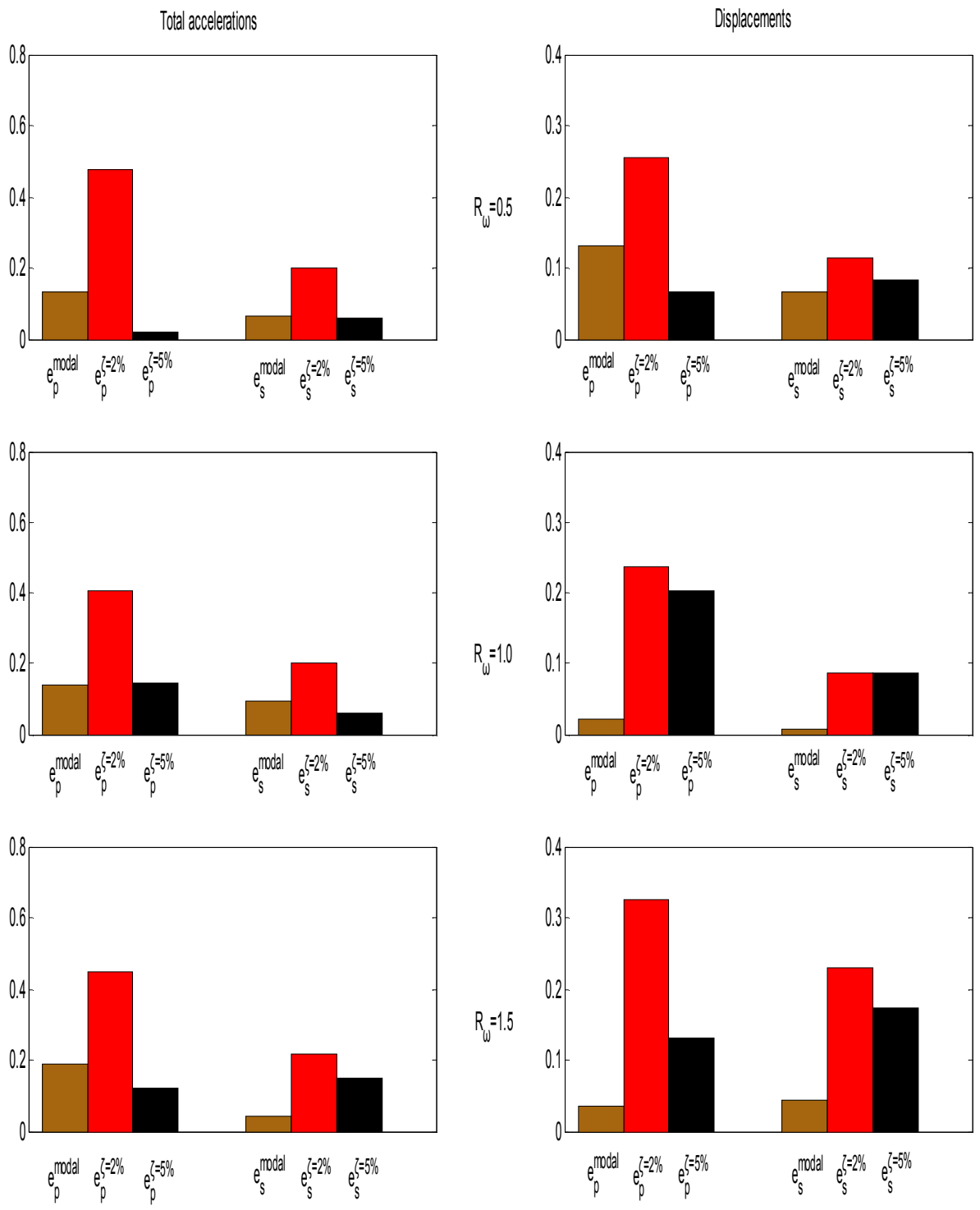
Εικ. 4.84: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=1



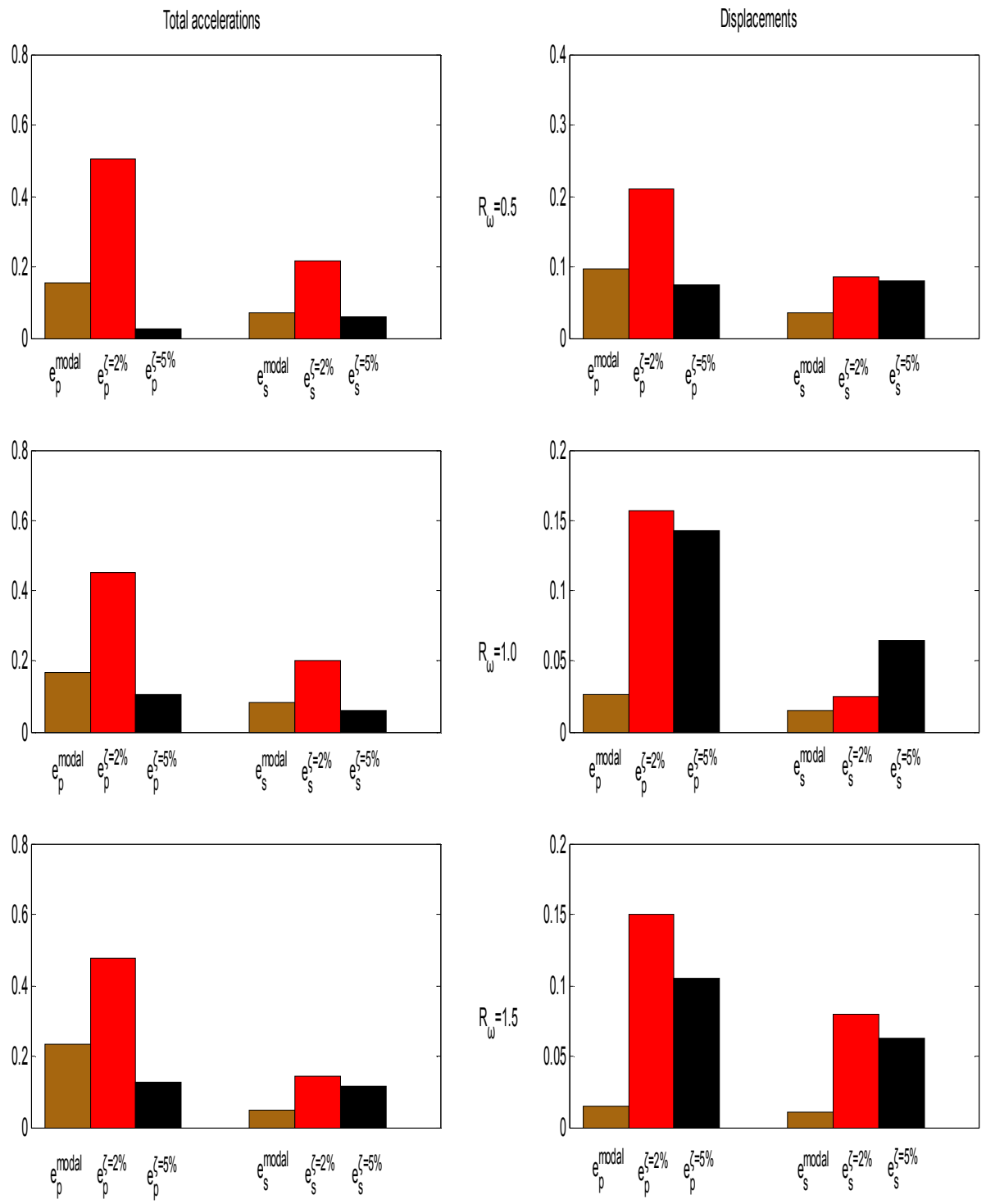
Εικ. 4.85: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.2



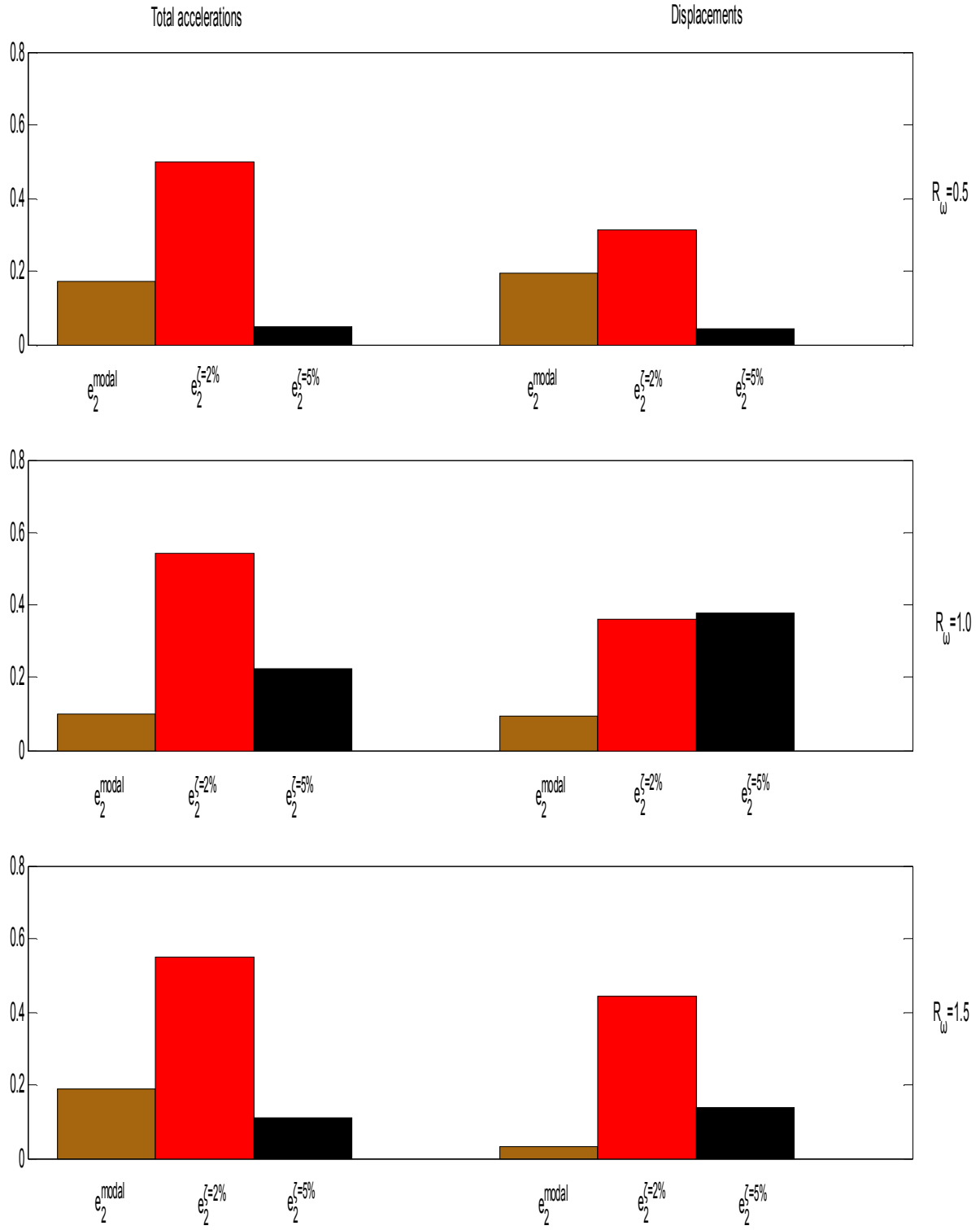
Εικ. 4.86: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.5



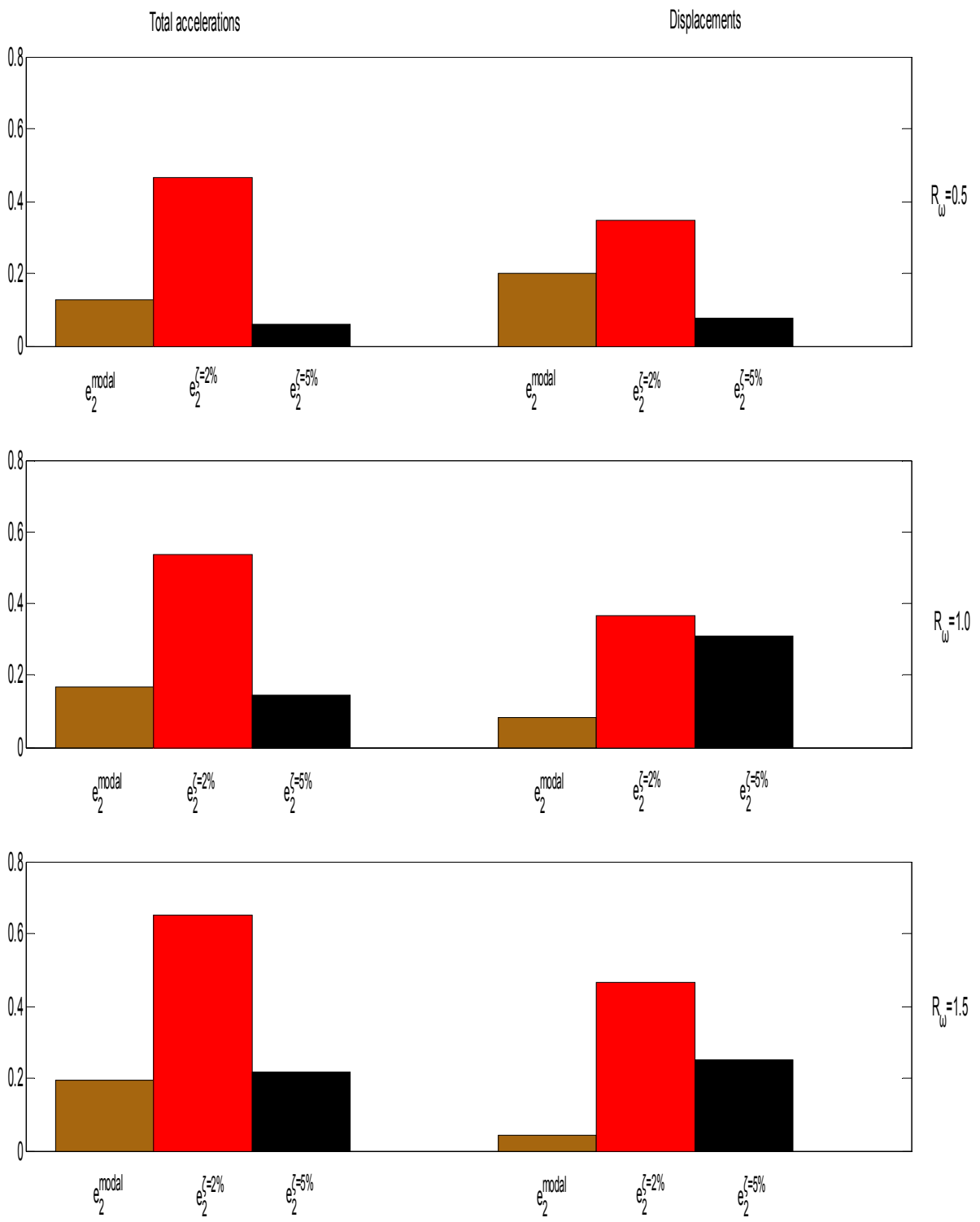
Εικ. 4.87: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.8



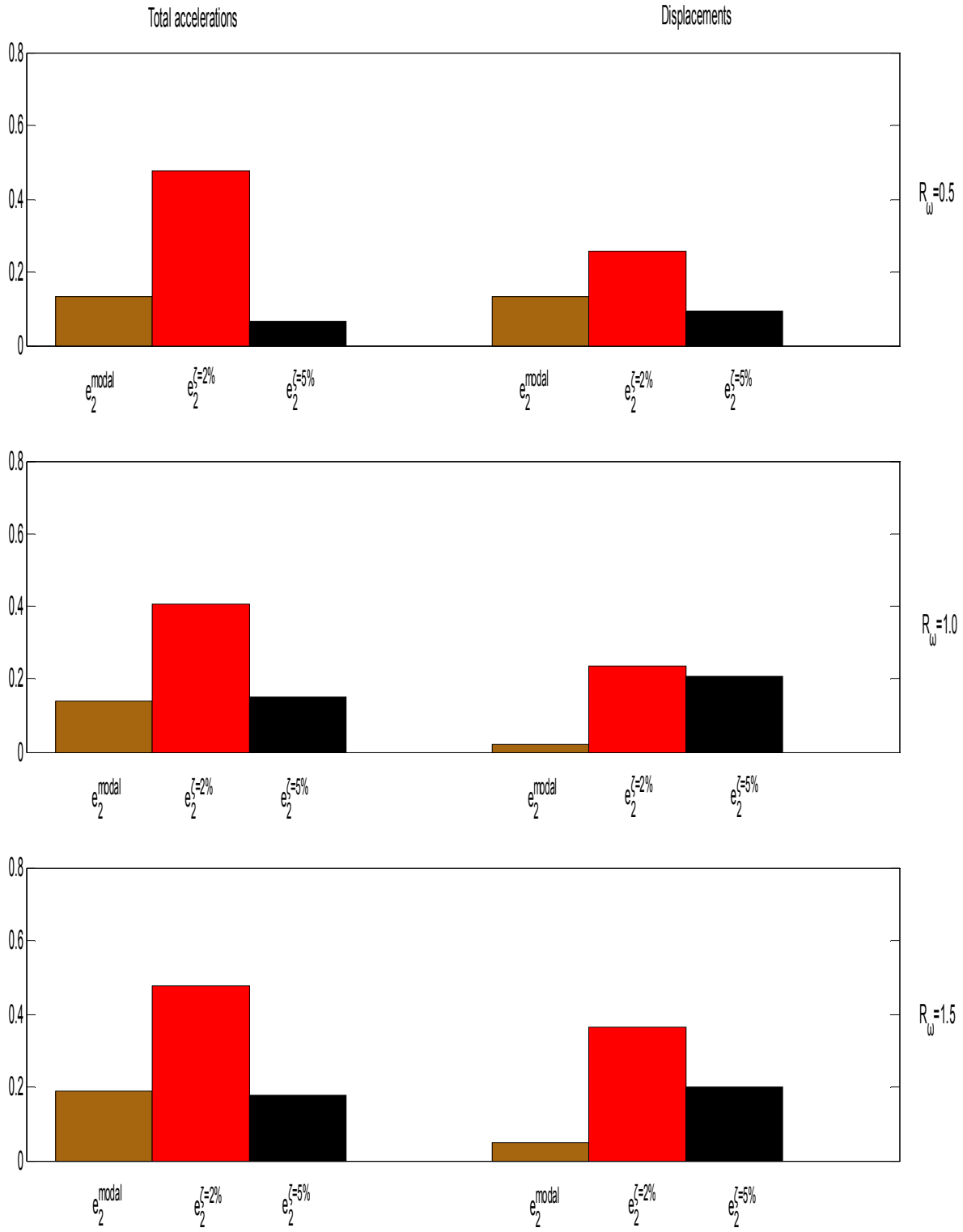
Εικ. 4.88: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=1



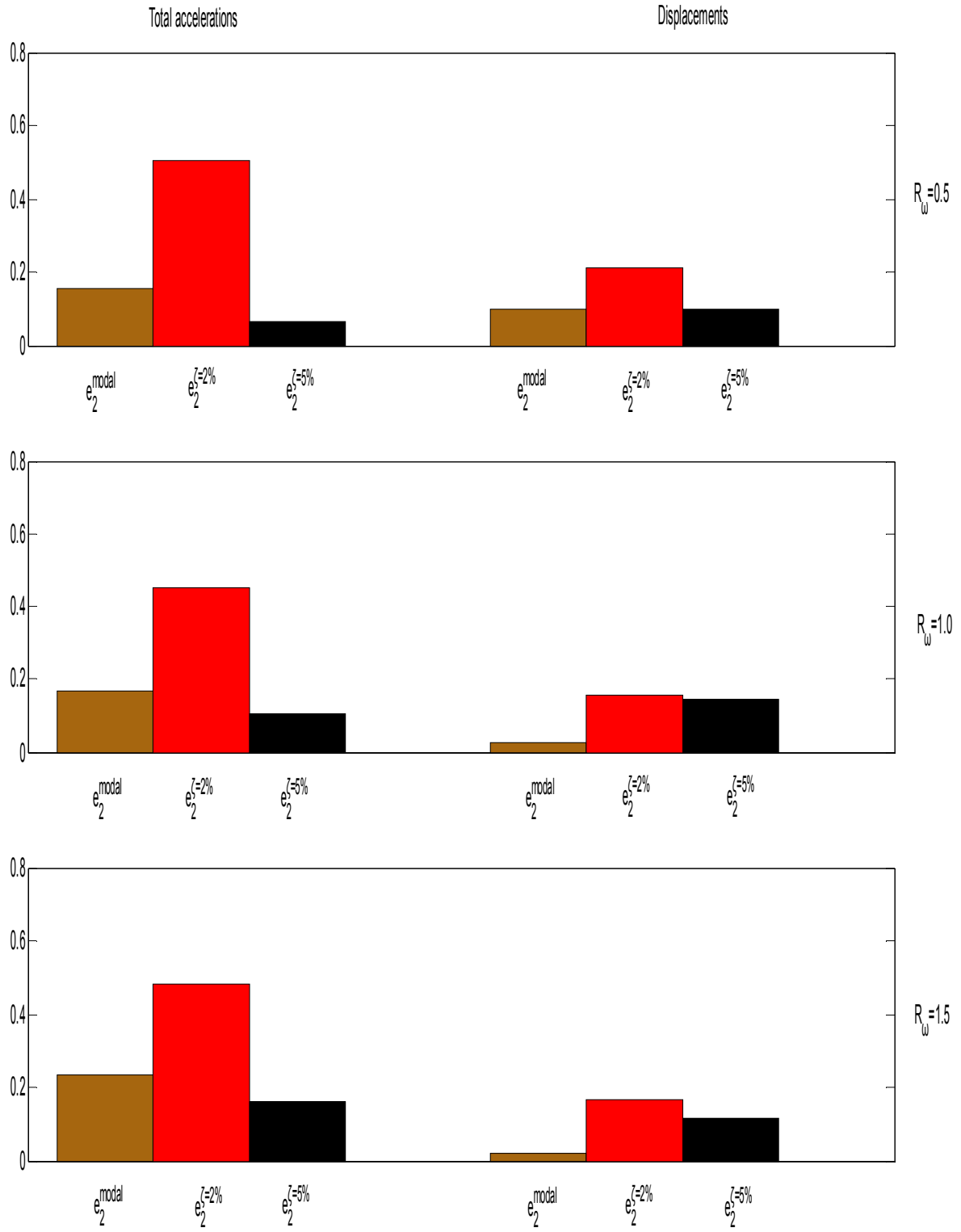
Εικ. 4.89: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.2



Εικ. 4.90: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.5



Εικ. 4.91: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.8



Εικ. 4.92: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=1

Η απόκριση που προκύπτει από τη χρήση των ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης είναι πολύ κοντά στην πραγματική απόκριση των πολυβάθμιων κατασκευών. Πολλές φορές μάλιστα, οι δύο αποκρίσεις σχεδόν ταυτίζονται, πράγμα που φαίνεται και από τα προφίλ των απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων αλλά και από τα προφίλ των αντίστοιχων σφαλμάτων. Βέβαια, πάντα υπάρχει απόκλιση της προτεινόμενης προσεγγιστικής διαδικασίας σε σχέση με την ακριβή ανάλυση. Η απόκλιση αυτή είναι μεν εγγενής στη διαδικασία της χρήσης των συντελεστών απόσβεσης που προκύπτουν από μιγαδική ανάλυση σε μια πραγματική ανάλυση, κάτι που προέκυψε και από τις σεισμικές αναλύσεις του διβάθμιου φορέα, κυρίως όμως ενισχύεται και από τη διαδικασία της αντιστοίχισης των πολυβάθμιων κατασκευών σε ισοδύναμες διβάθμιες και από αυτές στα διαγράμματα των ισοδύναμων ζ. Η απόκλισή όμως αυτή είναι σε ανεκτό επίπεδο και εφ' όσον πρόκειται για μελέτη μιας κατασκευής είναι σε επίπεδα τα οποία είναι ανεκτά και εν πάση περιπτώσει αντίστοιχα με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση των κανόνων συνδυασμού των μεγίστων κατά την ιδιομορφική φασματική ανάλυση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της απόκρισης των μικτών κατασκευών που εξετάστηκαν όταν υιοθετείται η προτεινόμενη ιδιομορφική απόσβεση και όταν αντιθέτως χρησιμοποιείται ενιαία απόσβεση ίση με 2% κατά τη συνήθη μελετητική πρακτική. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, η ιδιομορφική απόσβεση δίνει καλύτερη πρόβλεψη της απόκρισης. Αυτό φαίνεται από τα προφίλ των αποκρίσεων σε όρους και επιταχύνσεων και μετατοπίσεων, αλλά και από τα σφάλματα, τόσο από την εξέταση της καθ' ύψος κατανομής τους στις στάθμες όσο και από την μακροσκοπική τους εξέταση με τις νόρμες των σφαλμάτων. Μάλιστα, από τις τελευταίες προκύπτει και το κέρδος στα εντατικά μεγέθη από τη χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά μεγάλο. Οι διαφορές είναι ακόμα πιο έντονες στην περίπτωση της κατασκευής των 5+1 σταθμών, όπου και λόγω της διαμόρφωσης του φορέα οι ισοδύναμοι συντελεστές κινούνται κοντά στο 5%, οπότε η υιοθέτηση του ενιαίου 2% είναι κατά πολύ συντηρητική.

Υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες η προτεινόμενη διαδικασία των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης δεν λειτουργεί πολύ καλά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της κατασκευής των 5+1 σταθμών, κατά περίπτωση η υιοθέτηση του 5% ενιαίου, δίνει εξ' ίσου καλά αποτελέσματα με την ιδιομορφική απόσβεση. Αυτό εν μέρει οφείλεται στη μετάβαση από την πολυβάθμια κατασκευή στον ισοδύναμο διβάθμιο

ταλαντωτή. Σφάλμα όμως προκύπτει και από τον τρόπο αντιστοίχισης των συντελεστών απόσβεσης σε συγκεκριμένες ιδιομορφές. Έτσι, αναλόγως με το σε ποιες ιδιομορφές αντιστοιχούνται ποιοι συντελεστές απόσβεσης, μπορεί να αποδοθεί στην κατασκευή υπερβολική ή πολύ λίγη απόσβεση. Εν γένει όμως, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και η πρόβλεψη της απόκρισης είναι γενικώς αρκετά καλύτερη ή το ίδιο συγκρίσιμη με την περίπτωση που υιοθετείται η ενιαία απόσβεση 2%.

4.14 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια εναλλακτική προσέγγιση στην ανάλυση των μικτών κατασκευών. Συγκεκριμένα, σε κατασκευές στις οποίες η πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης είναι τέτοια ώστε να καθιστά την ξεχωριστή μελέτη τους απαγορευτική, γίνεται μια διερεύνηση που αφορά στη χρήση ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης, προκειμένου να αποφευχθεί η ανάλυση της κατασκευής με ενιαία συντηρητική απόσβεση ίση με 2%. Συγκεκριμένα, πάλι χρησιμοποιούνται διβάθμιοι ισοδύναμοι φορείς στους οποίους γίνεται μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση. Από τις μιγαδικές ιδιοτιμές προκύπτουν οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι εφαρμόζονται σε κλασσική ανάλυση χρονοϊστορίας σε μια προσπάθεια προσεγγιστικής εφαρμογής τους με τρόπο που να είναι οικείος με τη μελετητική πρακτική. Τα σφάλματα που προκύπτουν, τόσο από τις αρμονικές όσο και από τις σεισμικές διεγέρσεις, είναι αρκετά μικρά ώστε να ενθαρρύνεται η περαιτέρω εφαρμογή τους σε πολυβάθμιες κατασκευές.

Η χρήση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης στις πολυβάθμιες κατασκευές εμπεριέχει και άλλη μια πηγή σφάλματος, τη μετάβαση από την πολυβάθμια μικτή κατασκευή στη διβάθμια ισοδύναμή της. Παρ' όλα αυτά, για τους δύο τύπους κατασκευών που εξετάζονται, το σφάλμα που προκύπτει από τους ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης είναι αρκετά μικρό για την πλειονότητα των συνδυασμών δυναμικών χαρακτηριστικών των δύο τμημάτων. Συγκεκριμένα, τα σφάλματα που προκύπτουν τις περισσότερες περιπτώσεις είναι σε αποδεκτό επίπεδο όσον αφορά

τις μελετητικές ανάγκες, ενώ σχεδόν πάντα είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα της περίπτωσης που υιοθετείται η ενιαία απόσβεση ίση με 2%.

5

Ισοδύναμοι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης

5.1 Γενικά

Η αποσύζευξη της ανάλυσης των μικτών κατασκευών σκυροδέματος-χάλυβα, ενδέχεται να οδηγήσει σε σφάλμα στον υπολογισμό της απόκρισης άρα και των εντατικών μεγεθών της κατασκευής, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3. Η συνήθης πρακτική σε περιπτώσεις μεγάλου σφάλματος αποσύζευξης, δεδομένων των προβλημάτων που σχετίζονται με την αδιαστατοποίηση του μητρώου απόσβεσης, είναι η συζευγμένη ανάλυση της κατασκευής, με έναν ενιαίο συντηρητικό συντελεστή απόσβεσης ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσος με 2%. Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται οι δυσκολίες στην ιδιομορφική ανάλυση κατασκευών του συγκεκριμένου τύπου, και προτείνεται η χρήση ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης, σκοπός των οποίων είναι να χρησιμοποιηθούν σε μια ισοδύναμη συζευγμένη ανάλυση της κατασκευής, σε αντικατάσταση της ορθής ανάλυσης με την κανονική κατανομή της απόσβεσης.

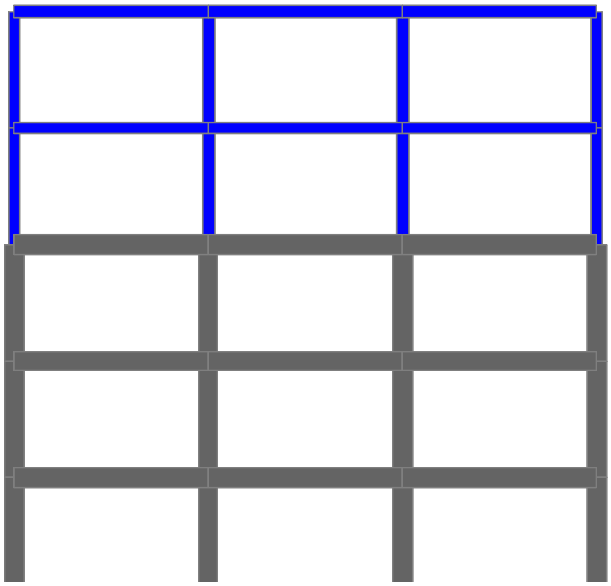
Εναλλακτικά, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι δε διαφέρουν ανάλογα με την ιδιομορφή, αλλά είναι ενιαίοι. Οι συντελεστές αυτοί είναι πιο κοντά στην καθημερινή μελετητική πρακτική, και έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και σε μια φασματική δυναμική ανάλυση με συνηθισμένα εμπορικά πακέτα λογισμικού. Η χρήση τους παρέχει τη δυνατότητα, αντί η ανάλυση να γίνει με την κανονική κατανομή της απόσβεσης, ή με συντηρητικό συντελεστή απόσβεσης 2%, να γίνει με ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης, οι οποίοι προσεγγίζουν κατά το δυνατόν την πραγματική απόκριση και συνεπάγονται το μικρότερο δυνατό σφάλμα στην πρόβλεψη της απόκρισης της κατασκευής.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των ενιαίων αυτών συντελεστών απόσβεσης, και γίνεται διερεύνηση του σφάλματος που συνεπάγεται η χρήση τους. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας η

οποία περιλαμβάνει δοκιμές μέσα από ένα εύρος πιθανών τιμών και επιλογή της βέλτιστης τιμής απόσβεσης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος που προκύπτει από τη χρήση τους.

5.2 Προβλήματα κλασσικής διαδικασίας ανάλυσης

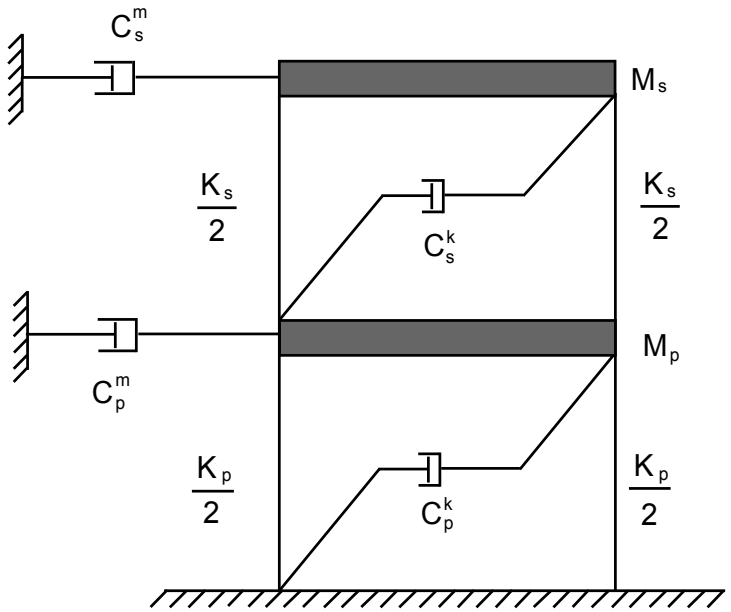
Η διαδικασία του σχηματισμού του μητρώου απόσβεσης για μια ελαστική πολυβάθμια μικτή κατασκευή, η οποία αποτελείται από δύο τμήματα, ένα από σκυρόδεμα με απόσβεση ίση με 5% και ένα από χάλυβα με απόσβεση ίση με 2%, όπως αυτή της Εικ. 5.1, παρουσιάζεται στο 4^{ο} κεφάλαιο. Η διαδικασία ουσιαστικά συνίσταται στο διαχωρισμό της κατασκευής σε δύο τμήματα αμιγή ως προς την απόσβεση, διαμόρφωση των αντίστοιχων υπομητρώων μάζας και δυσκαμψίας, και στον υπολογισμό των αντίστοιχων υπομητρώων απόσβεσης. Τα μητρώα αυτά τελικά συντίθενται, προκειμένου να δημιουργηθούν τα πλήρη μητρώα μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης που περιγράφουν τη μικτή κατασκευή.



Εικ. 5.1: Μικτή πολυβάθμια κατασκευή

Πέρα από τη δυσκολία της δημιουργίας του μητρώου απόσβεσης που να αντιπροσωπεύει την πλήρη μικτή κατασκευή, προβληματική είναι επίσης και η ανάλυση των κατασκευών αυτού του τύπου. Όπως έχει παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, για μια διβάθμια μικτή καθ' ύψος κατασκευή όπως αυτή της

Εικ. 5.2 με απόσβεση τύπου Rayleigh, η κλασσική ιδιομορφική ανάλυση δεν καταλήγει σε διαγώνιο κανονικοποιημένο μητρώο απόσβεσης, πράγμα που συνεπάγεται αδυναμία εκτέλεσης της ιδιομορφικής ανάλυσης.



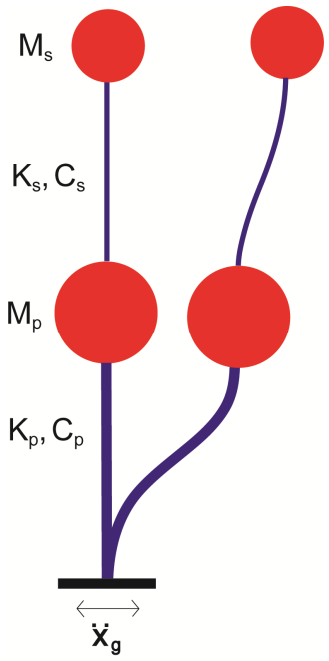
Εικ. 5.2: Σχηματική αναπαράσταση μικτής διβάθμιας κατασκευής

Στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, επιχειρείται ο υπολογισμός ιδιομορφικών τιμών απόσβεσης μέσα από μια μιγαδική ανάλυση για ένα εύρος δυναμικών χαρακτηριστικών διβάθμιων ταλαντωτών. Οι συντελεστές αυτοί, παρ' όλο που προέρχονται από μιγαδική ανάλυση, εφαρμόζονται σε μια κλασσική διαδικασία ανάλυσης, πράγμα που συνεπάγεται σφάλμα στον υπολογισμό της απόκρισης, το μέγεθος του οποίου διερευνάται ως προς τα δυναμικά χαρακτηριστικά του διβάθμιου ταλαντωτή και την επιβαλλόμενη διέγερση.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται απόπειρα να εξαχθούν ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι κατά τη συνήθη μελετητική πρακτική, η κάθε κατασκευή αντιμετωπίζεται σαν να έχει ένα μόνο συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος εξαρτάται από το δομικό σύστημα. Ο συντελεστής αυτός υπεισέρχεται στον υπολογισμό του φάσματος σχεδιασμού και όλες οι ιδιομορφές αντιστοιχούν τα μέγιστα της απόκρισής τους στο φάσμα αυτό. Έτσι, ο ενιαίος αυτός συντελεστής ρυθμίζει τη σεισμική απόκριση της κατασκευής.

5.3 Υπολογισμός ενιαίων συντελεστών απόσβεσης

Στην εργασία των Huang et al. [109], πέρα από τον υπολογισμό των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης με αναλυτικό τρόπο, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται και έναν αριθμητικός υπολογισμός τους, με βάση τη βέλτιστη δυνατή προσέγγιση της απόκρισης ανάμεσα στην ορθή και στην προσεγγιστική ανάλυση. Μια παρόμοια προσέγγιση επιχειρείται και στην παρούσα εργασία και συγκεκριμένα, η μελέτη της απόσβεσης γίνεται για μια ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή, όπως αυτή της Εικ. 5.3. Σκοπός είναι πάλι η διβάθμια αυτή κατασκευή να αποτελέσει μια ισοδύναμη αναπαράσταση πολυβάθμιων μικτών κατασκευών, ούτως ώστε τα αποτελέσματα της μελέτης να έχουν όσο το δυνατόν ευρύτερη εφαρμογή.



Εικ. 5.3: Ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή

Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, διατηρείται η αντιστοιχία των χαρακτηριστικών μεταξύ της διβάθμιας ισοδύναμης κατασκευής και της αρχικής πολυβάθμιας την οποία υποκαθιστά στην παρούσα μελέτη. Εν προκειμένω, στη στάθμη p αποδίδεται απόσβεση ίση με 5% και στη στάθμη s απόσβεση ίση με 2% σε αντιστοιχία με το υπόβαθρο και την υπερκατασκευή της μικτής κατασκευής. Οι μάζες και οι δυσκαμψίες της κάθε στάθμης $K_i, M_i, i = s,p$, οδηγούν στον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων των σταθμών, αν αυτές θεωρηθούν ως ανεξάρτητοι μονοβάθμιοι ταλαντωτές, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.1). Για να οριστεί ο συσχετισμός των

δυναμικών χαρακτηριστικών των σταθμών s και p, ορίζονται πάλι ο λόγος μαζών και ιδιοσυχνοτήτων ως το πηλίκο του αντίστοιχου μεγέθους της υπερκατασκευής προς αυτό του υποβάθρου, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (5.2).

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_i}{M_i}}, i = s,p \tag{5.1}$$

$$R_m = \frac{M_s}{M_p}, \quad R_\omega = \frac{\omega_s}{\omega_p} \tag{5.2}$$

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια βάση για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των διβάθμιων προσομοιωμάτων, ορίζεται ένα μονοβάθμιο υπόβαθρο, με μάζα ίση με 20Mgr, και ιδιοπερίοδο ίση με 0.2s, ένας ταλαντωτής δηλαδή ο οποίος βρίσκεται στο πλατό του κανονιστικού φάσματος κατά ΕΑΚ. Με δεδομένα αυτά τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου και με γνωστούς τους λόγους μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της υπερκατασκευής και του πλήρους διβάθμιου προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, αφού προσδιοριστούν η μάζα και η ιδιοσυχνότητα της υπερκατασκευής από την εξίσωση (5.2), υπολογίζεται και η δυσκαμψία της από την (5.1), και κατασκευάζονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας της πλήρους διβάθμιας κατασκευής:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_p & -K_s \\ -K_s & K_p + K_s \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

Με δεδομένα πλέον τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας της διβάθμιας κατασκευής, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί και το μητρώο απόσβεσής της. Εν προκειμένω, για την περίπτωση της διβάθμιας κατασκευής με τις δεδομένες αποσβέσεις στην κάθε στάθμη, ήτοι $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$, ακολουθείται μια διαδικασία ανάλογη με αυτήν που έχει παρουσιαστεί και στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρχικά εκτελείται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση με την οποία υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες του διβάθμιου φορέα, όπως στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$\left|\mathbf{K} - \mathbf{M}\omega_i^2\right| = 0, i = 1,2 \tag{5.4}$$

Έπειτα, γίνεται χωρισμός των μητρώων μάζας **M** και δυσκαμψίας **K** , όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2, με τρόπο τέτοιο ώστε το κάθε υπομητρώο, $\mathbf{M}^p$ και $\mathbf{M}^s$ καθώς και $\mathbf{K}^p$ και $\mathbf{K}^s$ που προκύπτει, να περιγράφει τη συμμετοχή του κάθε τμήματος

της κατασκευής στο συνολικό μητρώο μάζας και δυσκαμψίας. Αντίστοιχα, και το συνολικό μητρώο απόσβεσης $\mathbf{C}$ θεωρείται ότι αποτελείται από δύο υπομητρώα $\mathbf{C}^p$ και $\mathbf{C}^s$.

Οι ιδιοσυχνότητες της πλήρους κατασκευής που έχουν υπολογιστεί από την εξίσωση (5.4) χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (5.5) για να υπολογιστούν οι συντελεστές Rayleigh οι οποίοι οδηγούν στον υπολογισμό των υπομητρώων $\mathbf{C}^p$ και $\mathbf{C}^s$. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη για το κάθε υπομητρώο τον αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης, οι συντελεστές a_0 και a_1 για τα τμήματα p και s προκύπτουν από την εξίσωση (5.5).

$$\begin{Bmatrix} a_{0,i} \\ a_{1,i} \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta_i}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1\omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix}, i = s,p \tag{5.5}$$

Τελικά, το κάθε υπομητρώο $\mathbf{C}^i, i = s,p$, προκύπτει από την εξίσωση (5.6) και το συνολικό μητρώο απόσβεσης $\mathbf{C}$ από το άθροισμα των δύο, όπως φαίνεται στην (5.7), οπότε προκύπτει ένα μητρώο απόσβεσης το οποίο είναι αντίστοιχο με τη διαμόρφωση της κατασκευής της Εικ. 5.2.

$$\mathbf{C}^i = a_{0,i}\mathbf{M}^i + a_{1,i}\mathbf{K}^i, i = s,p \tag{5.6}$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}^p + \mathbf{C}^s \tag{5.7}$$

Στην επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία επιχειρείται η βέλτιστη προσέγγιση της ορθής απόκρισης της διβάθμιας κατασκευής, τα ορθά μεγέθη προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση της διβάθμιας κατασκευής με το μικτό μητρώο απόσβεσης όπως αυτό κατασκευάστηκε παραπάνω. Πλέον, με δεδομένα τα μητρώα μάζας $\mathbf{M}$, δυσκαμψίας $\mathbf{K}$, και απόσβεσης $\mathbf{C}$, όλα διαστάσεων 2×2, η κίνηση του φορέα περιγράφεται από την εξίσωση (5.8) όπου με το διαστάσεων 2×1 διάνυσμα $\{y\}$ αναπαριστώνται οι σχετικές μετατοπίσεις της κάθε στάθμης σε σχέση με τη βάση, το διάνυσμα $\{r\}$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα διαστάσεων και αυτό 2×1 και $\ddot{x}_g$ είναι η επιβαλλόμενη εδαφική διέγερση.

$$\mathbf{M}\{\ddot{y}\} + \mathbf{C}\{\dot{y}\} + \mathbf{K}\{y\} = -\mathbf{M}\{r\}\ddot{x}_g \tag{5.8}$$

Λαμβάνονται αποτελέσματα σε όρους μετατοπίσεων y και επιταχύνσεων $\ddot{y}$ οι οποίες μετατρέπονται σε απόλυτες επιταχύνσεις όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\left\{\bar{\ddot{y}}(t)\right\} = \left\{\ddot{y}(t)\right\} + \ddot{x}_g\{r\} \tag{5.9}$$

Προκειμένου να προκύψει μια προσέγγιση της απόκρισης της διβάθμιας κατασκευής με χρήση ενιαίου συντελεστή απόσβεσης, η παραπάνω διαδικασία για την εύρεση της απόκρισης της κατασκευής επαναλαμβάνεται, αντικαθιστώντας το μικτό μητρώο απόσβεσης με ένα νέο, το οποίο προκύπτει θεωρώντας ότι ολόκληρη η κατασκευή έχει έναν και μόνο συντελεστή απόσβεσης ζ_{un}. Στην περίπτωση αυτή και έχοντας δεδομένες τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής από την εξίσωση (5.4), οι συντελεστές Rayleigh προκύπτουν από την εξίσωση (5.10).

$$\begin{Bmatrix} a'_0 \\ a'_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta_{un}}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1\omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{5.10}$$

Δεδομένου ότι οι επιμέρους συντελεστές της κάθε στάθμης είναι $\zeta_p = 0.05$ και $\zeta_s = 0.02$, γίνεται η παραδοχή ότι ο ενιαίος συντελεστής θα κυμαίνεται ανάμεσα στους δύο επιμέρους, και συγκεκριμένα παίρνει τιμές που σαρώνουν το ενδιάμεσο διάστημα με βήμα 0.1%:

$$\zeta_{un} = \{0.02 : 0.001 : 0.05\} \tag{5.11}$$

Το προσεγγιστικό πλέον μητρώο απόσβεσης εξαρτάται από την τιμή που παίρνει ο ενιαίος συντελεστής απόσβεσης ζ_{un} και δίνεται από την εξίσωση (5.12).

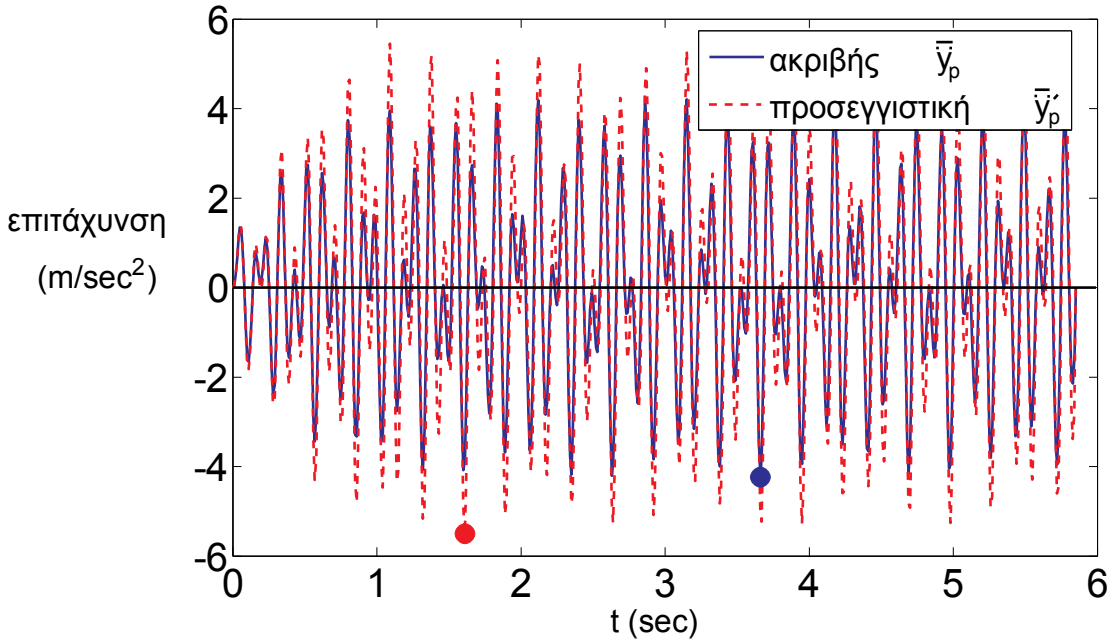
$$\mathbf{C}' = a'_0\mathbf{M} + a'_1\mathbf{K} \tag{5.12}$$

Για κάθε έναν από τους ενιαίους συντελεστές απόσβεσης, εκτελείται με συζευγμένο τρόπο η ανάλυση της διβάθμιας κατασκευής όπως περιγράφεται στην εξίσωση (5.13) , με το μητρώο $\mathbf{C}'$ διαστάσεων 2×2 να είναι αυτό που προκύπτει από τον συντελεστή ζ_{un}. Τα μητρώα μάζας $\mathbf{M}$ και δυσκαμψίας $\mathbf{K}$ είναι διαστάσεων 2×2, το διάνυσμα $\{r\}$ είναι μοναδιαίο διαστάσεων 2×1 και $\ddot{x}_g$ είναι η επιβαλλόμενη εδαφική διέγερση. Πλέον, το διάνυσμα των σχετικών ως προς τη βάση μετατοπίσεων $\{y'\}$, διαστάσεων 2×1, δίνει μια προσέγγιση της πραγματικής απόκρισης, αφού η απόσβεση που χρησιμοποιείται δεν είναι η ορθή, αλλά η ενιαία με συντελεστή ζ_{un} , και τα αποτελέσματα λαμβάνονται τόσο σε όρους μετατοπίσεων όσο και σε όρους επιταχύνσεων $\{\ddot{y}'\}$, οι οποίες μετατρέπονται σε απόλυτες επιταχύνσεις όπως περιγράφεται από την εξίσωση (5.14).

$$\mathbf{M}\{\ddot{y}'\} + \mathbf{C}'\{\dot{y}'\} + \mathbf{K}\{y'\} = -\mathbf{M}\{r\}\ddot{x}_g \tag{5.13}$$

$$\{\bar{\ddot{y}}'(t)\} = \{\ddot{y}'(t)\} + \ddot{x}_g\{r\} \tag{5.14}$$

Η χρήση του κάθε ένα από τους συντελεστές ζ_{un} στην ανάλυση του μικτού διβάθμιου συστήματος οδηγεί σε σφάλμα στην εκτίμηση της απόκρισης, αφού ουσιαστικά δεν αναλύεται η πραγματική κατασκευή αλλά μια νέα, με έναν πλασματικό ενιαίο συντελεστή απόσβεσης. Το αποτέλεσμα είναι οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων και των επιταχύνσεων να διαφέρουν ανάμεσα στις δύο αναλύσεις, όπως φαίνεται και στην Εικ. 5.4 που απεικονίζει τη σύγκριση της απόκρισης της στάθμης p σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, όταν ο διβάθμιος ταλαντωτής αναλύεται με την πραγματική κατανομή της απόσβεσης, μπλε γραμμή (ακριβής), και με έναν ενιαίο συντελεστή απόσβεσης ζ_{un} , κόκκινη γραμμή (προσεγγιστική), ενώ με τελείες αντίστοιχων χρωμάτων σημειώνονται τα απόλυτα μέγιστα της απόκρισης.



Εικ. 5.4: Σύγκριση απόκρισης της στάθμης p με χρήση της πραγματικής κατανομής της απόσβεσης και ενιαίου συντελεστή

Με γνωστές τις χρονοϊστορίες της απόκρισης της κάθε στάθμης, το σφάλμα για κάθε έναν από τους συντελεστές ζ_{un} δίνεται σε όρους μετατοπίσεων από την εξίσωση (5.15) και σε όρους απολύτων επιταχύνσεων από την εξίσωση (5.16).

$$e_i^{disp} = \frac{\max\left(\left|y_i(t)\right|\right) - \max\left(\left|y_i'(t)\right|\right)}{\max\left(\left|y_i(t)\right|\right)}, i = s,p \tag{5.15}$$

$$e_i^{accl} = \frac{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i(t)\right|\right) - \max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i'(t)\right|\right)}{\max\left(\left|\ddot{\bar{y}}_i(t)\right|\right)}, i = s,p \tag{5.16}$$

Παράλληλα με τα σφάλματα μετατοπίσεων και επιταχύνσεων στις δύο στάθμες του διβάθμιου ταλαντωτή, εξετάζεται και το άθροισμα των απολύτων τιμών τους, και η νόρμα τους, όπως περιγράφονται στις εξισώσεις (5.17) ως (5.20). Και αυτά τα σφάλματα, υπολογίζονται σε όρους τόσο μετατοπίσεων όσο και επιταχύνσεων, και έχουν ως σκοπό την συνολική απεικόνιση του σφάλματος στην κατασκευή με τη χρήση μιας μόνο ποσότητας. Συνολικά δηλαδή, για τον κάθε διβάθμιο ταλαντωτή, προκύπτουν 8 τιμές σφάλματος για κάθε τιμή του ενιαίου συντελεστή απόσβεσης ζ_{un}.

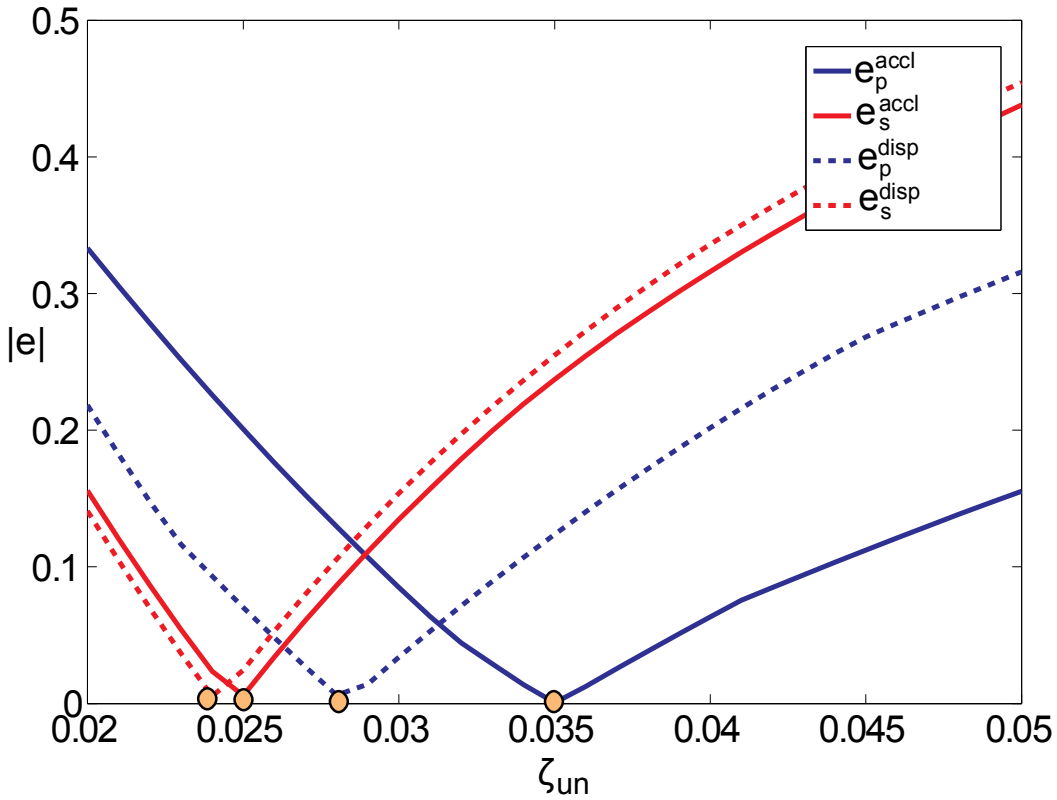
$$e_1^{disp} = \left|e_p^{disp} + e_s^{disp}\right| \tag{5.17}$$

$$e_1^{accl} = \left|e_p^{accl} + e_s^{accl}\right| \tag{5.18}$$

$$e_2^{disp} = \sqrt{\left(e_p^{disp}\right)^2 + \left(e_s^{disp}\right)^2} \tag{5.19}$$

$$e_2^{accl} = \sqrt{\left(e_p^{accl}\right)^2 + \left(e_s^{accl}\right)^2} \tag{5.20}$$

Η όλη μελέτη των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης γίνεται με σκοπό την εκλογή ενός βέλτιστου, ο οποίος μπορεί να αντικαταστήσει σε μια ανάλυση την πραγματική κατανομή της απόσβεσης. Η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται με βάση την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Συγκεκριμένα, ο κάθε συντελεστής απόσβεσης ζ_{un} συνεπάγεται και διαφορετικό σφάλμα σε όρους μετατοπίσεων ή απολύτων επιταχύνσεων στην κάθε στάθμη. Αυτός που οδηγεί σε ελαχιστοποίηση της απόλυτης τιμής του σφάλματος, αυτός δηλαδή που δίνει μέγεθος απόκρισης όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματική, αυτός είναι ο βέλτιστος δυνατός και εκλέγεται ως ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης. Ενδεικτικά, στην Εικ. 5.5 φαίνεται η διαφοροποίηση της απόλυτης τιμής του σφάλματος, τόσο σε όρους μετατοπίσεων όσο και απολύτων επιταχύνσεων στις στάθμες p και s της διβάθμιας κατασκευής, και οι τιμές του ενιαίου συντελεστή απόσβεσης που τελικά επιλέγονται ως οι βέλτιστες για κάθε περίπτωση απεικονίζονται με πορτοκαλί τελείες.



Εικ. 5.5: Κατανομή σφάλματος ανάλογα με την τιμή της ενιαίας απόσβεσης και βέλτιστες τιμές

Αυτές οι τιμές του συντελεστή ζ_{un} που καταλήγουν σε ελαχιστοποίηση του σφάλματος αποτελούν και τις τελικές ισοδύναμες ενιαίες τιμές απόσβεσης ζ_{eq}. Παρ' όλο που η απόσβεση είναι μια εγγενής ιδιότητα μιας κατασκευής με συγκεκριμένα υλικά και συγκεκριμένη διαμόρφωση στατικού συστήματος, η παραπάνω διαδικασία καταλήγει σε 8 διαφορετικές τιμές ισοδύναμης απόσβεσης, οι ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$, ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$, ${}^{accl}\zeta_{eq}^{1}$, ${}^{accl}\zeta_{eq}^{2}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$, ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$, ${}^{disp}\zeta_{eq}^{1}$, ${}^{disp}\zeta_{eq}^{2}$. Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμή ζ_{eq} δεν είναι ένα φυσικό μέγεθος, χαρακτηριστικό της κατασκευής. Αντίθετα, η κατασκευή κατά παραδοχή, έχει δύο συντελεστές απόσβεσης $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$. Ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης είναι ένα ιδεατό μέγεθος το οποίο καλείται να υποκαταστήσει την πραγματική κατανομή της απόσβεσης με τρόπο που να καθιστά εύκολη την ανάλυση. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός του, δηλαδή η επαναληπτική διαδικασία που καταλήγει σε ελαχιστοποίηση του σφάλματος, έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό διαφορετικών τιμών ζ_{eq} για κάθε στάθμη.

Επίσης, οι τιμές της ισοδύναμης απόσβεσης διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο σφάλματος, μετατοπίσεων ή επιταχύνσεων, αφού η κατασκευή δεν έχει αναλογικού τύπου απόσβεση αλλά μη κανονική, άρα δεν υπάρχει απ΄ευθείας διασύνδεση μετατοπίσεων και επιταχύνσεων μέσω του τετραγώνου των ιδιοσυχνοτήτων:

$$\bar{a}_{max} = \omega^2 d_{max} \tag{5.21}$$

Κατά συνέπεια, τα σφάλματα επιταχύνσεων και μετατοπίσεων διαφέρουν, άρα και οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης που ελαχιστοποιούν τα αντίστοιχα σφάλματα διαφέρουν. Κατ' επέκταση, αυτό συμβαίνει και στα σφάλματα e_1 και e_2 μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, τα οποία καταλήγουν σε διαφορετικές προβλέψεις αποσβέσεων ζ_{eq}.

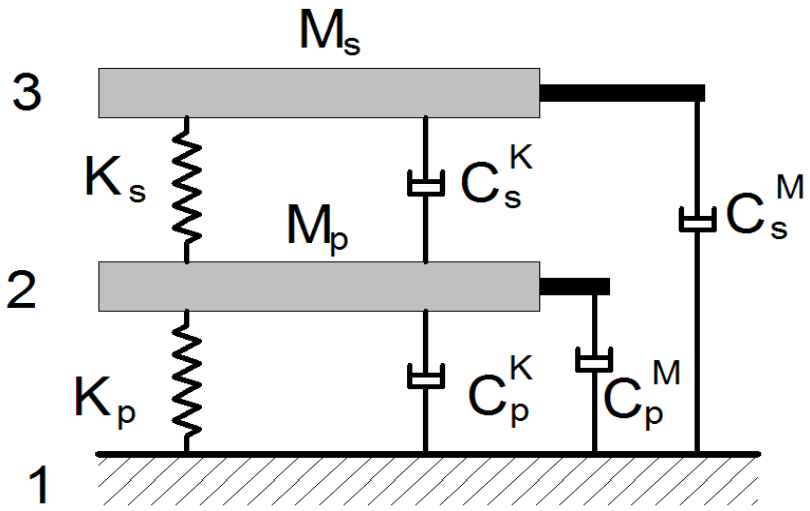
Με τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω, γίνεται η εκτίμηση των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης για την ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή, με βάση την απόκρισή της. Αυτό σημαίνει ότι οι συντελεστές ζ_{eq} προκύπτουν από μια αριθμητική διαδικασία δυναμικής ανάλυσης, στην οποία πλέον παίζει ρόλο, εκτός από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως στο κεφάλαιο 4, και η χρησιμοποιούμενη διέγερση η οποία καθορίζει και την απόκρισή της, καθώς ανάλογα με το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης διεγείρονται και αναλόγως οι ιδιομορφές άρα και προκύπτει διαφορετική απόκριση στις στάθμες της διβάθμιας κατασκευής.

5.4 Υπολογιστική εφαρμογή εύρεσης ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης

Η προαναφερθείσα διαδικασία εύρεσης σφάλματος στην πρόβλεψη της απόκρισης της διβάθμιας κατασκευής γίνεται αριθμητικά. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται διαδικασία χρονικής ολοκλήρωσης με τη μέθοδο της μέσης επιτάχυνσης (average acceleration) κατά Newmark, όπως αυτή περιγράφεται από τον Chopra [1]. Η ισοδύναμη διβάθμια κατασκευή είναι ελαστική και διαμορφώνεται με βάση έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή ο οποίος έχει μάζα ίση με 20Mgr και ιδιοπερίοδο ίση με 0.2s, και ο οποίος αποτελεί το υπόβαθρο p. Ακολούθως, και με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) είναι δυνατόν να υπολογιστούν και τα χαρακτηριστικά της υπερκατασκευής με βάση τις εξισώσεις (5.1) και (5.2), και με τον τρόπο αυτό να προκύψουν και τα χαρακτηριστικά της ισοδύναμης διβάθμιας κατασκευής της Εικ. 5.3. Η κάθε στάθμη του διβάθμιου φορέα έχει χαρακτηριστικά απόσβεσης αντίστοιχα με αυτά του τμήματος της πολυβάθμιας μικτής κατασκευής που καλείται να προσομοιώσει. Έτσι κατά την ορθή ανάλυση του

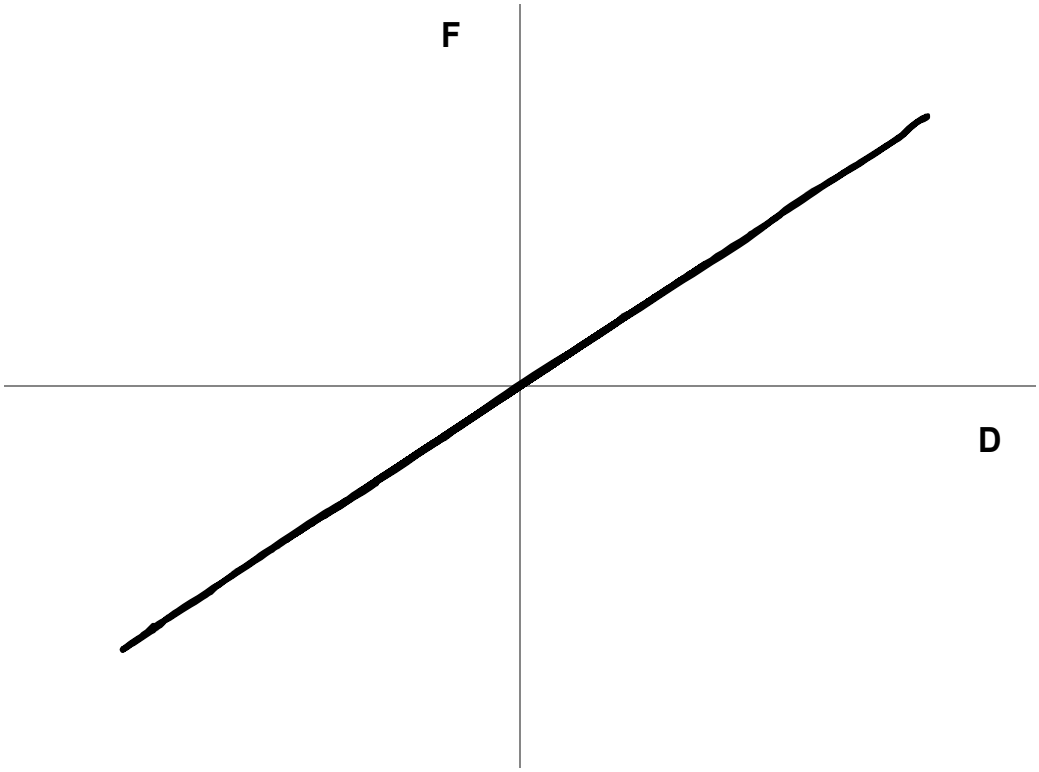
διβάθμιου συστήματος, η στάθμη p έχει απόσβεση $\zeta_p = 5\%$ και η στάθμη s $\zeta_s = 2\%$. Ο διβάθμιος ταλαντωτής έχει σε κάθε στάθμη απόσβεση τύπου Rayleigh, αλλά στο σύνολό του έχει μη κανονική απόσβεση και ο υπολογισμός του μητρώου απόσβεσής του, γίνεται με τη διαδικασία που περιγράφεται στις εξισώσεις (5.3) ως (5.7). Σε κάθε μια από τις προσεγγιστικές αναλύσεις, ο διβάθμιος ταλαντωτής έχει και στις δύο στάθμες του απόσβεση ίση με ζ_{un}, και το μητρώο απόσβεσής του δίνεται από τις εξισώσεις (5.10) ως (5.12).

Το λογισμικό Opensees (OS) [124] χρησιμοποιείται πάλι για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος της διέγερσης των διβάθμιων ταλαντωτών από εδαφική διέγερση. Ο ταλαντωτής της Εικ. 5.3 προσομοιώνεται με στοιχεία ZeroLength (ZL), με τα οποία αποδίδεται σε κάθε βαθμό ελευθερίας η επιθυμητή δυσκαμψία και η επιθυμητή απόσβεση χωρίς να απαιτείται να δημιουργηθεί περίπλοκο γεωμετρικό μοντέλο της κατασκευής. Όπως και στο κεφάλαιο 4, το προσομοίωμα που αναλύεται έχει σε κάθε στάθμη του απόσβεση κατά Rayleigh, οπότε υιοθετείται μια διάταξη στοιχείων ZL, όπως αυτή που φαίνεται σχηματικά στην Εικ. 5.6, προκειμένου να αποδοθούν αφ' ενός οι δυσκαμψίες των σταθμών και αφ' ετέρου οι αποσβέσεις, τόσο οι ανάλογες με τη δυσκαμψία οι οποίες ενεργοποιούνται από τη σχετική κίνηση των σταθμών, όσο και οι ανάλογες με τη μάζα, οι οποίες ενεργοποιούνται με την απόλυτη κίνηση των σταθμών. Το προσομοίωμα έχει τρεις, κόμβους, εκ των οποίων ο ένας είναι πλήρως δεσμευμένος και οι άλλοι δύο, στους οποίους αποδίδονται και οι μάζες της κάθε στάθμης, έχουν ελεύθερη κίνηση μόνο κατά μια διεύθυνση, αυτήν της εδαφικής κίνησης.



Εικ. 5.6: Υπολογιστικό προσομοίωμα στο Opensees

Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα στοιχεία μηδενικού μήκους ZL χρησιμοποιούνται τόσο για την απόδοση δυσκαμψίας στο προσομοίωμα όσο και για την απόδοση απόσβεσης. Συγκεκριμένα, με δύο στοιχεία ZL τα οποία συνδέουν τους κόμβους 1 με 2 και 2 με 3 αποδίδεται η επιθυμητή δυσκαμψία της κάθε στάθμης. Τα στοιχεία αυτά έχουν διάγραμμα δύναμης (F) - μετατόπισης (D) που υπακούει σε νόμο γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς, όπως αυτό της Εικ. 5.7, κάτι που σημαίνει ότι δε μπορούν να υλοποιήσουν απόσβεση.



Εικ. 5.7: Γραμμική ελαστική συμπεριφορά

Η απόσβεση που σχετίζεται με τη σχετική κίνηση των δύο σταθμών και είναι ανάλογη με τη δυσκαμψία τους υλοποιείται με δύο στοιχεία ZL που συνδέουν τις δύο στάθμες μεταξύ τους και τον κόμβο 2 με τον κόμβο 1, και τέλος, η απόσβεση που σχετίζεται με την απόλυτη κίνηση των δύο σταθμών και είναι ανάλογη με τη μάζα της κάθε μιας, υλοποιείται και αυτή με δύο στοιχεία ZL που συνδέουν την κάθε μια από τις στάθμες με τον κόμβο του εδάφους.

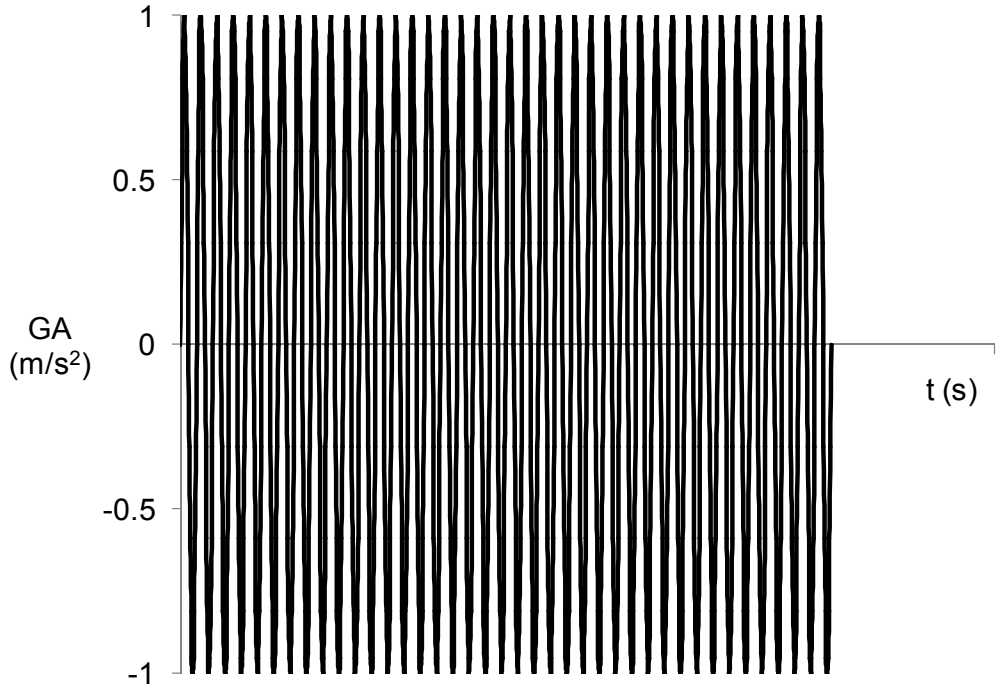
Στην περίπτωση της ορθής ανάλυσης με το μικτό μητρώο απόσβεσης, οι αποσβεστήρες C_i^M παίρνουν τιμές από τον πολλαπλασιασμό των μητρώων $a_{0,i}\mathbf{M}^i$, και οι αποσβεστήρες C_i^K από τον πολλαπλασιασμό $a_{1,i}\mathbf{K}^i$, $i = s,p$. Σε κάθε μια από τις

περιπτώσεις των προσεγγιστικών αναλύσεων με τους ενιαίους συντελεστές ζ_{un}, οι αποσβεστήρες C_i^M παίρνουν τιμές από το γινόμενο $a_0'\mathbf{M}^i$, και οι αποσβεστήρες C_i^K από το γινόμενο $a_1'\mathbf{K}^i$, $i = s,p$.

Κάθε δυναμική ανάλυση των διβάθμιων προσομοιωμάτων της Εικ. 5.6, καταλήγει σε καταγραφή των χρονοϊστοριών σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων των κόμβων 2 και 3, και στις τελευταίες προστίθεται η χρονοϊστορία των επιβαλλόμενων εδαφικών επιταχύνσεων προκειμένου να μετατραπούν σε απόλυτες επιταχύνσεις. Έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός των σφαλμάτων των εξισώσεων (5.15) ως (5.20) για κάθε ένα διβάθμιο ταλαντωτή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών, και για κάθε μια τιμή του ενιαίου λόγου απόσβεσης ζ_{un}, προκειμένου να προκύψει ο βέλτιστος ισοδύναμος συντελεστής ζ_{eq}. Το αρχείο εισαγωγής δεδομένων για το OS [124], είναι το zl2_damping.tcl που παρατίθεται στο παράρτημα της διατριβής.

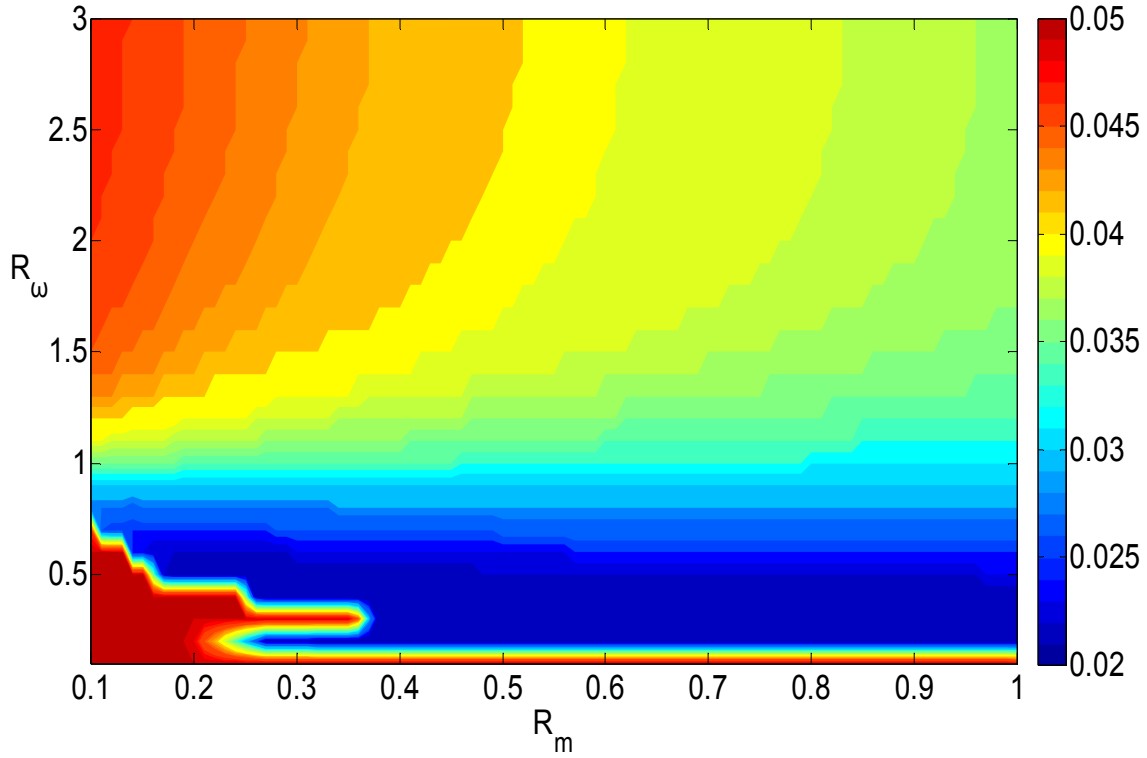
5.5 Ενιαίος συντελεστής απόσβεσης από αρμονικές σε συντονισμό διεγέρσεις

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία υπολογισμού των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη εδαφική διέγερση. Σε πρώτη φάση χρησιμοποιείται μια αρμονική διέγερση σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή του διβάθμιου ταλαντωτή. Συγκεκριμένα, για κάθε έναν από του διβάθμιους ταλαντωτές που αναλύονται, άρα και για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), γίνεται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, όπως αυτή περιγράφεται από τις εξισώσεις (5.3) και (5.4), και προκύπτουν οι ιδιοσυχνότητες των δύο ιδιομορφών, ω_1 και ω_2. Δεδομένου ότι η πρώτη ιδιομορφή έχει μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής στην τελική απόκριση του διβάθμιου φορέα, επιλέγεται η αρμονική διέγερση που τελικά δημιουργείται, να είναι σε συντονισμό με αυτήν ώστε να προκύψει η μέγιστη δυνατή ενίσχυση. Η εδαφική διέγερση που δημιουργείται (Ground Acceleration) έχει πλάτος $1 m/s^2$ και διάρκεια 40 κύκλους, όπως φαίνεται στην Εικ. 5.8.

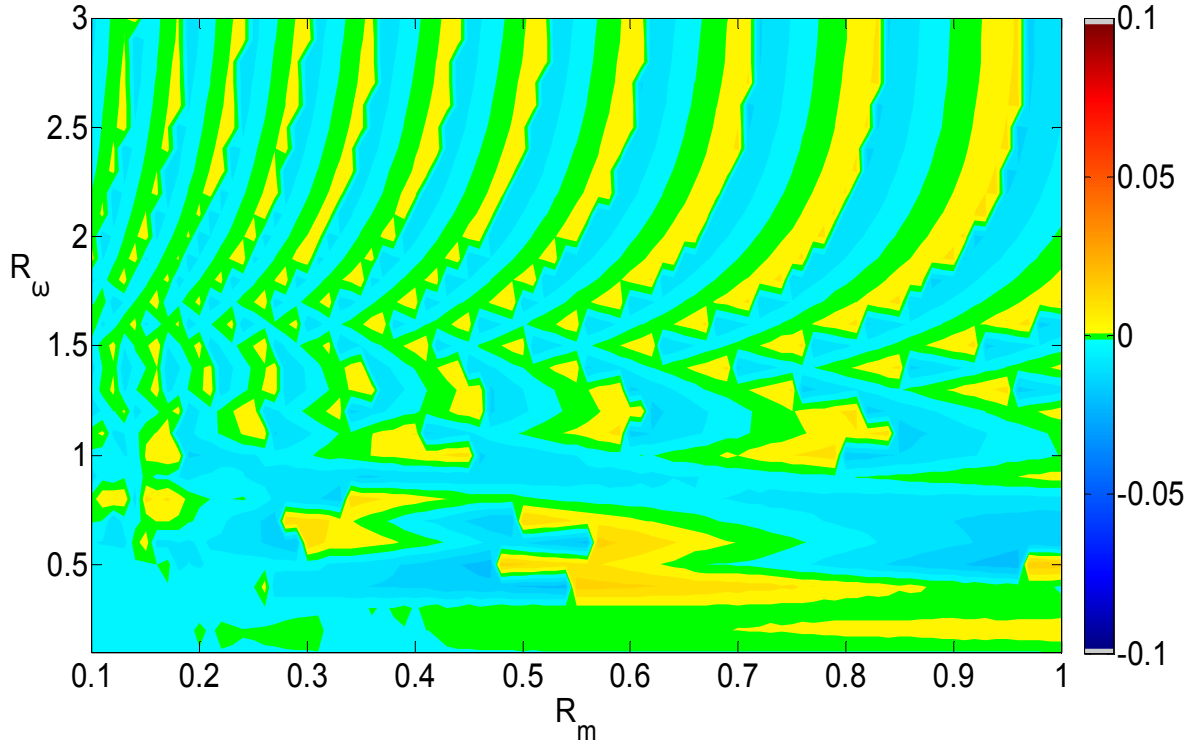


Εικ. 5.8: Αρμονική εδαφική διέγερση σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή

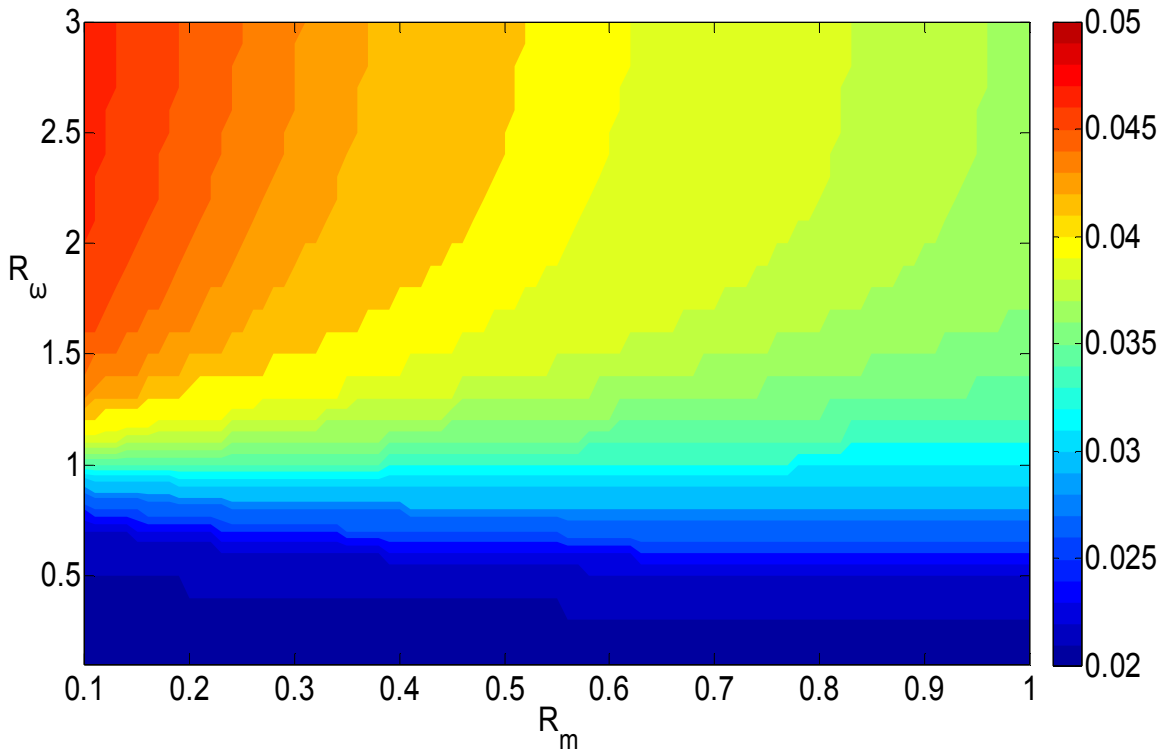
Για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), και αφού δημιουργηθεί η αντίστοιχή του εδαφική διέγερση, γίνεται πρώτα η ορθή του ανάλυση με την πραγματική κατανομή της απόσβεσης. Ακολουθούν οι προσεγγιστικές αναλύσεις, κάθε μια δοκιμάζοντας έναν από τους πιθανούς ενιαίους συντελεστές της εξίσωσης (5.11), και υπολογίζονται τα σφάλματα επιταχύνσεων και μετατοπίσεων στις στάθμες p και s και τα αντίστοιχα σφάλματα e_1 και e_2. Εν τέλει, γίνεται η επιλογή των βέλτιστων συντελεστών ζ_{eq} με βάση την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων αυτών, και τα αποτελέσματα φαίνονται στις ακόλουθες 16 εικόνες. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι κατανομές του ισοδύναμου συντελεστή ζ_{eq} οι οποίες ακολουθούνται από την κατανομή του σφάλματος το οποίο ελαχιστοποιούν. Απεικονίζονται πρώτα οι συντελεστές απόσβεσης που ελαχιστοποιούν τα σφάλματα σε όρους επιταχύνσεων και τα αντίστοιχα ελαχιστοποιημένα σφάλματα στις Εικ. 5.9 ως 5.16, και ακολούθως οι συντελεστές που ελαχιστοποιούν τα σφάλματα σε όρους μετατοπίσεων και τα αντίστοιχα ελαχιστοποιημένα σφάλματα στις Εικ. 5.17 ως 5.24. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τόσο σε επίπεδο σφάλματος σε κάθε στάθμη p και s, όσο και σε μακροσκοπικό επίπεδο σφαλμάτων e_1 και e_2. Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτά τα σφάλματα είναι συντηρητικά, έχουν όμως αξία γιατί προσφέρουν μια συνολική αποτίμηση της συμπεριφοράς του διβάθμιου ταλαντωτή στον οποίο αποδίδεται προσεγγιστικά απόσβεση ζ_{un}, με ένα μόνο βαθμωτό μέγεθος.



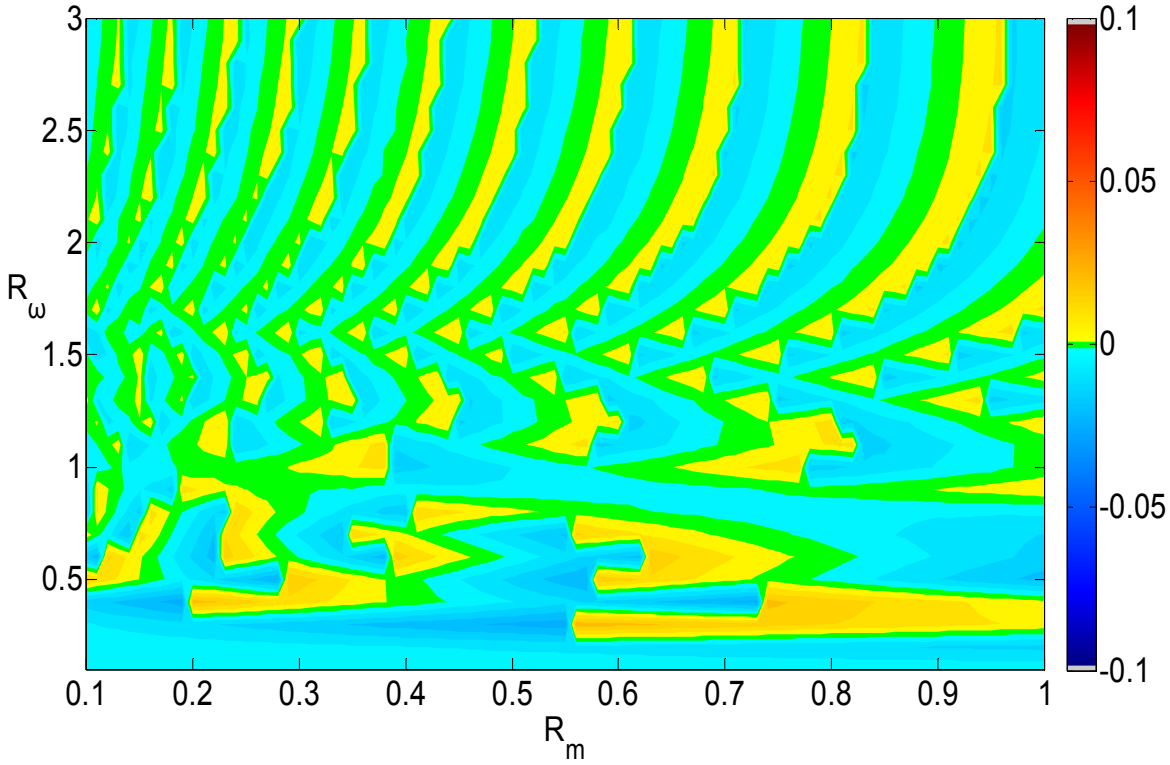
Εικ. 5.9: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta^{p}_{eq}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e^{accl}_{p}



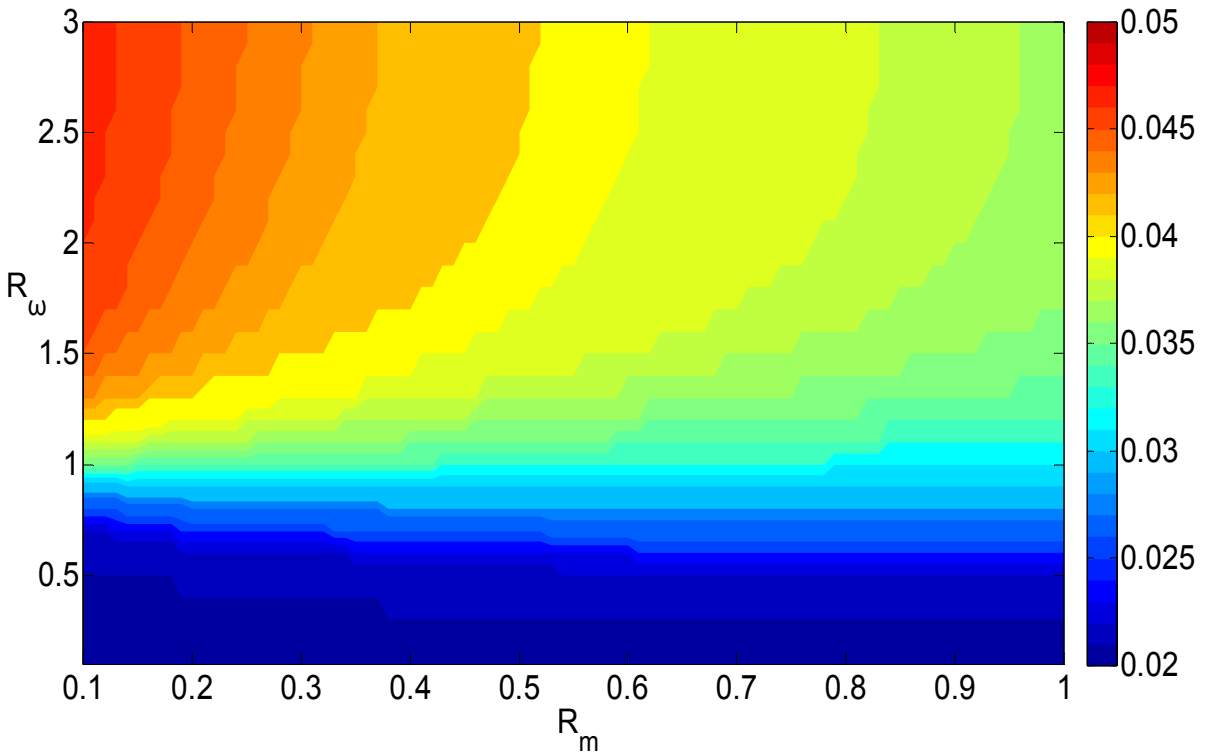
Εικ. 5.10: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e^{accl}_{p} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta^{p}_{eq}$



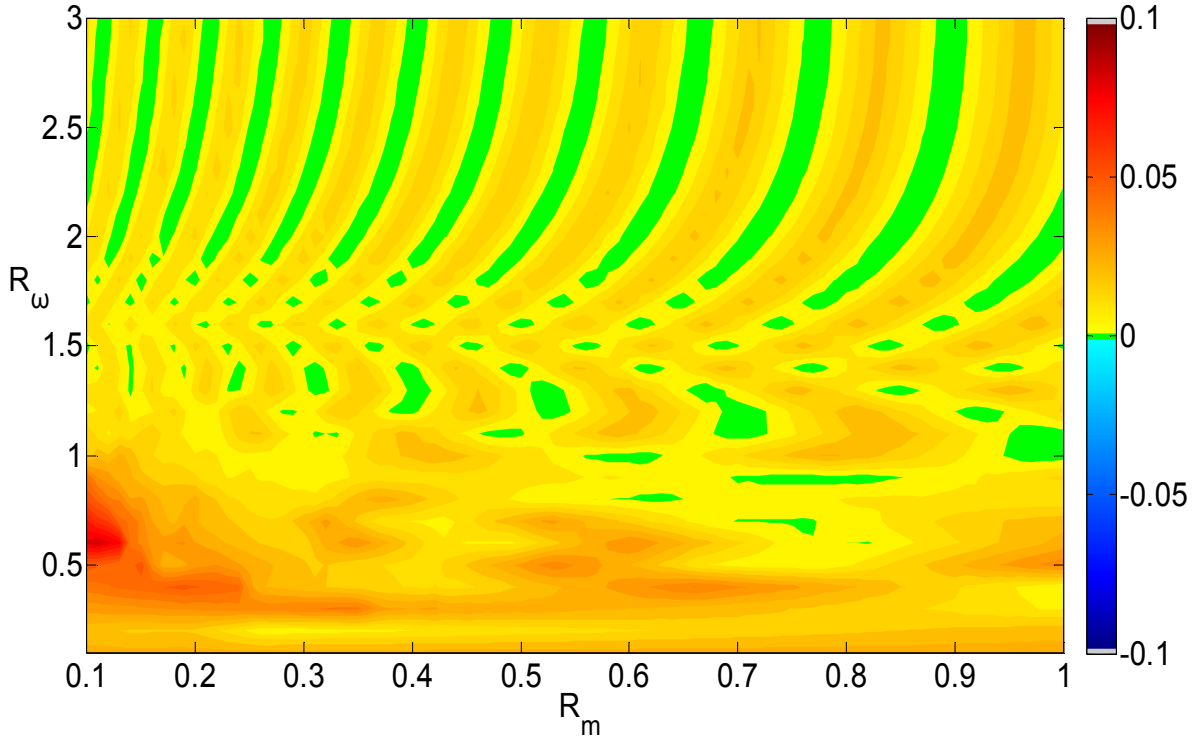
Εικ. 5.11: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta^{s}_{eq}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e^{accl}_{s}



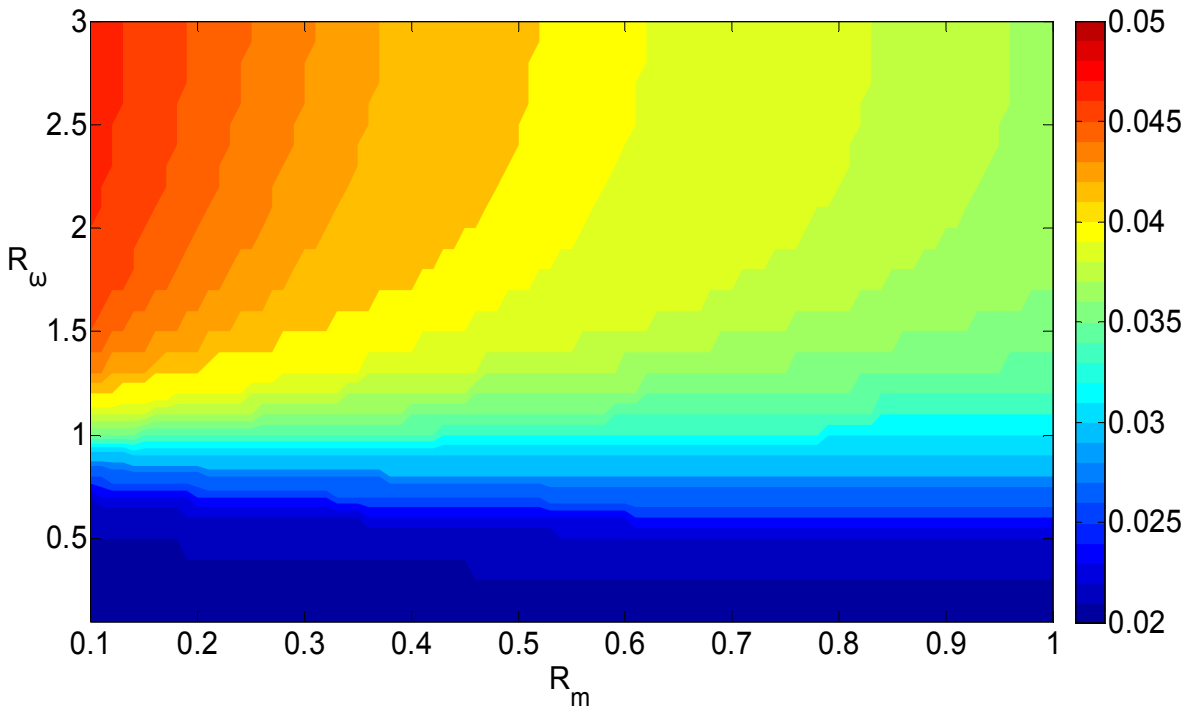
Εικ. 5.12: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e^{accl}_{s} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta^{s}_{eq}$



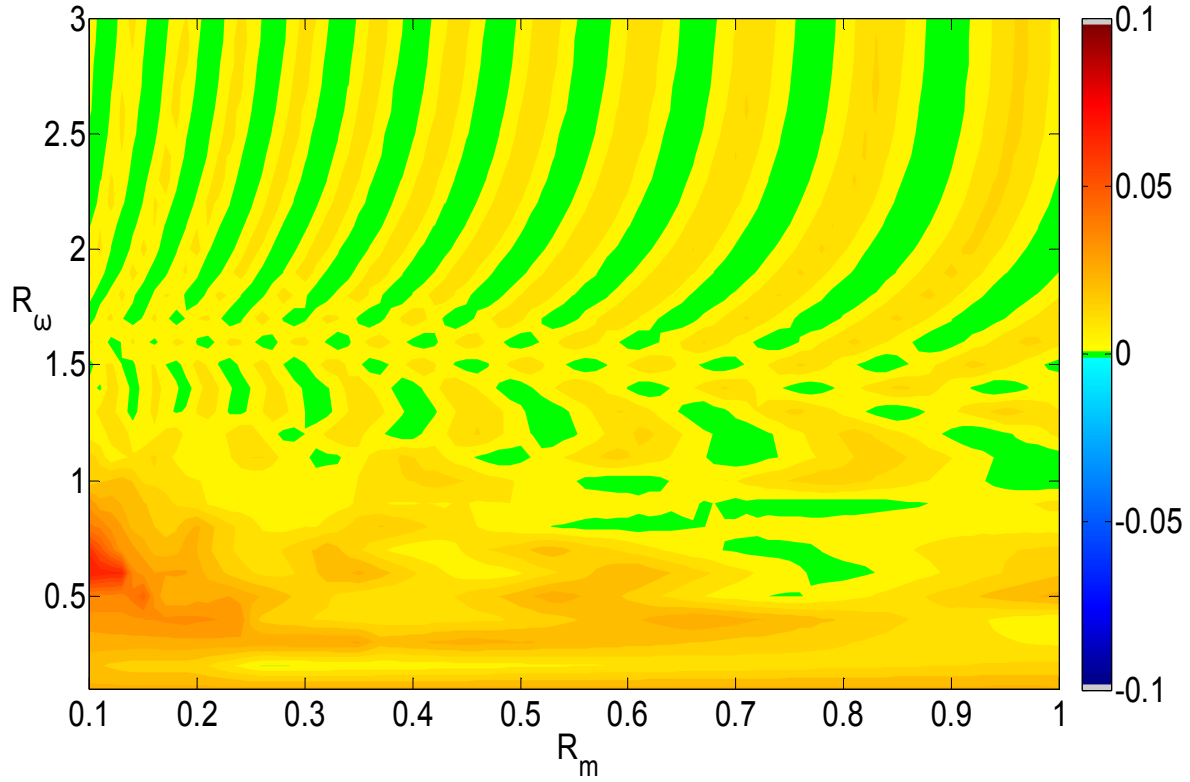
Εικ. 5.13: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta^{1}_{eq}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e^{accl}_{1}



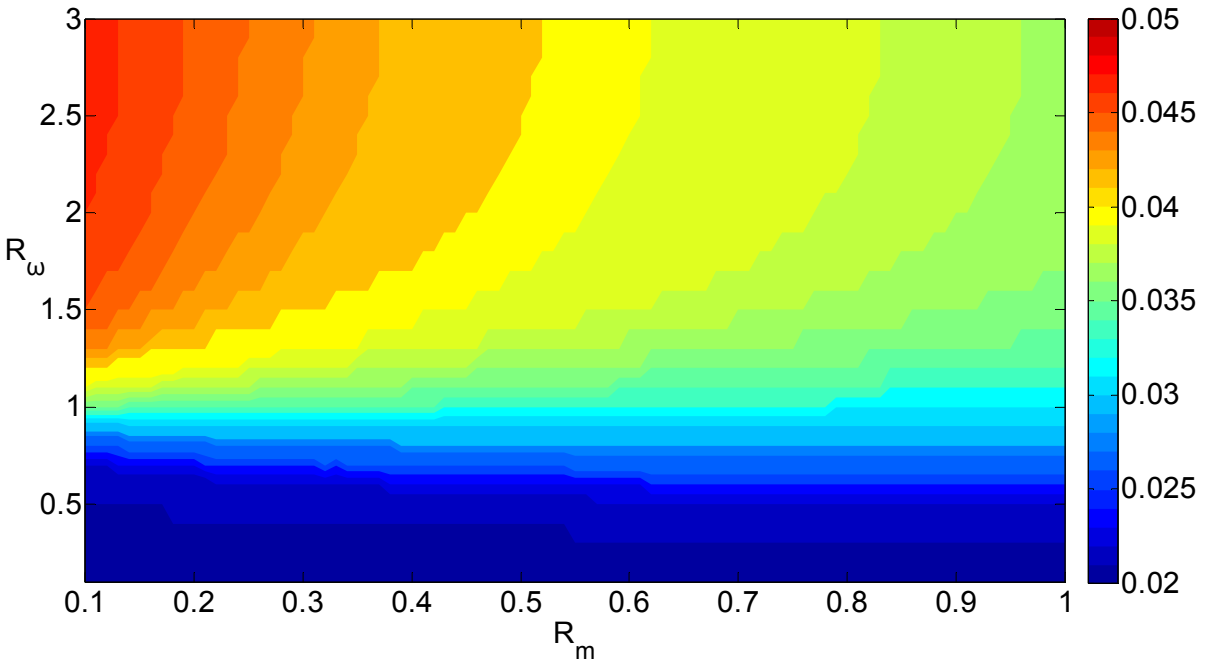
Εικ. 5.14: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e^{accl}_{1} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta^{1}_{eq}$



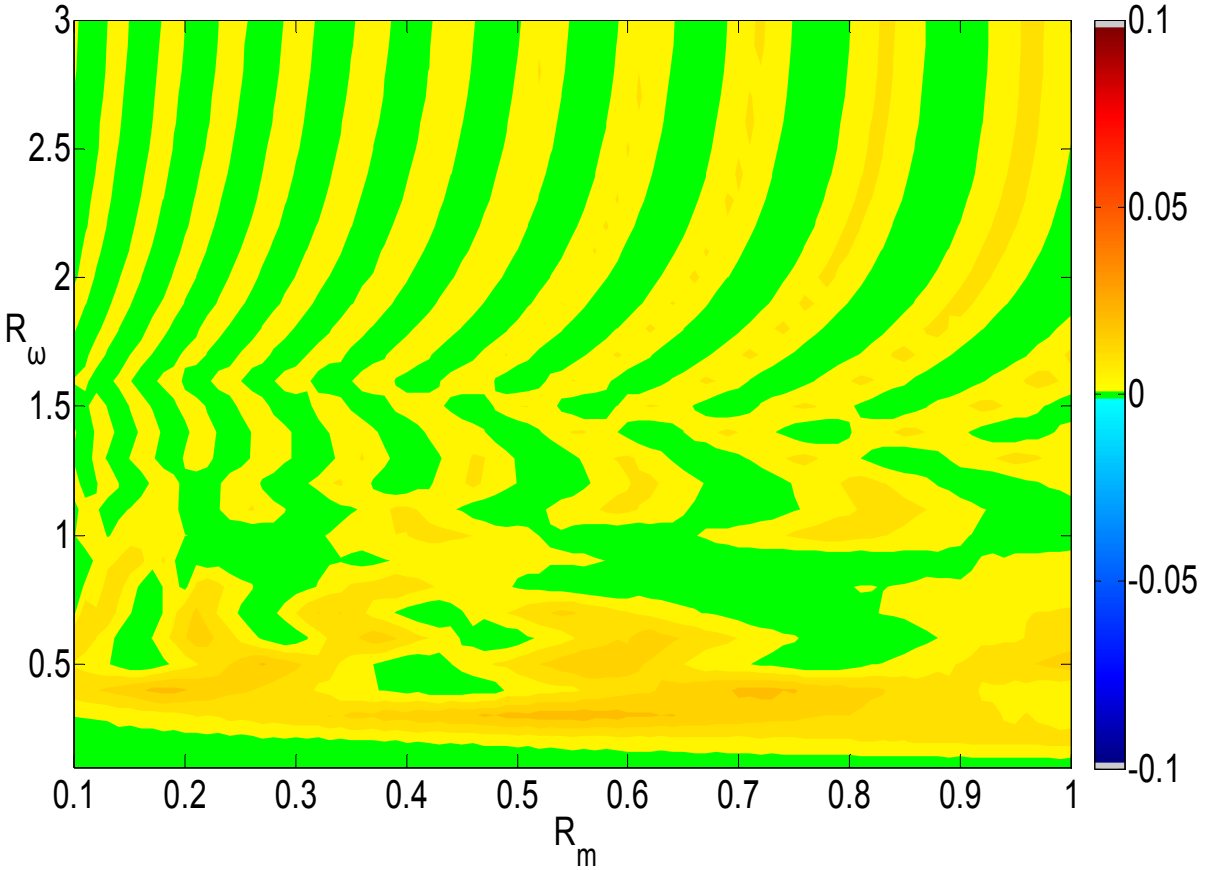
Εικ. 5.15: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta_{eq}^2$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_2^{accl}



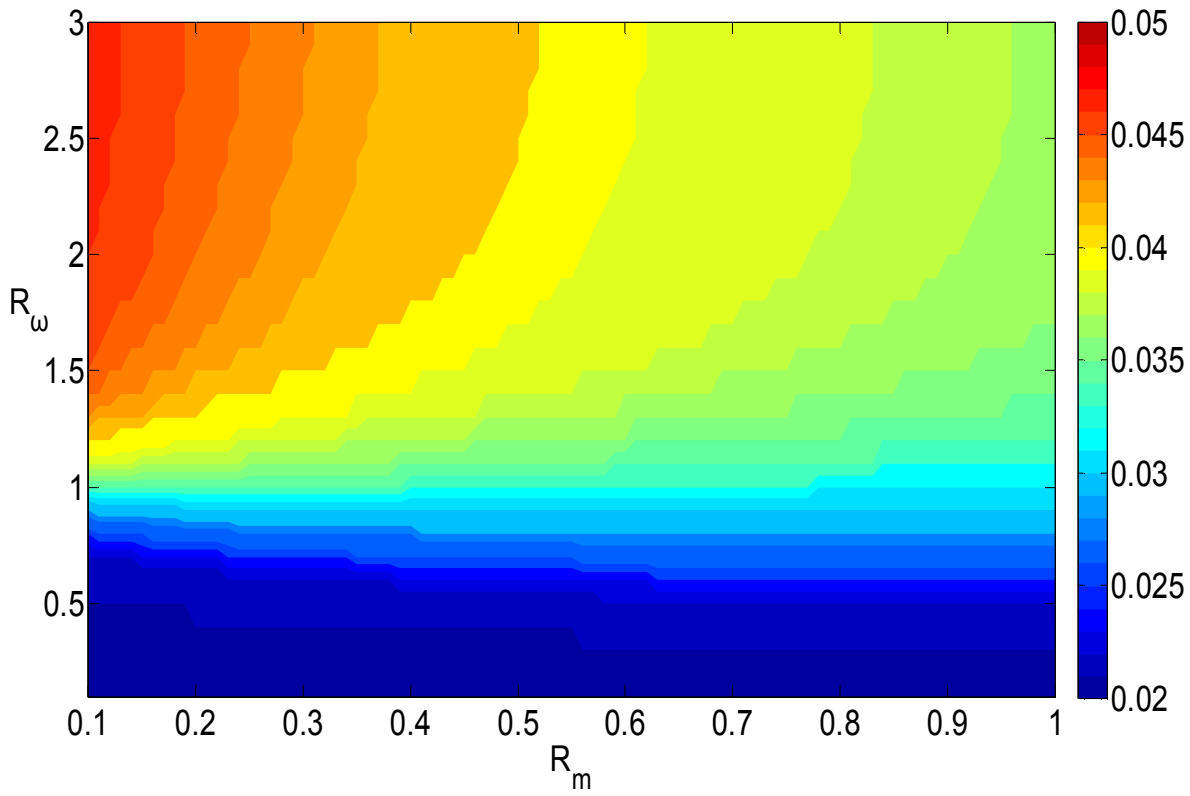
Εικ. 5.16: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_2^{accl} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^2$



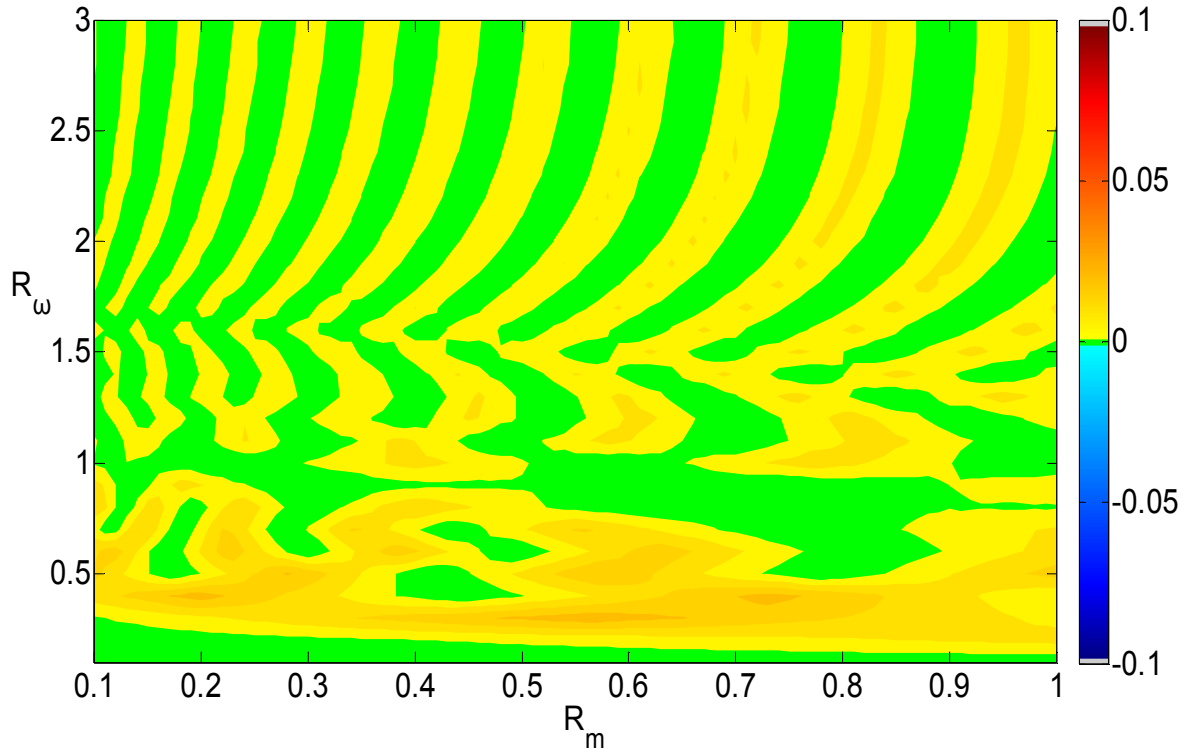
Εικ. 5.17: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_p^{disp}



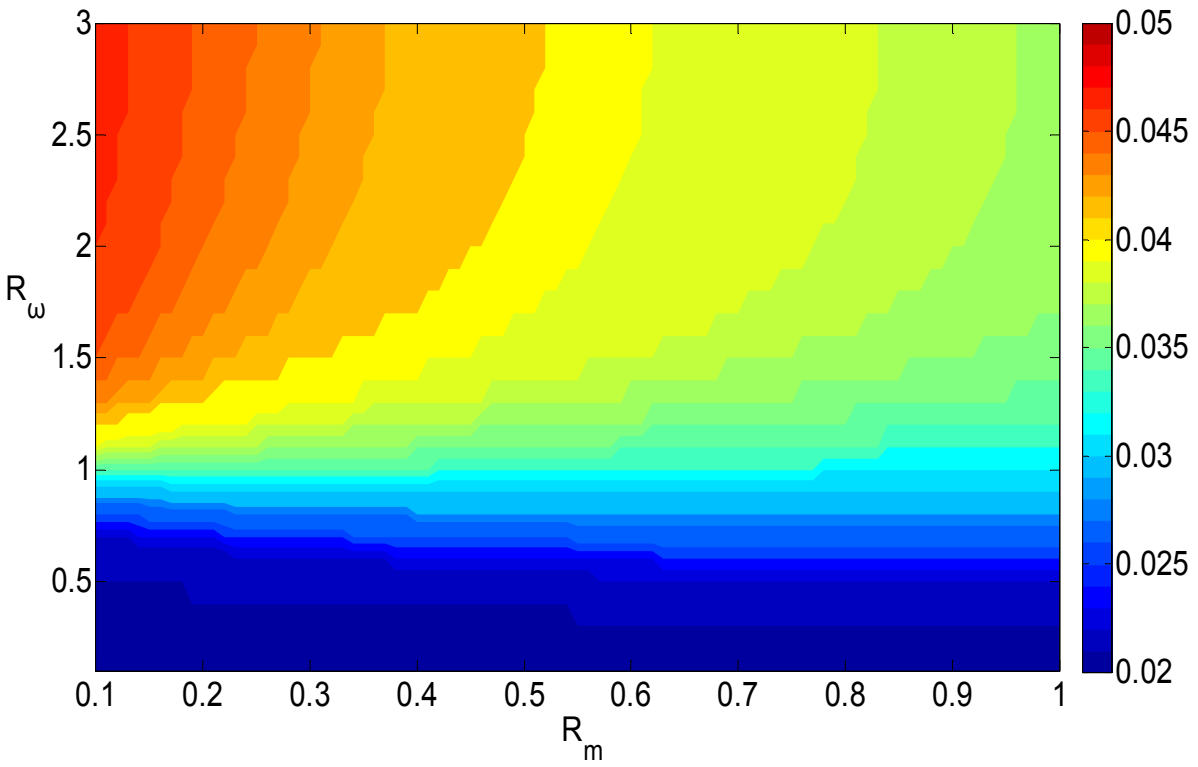
Εικ. 5.18: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_p^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$



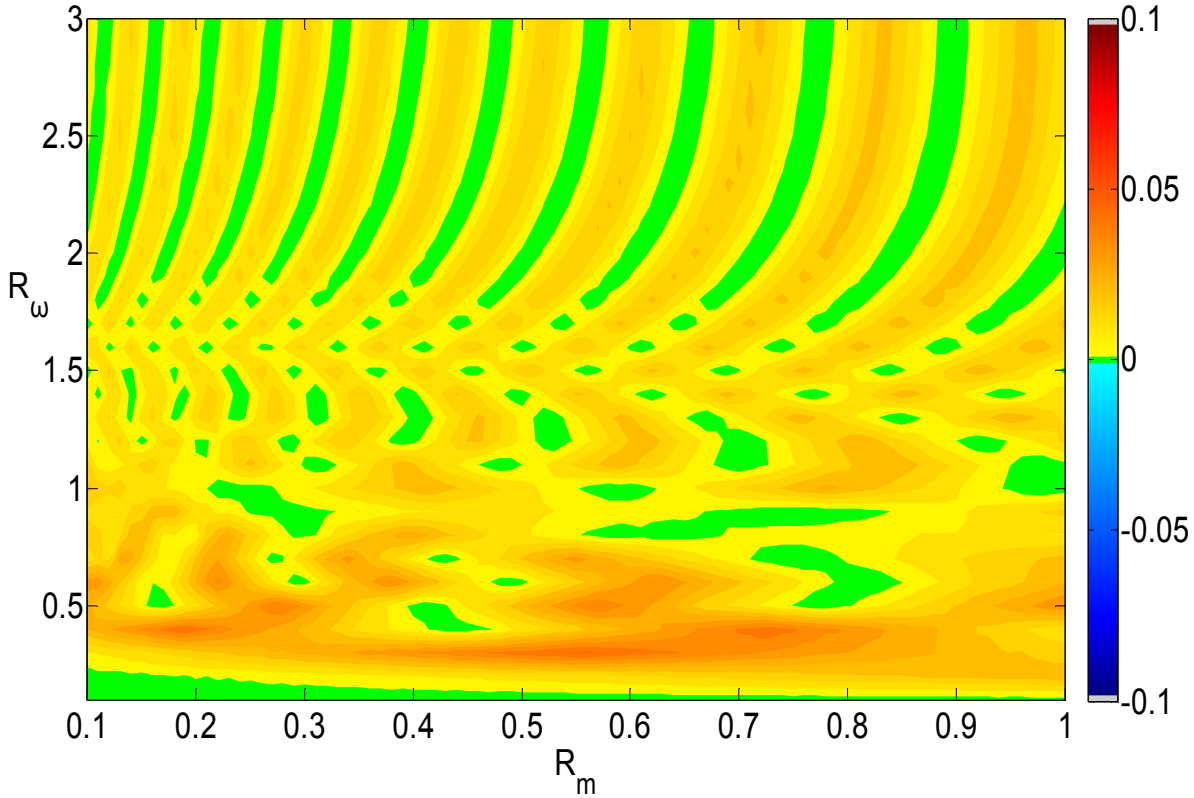
Εικ. 5.19: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_s^{disp}



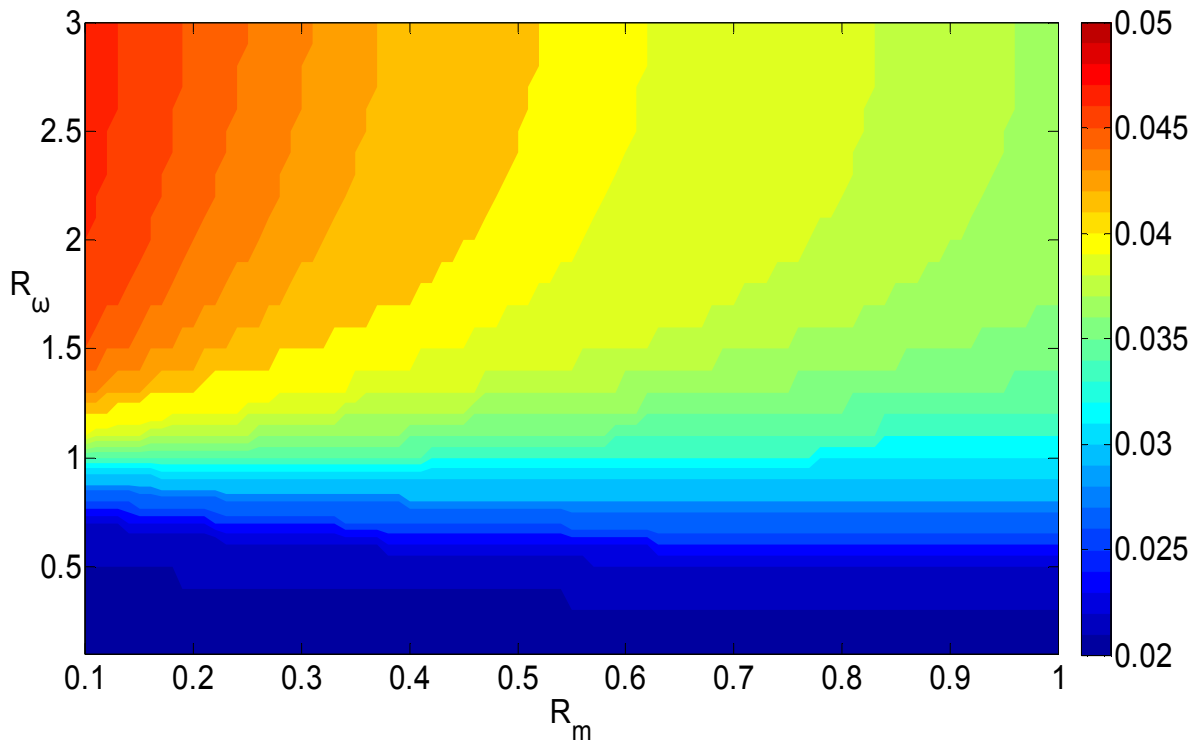
Εικ. 5.20: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_s^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$



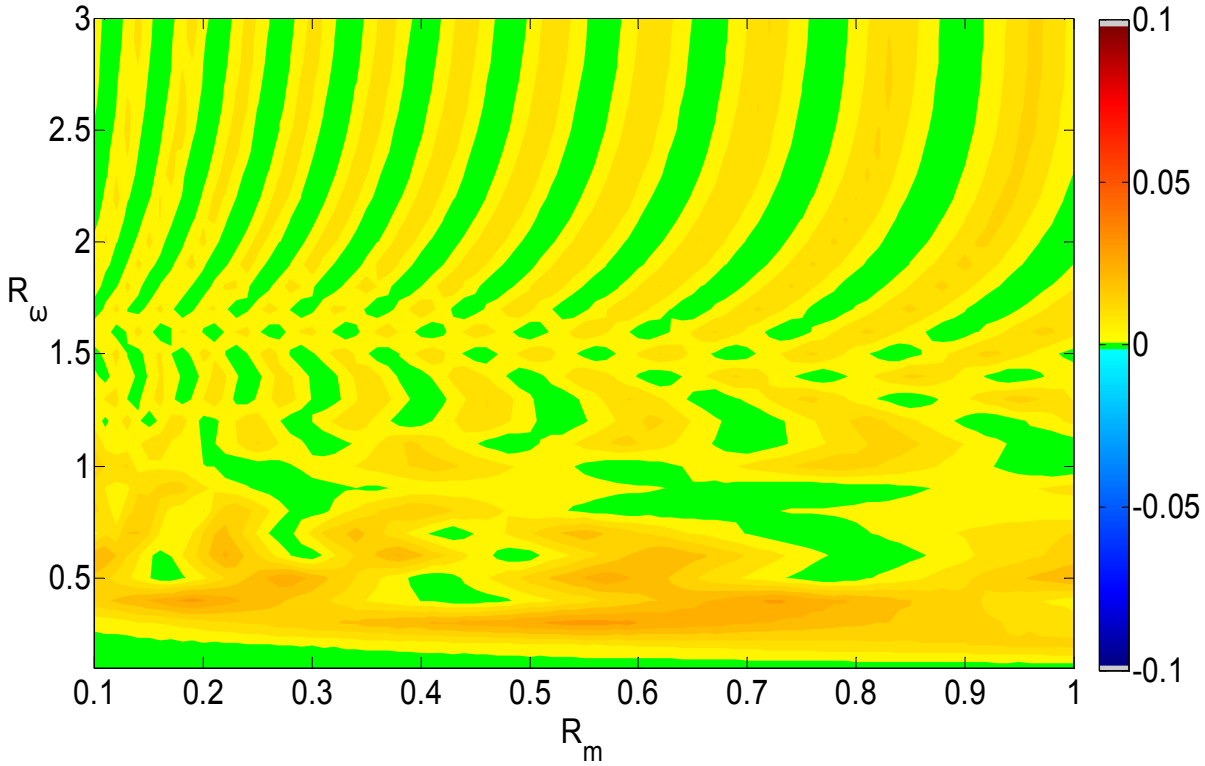
Εικ. 5.21: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta^{1}_{eq}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_1^{disp}



Εικ. 5.22: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_1^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta^{1}_{eq}$



Εικ. 5.23: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta_{eq}^2$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_2^{disp}



Εικ. 5.24: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_2^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^2$

Στις εικόνες σφάλματος, η χρωματική κλίμακα που ακολουθείται παραμένει σταθερή σε όλες, προκειμένου να γίνεται ευκολότερα η σύγκριση των επιπέδων σφάλματος σε κάθε περίπτωση. Το γκρι χρώμα στις χρωματικές κλίμακες έχει προστεθεί προκειμένου να απεικονιστούν όλες οι περιοχές οι οποίες έχουν σφάλμα μεγαλύτερο από 10%. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι οι περιοχές αυτές είναι περιορισμένες, οπότε απεικονίζονται με γκρι χρώμα ώστε να διατηρηθεί η χρωματική κλίμακα των υπολοίπων περιοχών σε τέτοιες αποχρώσεις που να είναι εύκολη η διάκριση μεταξύ των διαφόρων επιπέδων σφάλματος. Παράλληλα, τα χρώματα που χρησιμοποιούνται κλιμακώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε ανάλογα με τις αποχρώσεις να είναι εύκολα αντιληπτό αν το σφάλμα είναι θετικό ή αρνητικό, αν η χρήση δηλαδή του ενιαίου συντελεστή ζ_{un} οδηγεί σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση της απόκρισης του διβάθμιου ταλαντωτή που αντιστοιχεί στο εκάστοτε σημείο με συντεταγμένες (R_ω, R_m) του επιπέδου. Συγκεκριμένα, το πράσινο χρώμα υποδηλώνει σφάλμα μηδενικό ή σχεδόν μηδενικό, οι αποχρώσεις του κόκκινου υποδηλώνουν θετικές τιμές σφάλματος και τέλος οι αποχρώσεις του μπλε αρνητικές τιμές.

Γενικά, τα σφάλματα που προκύπτουν είναι πολύ μικρά, αφού οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση της απόλυτης τιμής των σφαλμάτων αυτών. Στις περιπτώσεις των απλών σφαλμάτων e_p και e_s, είτε σε όρους απολύτων επιταχύνσεων είτε σε όρους μετατοπίσεων, τα σφάλμα σε όλο το επίπεδο (R_ω, R_m), είναι κάτω από 5%. Εξαίρεση αποτελούν περιορισμένο εύρος λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων στα σφάλματα e_1 και e_2, οι οποίοι δίνουν τιμές σφάλματος που πλησιάζουν το 10%.

Η διαδικασία επιλογής των βέλτιστων συντελεστών απόσβεσης ζ_{eq}, βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των απολύτων τιμών του σφάλματος, και δεν λαμβάνεται υπόψη το πρόσημό του, αν οδηγεί δηλαδή σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της απόκρισης. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μην υπάρχει συστηματική κατανομή του προσήμου του σφάλματος στο επίπεδο (R_ω, R_m), αλλά να υπάρχουν περιοχές με θετικά και περιοχές με αρνητικά σφάλματα. Αντίθετα, αυτό δε συμβαίνει στις περιπτώσεις των σφαλμάτων e_1 και e_2, τα οποία εξ' ορισμού είναι μόνο θετικά, άρα τα χρώματα που υπάρχουν στις αντίστοιχες εικόνες είναι πράσινο, για μηδενικά ή σχεδόν μηδενικά σφάλματα, και αποχρώσεις του κόκκινου.

5.6 Ενιαίος συντελεστής απόσβεσης από σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις

Η διέγερση του διβάθμιου ταλαντωτή με αρμονικές σε συντονισμό διεγέρσεις είναι μεν συντηρητική ως προς τα μεγέθη απόκρισης που προκύπτουν, δεν είναι όμως ρεαλιστική φόρτιση. Παράλληλα, δίνει κίνηση μόνο στην πρώτη ιδιομορφή του διβάθμιου φορέα και αφήνει ανεπηρέαστη τη δεύτερη. Αυτό έχει ως συνέπεια και η ίδια η κίνηση των σταθμών του φορέα να μην είναι ρεαλιστική, και να μην έχει σχέση με την αναμενόμενη κίνηση σε μια πραγματική σεισμική διέγερση, η οποία διεγείρει και τις δύο ιδιομορφές, την κάθε μια ανάλογα με το συντελεστή συμμετοχής της. Δεδομένου ότι οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τη θαμιστική διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό είναι εξαρτημένοι από τη χρησιμοποιούμενη διέγερση, τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια οι συντελεστές απόσβεσης που παρουσιάζονται στις προηγούμενες εικόνες να μη θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί των κατασκευών για περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων.

Για το λόγο αυτό, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται και εδώ οι σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις. Τώρα όμως, δε χρησιμοποιούνται προκειμένου να ελέγξουν το σφάλμα από τη χρήση των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης που προκύπτουν από τις αρμονικές σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή διεγέρσεις, αλλά υπεισέρχονται στη διαδικασία εύρεσης των ίδιων των συντελεστών απόσβεσης ως χρησιμοποιούμενες εδαφικές διεγέρσεις. Συγκεκριμένα, η διαδικασία δοκιμών πιθανών ενιαίων συντελεστών απόσβεσης ζ_{un} και η κατάληξη σε έναν ισοδύναμο συντελεστή ζ_{eq}, ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος που ελαχιστοποιείται, όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.3, επαναλαμβάνεται με τις σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις αυτήν τη φορά.

Πάλι, για κάθε ένα από τα σημεία του επιπέδου (R_ω, R_m), για κάθε έναν από τους διβάθμιους ταλαντωτές που μελετώνται, μορφώνονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, και γίνεται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις (5.1) ως (5.4). Με βάση την κάθε μία από τις δύο ιδιοσυχνότητες που προκύπτουν, δημιουργείται μία αρμονική διέγερση με πλάτος $1 m/s^2$, και με διάρκεια 40 κύκλους, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (5.22).

$$\ddot{x}_i(t) = \sin(\omega_i t), i = 1,2 \tag{5.22}$$

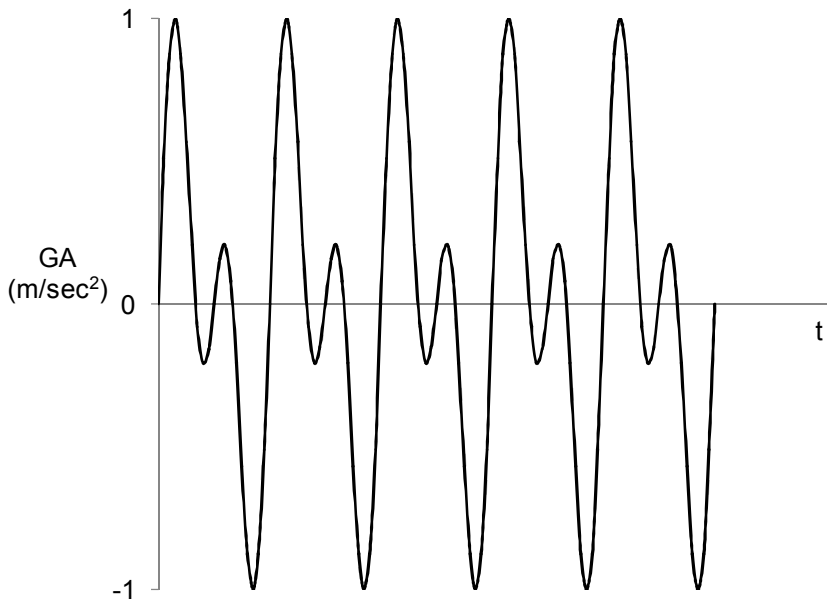
Ακολούθως, και με δεδομένα τα ιδιοδιανύσματα $\Phi_i, i = 1,2$, υπολογίζονται και οι συντελεστές συμμετοχής της κάθε ιδιομορφής όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.23), όπου με **M** συμβολίζεται το μητρώο μάζας, και το r είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα με διαστάσεις 2×1.

$$\Gamma_i = \frac{\Phi_i^T \mathbf{M} r}{\Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_i}, i = 1,2 \tag{5.23}$$

Οι συντελεστές συμμετοχής πολλαπλασιάζουν τις δύο αρμονικές διεγέρσεις της εξίσωσης (5.22), και το άθροισμά τους διαιρείται με το απόλυτο μέγιστό του προκειμένου πάλι να προκύψει μια διέγερση η οποία έχει μέγιστο πλάτος $1 m/s^2$:

$$\ddot{x}_g(t) = \frac{\sum_i \Gamma_i \sin(\omega_i t)}{\max\left(\left|\sum_i \Gamma_i \sin(\omega_i t)\right|\right)}, i = 1,2 \tag{5.24}$$

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι μια σύνθετη αρμονική διέγερση η οποία περιέχει τις αρμονικές διεγέρσεις που συντονίζουν τις ιδιομορφές της κατασκευής, λαμβάνει υπόψη τους αντίστοιχους συντελεστές συμμετοχής, και έχει τη μορφή της Εικ. 5.25.

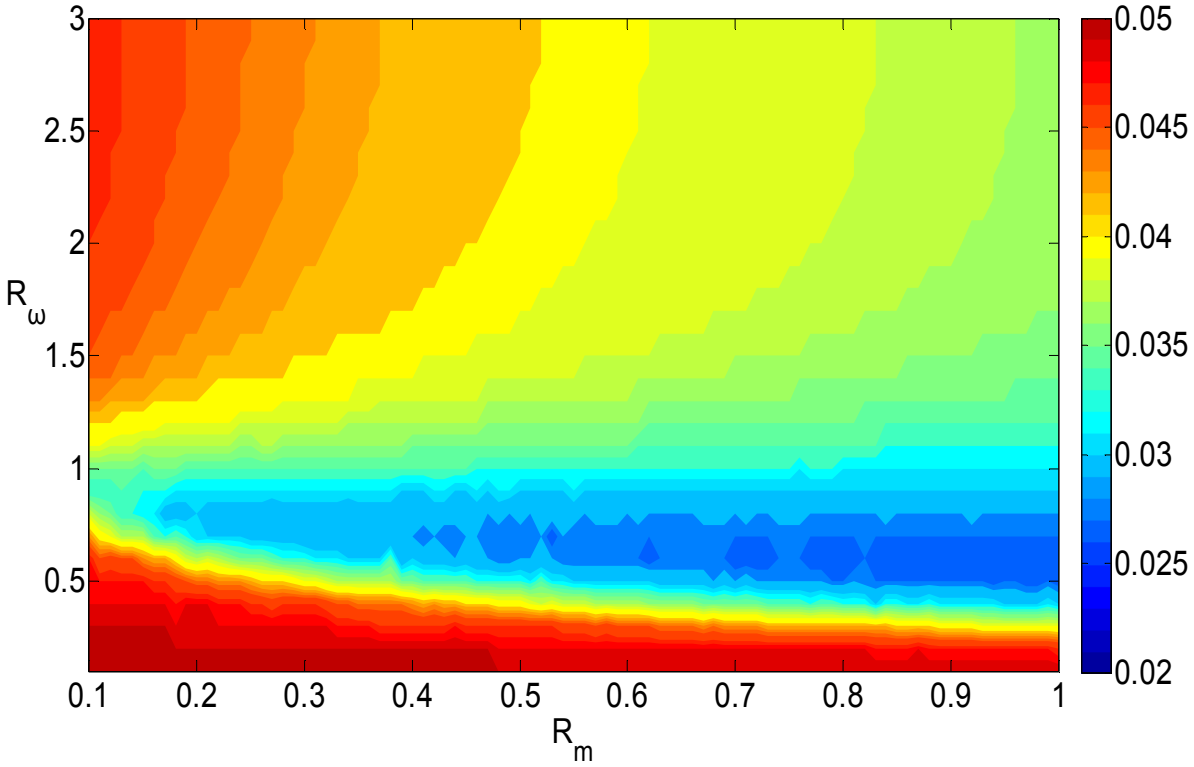


Εικ. 5.25: Σύνθετη αρμονική διέγερση

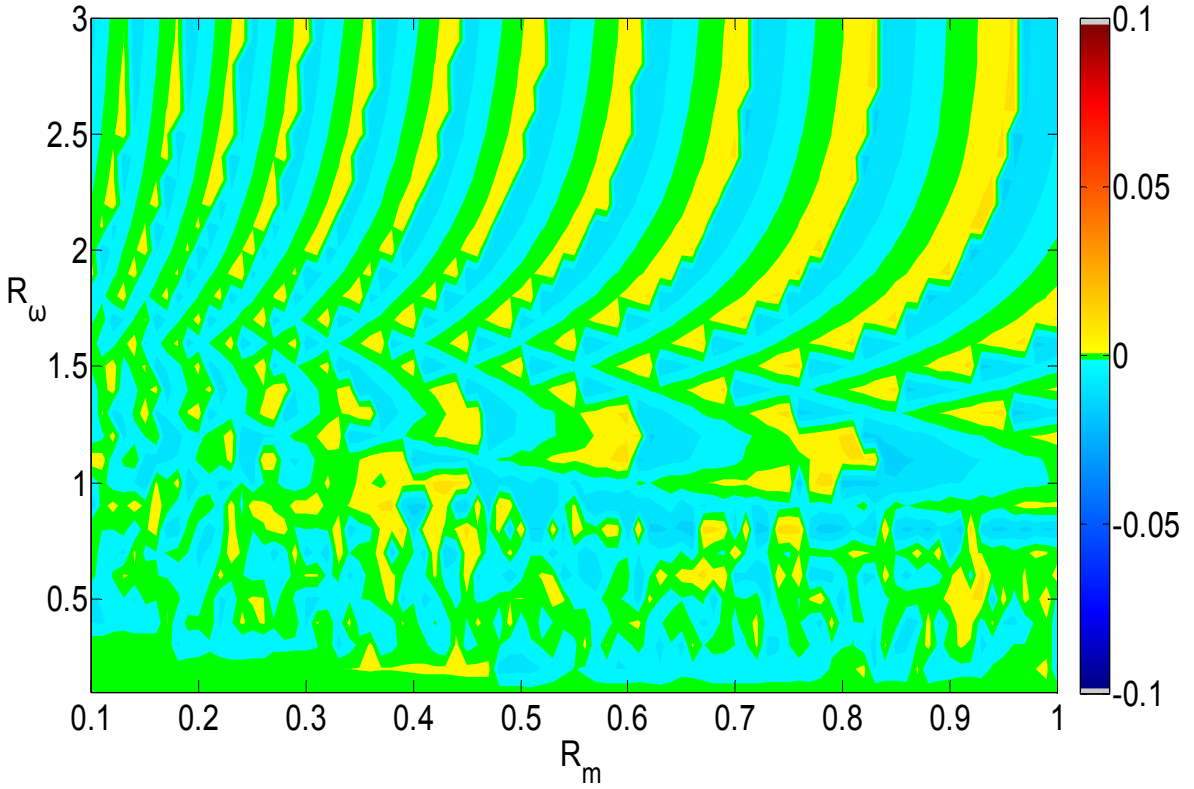
Πάλι, για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) γίνεται η διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων ισοδύναμων συντελεστών ενιαίας απόσβεσης, όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.3. Συγκεκριμένα, για κάθε σημείο και με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου, γίνεται η κλασσική ιδιομορφική ανάλυση και δημιουργείται η αντίστοιχη σύνθετη αρμονική διέγερση. Ακολούθως, για το εύρος των τιμών του συντελεστή ζ_{un} της εξίσωσης (5.11), εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία ελαχιστοποίησης κάθε ενός από τα 8 σφάλματα που εξετάζονται, και η τιμή του ενιαίου συντελεστή απόσβεσης με την οποία επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του εξεταζόμενου σφάλματος κάθε φορά, εκλέγεται ως η αντίστοιχη ισοδύναμη τιμή απόσβεσης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις ακόλουθες 16 εικόνες, σε όρους ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης και αντίστοιχων ελαχιστοποιημένων σφαλμάτων, ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται. Συγκεκριμένα, αρχικά απεικονίζονται οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι ελαχιστοποιούν τα σφάλματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και τα αντίστοιχα σφάλματα, και ακολούθως οι συντελεστές απόσβεσης που οδηγούν σε ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σε όρους μετατοπίσεων και τα αντίστοιχα σφάλματα. Σε κάθε περίπτωση εξετάζεται το σφάλμα σε κάθε στάθμη, e_p και e_s, προκειμένου να προκύψει λεπτομερής εικόνα της συμπεριφοράς της κάθε στάθμης, όταν ο φορέας έχει απόσβεση όχι την πραγματική αλλά την υπό δοκιμή ενιαία. Επίσης, πάλι εξετάζονται τα σφάλματα e_1 και e_2, παρά το γεγονός ότι είναι συντηρητικές εκτιμήσεις του σφάλματος της κατασκευής, ώστε να προκύψει μια μακροσκοπική εικόνα για το σφάλμα και στις δύο στάθμες της κατασκευής κάνοντας χρήση ενός μόνο μεγέθους.

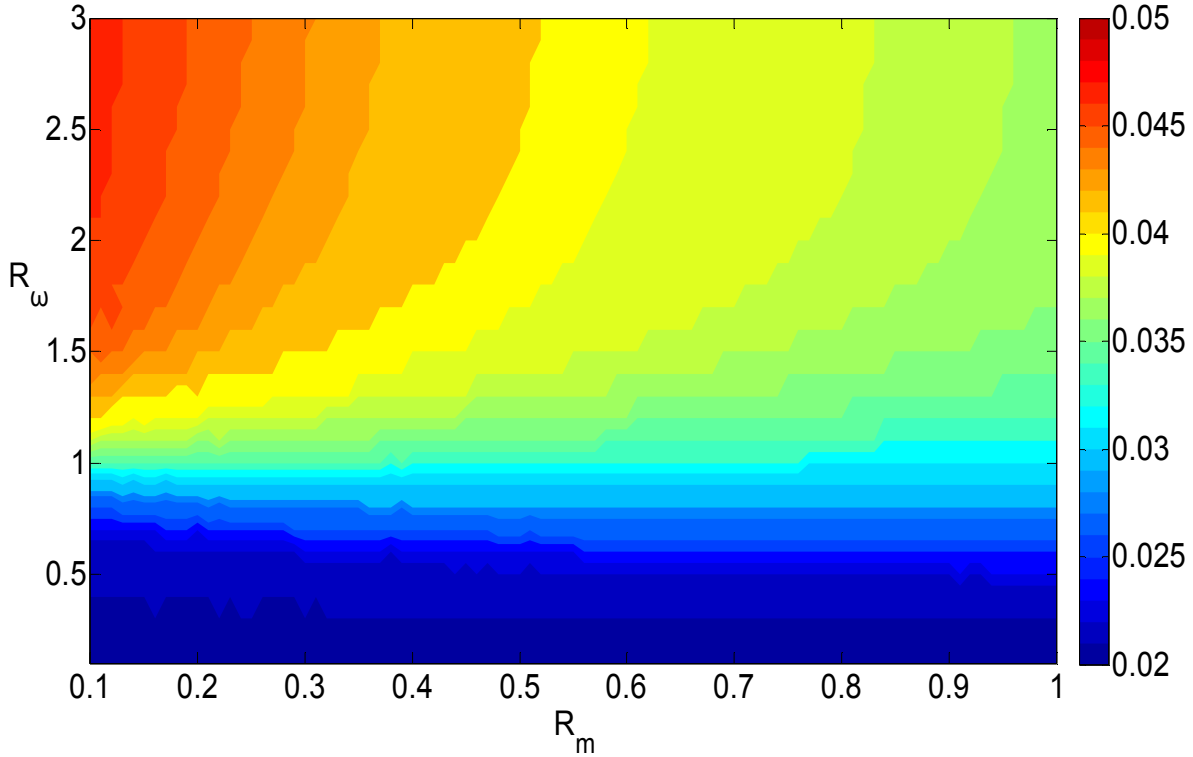
Στις εικόνες 5.26 ως 5.33, φαίνονται οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σε όρους απολύτων επιταχύνσεων, και τα αντίστοιχα ελαχιστοποιημένα σφάλματα, και στις εικόνες 5.34 ως 5.41 οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σε όρους μετατοπίσεων, και τα αντίστοιχα ελαχιστοποιημένα σφάλματα.



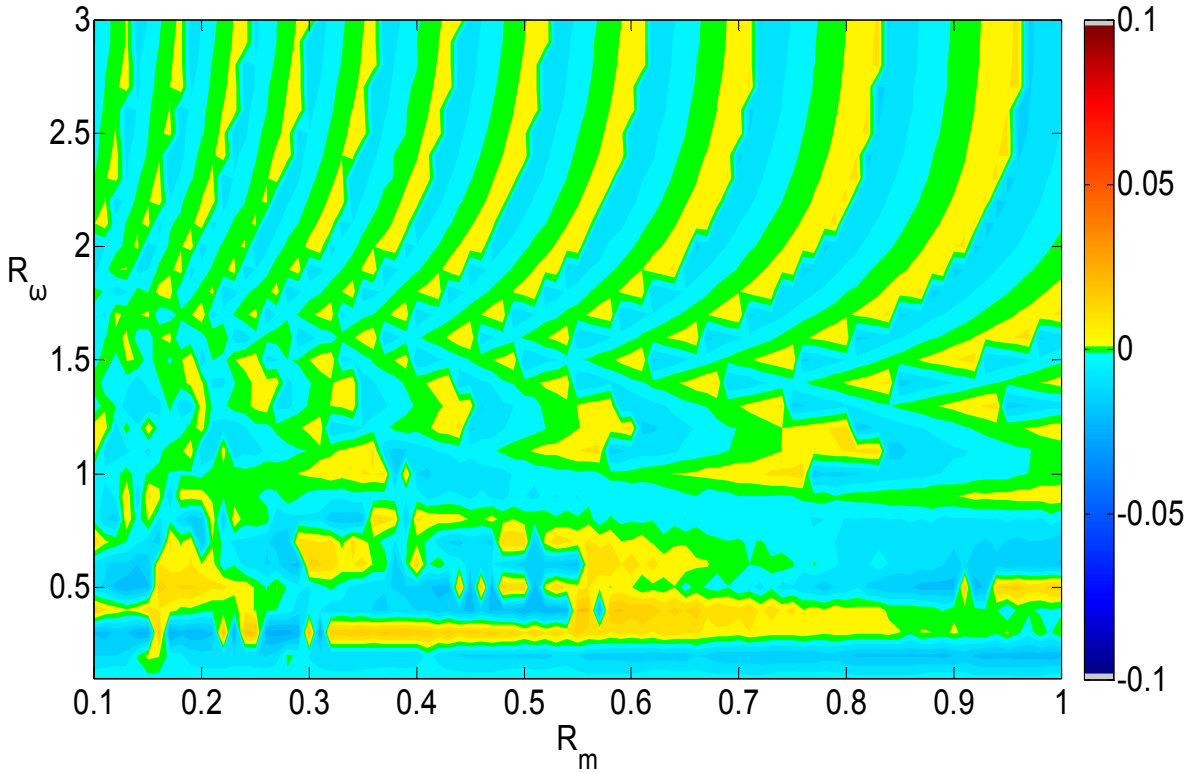
Εικ. 5.26: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_p^{accl}



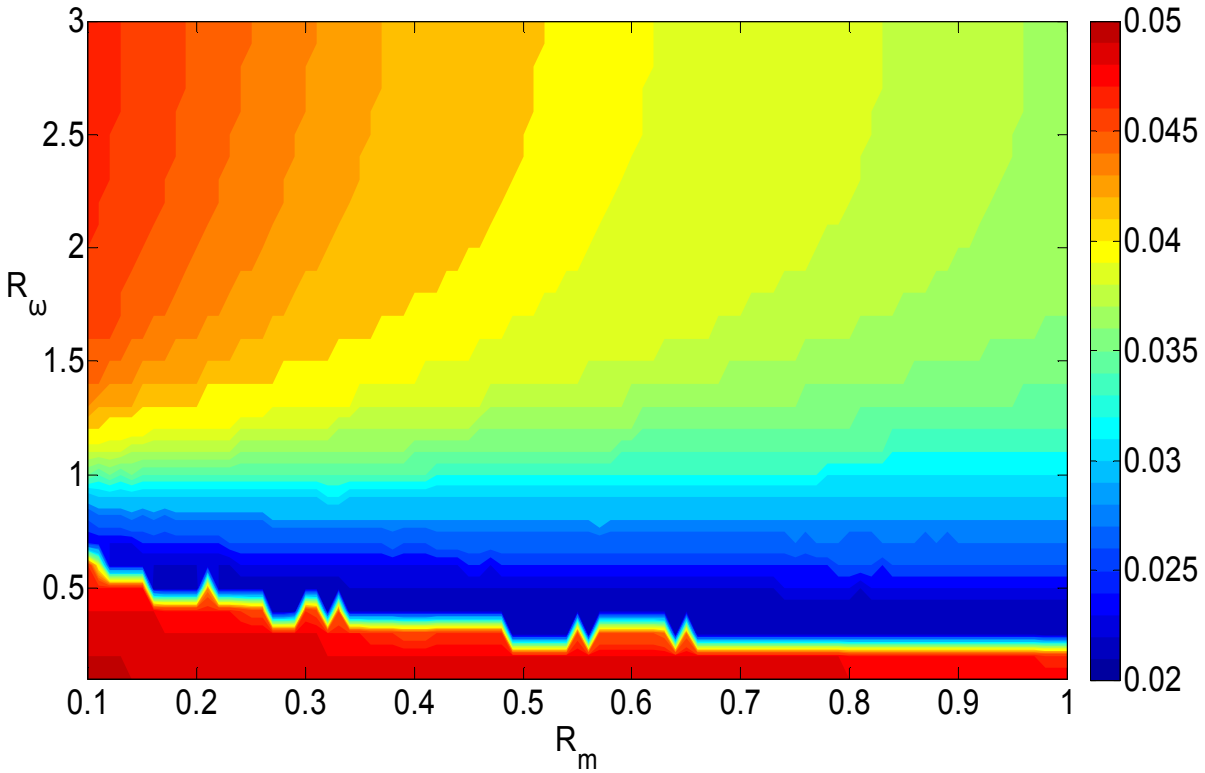
Εικ. 5.27: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_p^{accl} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$



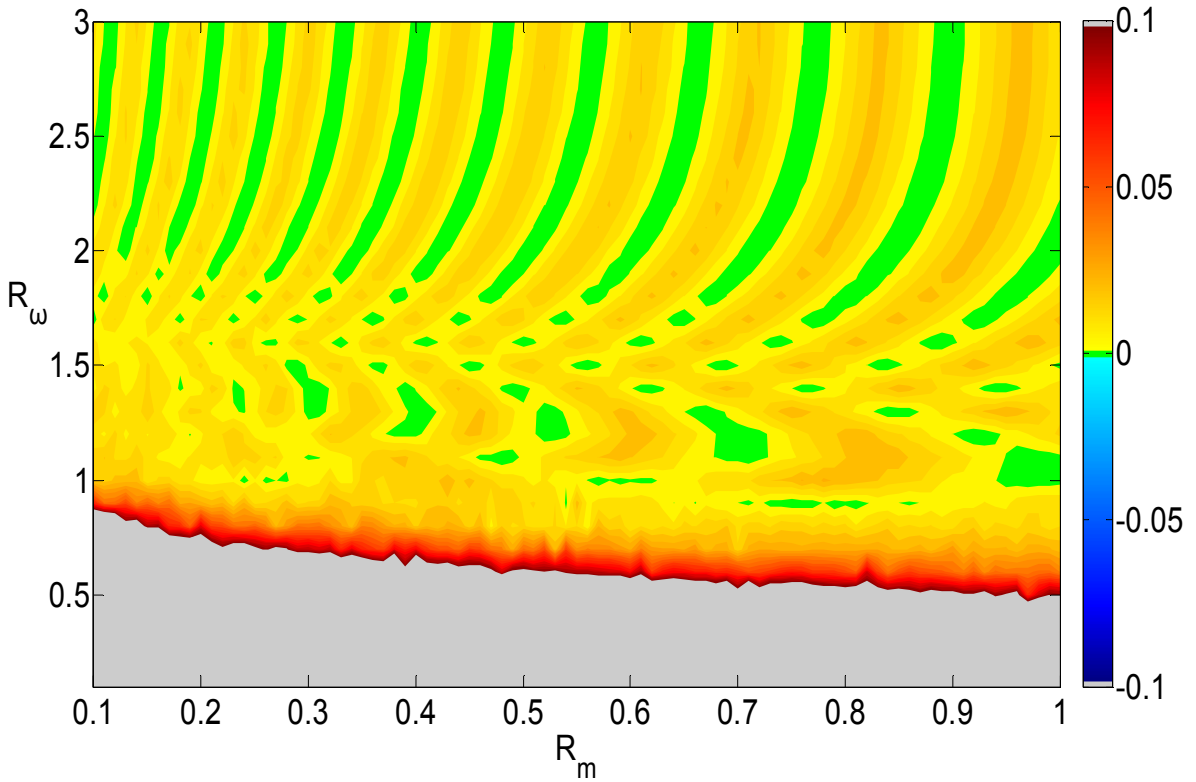
Εικ. 5.28: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta^{s}_{eq}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e^{accl}_{s}



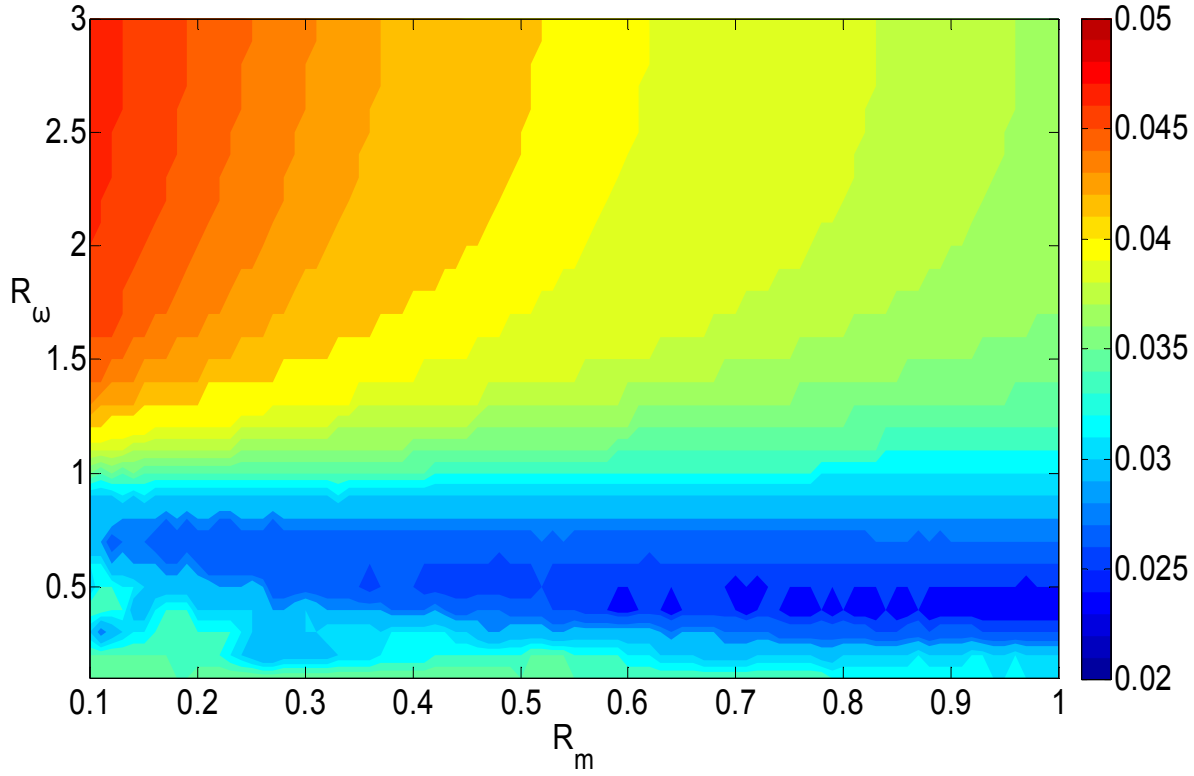
Εικ. 5.29: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e^{accl}_{s} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta^{s}_{eq}$



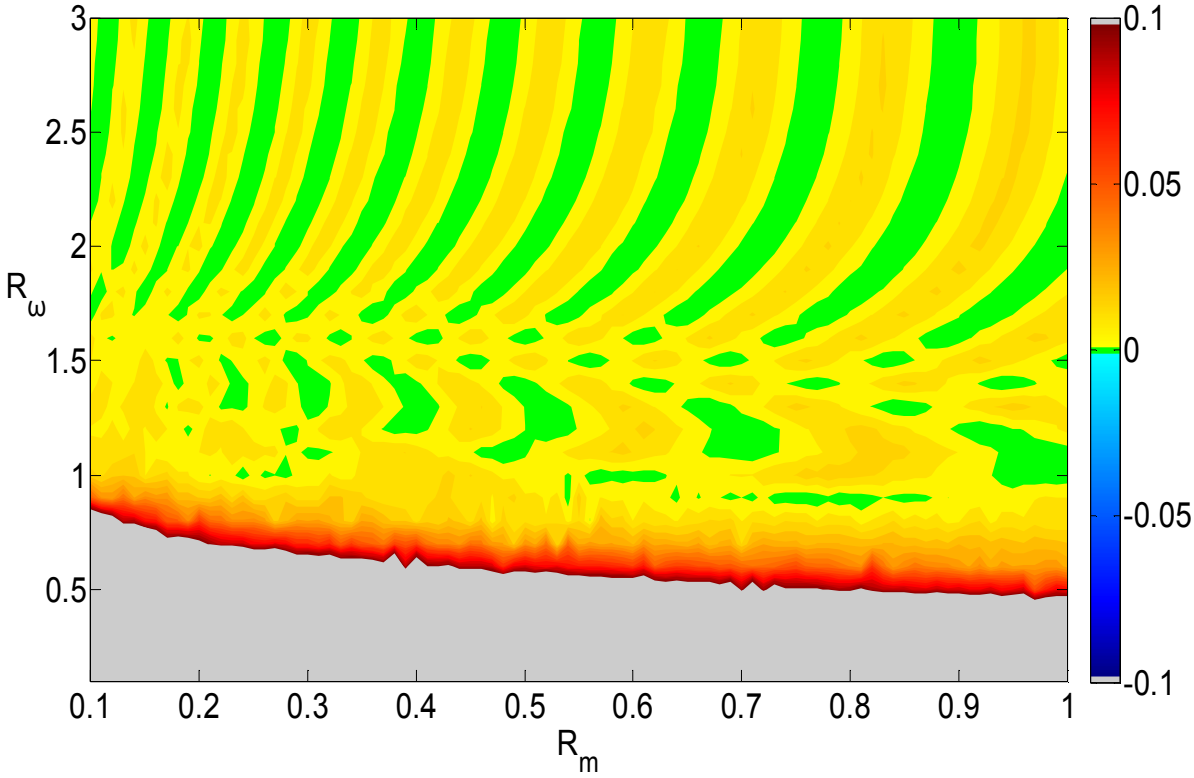
Εικ. 5.30: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta_{eq}^{1}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_1^{accl}



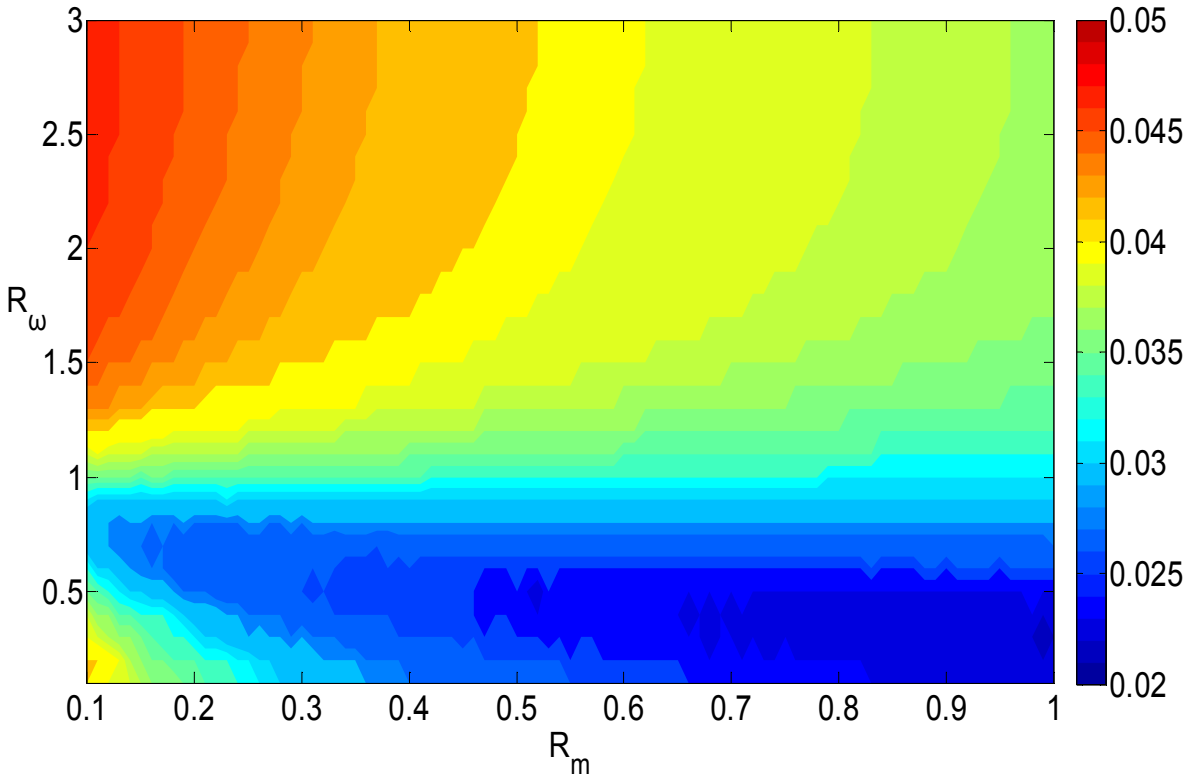
Εικ. 5.31: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_1^{accl} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{1}$



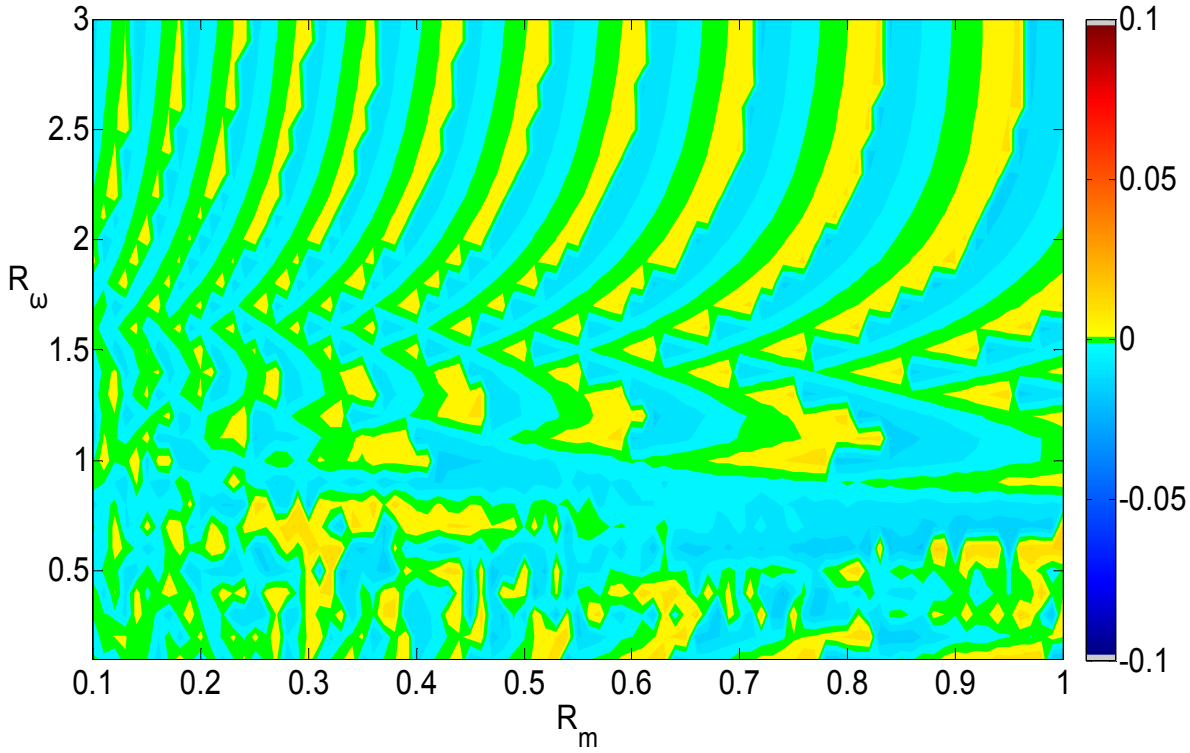
Εικ. 5.32: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{accl}\zeta_{eq}^{2}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_2^{accl}



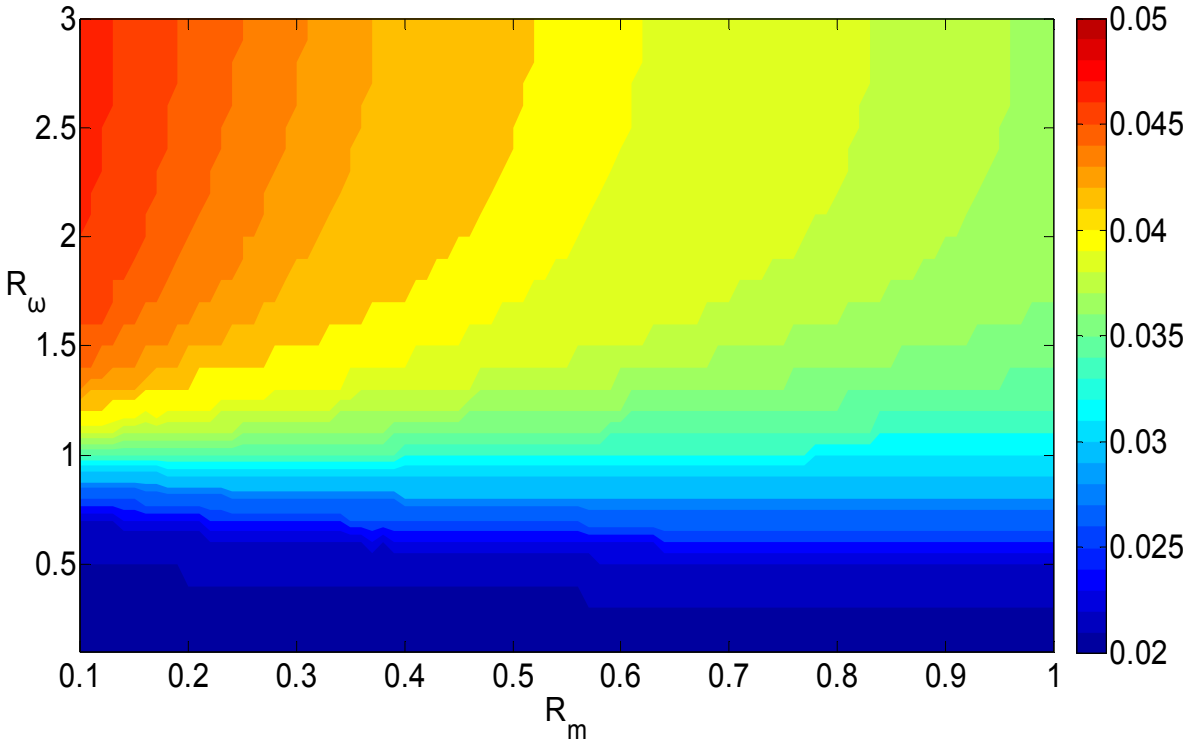
Εικ. 5.33: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_2^{accl} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{2}$



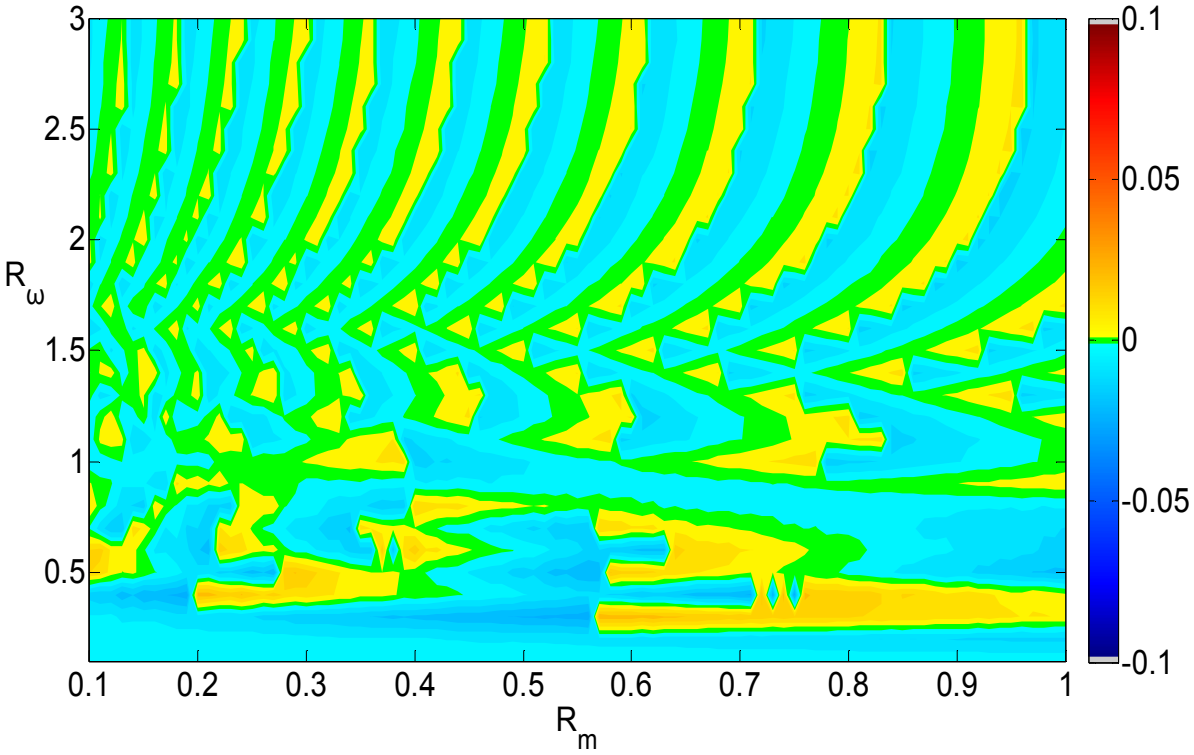
Εικ. 5.34: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_p^{disp}



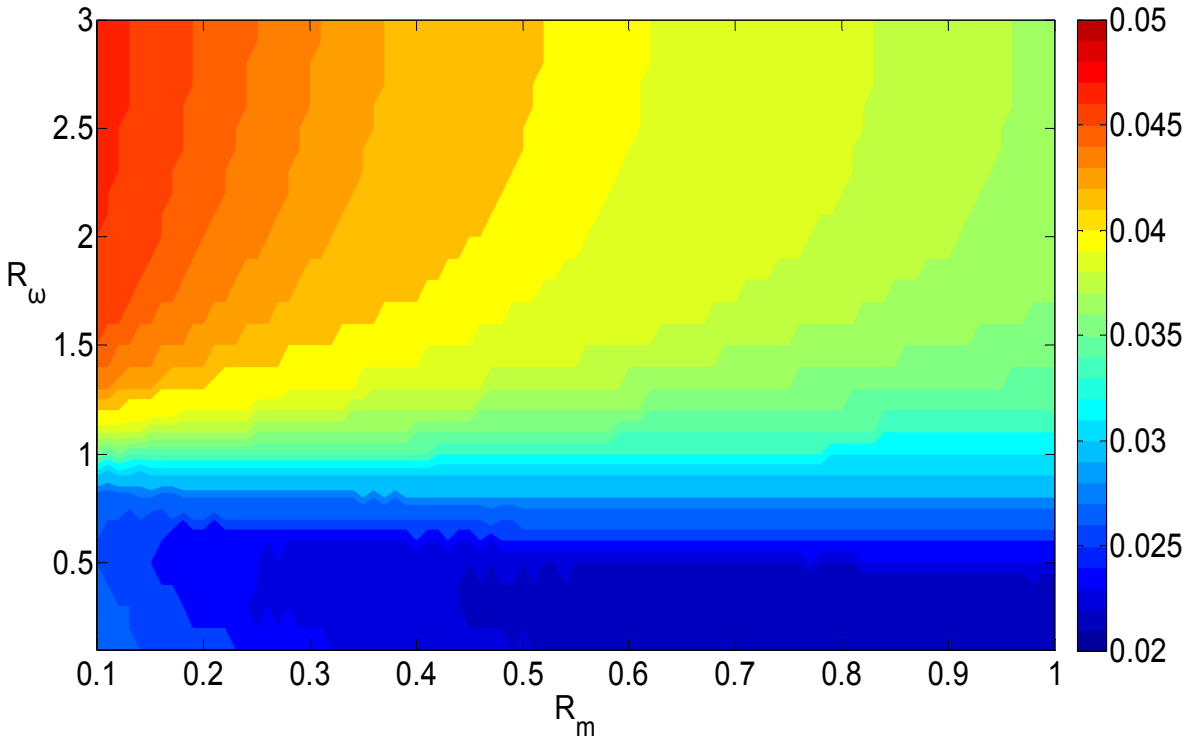
Εικ. 5.35: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_p^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$



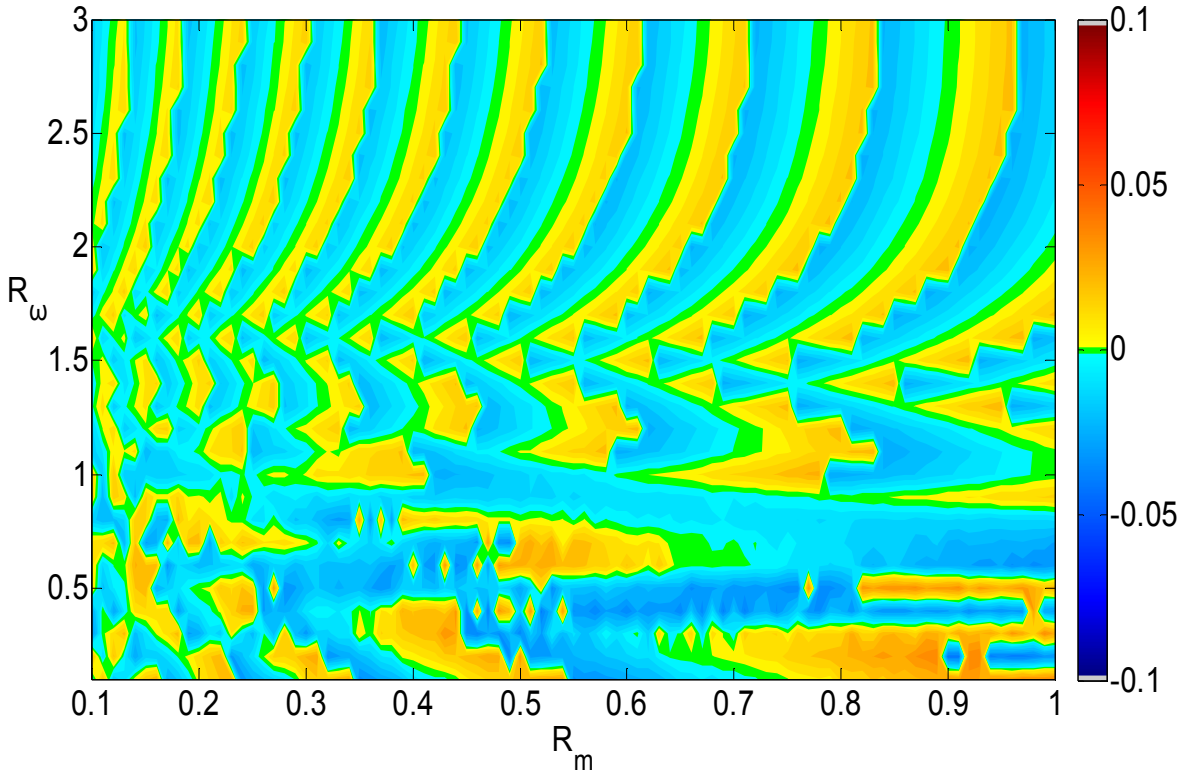
Εικ. 5.36: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta^{s}_{eq}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e^{disp}_{s}



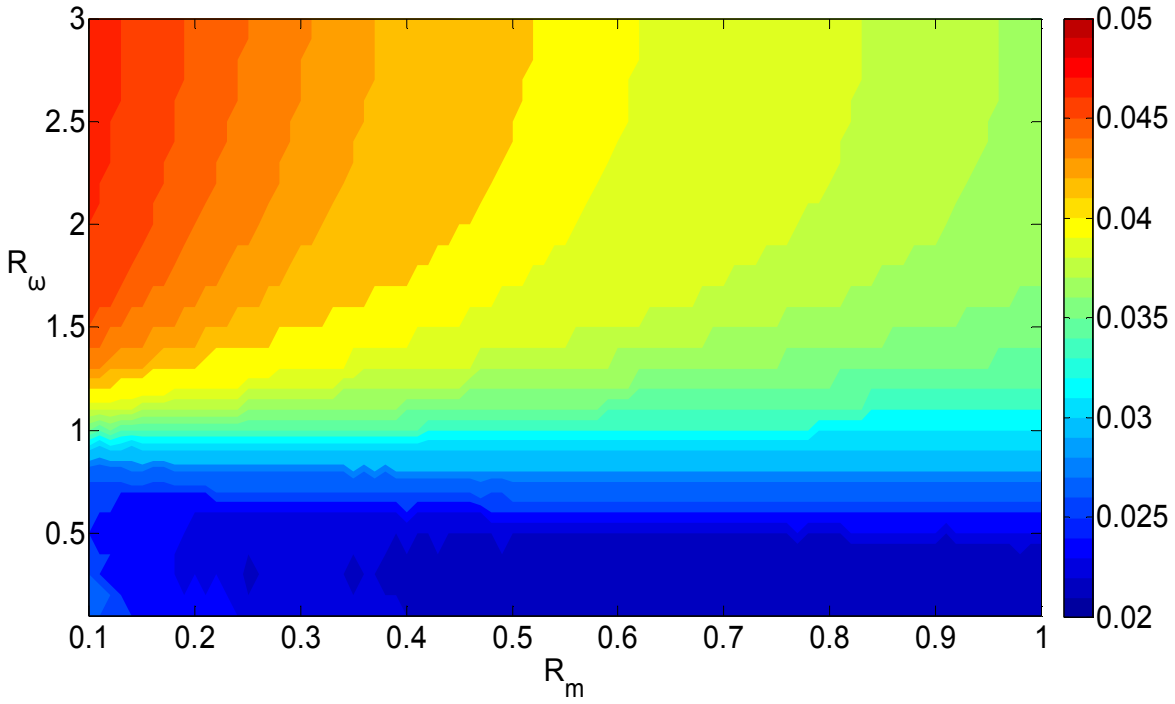
Εικ. 5.37: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e^{disp}_{s} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta^{s}_{eq}$



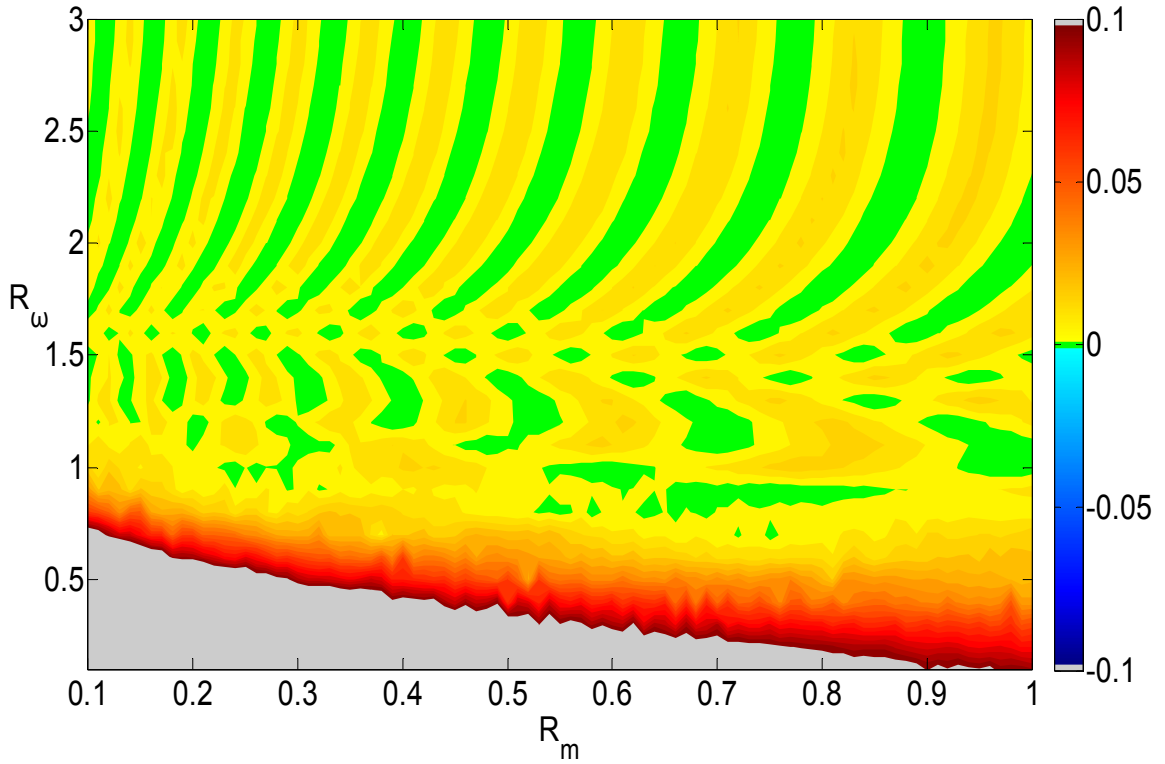
Εικ. 5.38: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta_{eq}^{1}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_1^{disp}



Εικ. 5.39: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_1^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{1}$



Εικ. 5.40: Ισοδύναμη απόσβεση ${}^{disp}\zeta_{eq}^{2}$ από ελαχιστοποίηση του σφάλματος e_2^{disp}



Εικ. 5.41: Ελαχιστοποιημένο σφάλμα e_2^{disp} από χρήση του ισοδύναμου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{2}$

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.3, η διαδικασία εύρεσης των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κάθε φορά εξεταζόμενου σφάλματος δίνει αποτελέσματα που εξαρτώνται από την χρησιμοποιούμενη κάθε φορά διέγερση, αφού ποικίλει και η διέγερση της κάθε ιδιομορφής του διβάθμιου φορέα και κατ' επέκταση η απόκριση των σταθμών του. Η επίδραση της εδαφικής διέγερσης είναι εμφανής στα παραπάνω διαγράμματα ισοδύναμης απόσβεσης, τα οποία διαφέρουν σε σχέση με τα αντίστοιχα των εικόνων 5.9 ως 5.24, συγκρινόμενα με αυτά που προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση των ίδιων τύπων σφαλμάτων. Οι διαφορές όμως δεν είναι μεγάλες, και οι κατανομές των αποσβέσεων που προκύπτουν είναι αντίστοιχες.

Πάλι στις εικόνες σφάλματος, η χρωματική κλίμακα είναι σταθερή προκειμένου να επιτραπεί η σύγκριση των σφαλμάτων μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, το πράσινο χρώμα υποδηλώνει σφάλμα μηδενικό ή πολύ μικρό, το κόκκινο και οι αποχρώσεις του αντιστοιχούν σε θετικές τιμές σφάλματος, άρα υπερεκτίμηση της απόκρισης από τον ισοδύναμο συντελεστή απόσβεσης, και το μπλε χρώμα και οι αποχρώσεις του αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές σφάλματος, άρα υποεκτίμηση της απόκρισης. Τέλος, το γκρι χρώμα υποδηλώνει περιοχές με σφάλμα μεγαλύτερο από 10%.

Όσον αφορά τα απλά σφάλματα e_p και e_s, είτε σε όρους απολύτων επιταχύνσεων είτε σε όρους μετατοπίσεων, οι τιμές τους είναι πάλι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ανάλογα με αυτά της αρμονικής σε συντονισμό διέγερσης. Πάλι, λόγω του ότι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος γίνεται με γνώμονα την απόλυτη τιμή του και όχι το πρόσημό του, οι κατανομές των σφαλμάτων έχουν ανάμικτα πρόσημα, και τα χρώματα που εμφανίζονται στα διαγράμματα σφάλματος είναι αποχρώσεις τόσο του κόκκινου όσο και του μπλε.

Στην περίπτωση όμως των σύνθετων σφαλμάτων e_1 και e_2 η χρήση της σύνθετης αρμονικής διέγερσης οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές σφάλματος. Έτσι, υπάρχουν πλέον περιοχές στις οποίες προκύπτει υπέρβαση του 10% στην τιμή του σφάλματος, και χρωματίζονται με γκρι. Τα σφάλματα αυτά έχουν μόνο θετικές τιμές, και είναι συντηρητικές εκτιμήσεις της διαφοράς της απόκρισης της κατασκευής ανάμεσα στις αναλύσεις με τους ενιαίους συντελεστές και στην ανάλυση με την πραγματική κατανομή της απόσβεσης, και ως εκ τούτου οι τιμές τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των απλών σφαλμάτων. Αυτό άλλωστε, παρατηρείται και στα διαγράμματα των

σφαλμάτων e_1 και e_2 της απλής αρμονικής διέγερσης. Η διαφορά τώρα είναι ότι στη σύνθετη αρμονική διέγερση, οι τιμές τους είναι μεγαλύτερες και ξεπερνούν το 10%, λόγω της διαφορετικής ενίσχυσης των ιδιομορφών.

Οι περιοχές αυτές περιορίζονται σε χαμηλές τιμές του λόγου ιδιοσυχνοτήτων R_ω, που σημαίνει ότι η υπερκατασκευή είναι πολύ πιο εύκαμπτη σε σχέση με το υπόβαθρο, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα η κίνηση της να είναι πολύ πιο έντονη σε σχέση με αυτήν του υποβάθρου. Έτσι, όταν επιχειρείται να προσεγγιστεί η απόκριση της υπερκατασκευής απαιτείται ενιαίος συντελεστής απόσβεσης ίσος με 2%, ενώ προκειμένου να προσεγγιστεί η απόκριση του υποβάθρου, ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης είναι της τάξης του 5%. Αυτό αποτυπώνεται και στα διαγράμματα ισοδύναμης απόσβεσης, τόσο σε αυτά που έχουν προκύψει έχοντας ως κριτήριο τα σφάλματα απολύτων επιταχύνσεων, όσο και σε αυτά που έχουν προκύψει με κριτήριο τα σφάλματα μετατοπίσεων. Η ασυμφωνία αυτή των συντελεστών αποτυπώνεται στα μεγάλα σφάλματα e_1 και e_2, αφού δεν υπάρχει κοινό πεδίο των ενιαίων συντελεστών ζ_{un} που να δίνει ικανοποιητική προσέγγιση και στις δύο στάθμες. Αντίθετα, στην περιοχή των μεγάλων λόγων R_ω όπου λόγω της δυσκαμψίας της υπερκατασκευής η κίνηση είναι εντοπισμένη στο υπόβαθρο, υπάρχει συμφωνία σε αυξημένο ενιαίο συντελεστή απόσβεσης που πλησιάζει αυτόν του υποβάθρου, δηλαδή το 5%, οπότε και τα σφάλματα e_1 και e_2 κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα.

Όπως και η απλή αρμονική διέγερση, έτσι και η σύνθετη, δεν είναι ρεαλιστική διέγερση. Παρ' όλα αυτά, οι ισοδύναμοι συντελεστές που προκύπτουν από αυτήν, θεωρούνται αντιπροσωπευτικότεροι, και υιοθετούνται προκειμένου να μελετηθεί περεταίρω η συμπεριφορά των μικτών κατασκευών. Ο λόγος είναι ότι με τη σύνθετη αρμονική διέγερση προκύπτει σημαντική απόκριση και των δύο ιδιομορφών και όχι μόνο της πρώτης, κάτι που αναμένεται να συμβεί και κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης.

5.7 Σφάλμα υπό σεισμικές διεγέρσεις

Η συμπεριφορά των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης ακολούθως εξετάζεται όταν ο διβάθμιος φορέας καταπονείται από σεισμικές διεγέρσεις. Οι συντελεστές που έχουν προκύψει από τις σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις θεωρούνται οι καταλληλότεροι για εφαρμογή, αφού η επαρκής ενίσχυση και των δύο ιδιομορφών προσομοιώνει καλύτερα πραγματικές συνθήκες σεισμικών φορτίσεων, οι οποίες έχουν πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο και δεν ενισχύουν αποκλειστικά και μόνο μία ιδιομορφή.

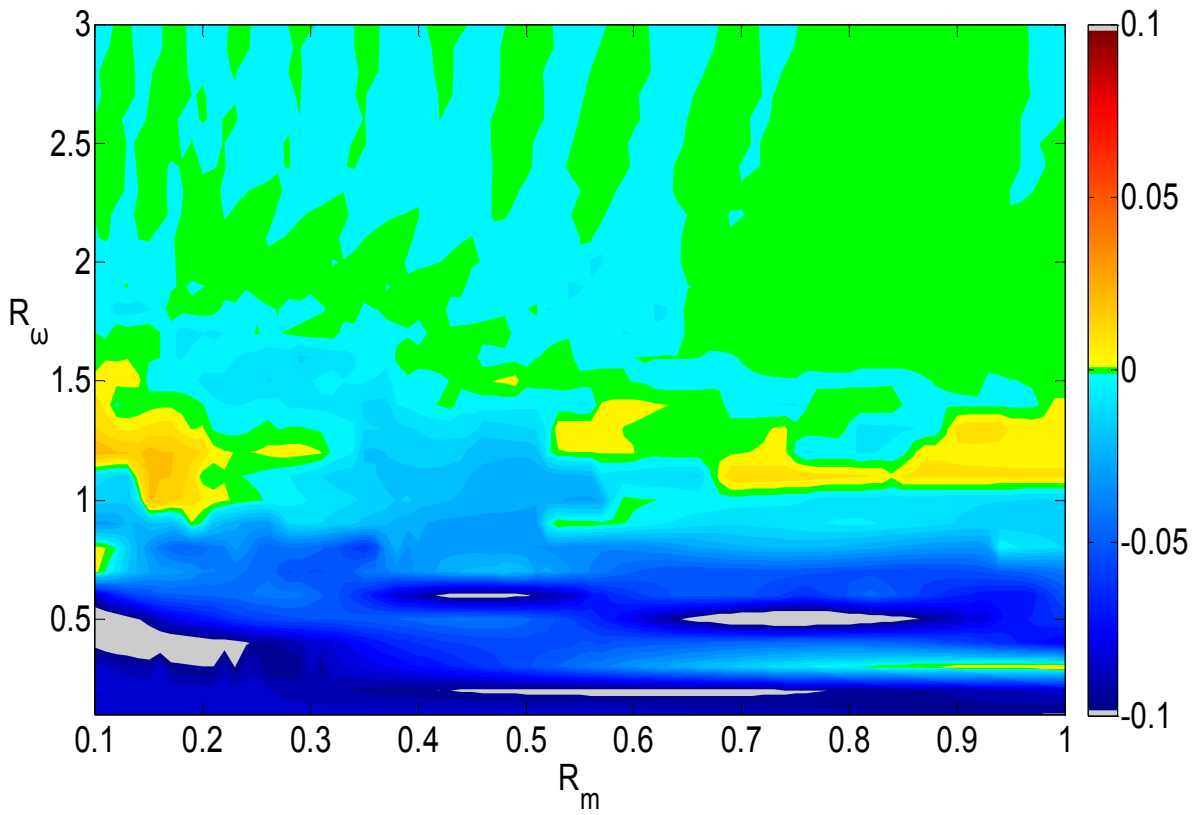
Προκειμένου να γίνει η εφαρμογή των ενιαίων ισοδύναμων συντελεστών, δε χρησιμοποιείται μόνο ένας από αυτούς, αλλά γίνεται αξιοποίηση περισσότερων από έναν, δεδομένου ότι η κάθε μια από τις κατανομές των ζ_{eq} προκύπτει από την ελαχιστοποίηση και ενός σφάλματος. Εν προκειμένω, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές που καταλήγουν σε ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων στις στάθμες p και s, δηλαδή οι ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$, και οι ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$, ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$, οι κατανομές των οποίων φαίνονται στις εικόνες 5.26, 5.28, και 5.34 και 5.36. Οι ισοδύναμοι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης που έχουν προκύψει από την ελαχιστοποίηση των σύνθετων σφαλμάτων e_1 και e_2 δε χρησιμοποιούνται γιατί παρά το ότι τα σφάλματα είναι ελαχιστοποιημένα, οι τιμές τους όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.31, 5.33 καθώς και 5.39 και 5.41 είναι αρκετά μεγάλες και δεν ενθαρρύνεται η εφαρμογή τους.

Η αποτελεσματικότητα του κάθε ενός από τους παραπάνω συντελεστές εξετάζεται στην περίπτωση των σεισμικών διεγέρσεων ως προς το αντίστοιχο σφάλμα που προκαλεί η χρήση του στην ανάλυση του διβάθμιου φορέα, σε σχέση με την ανάλυση με την ορθή κατανομή της απόσβεσης. Έτσι, οι συντελεστές ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$ εφαρμόζονται ενιαία στην διβάθμια κατασκευή σε αναλύσεις χρονοϊστορίας, και η απόκριση που προκαλούν σε όρους απολύτων επιταχύνσεων συγκρίνεται με την απόκριση σε όρους πάλι απολύτων επιταχύνσεων από την ορθή ανάλυση, στη στάθμη p και στη στάθμη s αντίστοιχα. Με τον ίδιο τρόπο, η απόκριση του διβάθμιου σε όρους μετατοπίσεων που προκύπτει από την εφαρμογή των ενιαίων συντελεστών ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$, συγκρίνεται με την απόκριση σε όρους μετατοπίσεων από την ανάλυση της κατασκευής με την πραγματική κατανομή της απόσβεσης στις στάθμες p και s αντίστοιχα. Το ζητούμενο δηλαδή, είναι ο κάθε συντελεστής να δώσει

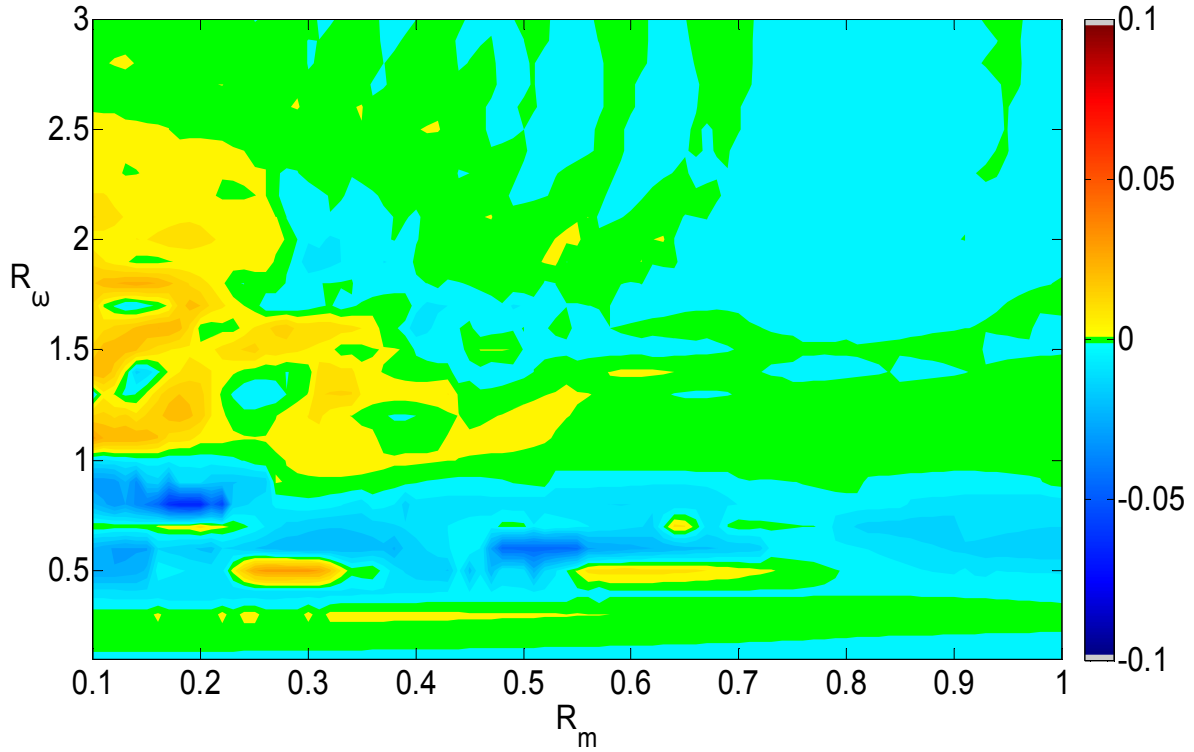
απόκριση με μικρή απόκλιση από την πραγματική, στο μέγεθος από την ελαχιστοποίηση του σφάλματος του οποίου έχει προκύψει.

Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι δέκα σεισμικές καταγραφές που έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2. Για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m), κατασκευάζονται οι αντίστοιχοι διβάθμιοι ταλαντωτές με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου που περιγράφονται στην ενότητα 5.4. Κάθε μία από αυτές τις κατασκευές υποβάλλεται σε όλες τις σεισμικές διεγέρσεις και εκτελούνται 5 διαφορετικές αναλύσεις. Η μία γίνεται με την μικτή κατανομή της απόσβεσης, $\zeta_p = 5\%$ και $\zeta_s = 2\%$, προκειμένου να προκύψουν τα ορθά μεγέθη της απόκρισης. Ακολουθούν 4 προσεγγιστικές αναλύσεις με χρήση των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$, και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$, ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$, οι οποίοι αντιστοιχούν στα σημεία με συντεταγμένες (R_ω, R_m) των διαγραμμάτων των εικόνων 5.26, 5.28, 5.34 και 5.36. Από κάθε μια από αυτές λαμβάνονται αποτελέσματα σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων τόσο στο υπόβαθρο όσο και στην υπερκατασκευή. Τα σφάλματα που προκύπτουν μεταξύ της ορθής ανάλυσης και των 4 προσεγγιστικών, υπολογίζονται σε κάθε στάθμη σε όρους μετατοπίσεων από την εξίσωση (5.15) και σε όρους απολύτων επιταχύνσεων από την εξίσωση (5.16).

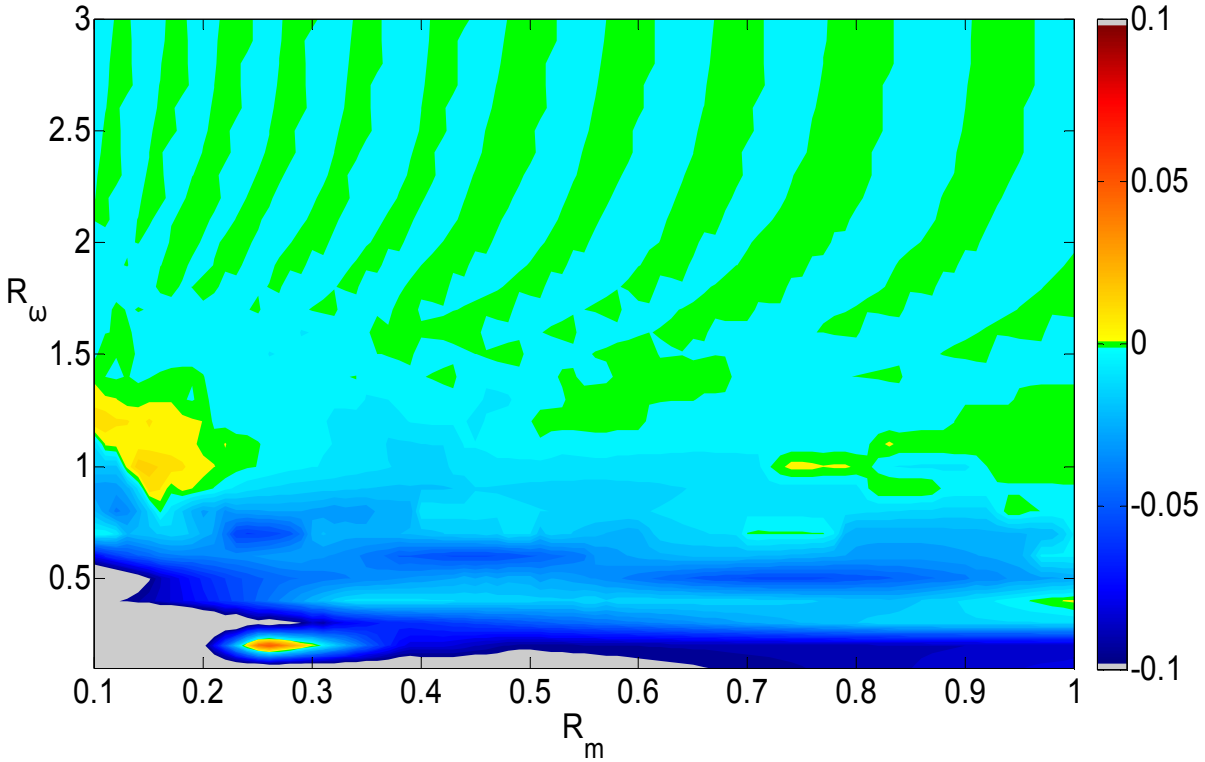
Στις εικόνες 5.42 ως 5.45, φαίνονται οι κατανομές των σφαλμάτων στις στάθμες p και s, σε όρους μετατοπίσεων και απολύτων επιταχύνσεων στις κατασκευές του επιπέδου (R_ω, R_m), όταν η διέγερση είναι αυτή του σεισμού του Northridge. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται είναι η ίδια με αυτή των προηγούμενων κατανομών σφάλματος. Έτσι, το πράσινο χρώμα υποδηλώνει σφάλμα μηδενικό ή πολύ μικρό, οι αποχρώσεις του κόκκινου αντιστοιχούν σε θετικές τιμές σφάλματος, άρα υποεκτίμηση της απόκρισης, και οι αποχρώσεις του μπλε σε αρνητικές τιμές σφάλματος, άρα υπερεκτίμηση της απόκρισης, σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.15) και (5.16). Επίσης, πάλι γίνεται χρήση του γκρι χρώματος, ώστε να καταδειχθούν περιοχές με σφάλμα μεγαλύτερο ή ίσο από 10%.



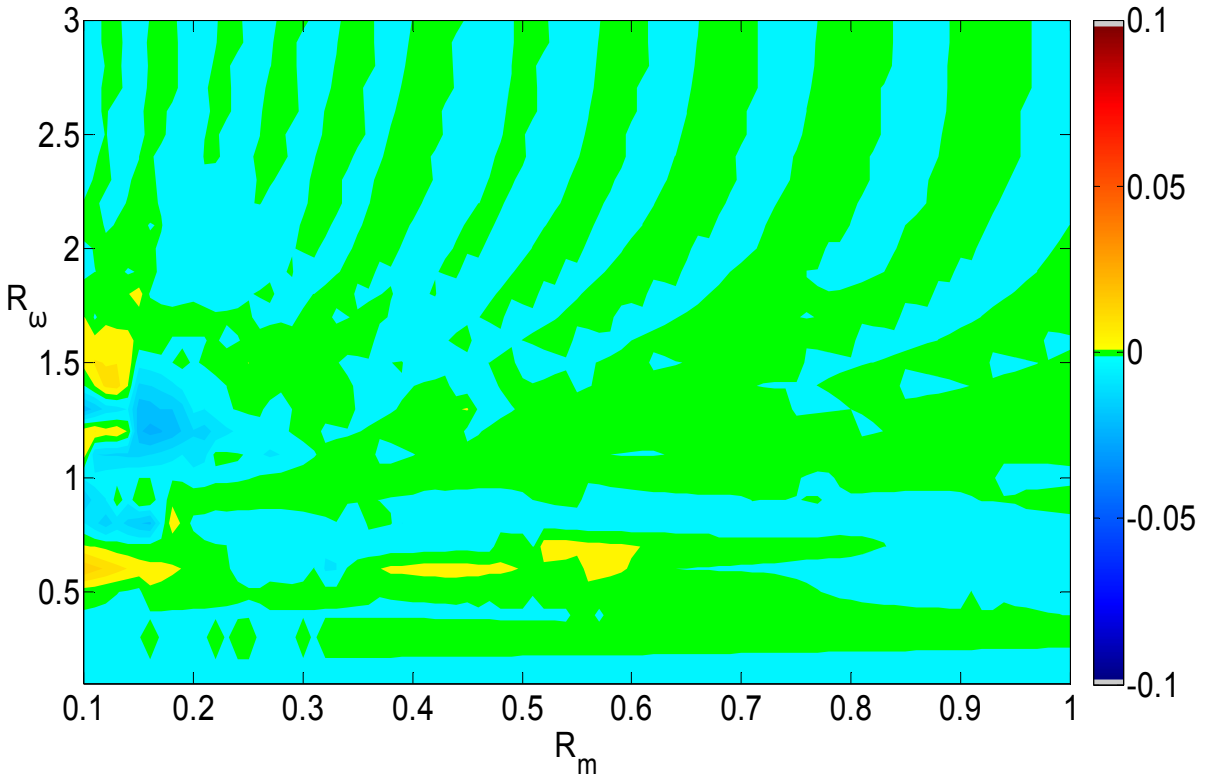
Εικ. 5.42: Σφάλμα e_p^{accl} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ με διέγερση το Northridge



Εικ. 5.43: Σφάλμα e_s^{accl} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$ με διέγερση το Northridge



Εικ. 5.44: Σφάλμα e_p^{disp} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ με διέγερση το Northridge



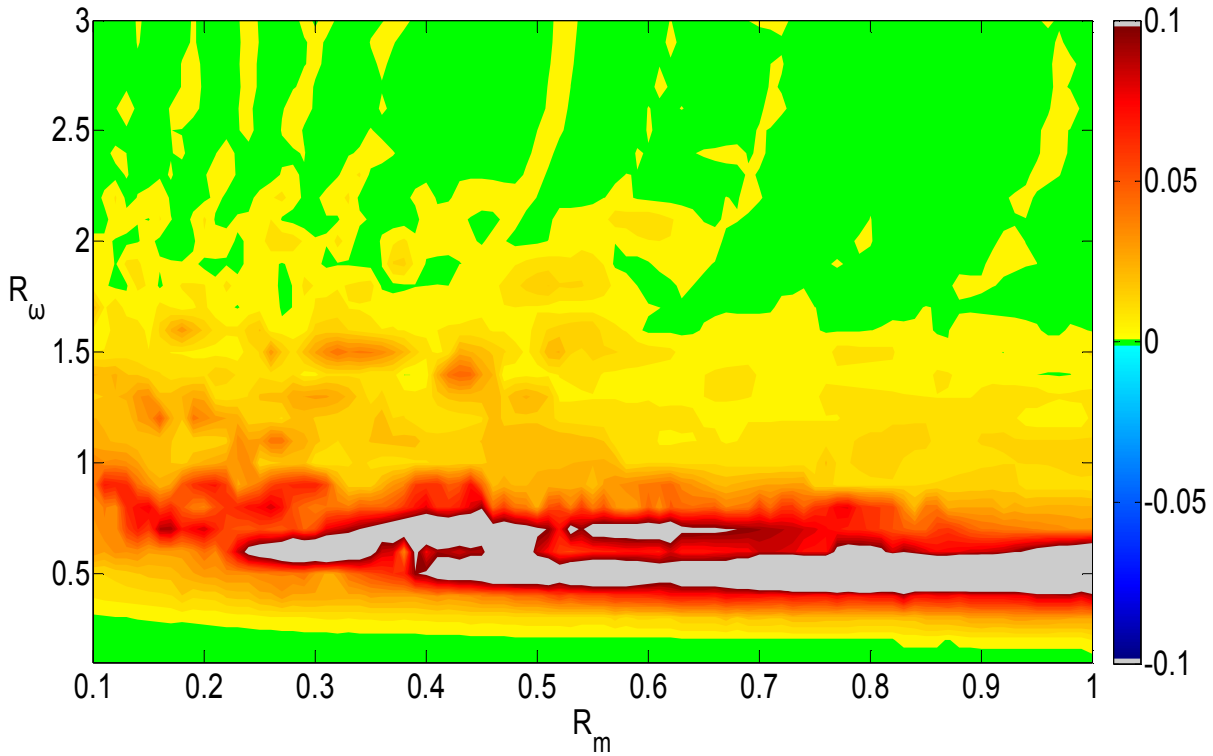
Εικ. 5.45: Σφάλμα e_s^{disp} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ με διέγερση το Northridge

Τα σφάλματα που προκύπτουν τώρα είναι σαφώς μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα ελαχιστοποιημένα σφάλματα της στάθμης p και της στάθμης s. Αφ' ενός οι περιοχές με πράσινο χρώμα είναι περιορισμένες και αφ' ετέρου οι αποχρώσεις του μπλε και του κόκκινου είναι πιο βαθιές. Τέλος, υπάρχουν και περιοχές με σφάλμα μεγαλύτερο από 10%, κάτι που μέχρι στιγμής είχε παρατηρηθεί μόνο στα σύνθετα σφάλματα e_1 και e_2. Ο λόγος είναι ότι οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης που χρησιμοποιούνται, επιλέγονται με βάση την ικανότητά τους να ελαχιστοποιούν τα εν λόγω σφάλματα όταν η διβάθμια κατασκευή καταπονείται από τη σύνθετη αρμονική διέγερση. Τώρα όμως, η διέγερση είναι σεισμική, που σημαίνει ότι στη διέγερση της κάθε ιδιομορφής, εκτός από το συντελεστή συμμετοχής της, που έχει ληφθεί υπόψη και στη σύνθετη αρμονική διέγερση, υπεισέρχεται και η φασματική ενίσχυση στη συγκεκριμένη περίοδο, η οποία στις σεισμικές διεγέρσεις είναι τυχαίας μορφής. Αυτό δεν υποβαθμίζει την αξία των ισοδύναμων συντελεστών που προκύπτουν από τη σύνθετη αρμονική διέγερση, αφού είναι πρακτικά αδύνατο να προκύψουν ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης βασισμένοι σε κάθε σεισμό ξεχωριστά.

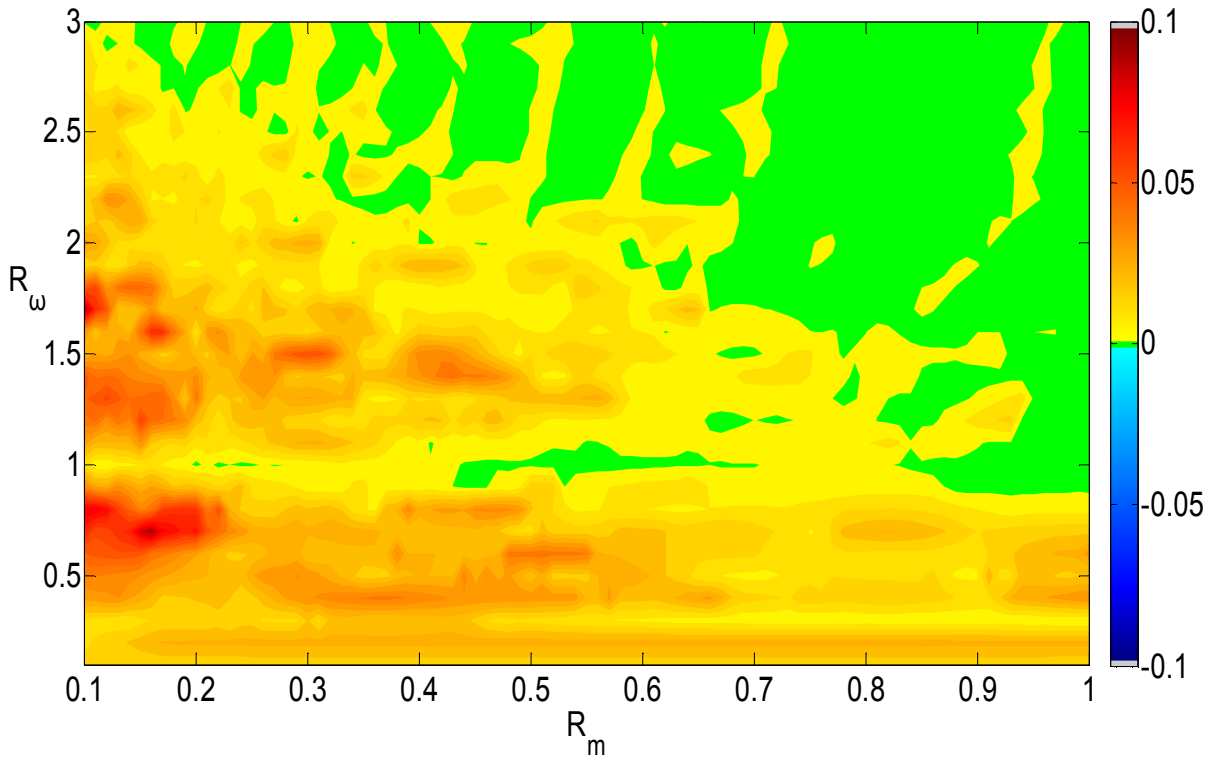
Παρά τα μεγαλύτερα σφάλματα, τα οποία είναι αναπόφευκτα λόγω των χαρακτηριστικών των σεισμικών διεγέρσεων, οι συντελεστές απόσβεσης της σύνθετης αρμονικής διέγερσης δοκιμάζονται σε κάθε μια από τις δέκα σεισμικές καταγραφές. Έτσι, για κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) εκτελείται η ορθή ανάλυση και οι τέσσερις προσεγγιστικές, κάθε μια κάνοντας χρήση ενός από τους ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$, ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$, ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ της σύνθετης αρμονικής διέγερσης, για κάθε μια από τις δέκα διεγέρσεις. Στην κάθε μια από τις τέσσερις προσεγγιστικές αναλύσεις καταγράφεται το αντίστοιχο σφάλμα: e_p^{accl}, e_s^{accl}, e_p^{disp} και e_s^{disp}, και τέλος υπολογίζεται για κάθε σημείο του επιπέδου το μέγιστο σφάλμα από όλες τις σεισμικές καταγραφές, σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων στην κάθε στάθμη:

$$ {}^{seism}e_i^{accl} = \max\left(\left|{}^{j}e_i^{accl}\right|\right) \text{ και } {}^{seism}e_i^{disp} = \max\left(\left|{}^{j}e_i^{disp}\right|\right), i = s,p \,/\, j = 1,2...10 \qquad (5.25) $$

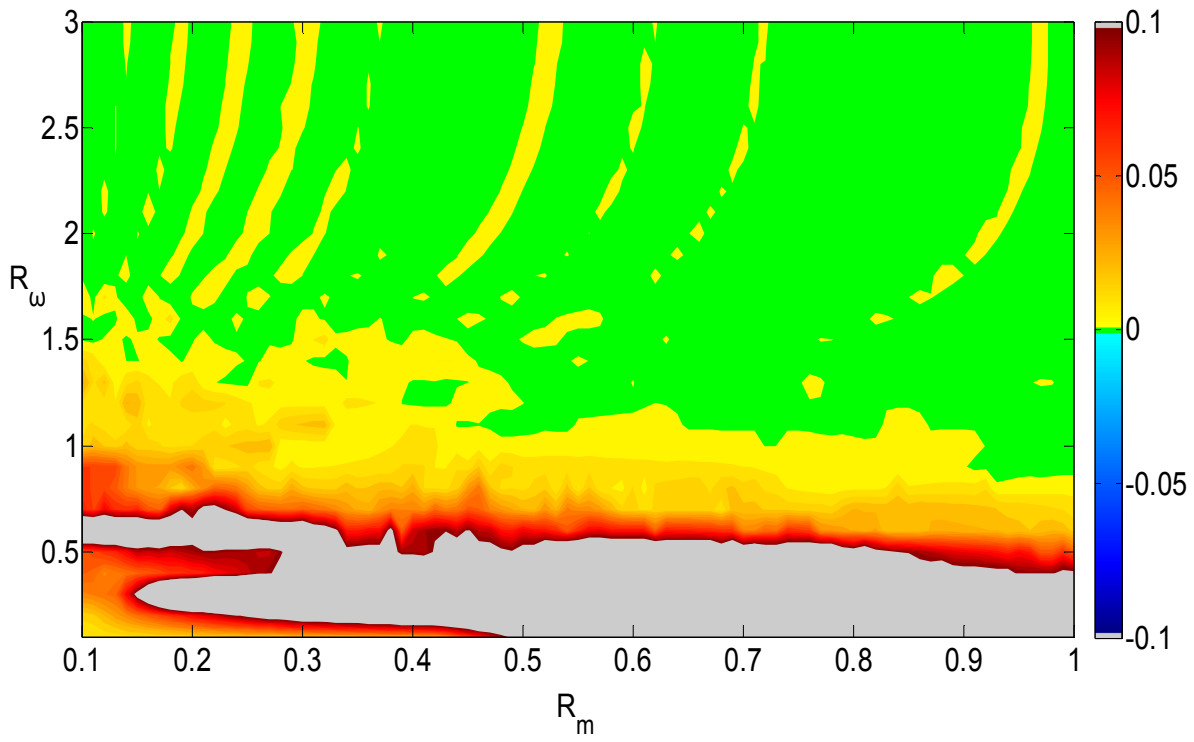
Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται οι περιβάλλουσες στο επίπεδο (R_ω, R_m) των σφαλμάτων σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων των δύο σταθμών από τις 10 διεγέρσεις, και παρουσιάζονται στις εικόνες 5.46 ως 5.49.



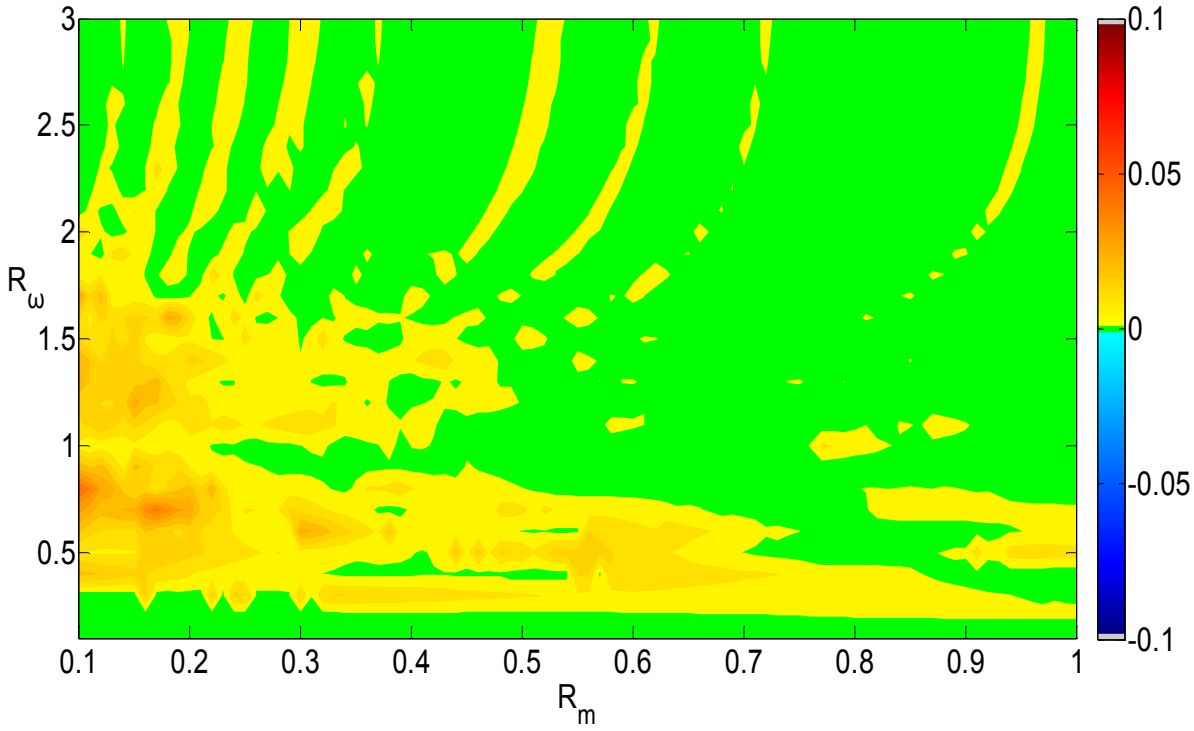
Εικ. 5.46: Περιβάλλουσα σφαλμάτων e_p^{accl} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ από σεισμικές διεγέρσεις



Εικ. 5.47: Περιβάλλουσα σφαλμάτων e_s^{accl} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$ από σεισμικές διεγέρσεις



Εικ. 5.48: Περιβάλλουσα σφαλμάτων e_p^{disp} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ από σεισμικές διεγέρσεις



Εικ. 5.49: Περιβάλλουσα σφαλμάτων e_s^{disp} από τη χρήση του ενιαίου συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ από σεισμικές διεγέρσεις

Στις παραπάνω εικόνες πάλι η χρωματική κλίμακα διατηρείται σταθερή. Έτσι, το πράσινο χρώμα υποδηλώνει πολύ μικρά σφάλματα και οι αποχρώσεις του κόκκινου αντιστοιχούν σε θετικά σφάλματα, άρα και υποεκτίμηση της απόκρισης. Λόγω του τρόπου με τον οποίο υπολογίζονται οι περιβάλλουσες των σφαλμάτων, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.25), δεν υπάρχουν αρνητικές τιμές σφάλματος και κατά συνέπεια δεν υπάρχουν περιοχές με μπλε χρώμα.

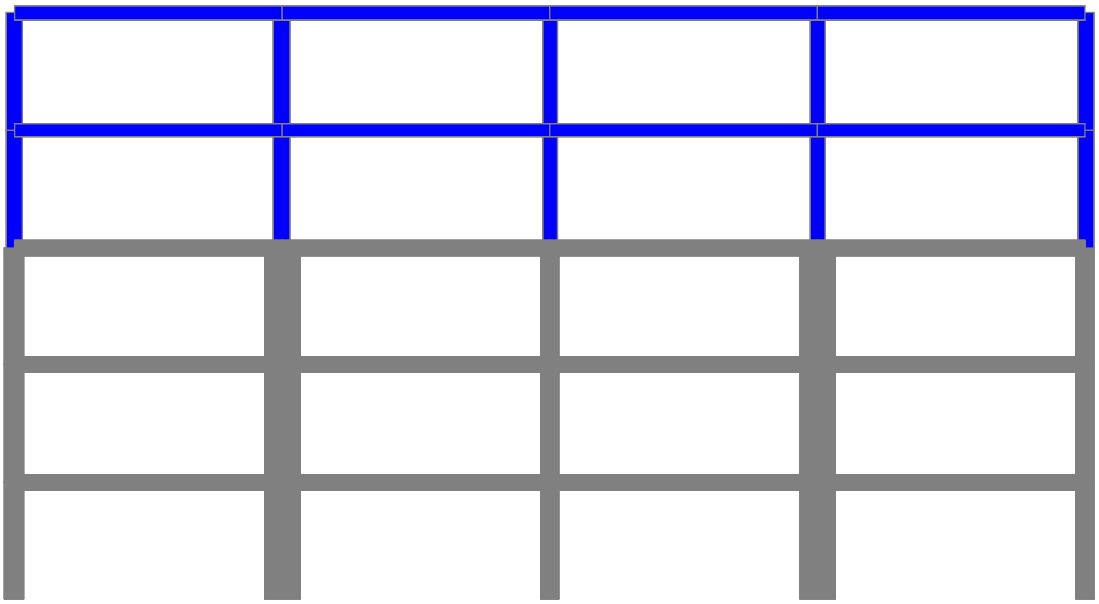
Όπως και στην περίπτωση της δοκιμής των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης που προκύπτουν από τη σύνθετη αρμονική διέγερση σε σεισμική διέγερση υπό την καταγραφή του Northridge, έτσι και οι περιβάλλουσες των σεισμικών διεγέρσεων καταλήγουν σε σημαντικά μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με τα ελαχιστοποιημένα λόγω της διαφοράς μεταξύ της σύνθετης αρμονικής διέγερσης και των σεισμικών στην ενίσχυση των ιδιομορφών των διβάθμιων συστημάτων. Μάλιστα, δεδομένου ότι οι παραπάνω εικόνες είναι οι περιβάλλουσες των σεισμικών σφαλμάτων, οι κατανομές που προκύπτουν είναι ακόμα πιο δυσμενείς. Όπως και στην περίπτωση του Northridge, τα σφάλματα που προκύπτουν είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους, είτε μελετηθούν σε όρους απολύτων επιταχύνσεων είτε σε όρους μετατοπίσεων.

Πάλι σε αντιστοιχία με τη μεμονωμένη μελέτη του Northridge, οι περιοχές με μεγάλες τιμές των λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών έχουν μικρότερα σφάλματα σε όρους μετατοπίσεων και επιταχύνσεων σε σχέση με τις περιοχές που ο λόγος των ιδιοσυχνοτήτων κυμαίνεται γύρω από τη μονάδα και ο λόγος μαζών παίρνει μικρές τιμές. Ο λόγος είναι ότι οι περιοχές με μικρά σφάλματα αντιστοιχούν σε διβάθμια συστήματα με ιδιομορφές από τις οποίες η μία είναι εντελώς εκτός συντονισμού από τις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ενίσχυση που δίνουν οι σεισμικές διεγέρσεις στην ιδιομορφή αυτή είναι αμελητέα και η απόκριση του διβάθμιου συστήματος προκύπτει σχεδόν αποκλειστικά από την άλλη ιδιομορφή. Αυτός ο συνδυασμός αποκρίσεων των ιδιομορφών είναι ευμενέστερος από τον αντίστοιχο που προκύπτει από την σύνθετη αρμονική διέγερση η οποία κατασκευάζεται με βάση και τις δύο ιδιομορφές. Αυτό αποτυπώνεται στην μεγαλύτερη έκταση του πράσινου χρώματος στις περιοχές αυτές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιοχές των διαγραμμάτων σφάλματος από σύνθετες αρμονικές διεγέρσεις. Εν γένει όμως, τα σφάλματα είναι αρκετά μικρά ώστε να ενθαρρύνεται η εφαρμογή τους. Μάλιστα, η ευκολία της εφαρμογής των ενιαίων συντελεστών

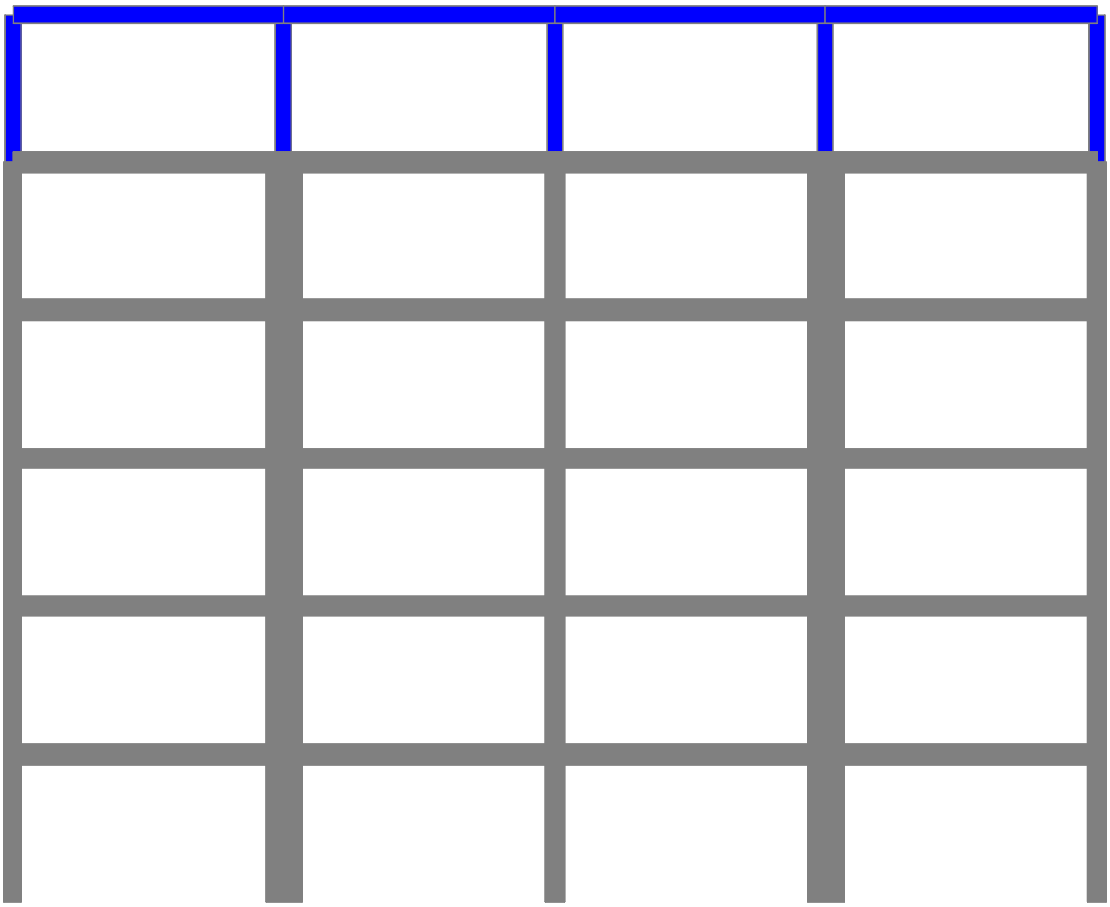
απόσβεσης, και η δυνατότητα χρήσης τους στα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού, κάνει πιο ελκυστική την εφαρμογή τους, παρά τα ενδεχόμενα σφάλματα.

5.8 Εφαρμογές ισοδύναμων ενιαίων συντελεστών απόσβεσης

Οι ισοδύναμοι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από την σύνθετη αρμονική διέγερση, ακολούθως δοκιμάζονται σε πολυώροφα επίπεδα πλαίσια, προκειμένου να διαπιστωθεί αν μπορούν να αποτελέσουν μια εναλλακτική πρόταση ανάλυσης πολυβάθμιων μικτών κατασκευών. Όπως και στο κεφάλαιο 4, εξετάζονται 2 πλαίσια, ένα με 3 στάθμες από σκυρόδεμα και 2 στάθμες από χάλυβα το οποίο παρουσιάζεται στην Εικ. 5.50, και ένα που αποτελείται από 5 στάθμες από σκυρόδεμα και 1 στάθμη από χάλυβα, όπως αυτό της Εικ. 5.51. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται και η ακρίβεια της προσομοίωσης του πολυβάθμιου τμήματος από έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή, ενώ η δεύτερη περίπτωση είναι και η πιο συνηθισμένη αφού συνήθως οι προσθήκες καθ' ύψος αφορούν την προσθήκη μιας στάθμης από χάλυβα σε υφιστάμενη κατασκευή.



Εικ. 5.50: Πλαίσιο με 3 στάθμες από σκυρόδεμα και 2 στάθμες χάλυβα



Εικ. 5.51: Πλαίσιο με 5 στάθμες από σκυρόδεμα και 1 στάθμη χάλυβα

Για τους σκοπούς της εφαρμογής, χρησιμοποιούνται οι κατανομές των συντελεστών ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ που προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σε όρους μετατοπίσεων της στάθμης p και της στάθμης s με τη χρήση της σύνθετης αρμονικής διέγερσης. Όπως προαναφέρθηκε, η σύνθετη αρμονική διέγερση, με τον τρόπο που κατασκευάζεται, δίνει σημαντική ενίσχυση και στις δύο ιδιομορφές, με αποτέλεσμα να αποτελεί καλή προσέγγιση μιας σεισμικής διέγερσης. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές των εικόνων 5.34 και 5.36, δηλαδή οι συντελεστές ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ που προκύπτουν από τη σύνθετη διέγερση, είναι αρκετά κοντά σε αυτούς που θα προέκυπταν από μια οποιαδήποτε σεισμική διέγερση. Έτσι, παρ' όλο που τα σφάλματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 5.7 είναι αρκετά μεγάλα, οι εφαρμογές εκτελούνται με τους συντελεστές ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$.

Παράλληλα, αφού πρόκειται για εφαρμογή των ισοδύναμων συντελεστών, θεωρείται σκόπιμο να περιοριστεί ο υπολογιστικός όγκος σε επίπεδο τέτοιο ώστε να μπορεί η χρήση των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης να γίνει στα πλαίσια μιας κοινής

μελέτης. Για το λόγο αυτό, δε γίνεται χρήση και των συντελεστών ${}^{accl}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{accl}\zeta_{eq}^{s}$ που προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σε όρους απολύτων επιταχύνσεων. Έτσι, οι συντελεστές που ελαχιστοποιούν τα σφάλματα σε όρους μετατοπίσεων δοκιμάζονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους και για τις επιταχύνσεις. Προτιμώνται οι συντελεστές απόσβεσης που σχετίζονται με τις μετατοπίσεις, γιατί αυτές είναι από μόνες τους μεγέθη σχεδιασμού, ενώ οι επιταχύνσεις πρέπει να πολλαπλασιαστούν με μάζες προκειμένου να δώσουν μεγέθη σχεδιασμού.

Δεδομένου ότι ο κάθε ένας από τους συντελεστές ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ που χρησιμοποιούνται αντιστοιχεί σε ελαχιστοποίηση του σφάλματος μετατοπίσεων στην αντίστοιχη στάθμη, η εφαρμογή τους γίνεται με έναν αντίστοιχο τρόπο. Έτσι, από την ανάλυση με θεώρηση ενιαίου συντελεστή απόσβεσης ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ προκύπτει η απόκριση του υποβάθρου, και από την ανάλυση με θεώρηση ενιαίου συντελεστή απόσβεσης ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ προκύπτει η απόκριση της υπερκατασκευής. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, εκτελούνται δύο προσεγγιστικές αναλύσεις, μία με τον κάθε ένα συντελεστή απόσβεσης, και από την κάθε μια προκύπτουν τα επιθυμητά μεγέθη απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, από την ανάλυση με ενιαίο συντελεστή απόσβεσης ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ εξάγονται μεγέθη απόκρισης σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων για το υπόβαθρο, και από την ανάλυση με ενιαίο συντελεστή απόσβεσης ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ εξάγονται τα μεγέθη απόκρισης σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων για την υπερκατασκευή. Ακολούθως, τα αποτελέσματα από τις δύο αναλύσεις συνδυάζονται προκειμένου να προκύψει το πλήρες προφίλ της προσέγγισης της απόκρισης της κατασκευής σε επιταχύνσεις και μετατοπίσεις από τη χρήση των ενιαίων ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης.

Από τις Εικ. 5.34 και 5.36 προκύπτει ότι για ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι του επιπέδου (R_ω, R_m), οι τιμές των συντελεστών ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ παίρνουν παρόμοιες ή και ίδιες τιμές για τις αντίστοιχες τιμές των λόγων μαζών και ιδιοσυχνοτήτων. Στις περιπτώσεις αυτές, αν η ανάλυση γίνει με έναν ισοδύναμο συντελεστή απόσβεσης αντί για δύο, η διαφορά που προκύπτει είναι πολύ μικρή. Ειδικά όταν πρόκειται για εφαρμογή σε πραγματική κατασκευή που αντιστοιχεί στις περιοχές αυτές, οι ενδεχόμενες διαφορές από την ανάλυση με έναν ή με δύο ισοδύναμους συντελεστές

απόσβεσης είναι αμελητέες και πολύ μικρής σημασίας για τον προσδιορισμό των τελικών εντατικών μεγεθών.

Όσον αφορά τα πολυώροφα επίπεδα πλαίσια των εικόνων 5.50 και 5.51 που αναλύονται, υιοθετείται η παραδοχή ότι οι πλάκες τους έχουν πολύ μεγάλη δυσκαμψία στο επίπεδό τους, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα διαφραγματική λειτουργία, οπότε η κάθε στάθμη αντιστοιχεί σε έναν μεταφορικό βαθμό ελευθερίας. Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει η προσομοίωση των πλαισίων στο OS [124] να γίνει με έναν κόμβο ανά στάθμη. Ο κάθε κόμβος συνδέεται με τους γειτονικούς του μέσω στοιχείων ZL τα οποία αποδίδουν τη συνολική δυσκαμψία της κάθε στάθμης, αλλά και την απόσβεση, τόσο την ανάλογη με τη μάζα όσο και την ανάλογη με τη δυσκαμψία, ώστε τελικά να προκύψει ένας φορέας του τύπου της Εικ. 5.6.

Πάλι, το κάθε σημείο του επιπέδου (R_ω, R_m) σχετίζεται με το κάθε πολυώροφο πλαίσιο μέσω των χαρακτηριστικών της πρώτης ιδιομορφής του κάθε τμήματος. Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα πλαίσια των εικόνων 5.50 και 5.51 χωρίζονται σε δύο ομοειδή από άποψης υλικού τμήματα, και στο κάθε ένα από αυτά γίνεται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση. Τα χαρακτηριστικά της πρώτης ιδιομορφής του κάθε τμήματος, και συγκεκριμένα η μάζα και η ιδιοσυχνότητα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών:

$$R_\omega = \frac{\omega_p^1}{\omega_s^1}, \quad R_m = \frac{M_p^1}{M_s^1} \tag{5.26}$$

Η εφαρμογή των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης γίνεται σε ένα εύρος λόγων ιδιοσυχνοτήτων και μαζών, προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά τους και ως προς τη συσχέτιση των δυναμικών χαρακτηριστικών των δύο τμημάτων. Για το λόγο αυτό επιλέγονται τρεις τιμές για το λόγο ιδιοσυχνοτήτων: $R_\omega = \{0.5, 1, 1.5\}$ και τέσσερις τιμές για το λόγο μαζών: $R_m \{0.2, 0.5, 0.8, 1.0\}$. Με τον τρόπο αυτό σαρώνεται ένα τμήμα του επιπέδου (R_ω, R_m) στο οποίο αντιστοιχούν οι περισσότερες περιπτώσεις κατασκευών ενδιαφέροντος πολιτικού μηχανικού.

Στην κάθε στάθμη του υποβάθρου, αποδίδεται μάζα ίση με 200Mgr, και δυσκαμψία κατά την οριζόντια μετακίνηση ίση με 311623,56kN/m, χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν σε συνηθισμένη κτιριακή κατασκευή. Με δεδομένα τα μεγέθη μάζας και δυσκαμψίας του υποβάθρου, υπολογίζονται με μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση η

ιδιοσυχνότητα και η ιδιομορφική μάζα της πρώτης ιδιομορφής. Ακολούθως, με δεδομένους κάθε φορά τους λόγους R_ω και R_m, είναι δυνατόν να υπολογιστούν και η ιδιοσυχνότητα και η ιδιομορφική μάζα της πρώτης ιδιομορφής της υπερκατασκευής. Με τη βοήθεια ενός λογισμικού στατικής ανάλυσης, και με λίγες δοκιμές κάθε φορά, είναι δυνατός ο πλήρης υπολογισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών της υπερκατασκευής σε όρους μαζών και δυσκαμψιών. Οι δυσκαμψίες του υποβάθρου και της υπερκατασκευής εισάγονται στο υπολογιστικό προσομοίωμα του OS [124] ως δυσκαμψίες των στοιχείων ZL, και οι μάζες αποδίδονται ως επικόμβιες μάζες.

Για κάθε μια από τις πολυβάθμιες κατασκευές, 3+2 και 5+1 σταθμών, που αναλύονται και προσδιορίζονται από τους λόγους μαζών και ιδιοσυχνοτήτων, γίνεται μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση η οποία καθορίζει τις ιδιοσυχνότητες της πλήρους κατασκευής. Από τις ιδιοσυχνότητες αυτές, και με τη διαδικασία που περιγράφεται στις εξισώσεις (5.5) ως (5.7) κατασκευάζεται το μητρώο απόσβεσης της μικτής κατασκευής, και τα στοιχεία ZL που υλοποιούν την απόσβεση στα προσομοιώματα λαμβάνουν τα χαρακτηριστικά τους με τρόπο αντίστοιχο με αυτά της διβάθμιας μικτής κατασκευής. Έτσι ολοκληρώνεται το προσομοίωμα του μικτού πλαισίου για την ορθή ανάλυση.

Στην περίπτωση της ανάλυσης των πλαισίων με ενιαίο συντελεστή απόσβεσης η κατασκευή του μητρώου απόσβεσης είναι απλούστερη διαδικασία. Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης της κατασκευής, αποδίδεται ο εκάστοτε ενιαίος συντελεστής απόσβεσης σε δύο ιδιομορφές, στην πρώτη με ιδιοσυχνότητα ω_1 και σε αυτήν στην οποία επιτυγχάνεται ποσοστό μάζας ίσο με 90%, με ιδιοσυχνότητα έστω ω_n. Οι συντελεστές a_0 και a_1 υπολογίζονται κατά Rayleigh ως εξής:

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_1\omega_n}{\omega_1 + \omega_n} \tag{5.27}$$

$$a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_1 + \omega_n} \tag{5.28}$$

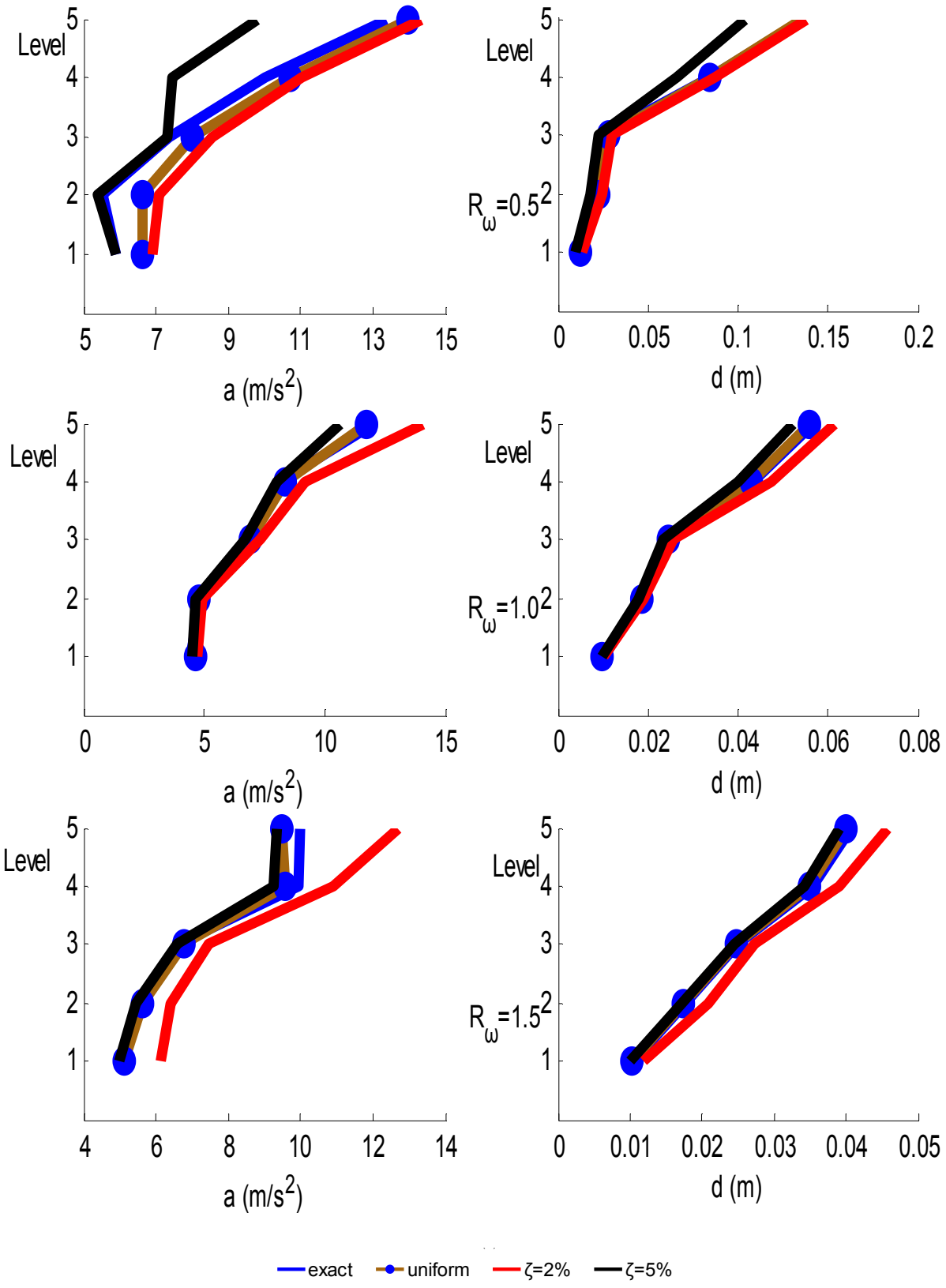
Από τους συντελεστές a_0 και a_1, και με δεδομένα τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, γίνεται ο υπολογισμός του μητρώου απόσβεσης της κατασκευής με ενιαία απόσβεση, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.12). Πάλι, τα χαρακτηριστικά απόσβεσης που αποδίδονται στα στοιχεία ZL προκύπτουν όπως στην περίπτωση της διβάθμιας

κατασκευής με ενιαία απόσβεση και ολοκληρώνεται το προσομοίωμα των πολυώροφων πλαισίων με ενιαία απόσβεση. Οι αναλύσεις με ενιαία απόσβεση που εκτελούνται είναι αυτές με συντελεστή ${}^{disp}\zeta_{eq}^{p}$ και ${}^{disp}\zeta_{eq}^{s}$ που προκύπτουν από τους εκάστοτε λόγους R_ω και R_m, αλλά και μία ανάλυση με ενιαίο συντελεστή 2%, η οποία είναι και η μελετητική πρακτική, και μία με ενιαίο συντελεστή 5%, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των πλαισίων με τις ακραίες δυνατές τιμές της απόσβεσης.

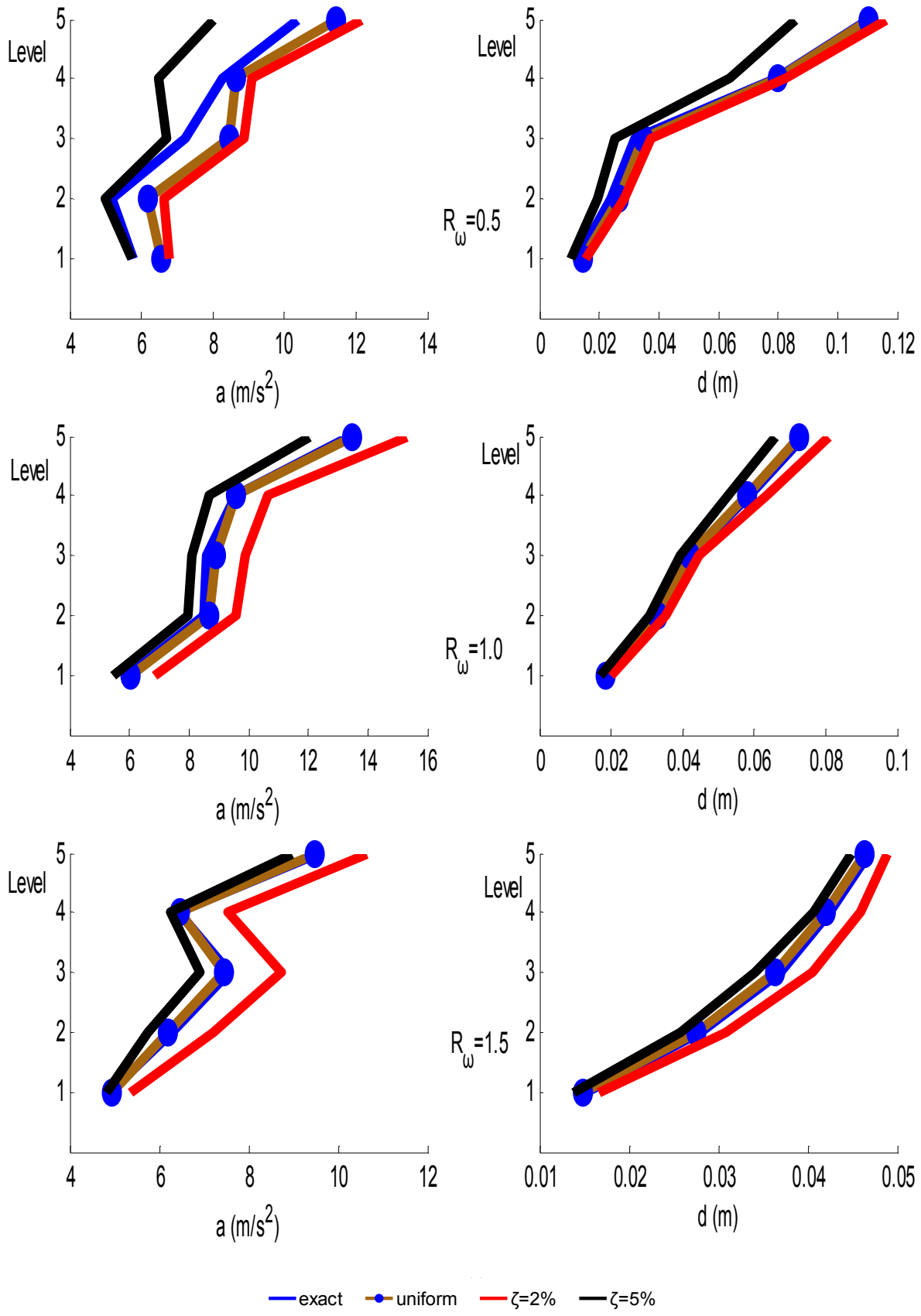
Οι 5 αναλύσεις που εκτελούνται για κάθε πολυώροφο πλαίσιο, μία με την ορθή απόσβεση, 2 με τους ισοδύναμους συντελεστές και 2 με τις ακραίες δυνατές τιμές της απόσβεσης, είναι αναλύσεις χρονοϊστορίας. Τα πολυβάθμια προσομοιώματα αναλύονται στο OS [124] με τη μέθοδο μέσης επιτάχυνσης Newmark. Οι φασματικές αναλύσεις πάλι δεν εκτελούνται, προκειμένου να μην υπεισέλθει στα αποτελέσματα το σφάλμα από το συνδυασμό των μεγίστων των ιδιομορφικών αποκρίσεων. Η διέγερση που χρησιμοποιείται είναι η Athens, και η απόκριση κάθε στάθμης λαμβάνεται σε όρους μετατοπίσεων, y στην ορθή και y' στις προσεγγιστικές, και απολύτων επιταχύνσεων, $\ddot{\bar{y}}$ στην ορθή και $\ddot{\bar{y}}'$ στις προσεγγιστικές. Μεταξύ της ορθής και των προσεγγιστικών αναλύσεων υπολογίζονται τα σφάλματα σε όρους μετατοπίσεων και απολύτων επιταχύνσεων, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.29), και σε μορφή νόρμας τμηματικά και για όλη την κατασκευή στην εξίσωση (5.30). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων απεικονίζονται στις ακόλουθες εικόνες με τη μορφή προφίλ μεγίστων αποκρίσεων, προφίλ σφαλμάτων, καθώς και με ραβδογράμματα νόρμας σφάλματος για το κάθε τμήμα και για ολόκληρη την κατασκευή. Συγκεκριμένα, στις εικόνες 5.52 ως 5.67 φαίνονται τα αποτελέσματα για την κατασκευή με 3+2 στάθμες, και στις εικόνες 5.68 ως 5.83 για την κατασκευή με τις 5+1 στάθμες.

$$e_i^{disp} = \left|\frac{\max(|y_i|) - \max(|y_i'|)}{\max(|y_i|)}\right|,\ e_i^{accl} = \left|\frac{\max(|\ddot{\bar{y}}_i|) - \max(|\ddot{\bar{y}}_i'|)}{\max(|\ddot{\bar{y}}_i|)}\right|,\ i = 1,2...(np+ns) \quad (5.29)$$

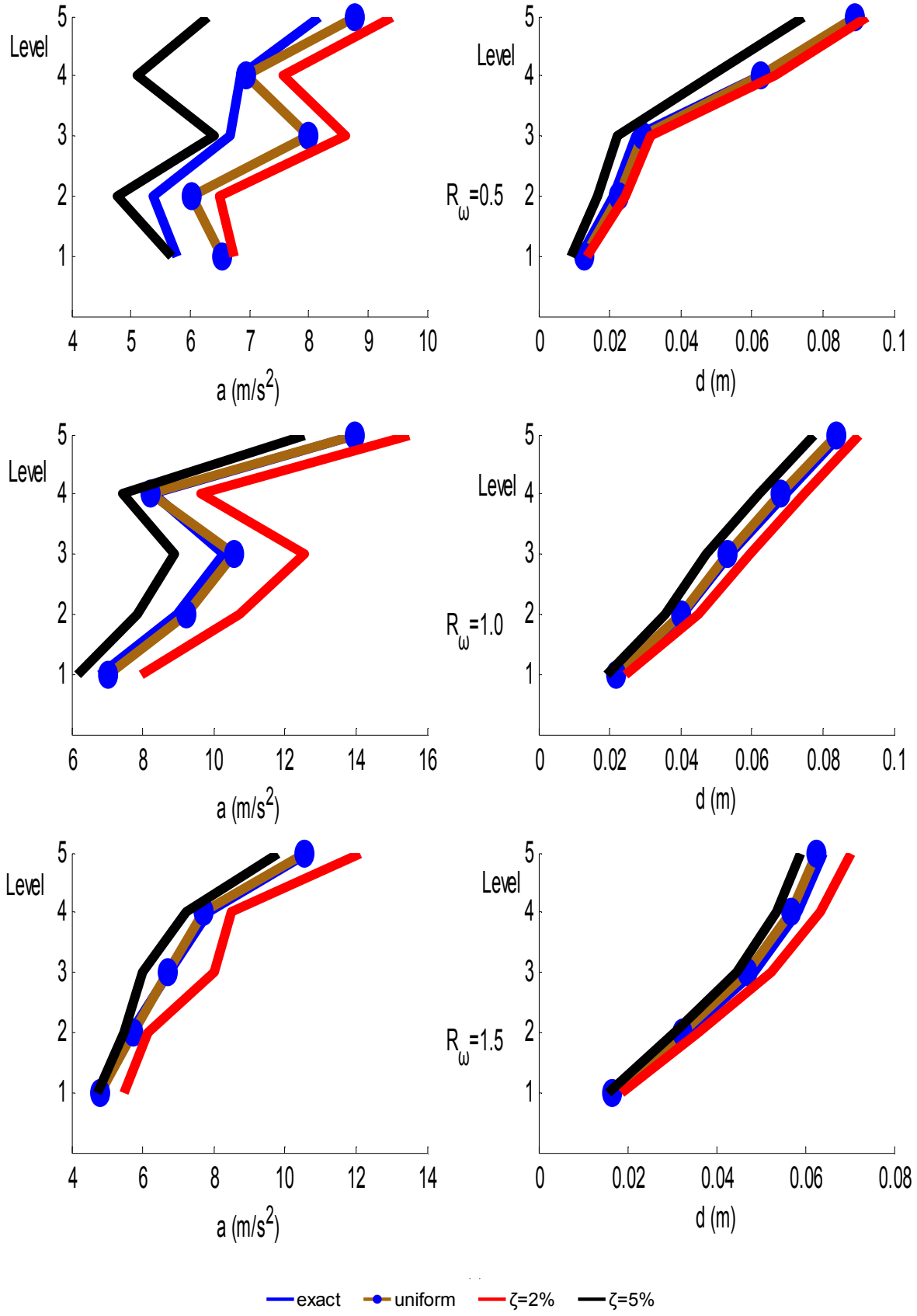
$$e_2^{disp} = \sqrt{\sum_1^n \left(e_i^{disp}\right)^2},\ e_2^{accl} = \sqrt{\sum_1^n \left(e_i^{accl}\right)^2},\ n = \{np / ns / np+ns\} \quad (5.30)$$



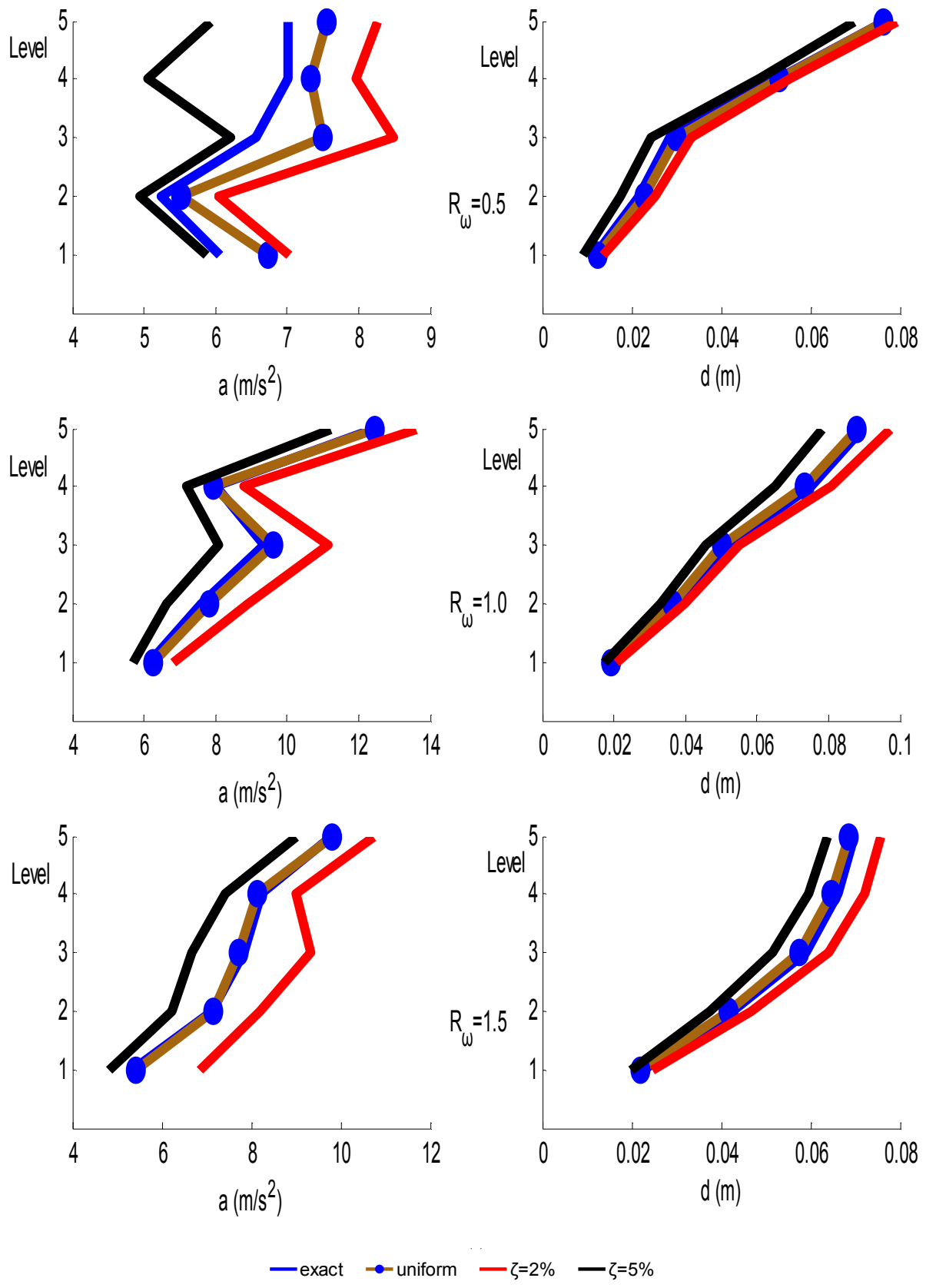
Εικ. 5.52: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.2



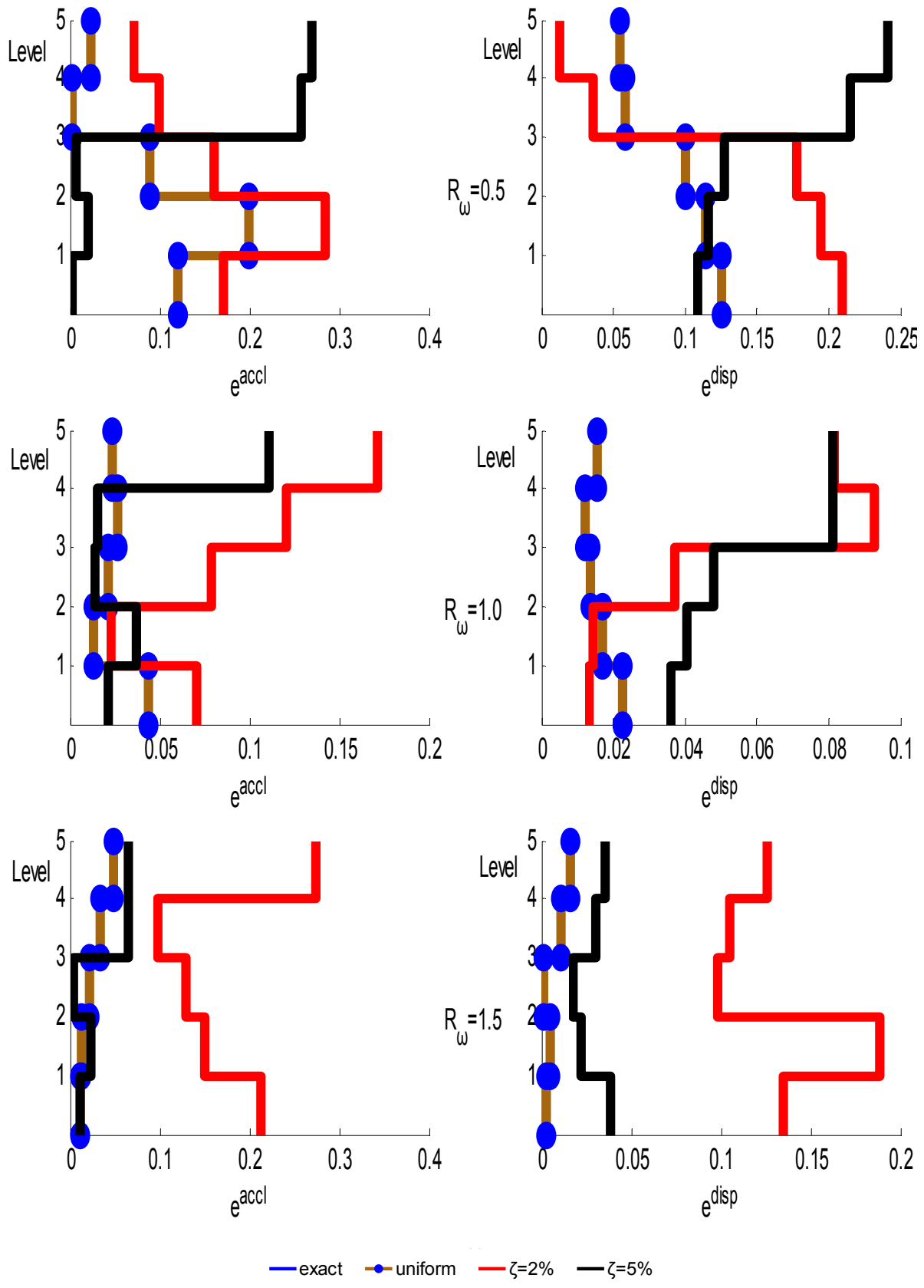
Εικ. 5.53: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.5



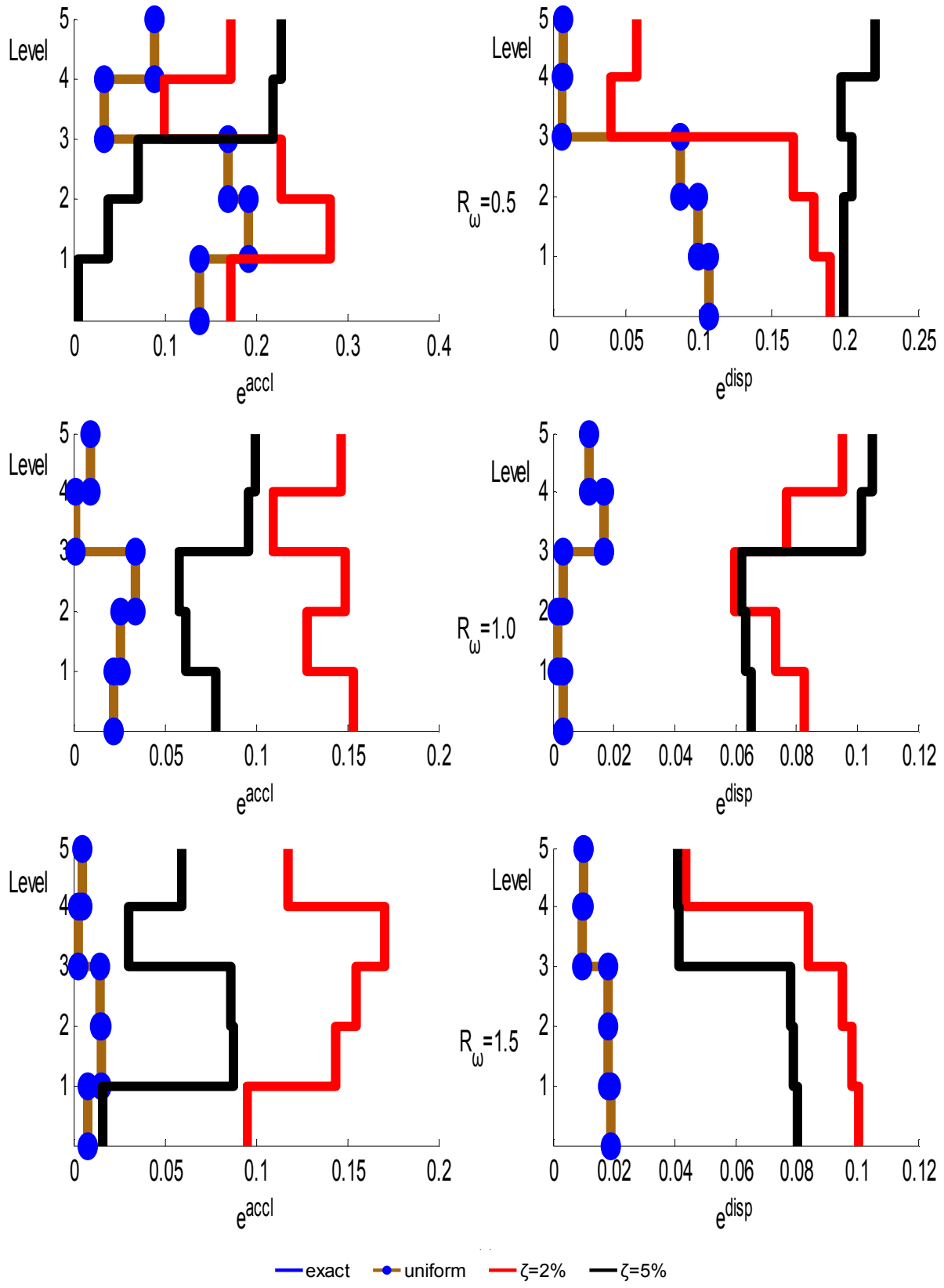
Εικ. 5.54: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.8



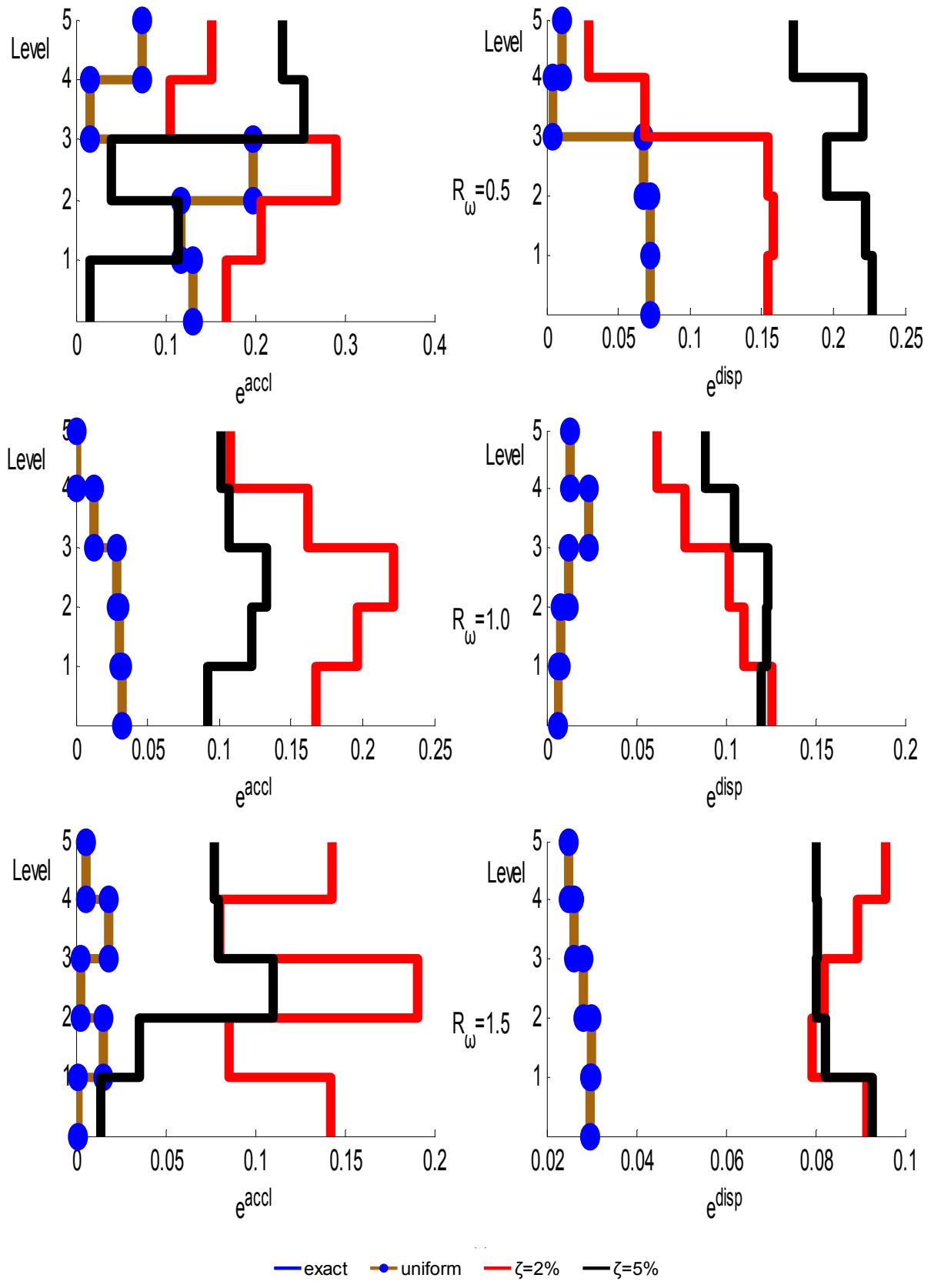
Εικ. 5.55: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=1



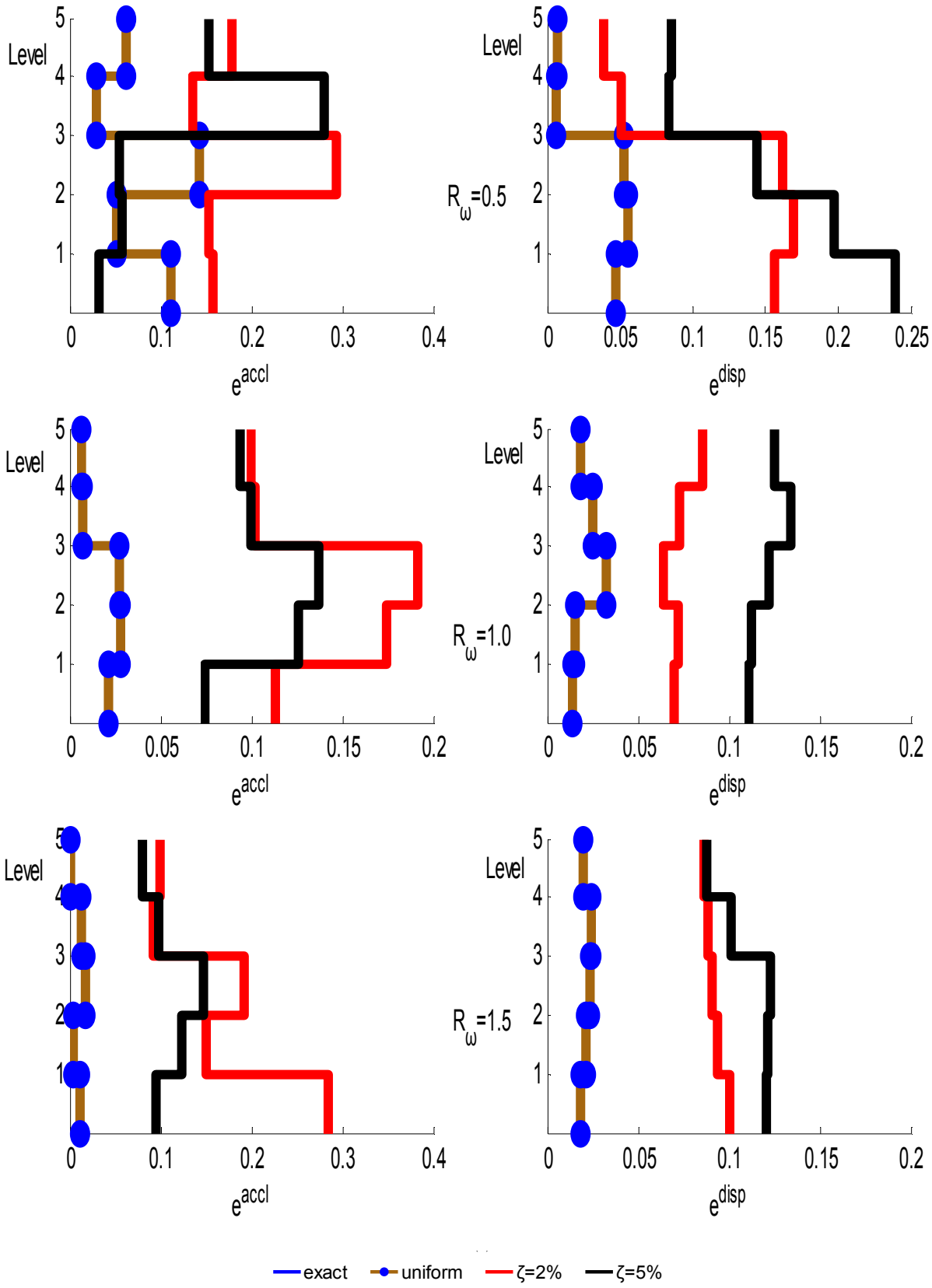
Εικ. 5.56: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.2



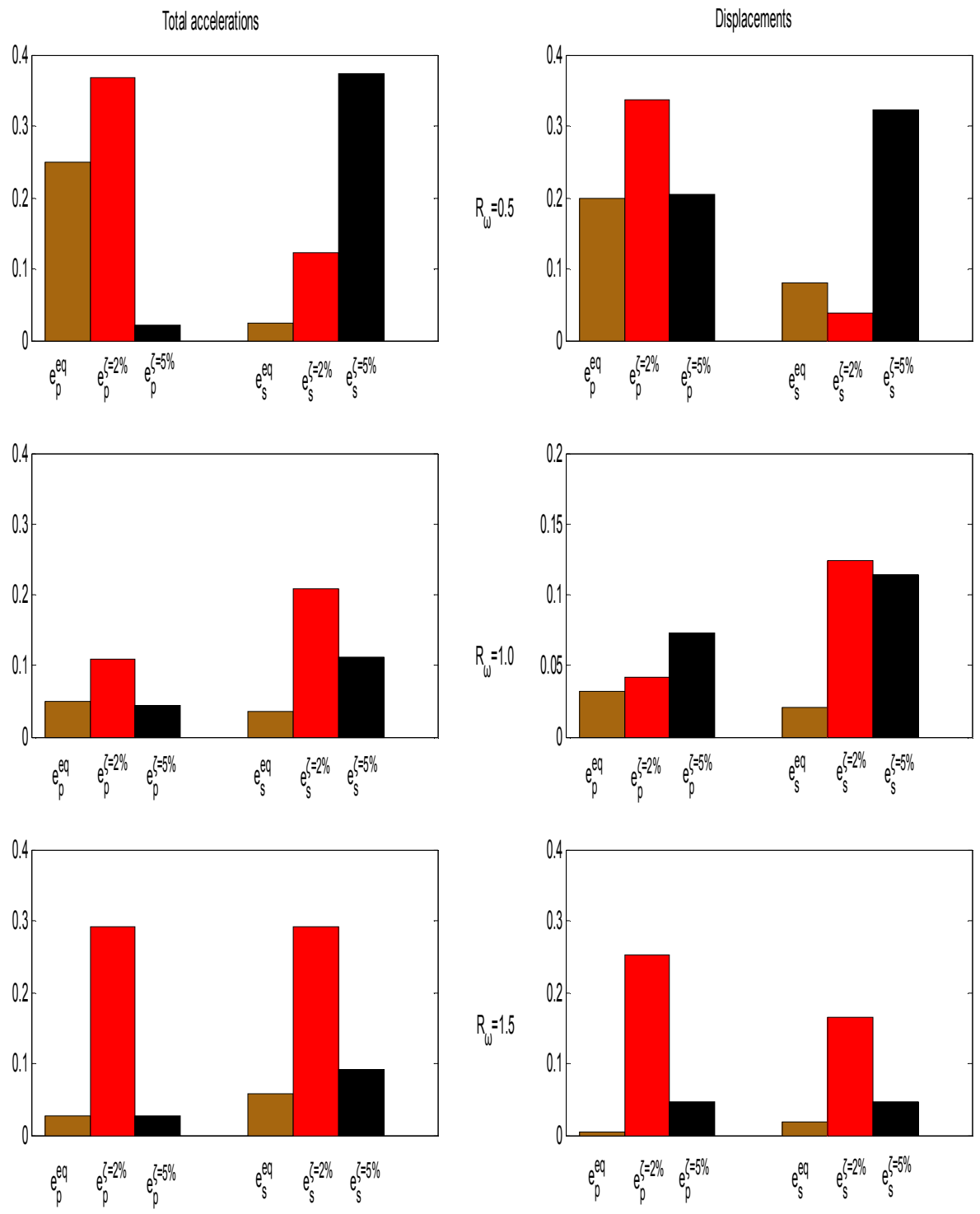
Εικ. 5.57: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.5



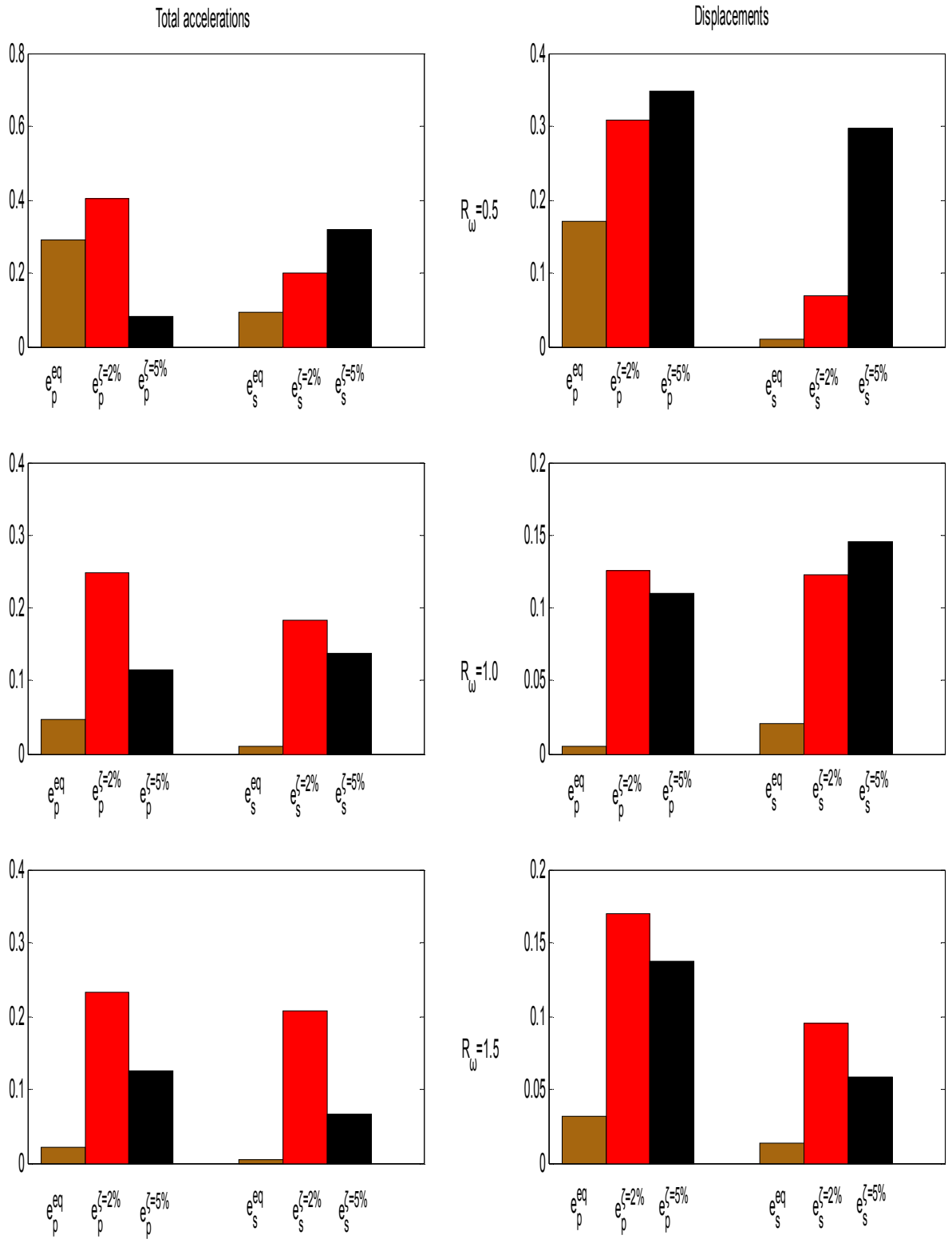
Εικ. 5.58: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.8



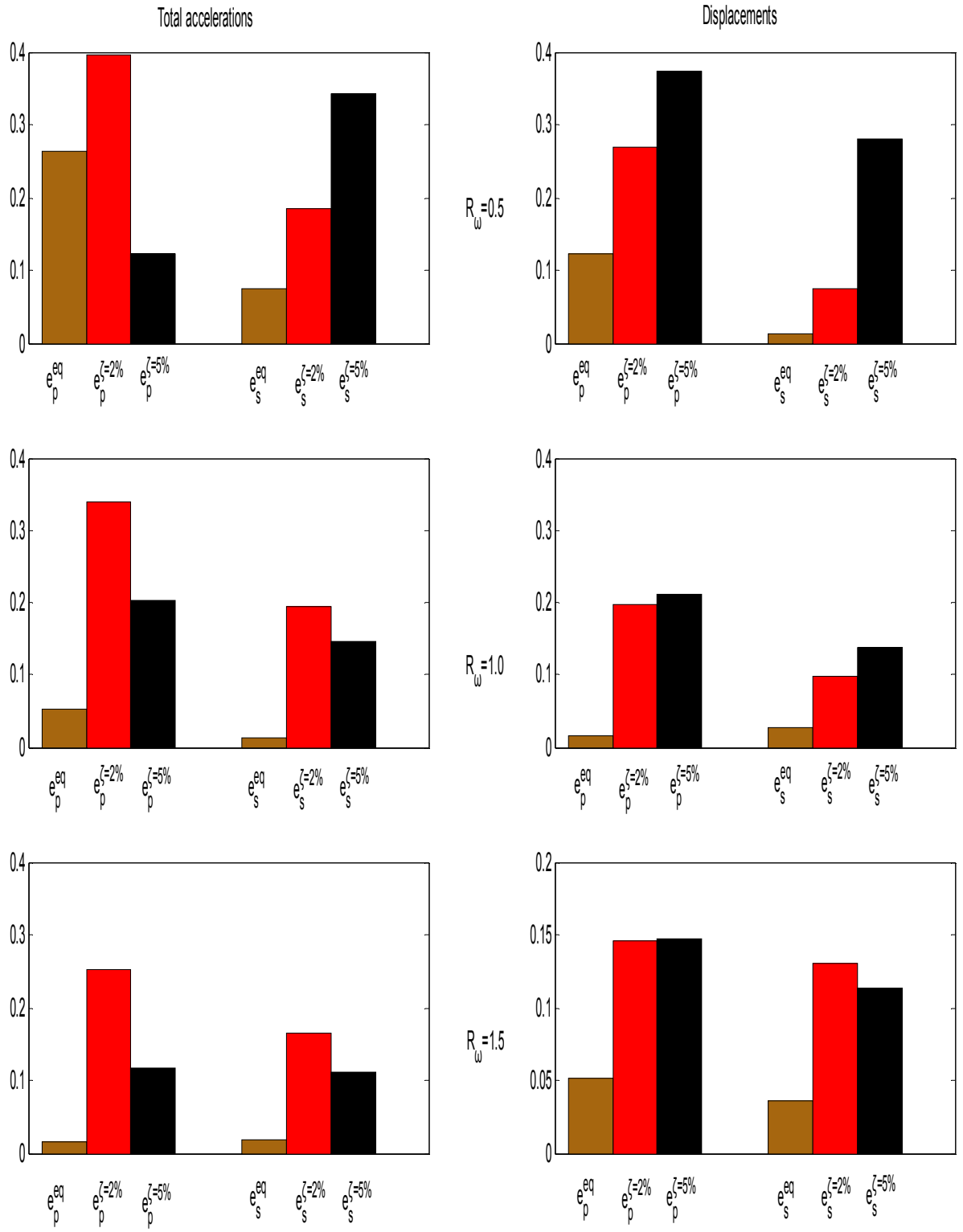
Εικ. 5.59: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=1



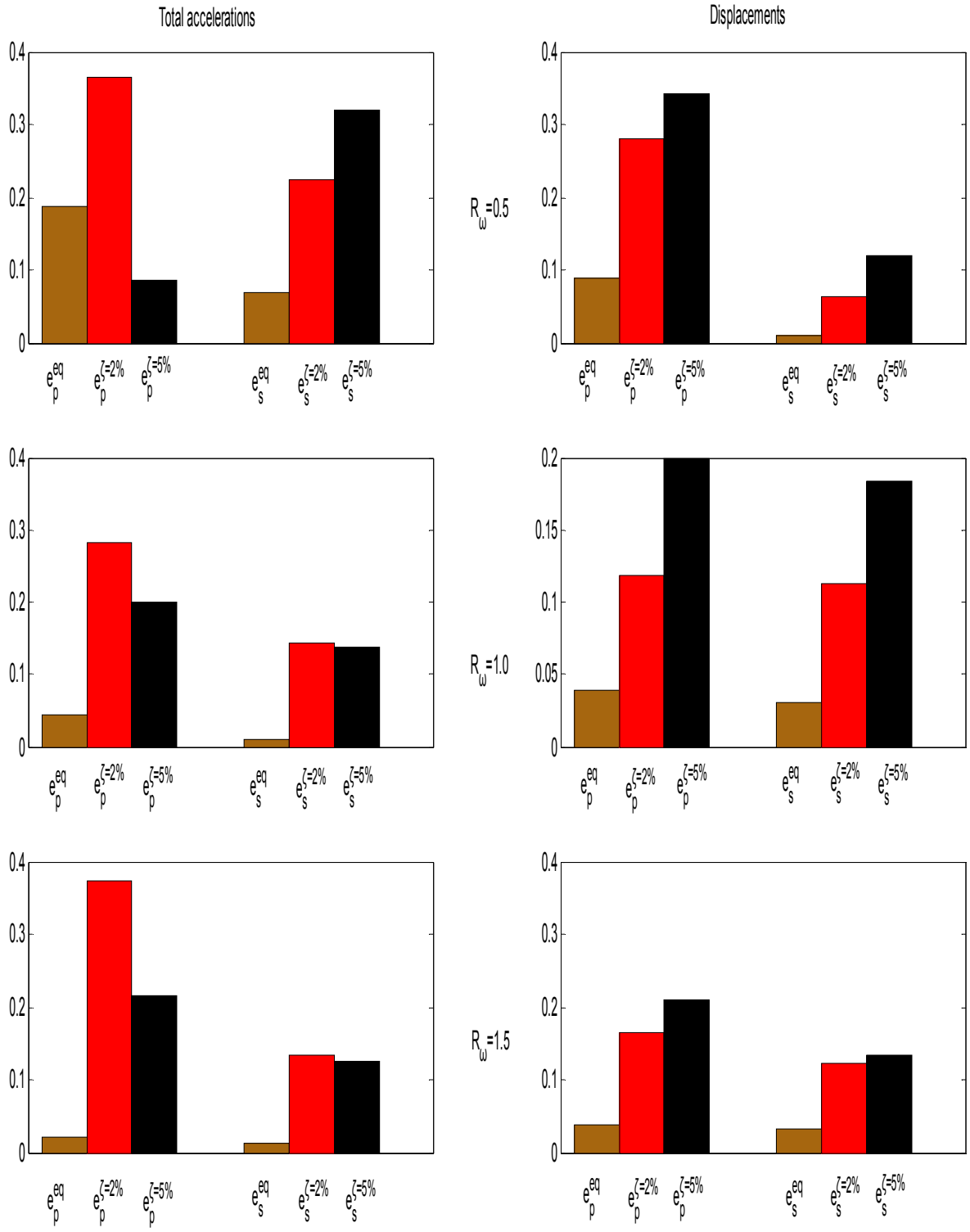
Εικ. 5.60: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.2



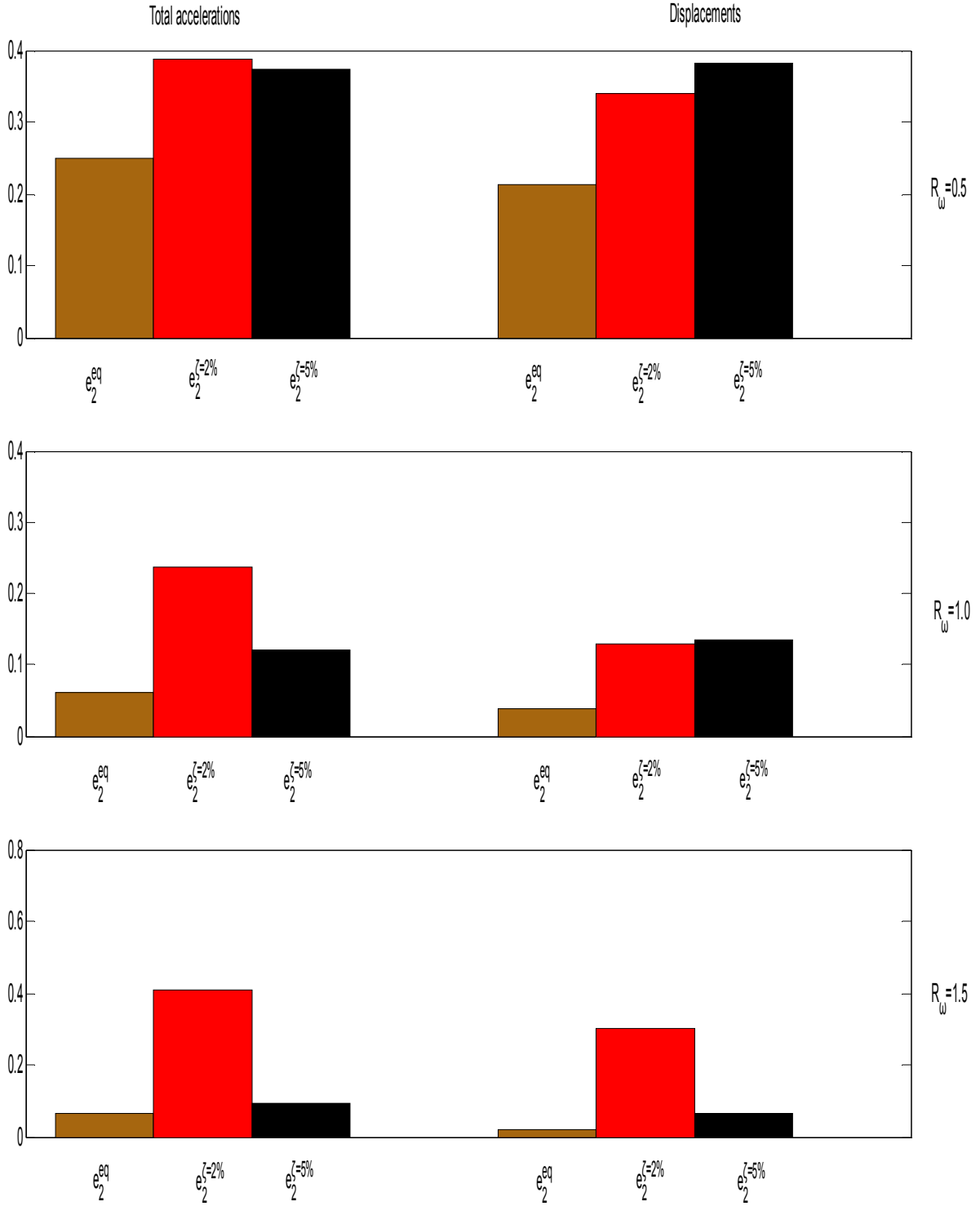
Εικ. 5.61: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.5



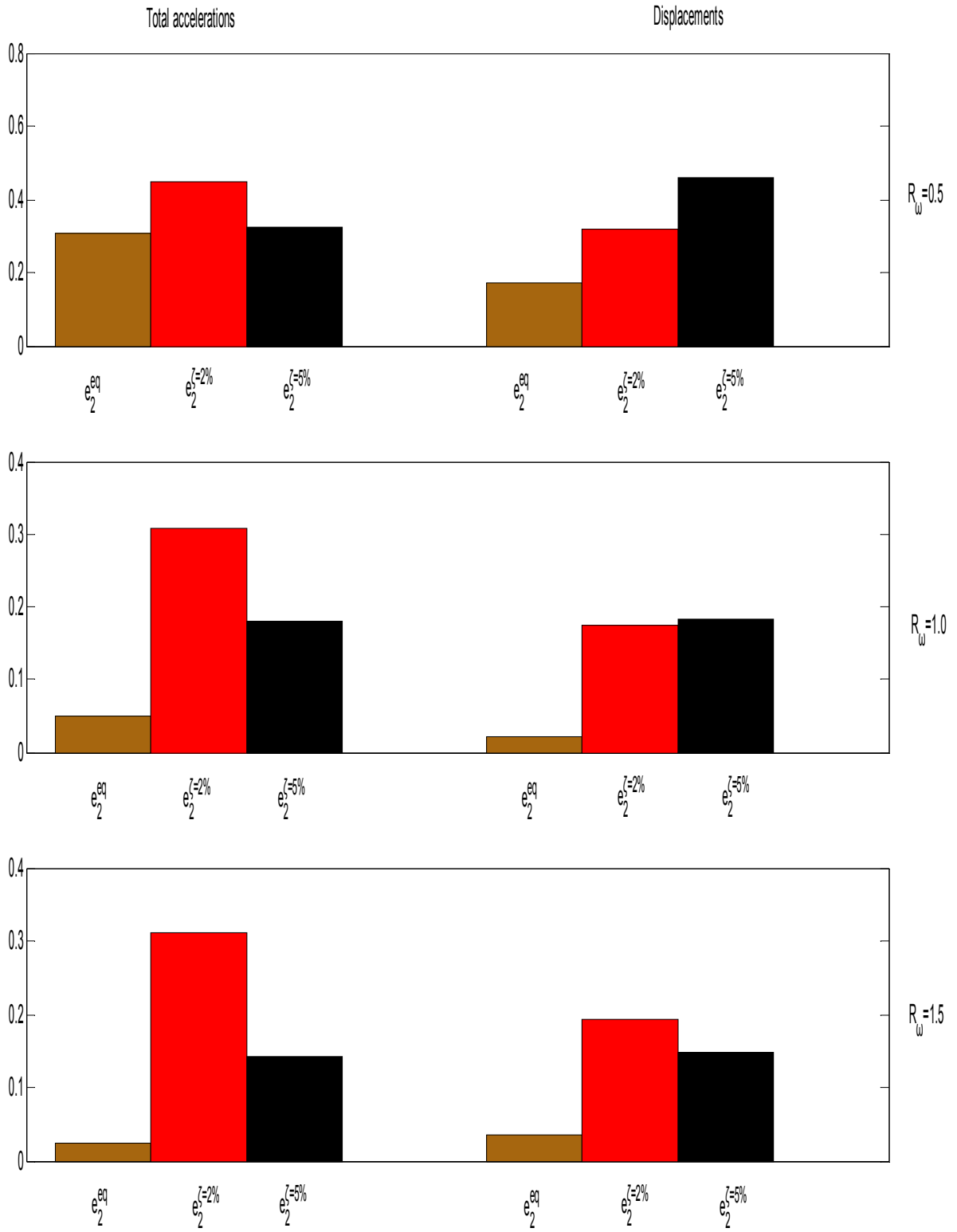
Εικ. 5.62: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.8



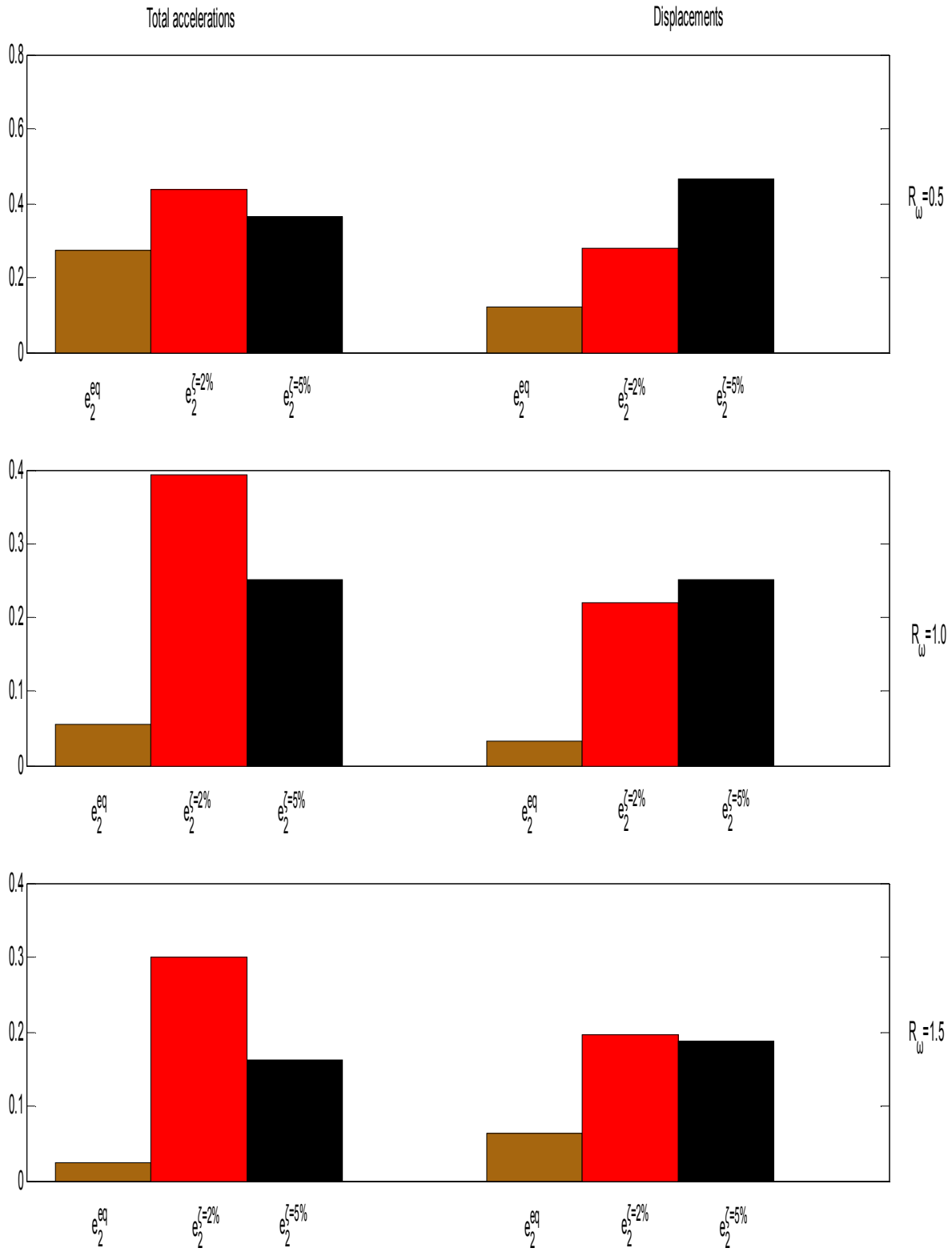
Εικ. 5.63: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=1



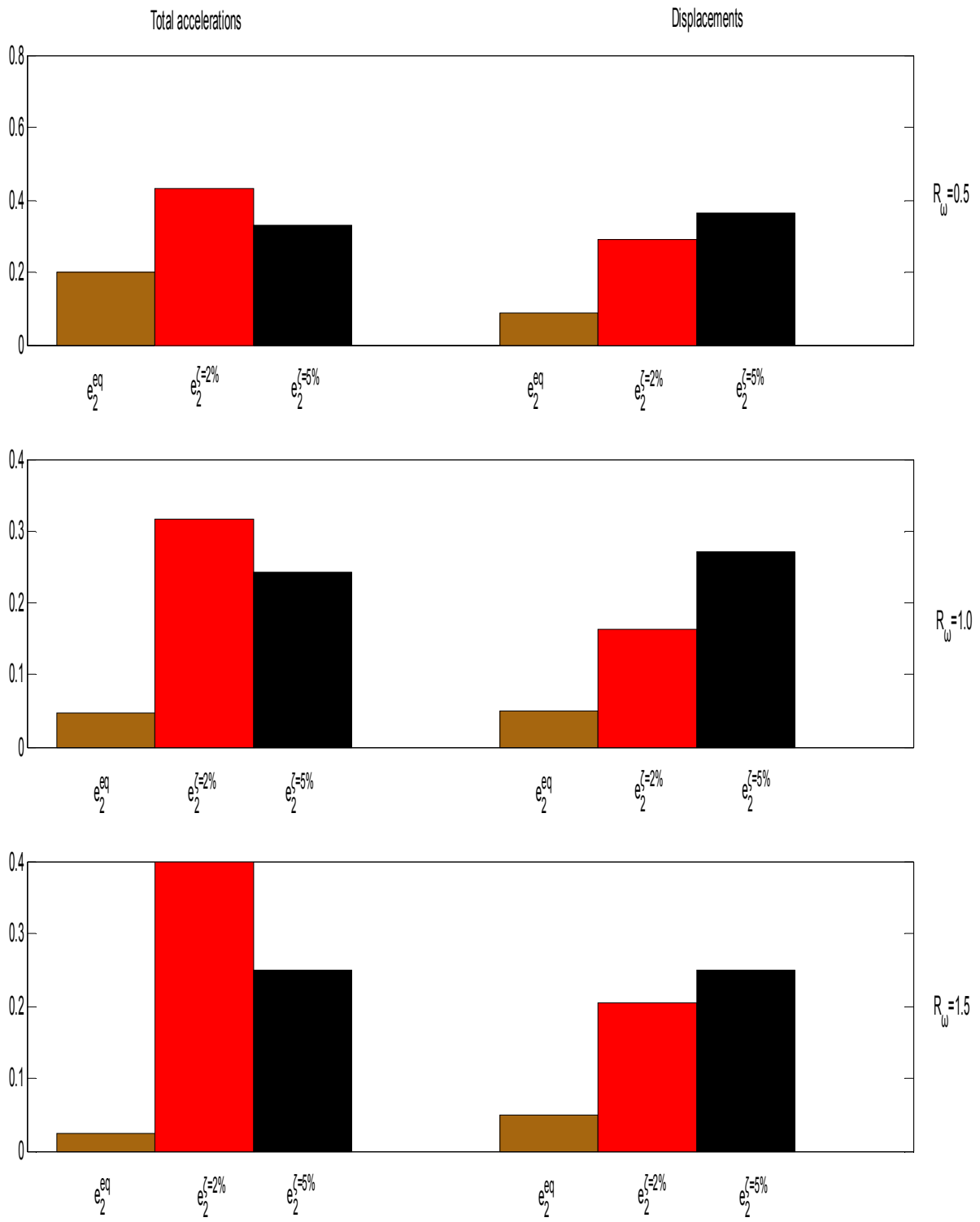
Εικ. 5.64: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.2



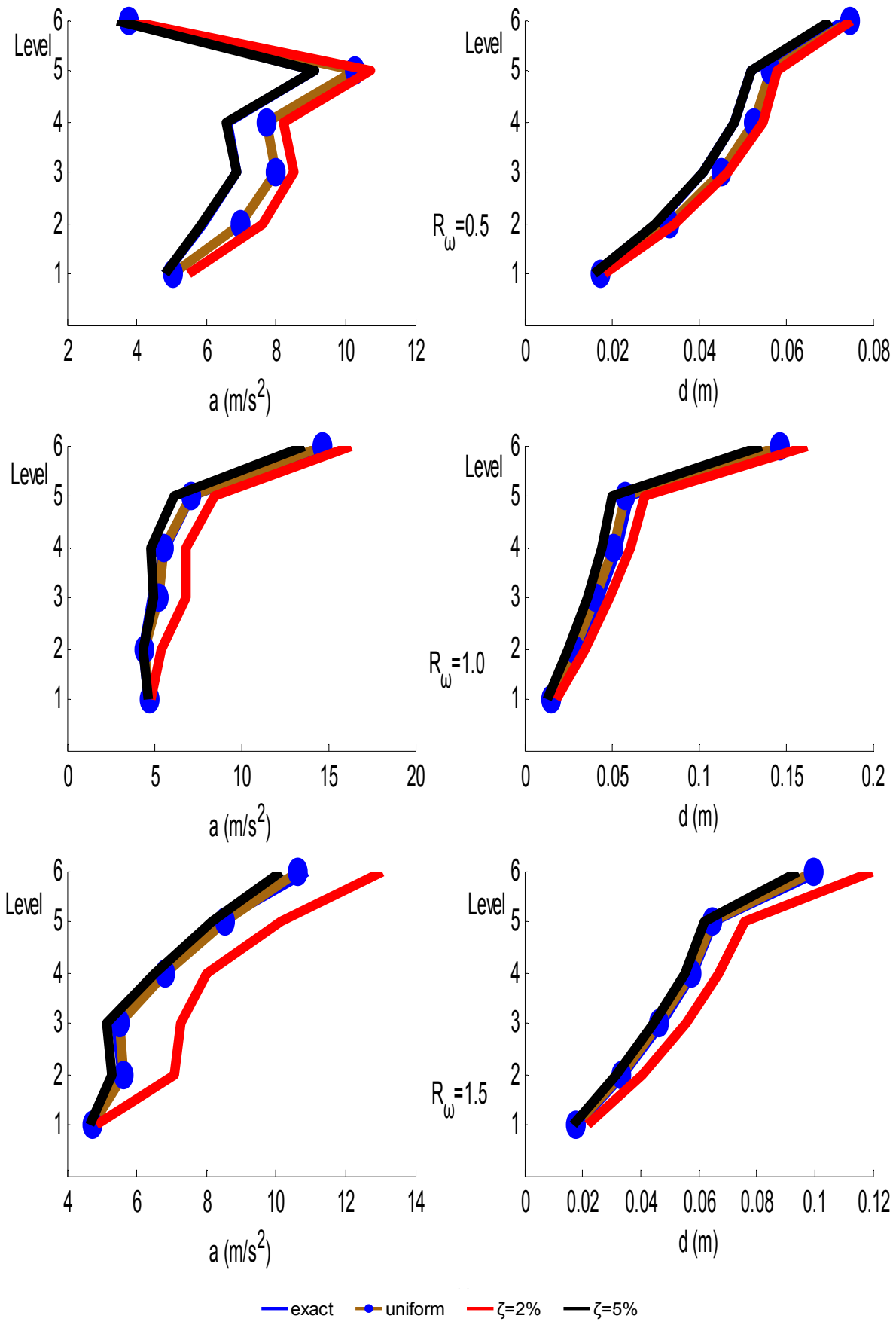
Εικ. 5.65: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.5



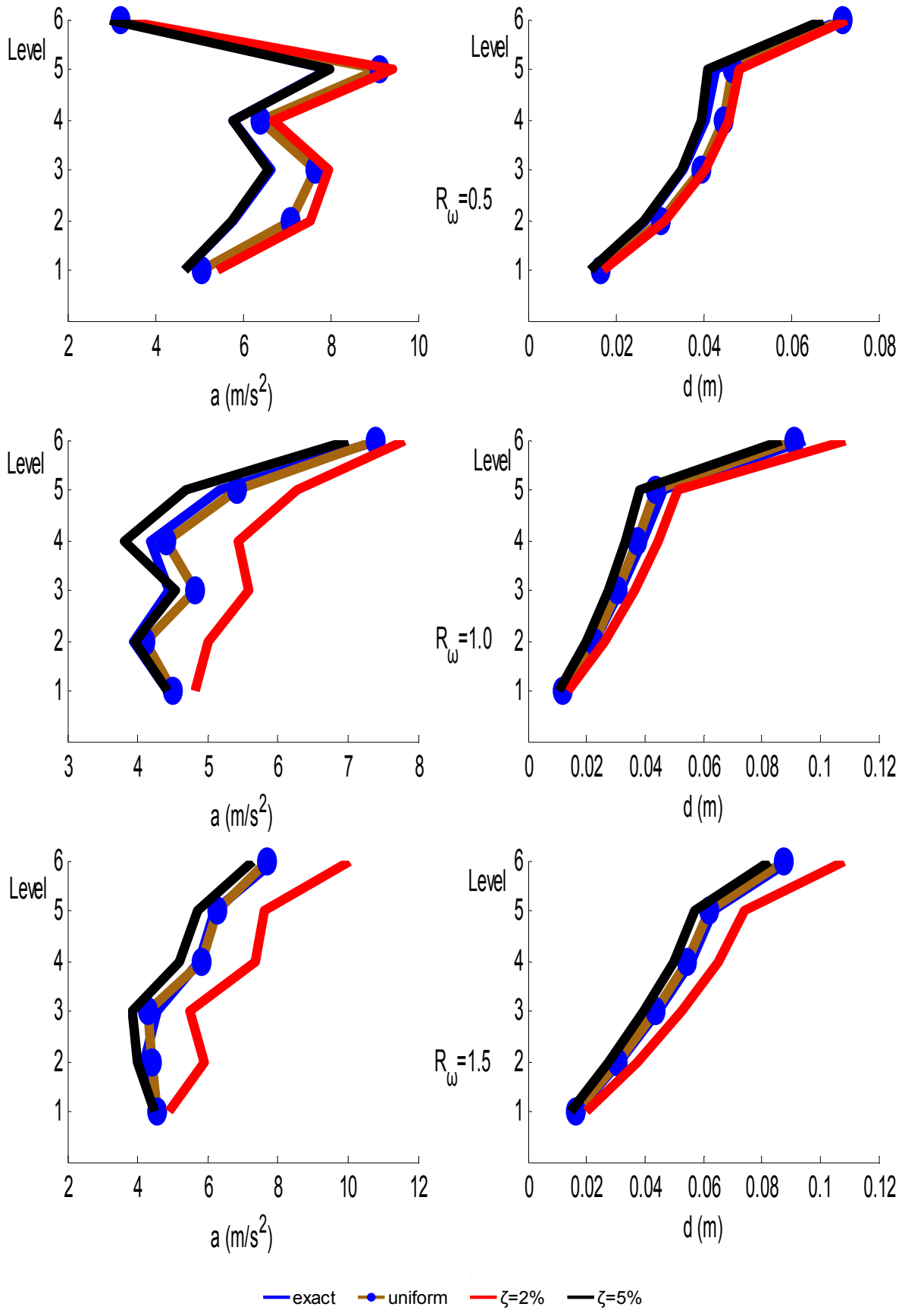
Εικ. 5.66: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.8



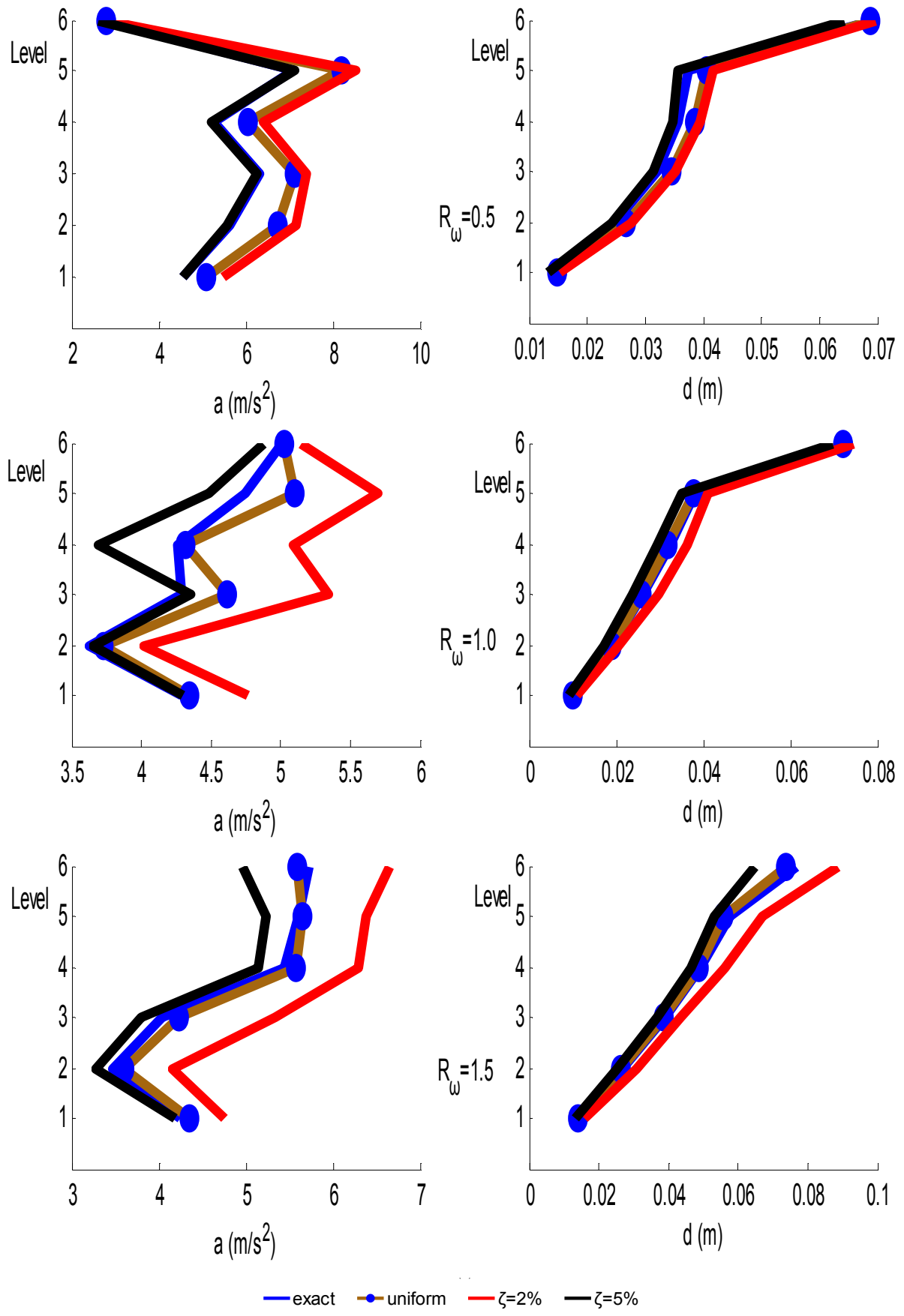
Εικ. 5.67: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=1



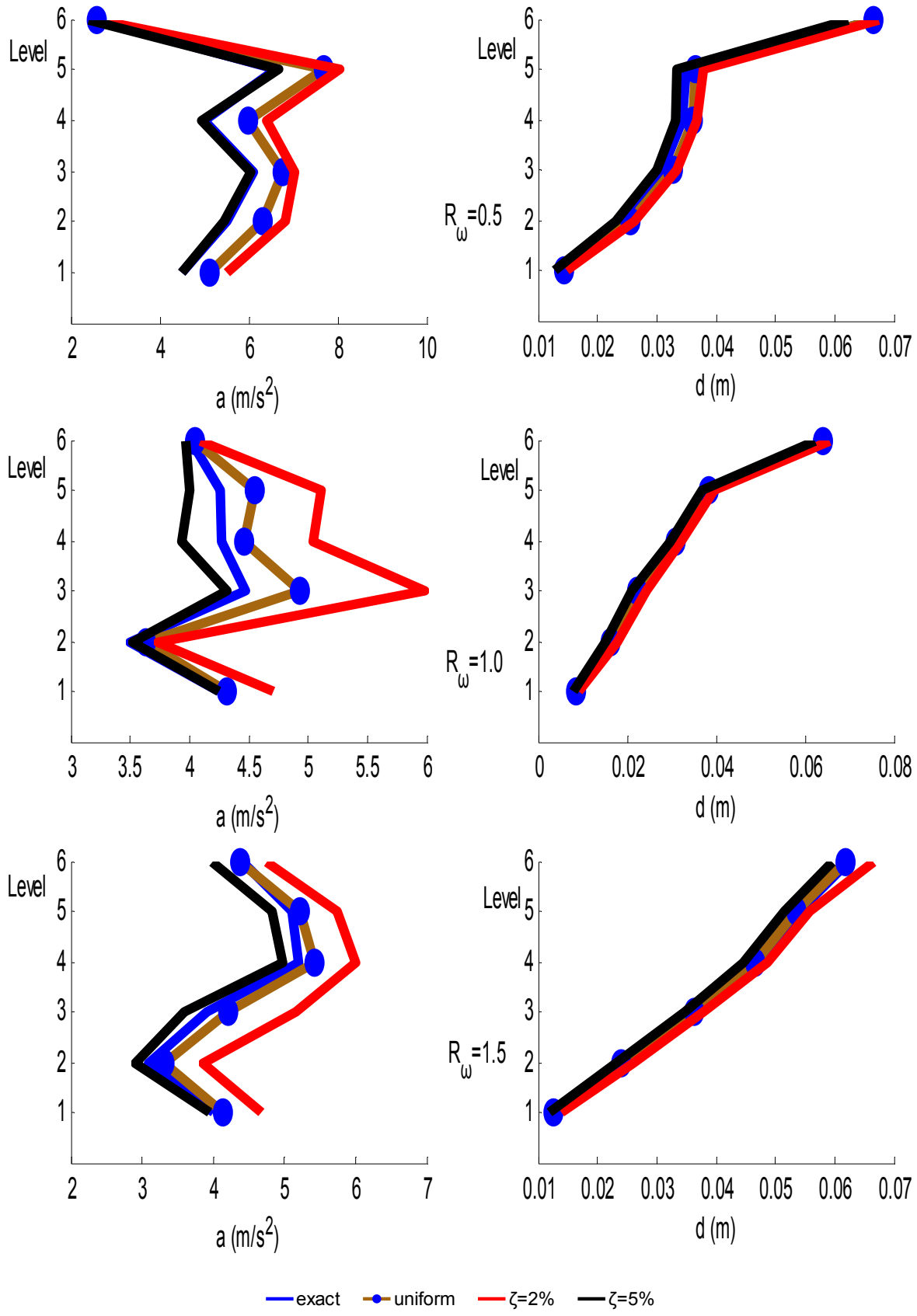
Εικ. 5.68: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.2



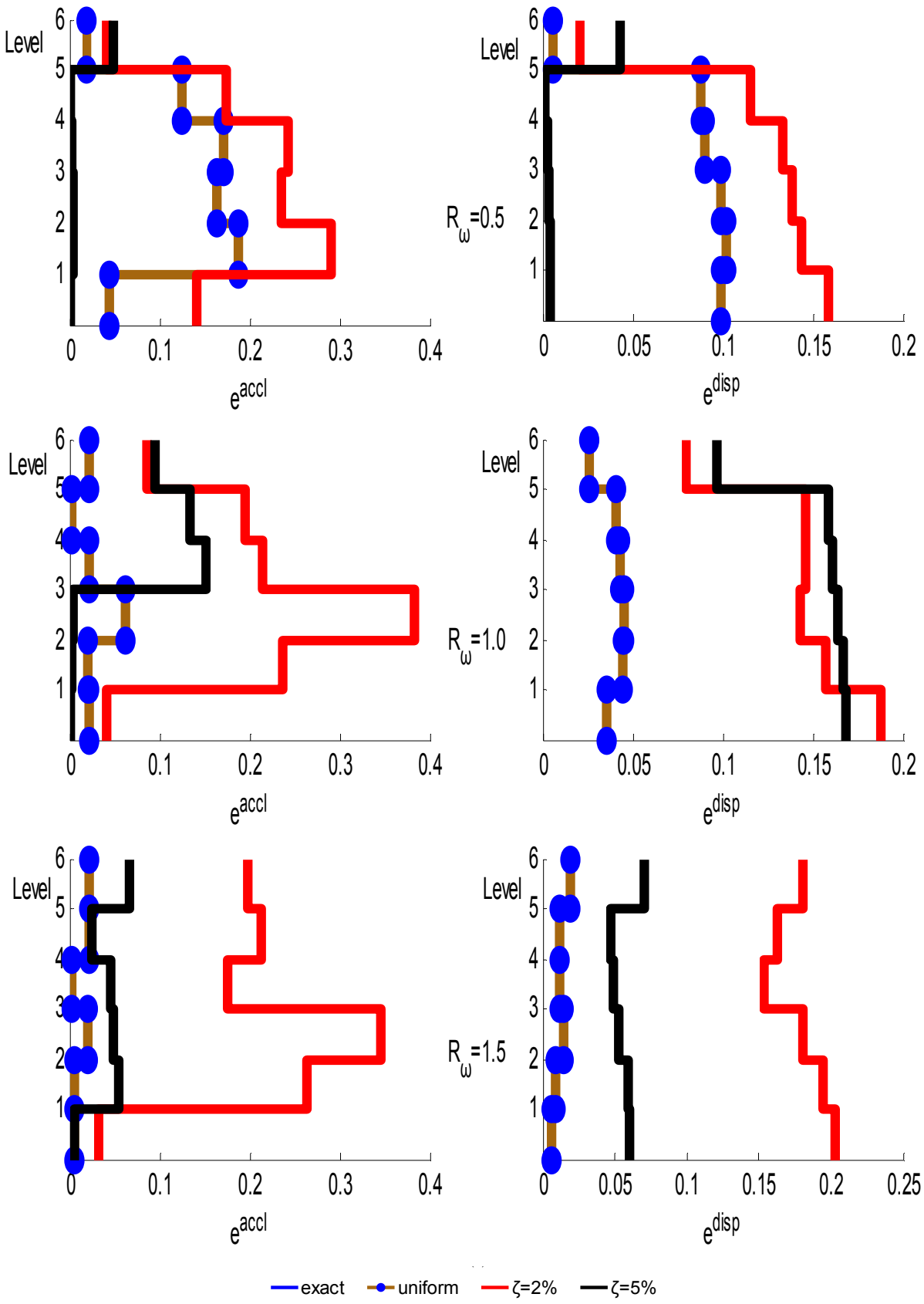
Εικ. 5.69: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.5



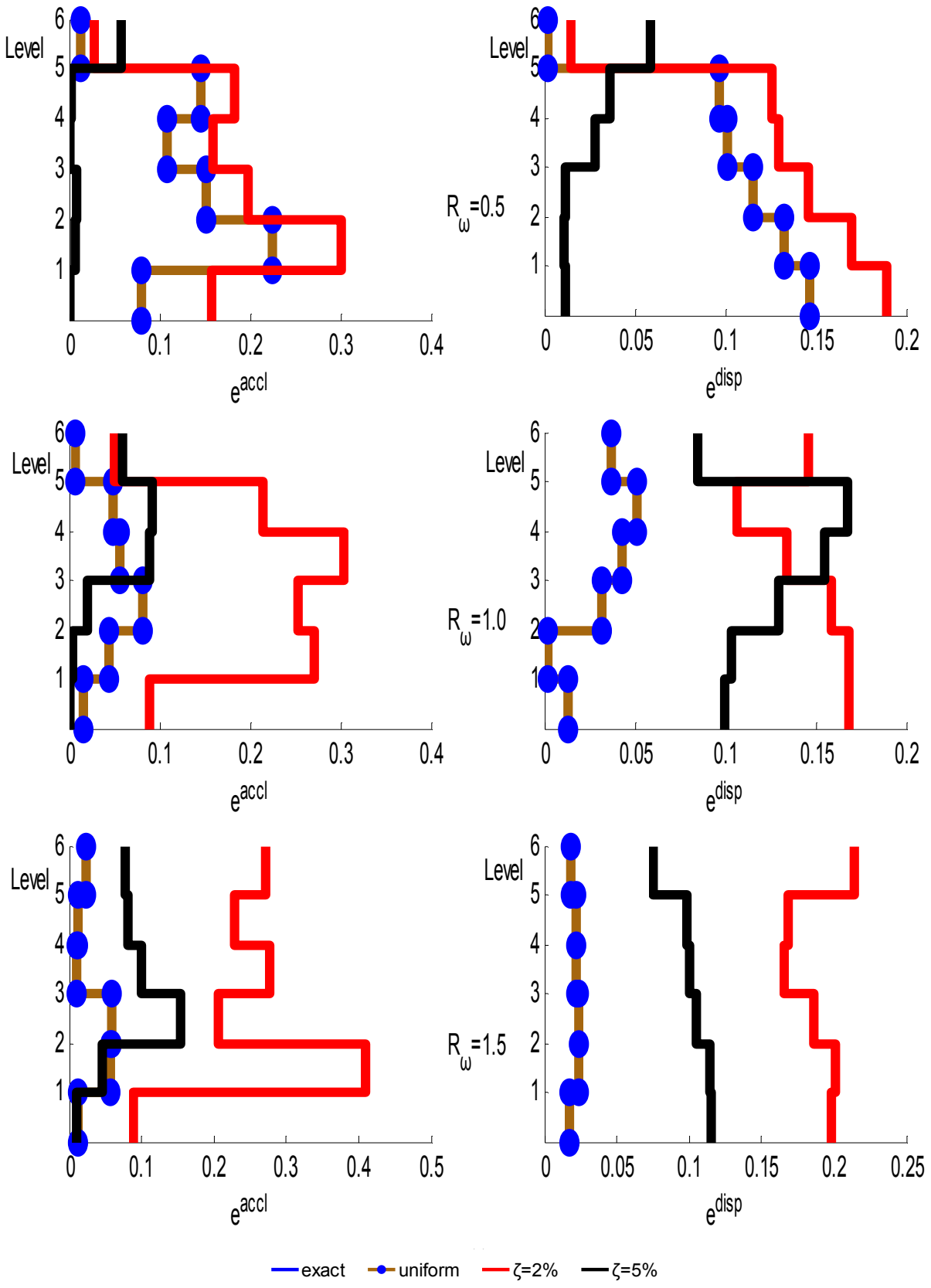
Εικ. 5.70: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.8



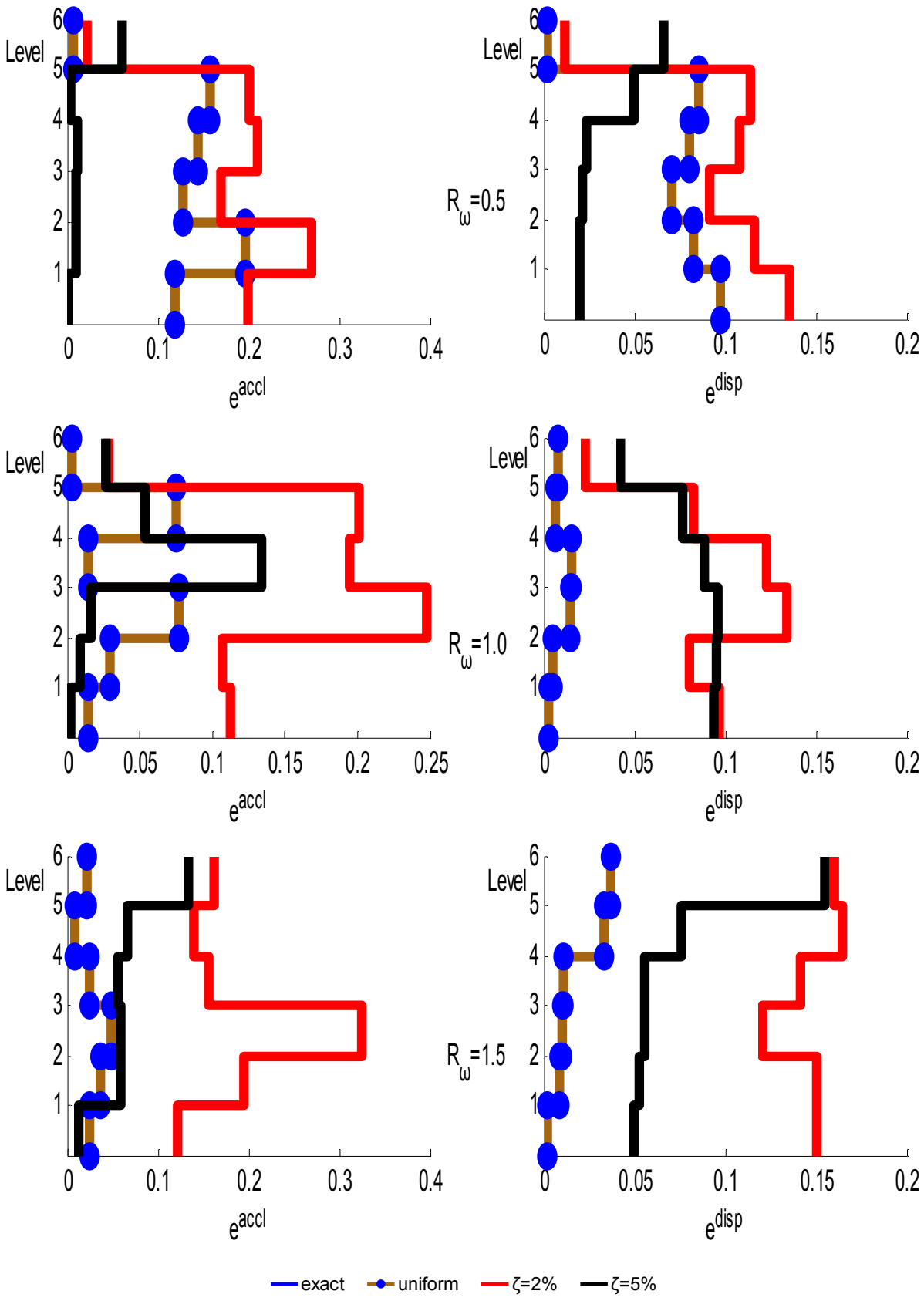
Εικ. 5.71: Προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=1



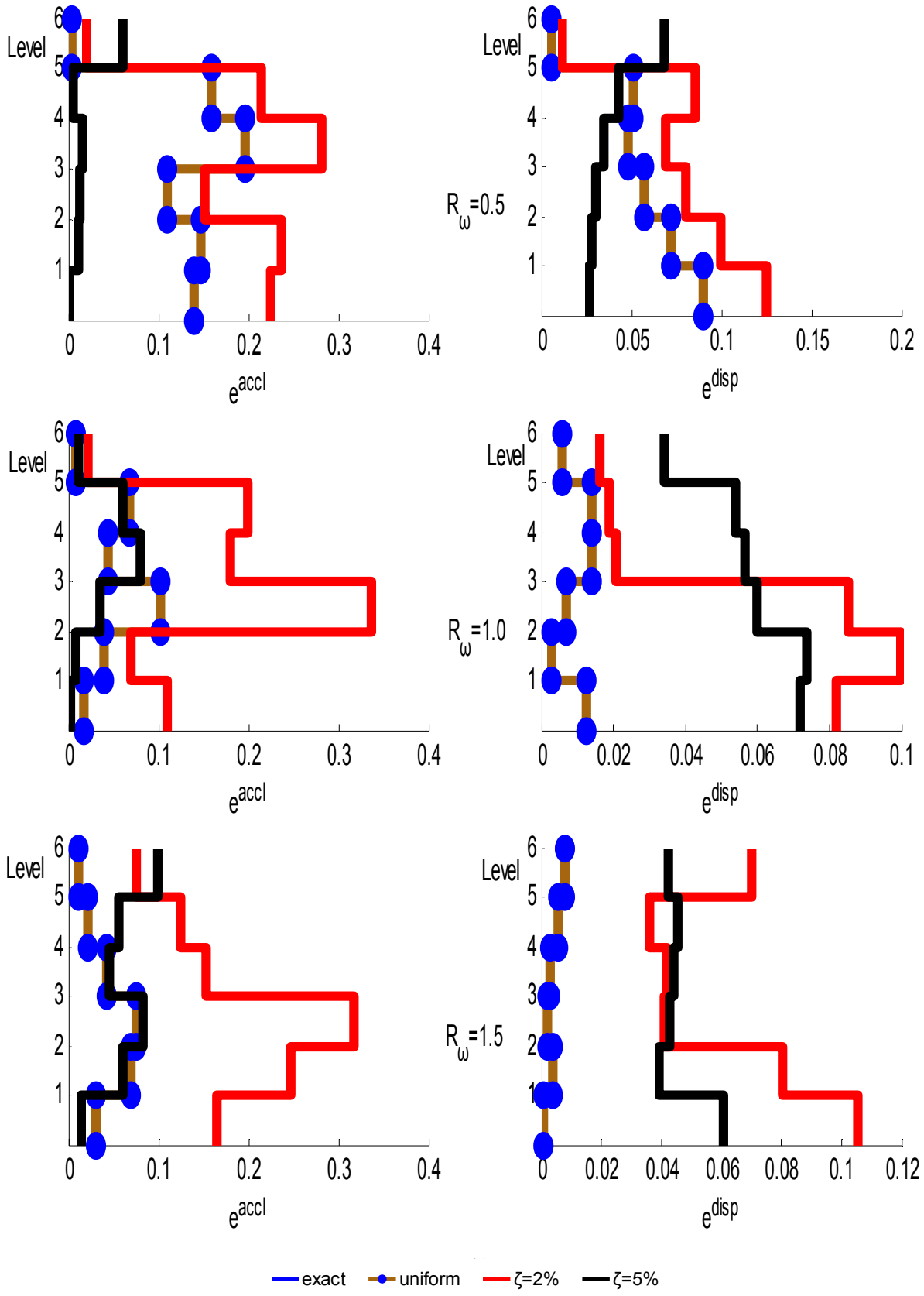
Εικ. 5.72: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.2



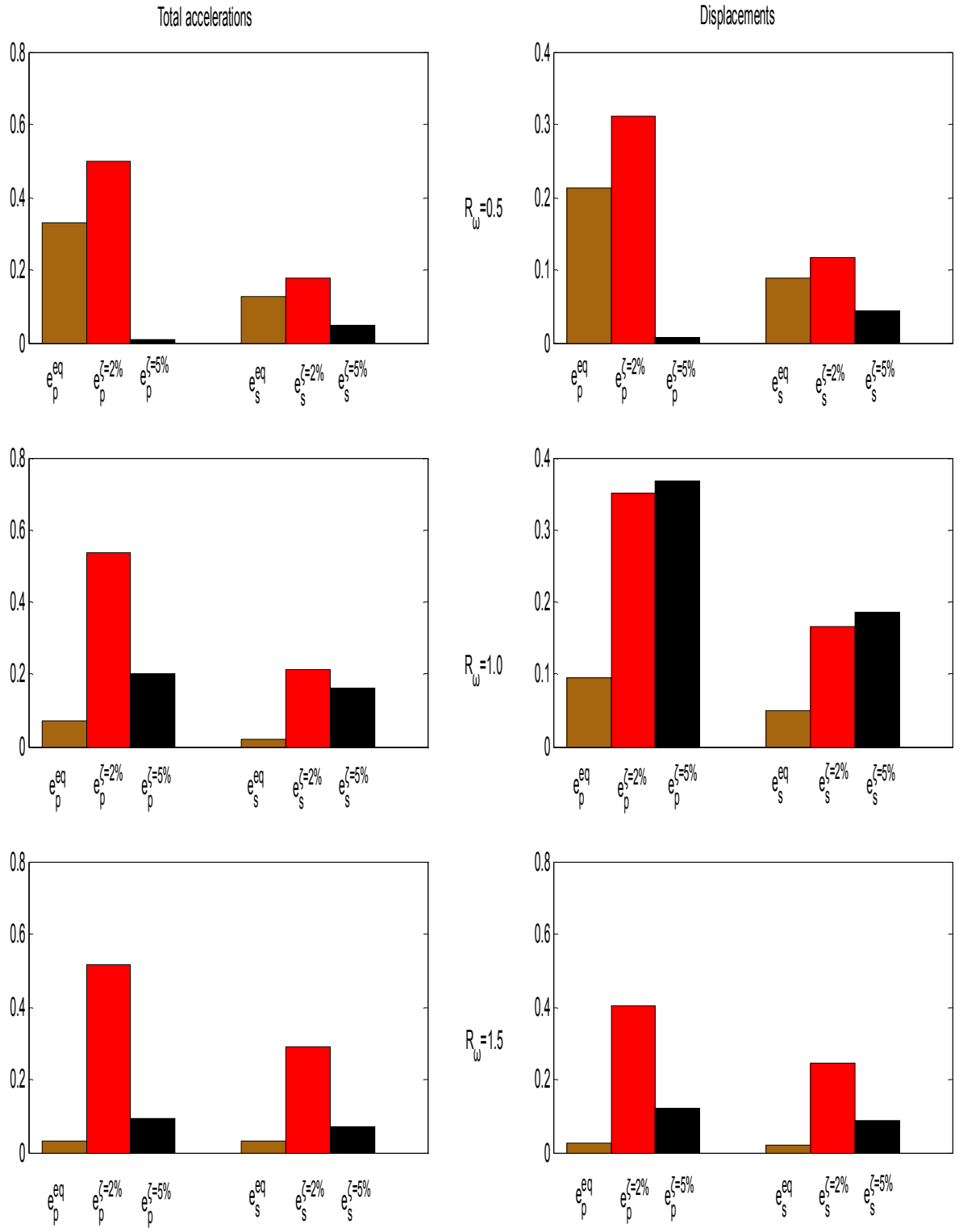
Εικ. 5.73: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.5



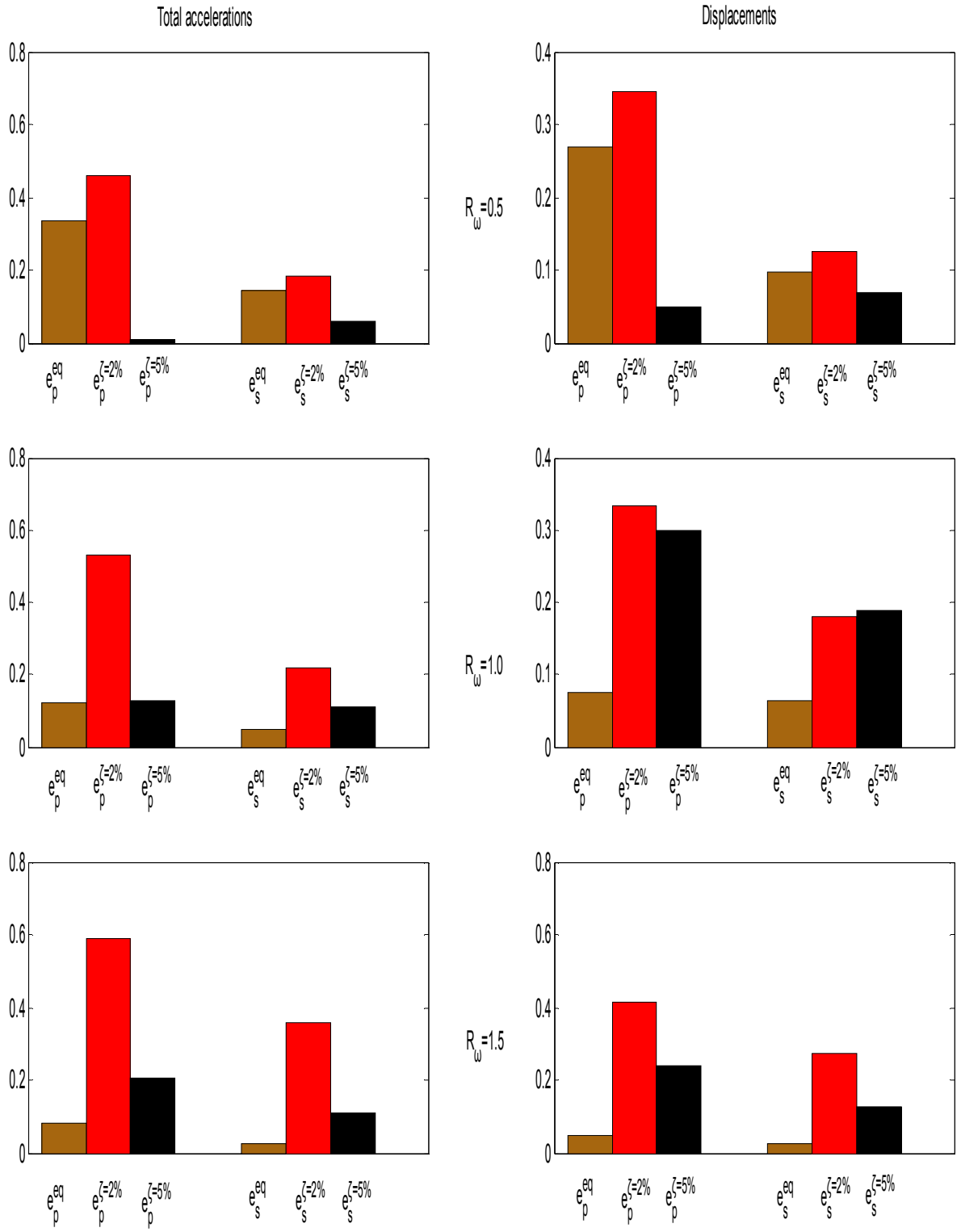
Εικ. 5.74: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.8



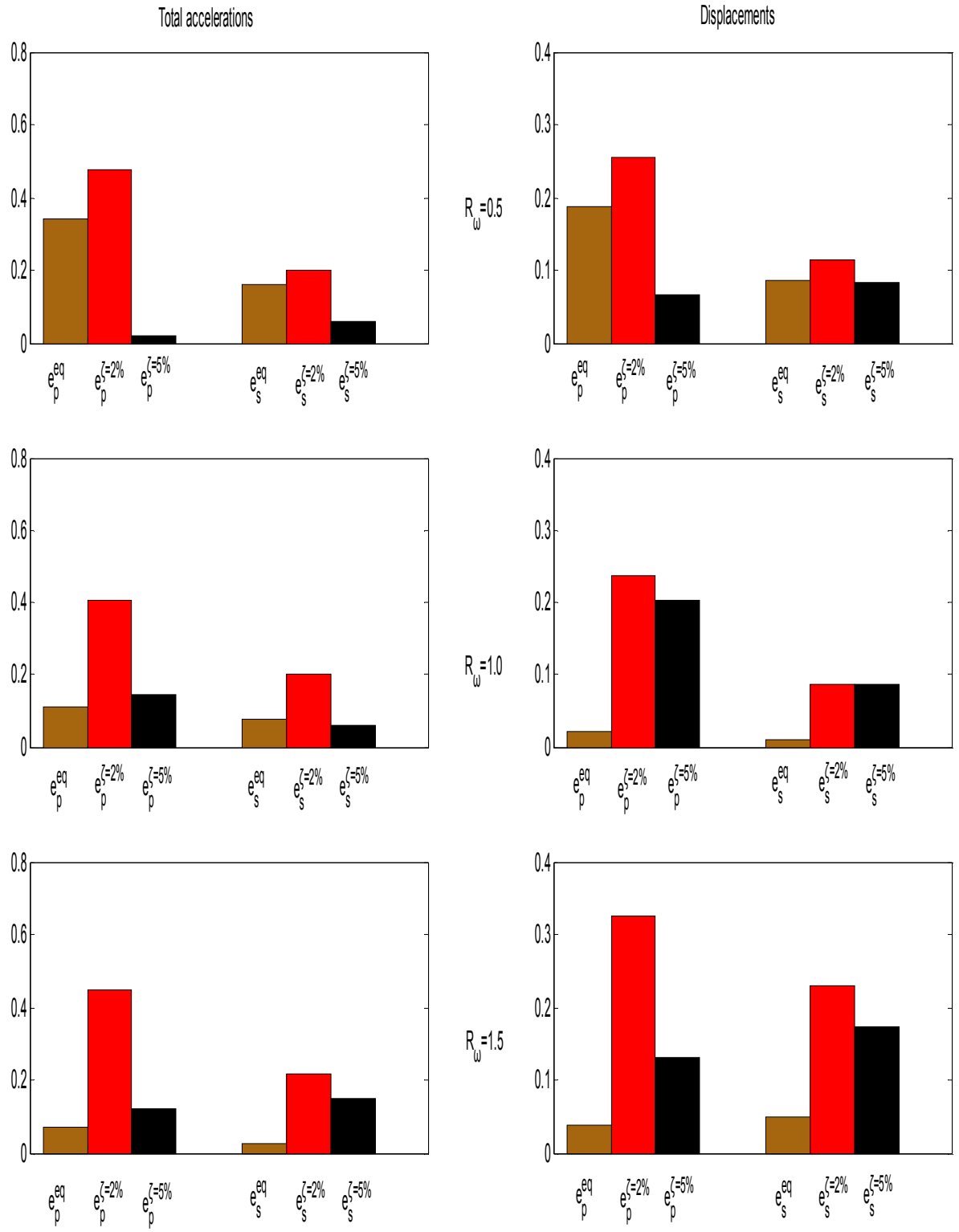
Εικ. 5.75: Προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=1



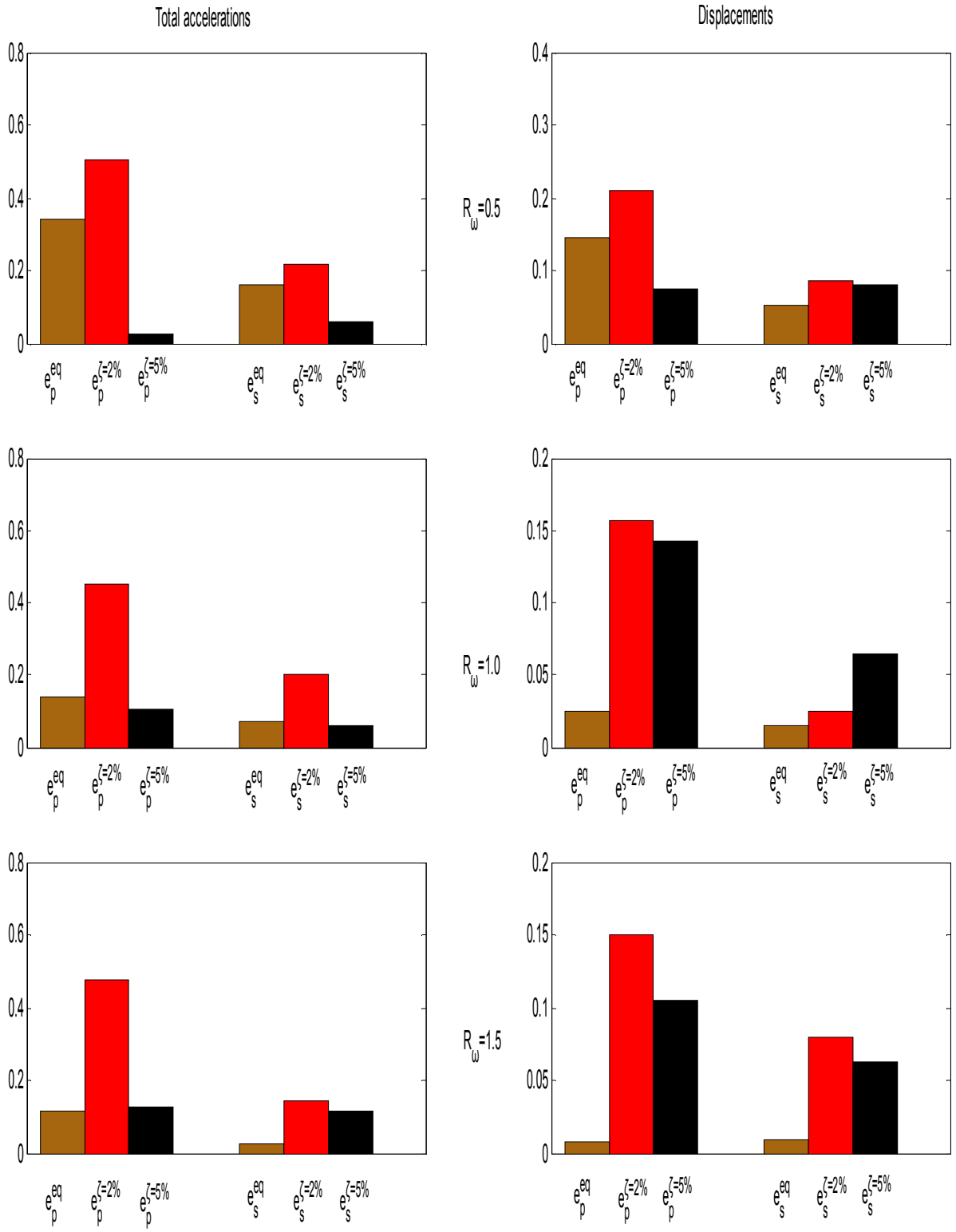
Εικ. 5.76: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.2



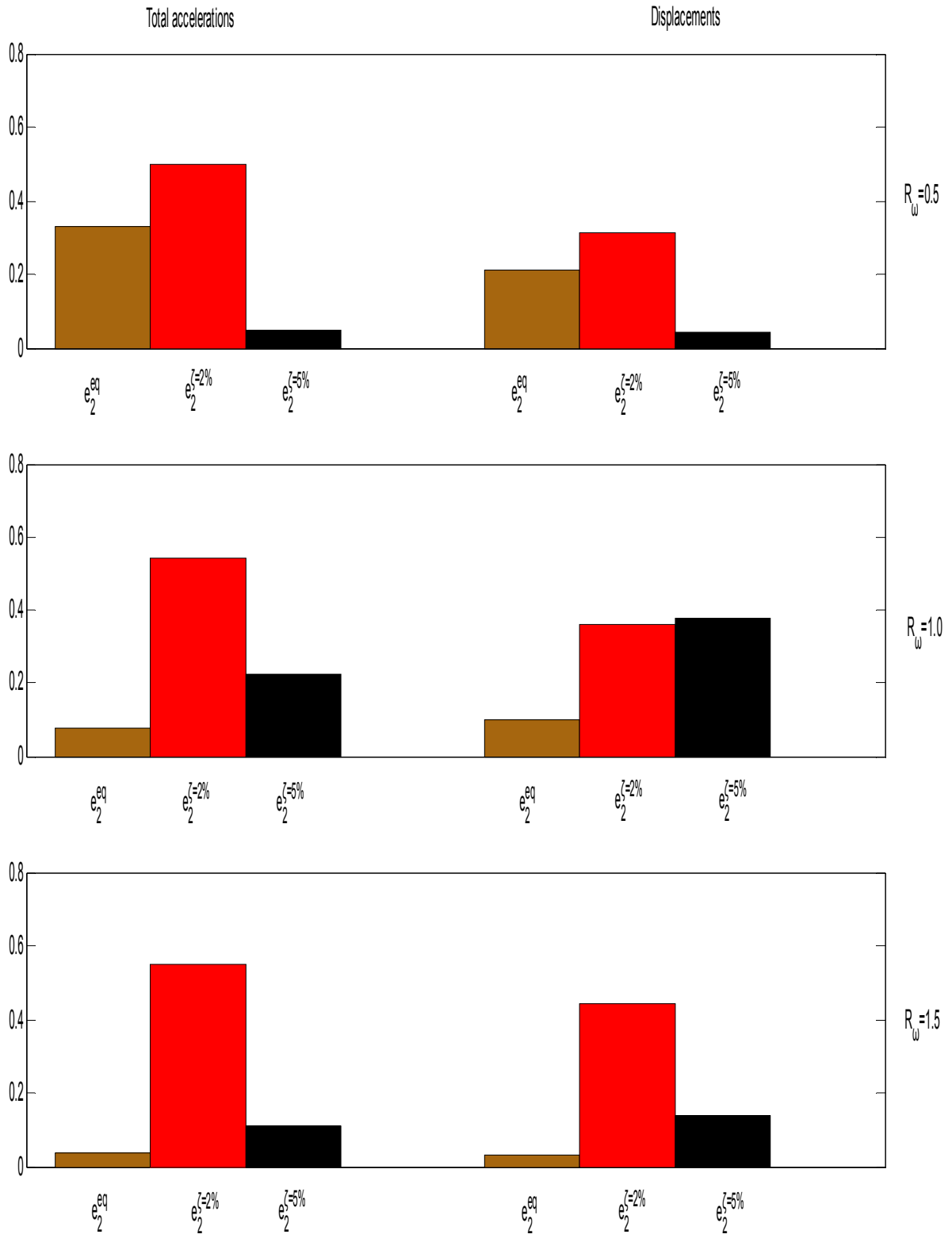
Εικ. 5.77: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.5



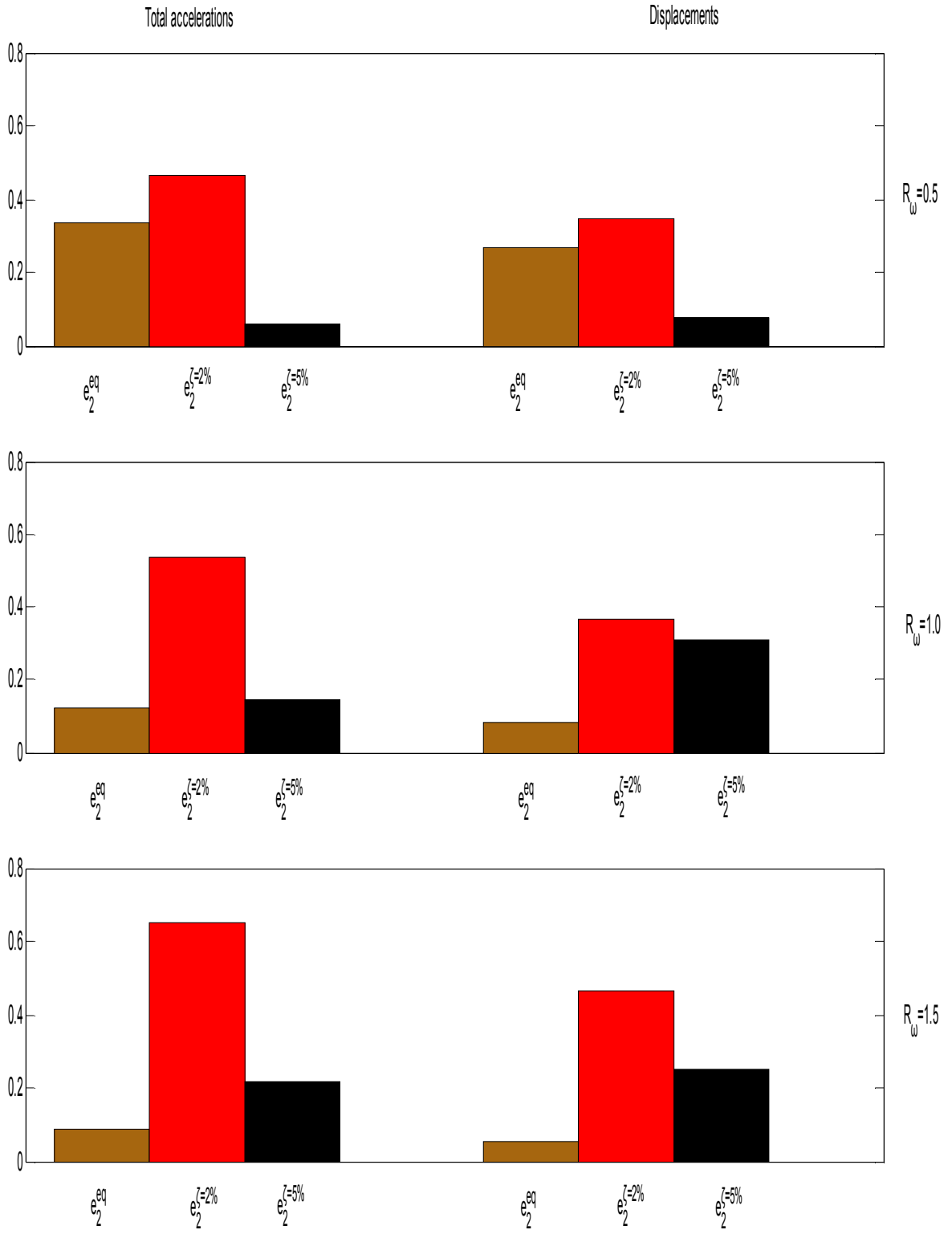
Εικ. 5.78: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=0.8



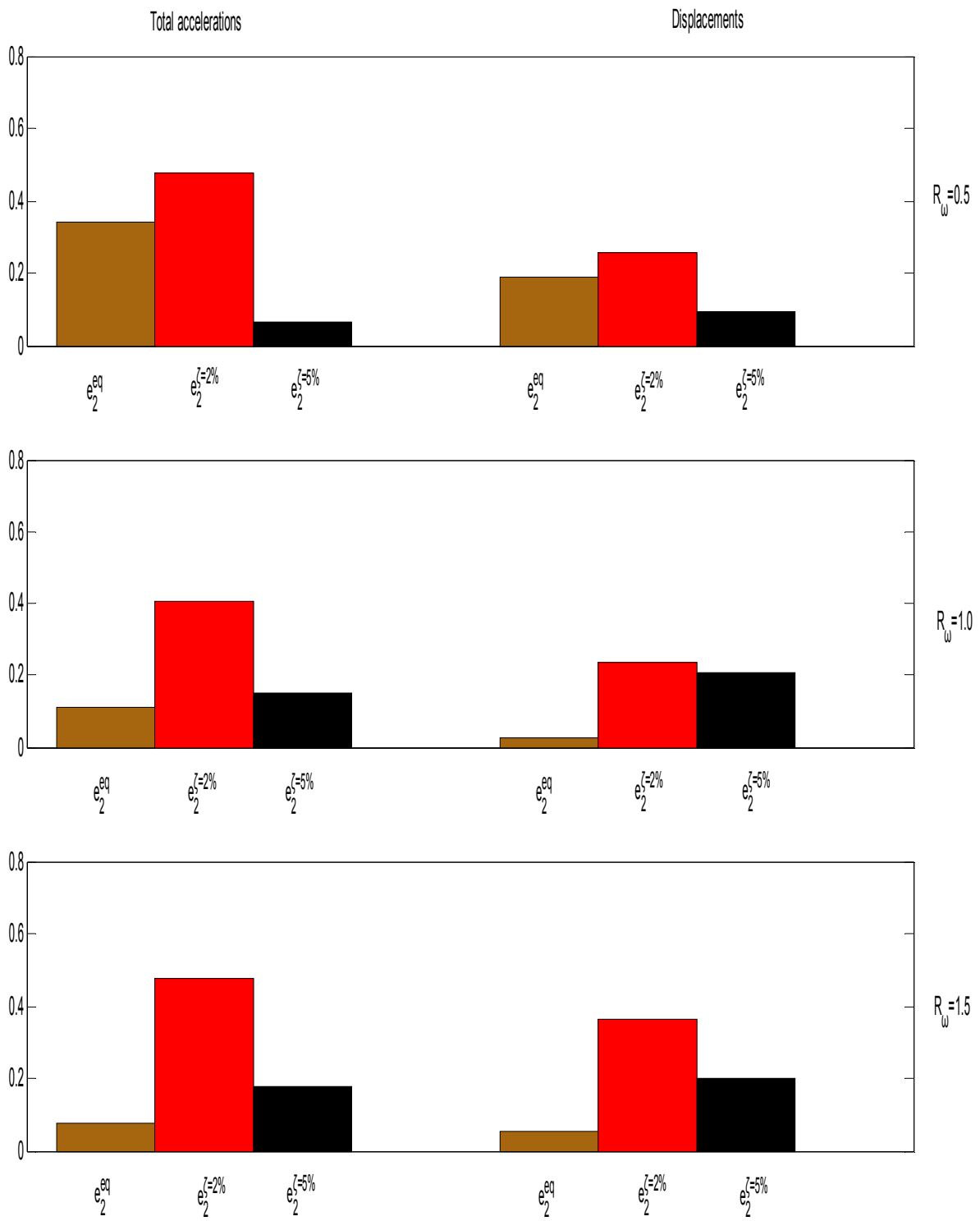
Εικ. 5.79: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών στο κάθε τμήμα της κατασκευής για R_m=1



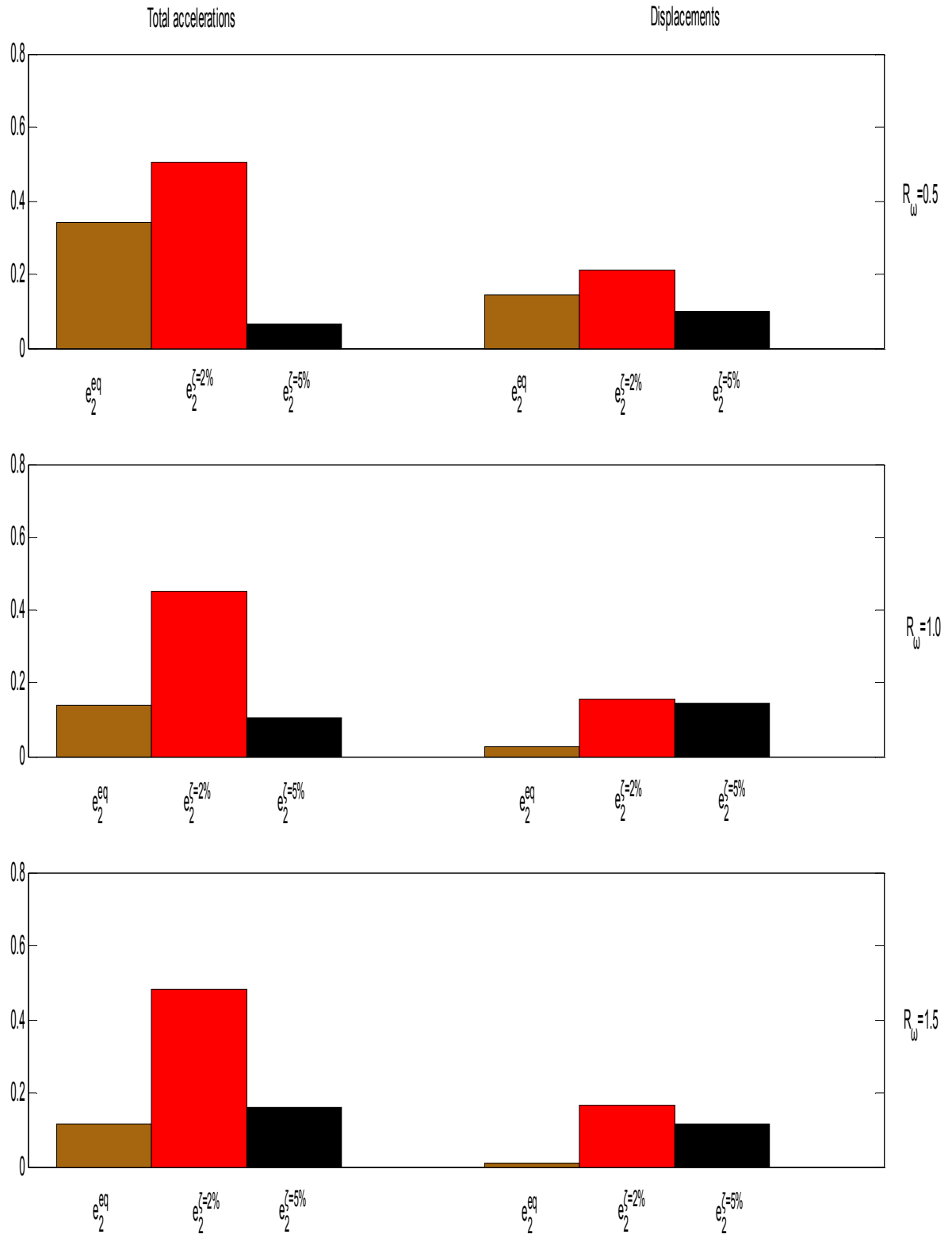
Εικ. 5.80: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.2



Εικ. 5.81: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.5



Εικ. 5.82: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=0.8



Εικ. 5.83: Νόρμες σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών σε ολόκληρη την κατασκευή για R_m=1

Τα προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων που προκύπτουν από τις αναλύσεις των πολυβάθμιων πλαισίων με το συνδυασμό των ισοδύναμων ενιαίων συντελεστών απόσβεσης είναι πολύ κοντά σε αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση με την ορθή κατανομή της απόσβεσης. Αντίστοιχα, τα σφάλματα που προκύπτουν από τη χρήση των συντελεστών αυτών είναι πολύ μικρά, και σε πολλές περιπτώσεις σχεδόν μηδενικά. Μάλιστα, τα σφάλματα αυτά είναι σε επίπεδα συστηματικά μικρότερα από αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση με ενιαίο συντελεστή 2%, και εν πάση περιπτώσει είναι μέσα στα περιθώρια σφάλματος μιας ανάλυσης πολυβάθμιας κτιριακής κατασκευής.

Τα σφάλματα που προκύπτουν από τις ισοδύναμες αναλύσεις, είναι σχεδόν πάντα μικρότερα σε σύγκριση με αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση με τον ενιαίο συντελεστή 2%. Επίσης, με λίγες εξαιρέσεις είναι μικρότερα και από αυτά της ανάλυσης με ενιαίο συντελεστή 5%, περίπτωση που δεν εφαρμόζεται στην πράξη αφού είναι μη συντηρητική, αλλά αναλύεται απλά και μόνο για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά των πλαισίων με ακραία τιμή της απόσβεσης. Ο λόγος είναι ότι η τελική απόκριση του φορέα προκύπτει από το συνδυασμό δύο φορτίσεων, μία η οποία έχει στόχο την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων στο υπόβαθρο και μία η οποία καταλήγει σε ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων στην υπερκατασκευή. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να προκύψουν δύο διαφορετικές βέλτιστες επιμέρους προσεγγίσεις, οι οποίες συνδυαζόμενες δίνουν συνολική απόκριση πολύ κοντά στην πραγματική. Το κόστος βέβαια είναι διπλό, αν πρόκειται όμως για φασματική ανάλυση τότε αυτό δεν είναι πρόβλημα.

Όταν ο λόγος ιδιοσυχνοτήτων είναι $R_\omega = 0.5$, δηλαδή για υπερκατασκευές πολύ εύκαμπτες σε σχέση με το υπόβαθρο, παρατηρούνται πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες η ενιαία απόσβεση $\zeta = 5\%$ δίνει καλύτερη εκτίμηση της απόκρισης σε σχέση με τους προτεινόμενους ισοδύναμους συντελεστές. Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης για το υπόβαθρο που προκύπτουν από τον ισοδύναμο διβάθμιο ταλαντωτή, παίρνουν τιμές κοντά αλλά όχι αρκετά, στο 5%, προκειμένου να πετύχουν καλή προσέγγιση της απόκρισης της διβάθμιας κατασκευής. Οι εφαρμογές όμως γίνονται σε πολυβάθμια πλαίσια, και ειδικά στην περίπτωση της κατασκευής με τις 5+1 στάθμες, η επιρροή της μίας χαλύβδινης στάθμης, η οποία είναι και πολύ εύκαμπτη στις εν λόγω περιπτώσεις, είναι πολύ μικρή, και ο ενιαίος συντελεστής απόσβεσης στην πραγματικότητα είναι πολύ κοντά

στο 5%. Αυτό δε γίνεται να αποφευχθεί, αφού δεν είναι δυνατόν οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης να υπολογιστούν με βάση κάθε μια κατασκευή ξεχωριστά. Εν πάση περιπτώσει, η διαφορά στην πρόβλεψη της απόκρισης είναι μικρή, και επιπλέον η χρήση ενός μη συντηρητικού ενιαίου συντελεστή ίσου με 5% είναι συζητήσιμη.

5.9 Σύγκριση προτεινόμενων μεθόδων ανάλυσης με ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης

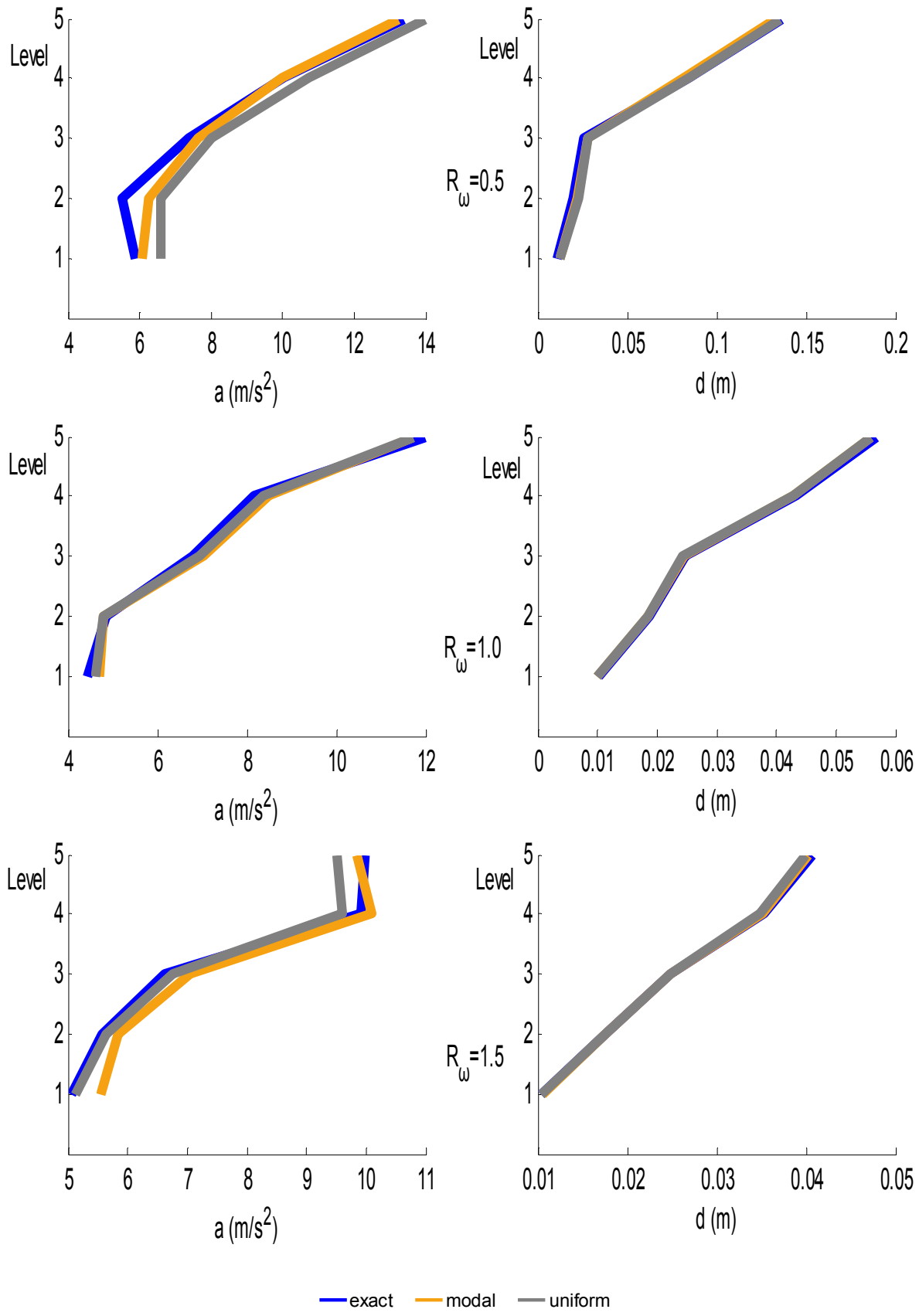
Τα πολυώροφα πλαίσια των Εικ. 5.50 και 5.51 στα οποία δοκιμάζονται οι ενιαίοι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης, είναι τα ίδια με αυτά του 4^{ου} κεφαλαίου στα οποία έγινε η εφαρμογή των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης. Μάλιστα, δεδομένου ότι η διέγερση και στις δύο περιπτώσεις είναι το επιταχυνσιογράφημα Athens, και οι λόγοι μαζών και ιδιοσυχνοτήτων που εξετάζονται παίρνουν τις ίδιες τιμές, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των δύο προσεγγίσεων στην ισοδύναμη ανάλυση των πολυβάθμιων μικτών πλαισίων, αντικαθιστώντας την πραγματική κατανομή της απόσβεσης με τις προτεινόμενες ισοδύναμες.

Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν στο κεφάλαιο αυτό από την ανάλυση των μικτών πλαισίων με τους ισοδύναμους ενιαίους συντελεστές απόσβεσης των Εικ. 5.34 και 5.36, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης του κεφαλαίου 4 με τους ισοδύναμους ιδιομορφικούς συντελεστές των Εικ. 4.7 και 4.8. Η σύγκριση γίνεται τόσο σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όσο και σε όρους μετατοπίσεων. Λαμβάνονται δηλαδή υπόψη τα προφίλ των μεγίστων αποκρίσεων των Εικ. 5.52 ως 5.55 για την κατασκευή των 3+2 σταθμών και τα προφίλ των Εικ. 5.68 ως 5.71 για την κατασκευή των 5+1 σταθμών, όσον αφορά την ανάλυση με τους ενιαίους ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης. Αντίστοιχα, για την ανάλυση με τους ιδιομορφικούς ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης, λαμβάνονται υπόψη τα προφίλ των Εικ. 4.61 ως 4.64 για την κατασκευή των 3+2 σταθμών, και τα προφίλ των Εικ. 4.77 ως 4.80. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση και των προφίλ των σφαλμάτων προκειμένου να προκύψει μια πληρέστερη εικόνα για την ικανότητα των ισοδύναμων συντελεστών να προσεγγίσουν την πραγματική απόκριση. Έτσι,

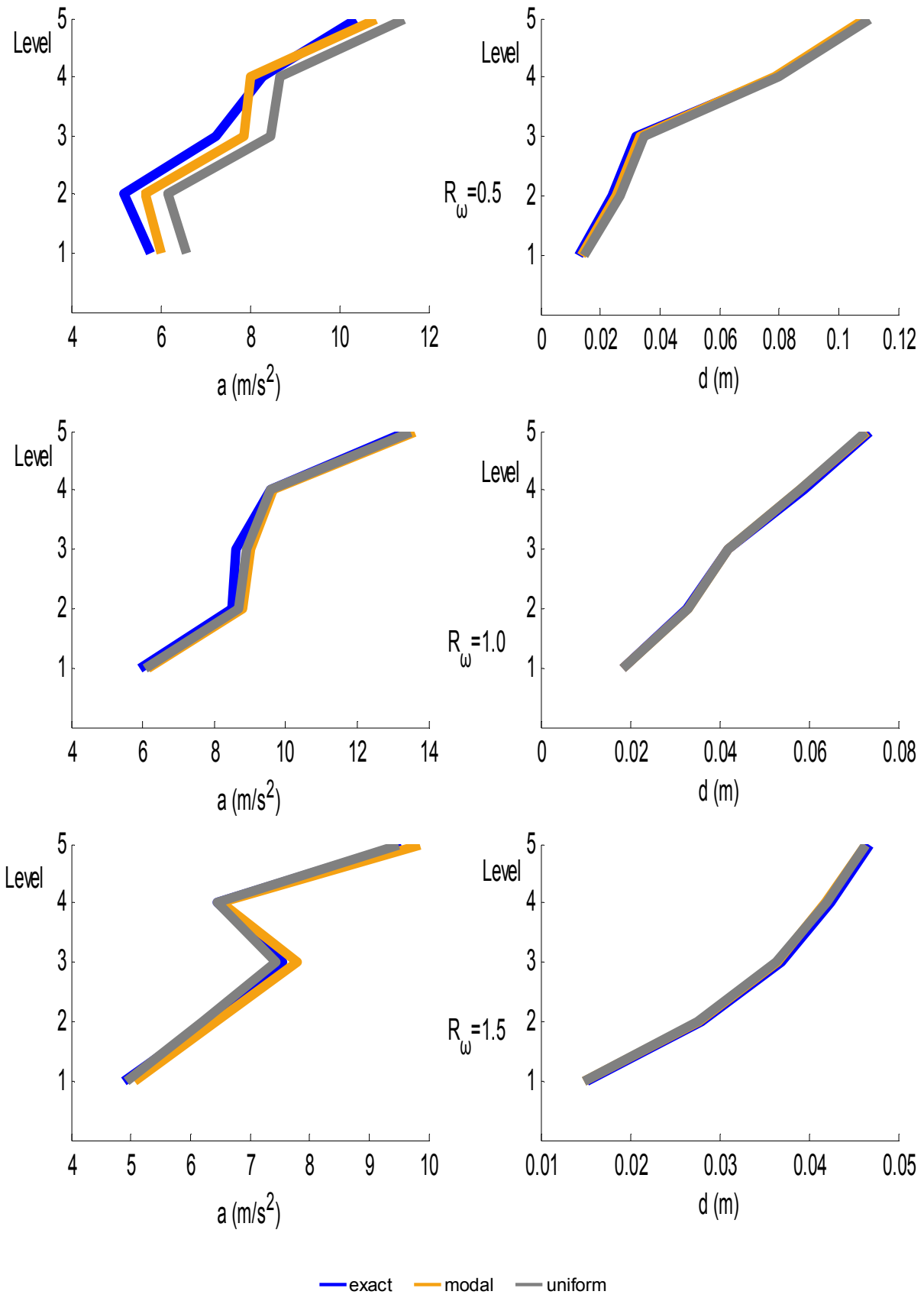
συγκρίνονται τα προφίλ των σφαλμάτων των Εικ. 5.56 ως 5.59 και 4.65 ως 4.68 για την 3+2 κατασκευή, και τα προφίλ σφαλμάτων των Εικ. 5.72 ως 5.75 και 4.81 ως 4.84 για την κατασκευή των 5+1 σταθμών.

Από τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στις παραπάνω εικόνες, αφαιρούνται τα μέγιστα των αποκρίσεων τόσο σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όσο και σε όρους μετατοπίσεων, που προκύπτουν από τις αναλύσεις με τους ενιαίους συντελεστές απόσβεσης 2% και 5%. Ο λόγος είναι ότι πλέον η σύγκριση αφορά τις δύο προσεγγίσεις μεταξύ τους και όχι την κάθε μια σε σχέση με τις αναλύσεις με τις ακραίες τιμές απόσβεσης. Η σύγκριση για την κατασκευή των 3+2 σταθμών γίνεται στις Εικ. 5.84 ως 5.87 για τα προφίλ των μεγίστων των αποκρίσεων και στις Εικ. 5.88 ως 5.91 για τα προφίλ των σφαλμάτων. Αντίστοιχα, για την κατασκευή των 5+1 σταθμών, η σύγκριση γίνεται στις Εικ. 5.92 ως 5.95 για τα προφίλ των μεγίστων των αποκρίσεων και στις Εικ. 5.96 ως 5.99 για τα προφίλ των σφαλμάτων.

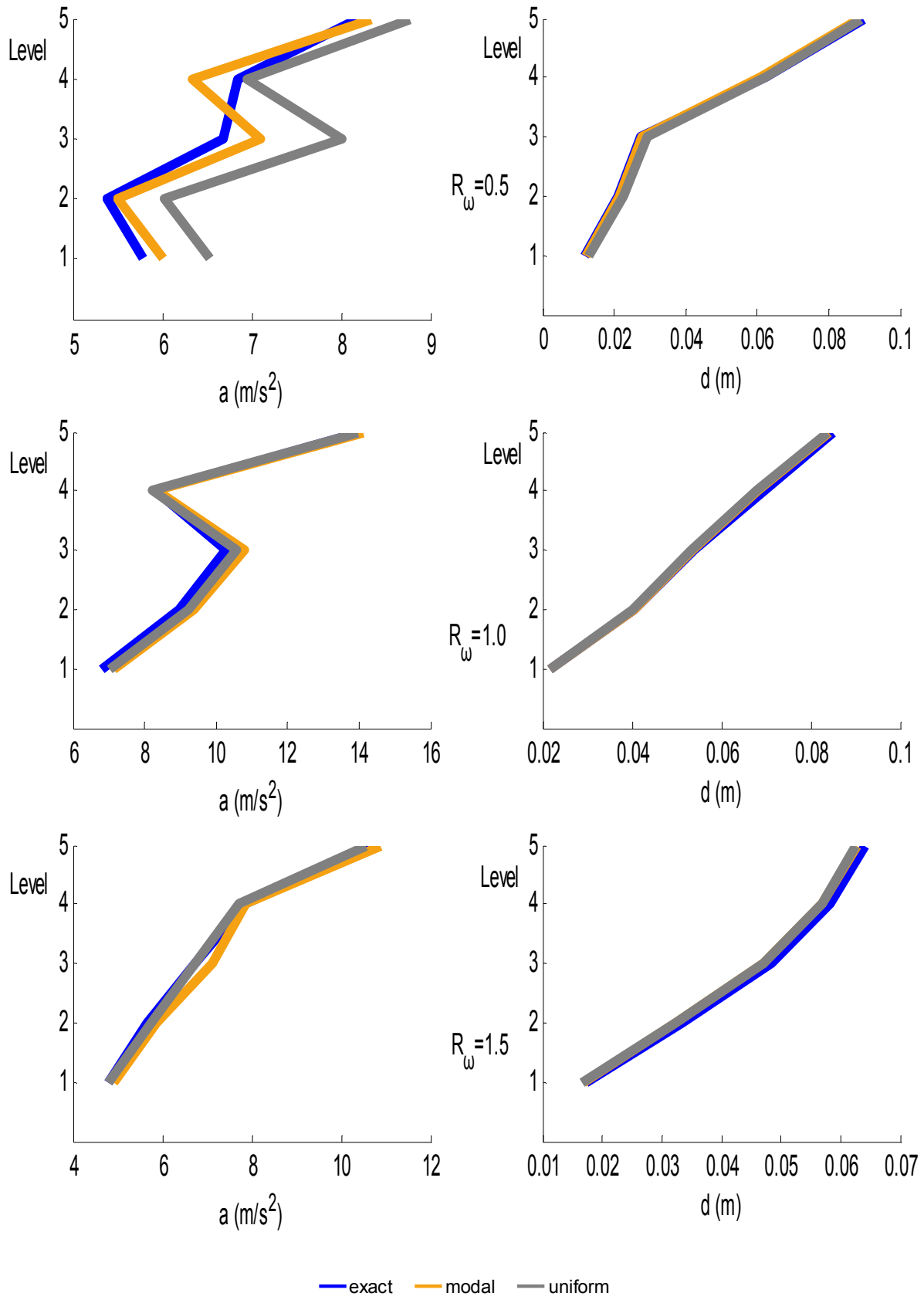
Και οι δύο προτεινόμενες προσεγγίσεις, η ανάλυση δηλαδή με τους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης, και ο συνδυασμός των αναλύσεων με τους ενιαίους συντελεστές απόσβεσης, δίνουν προφίλ απόκρισης τα οποία είναι πολύ κοντά στην πραγματική απόκριση των μικτών καθ' ύψος κατασκευών, ιδιαίτερα στα προφίλ των μετατοπίσεων όπου και τα σφάλματα είναι πολύ μικρά. Η προσέγγιση είναι ικανοποιητική, τόσο σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όσο και σε όρους μετατοπίσεων. Όσον αφορά την κατασκευή των 3+2 σταθμών, καμία από τις δύο μεθόδους δε δίνει προφίλ απόκρισης που να έχουν συστηματική συμπεριφορά σε σχέση με τα ακριβή, δεδομένου ότι παρατηρούνται και περιπτώσεις υποεκτίμησης και περιπτώσεις υπερεκτίμησης της απόκρισης. Αυτό άλλωστε προκύπτει και από τη μεμονωμένη σύγκριση των προφίλ των αποκρίσεων στις Εικ. 4.61 ως 4.64 και 5.52 ως 5.55. Αντίθετα, για την κατασκευή των 5+1 σταθμών, οι προσεγγιστικές μέθοδοι δίνουν μια συστηματική υπερεκτίμηση των μεγίστων της απόκρισης. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μέθοδοι προτείνουν μεν αρκετά υψηλούς ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης, όχι όμως αρκετά κοντά στο 5%, ώστε να καταφέρουν να προβλέψουν την πολύ μικρή επίδραση της μίας χαλύβδινης στάθμης. Αυτή η αδυναμία είναι αποτέλεσμα της μετάβασης από τις πολυβάθμιες κατασκευές στις ισοδύναμες μονοβάθμιες, και δεδομένου ότι οδηγεί σε συντηρητική θεώρηση δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα, εφόσον αυτή παραμένει μικρότερη από την πολύ συντηρητική θεώρηση του ενιαίου συντελεστή απόσβεσης 2%.



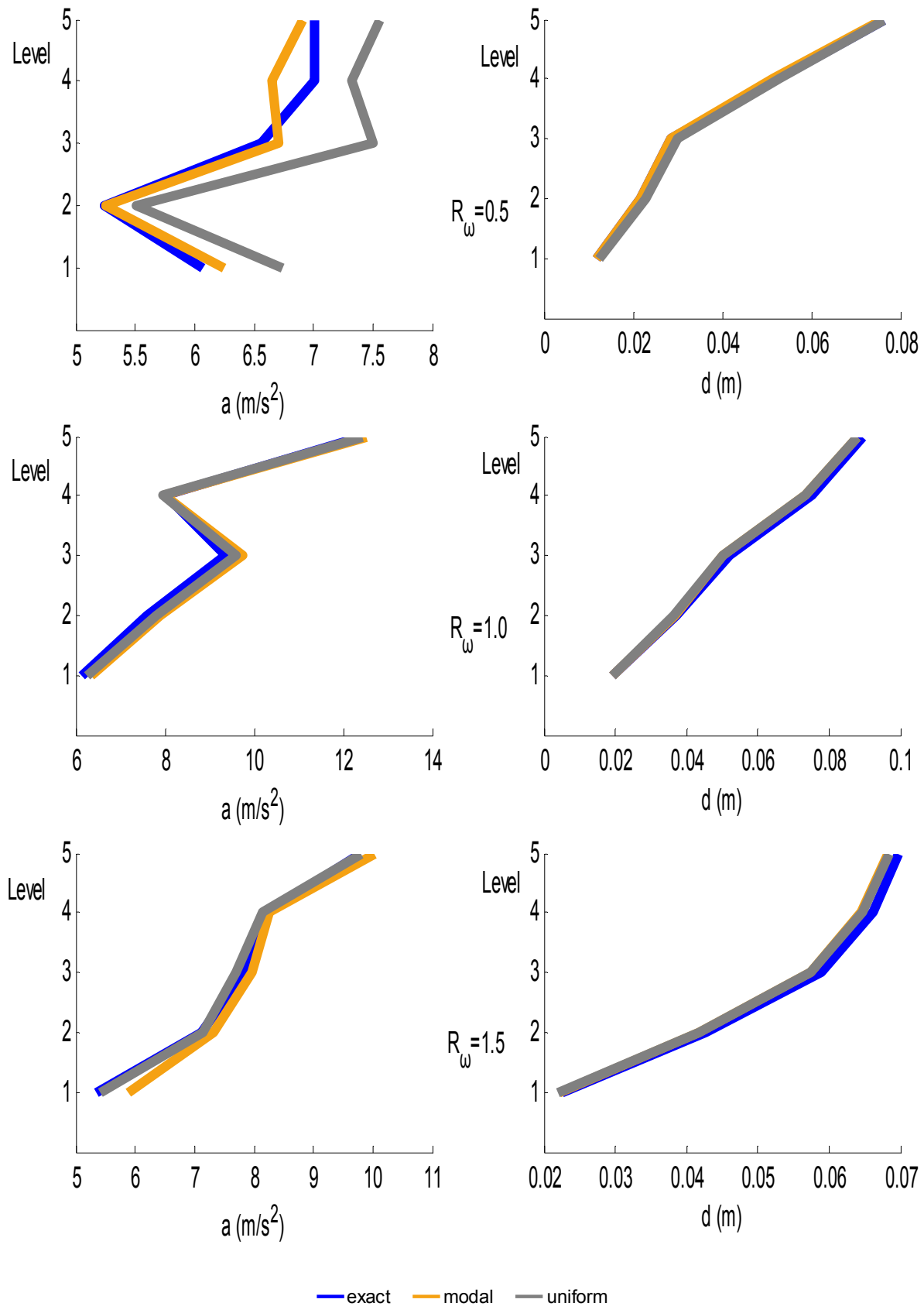
Εικ. 5.84: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.2



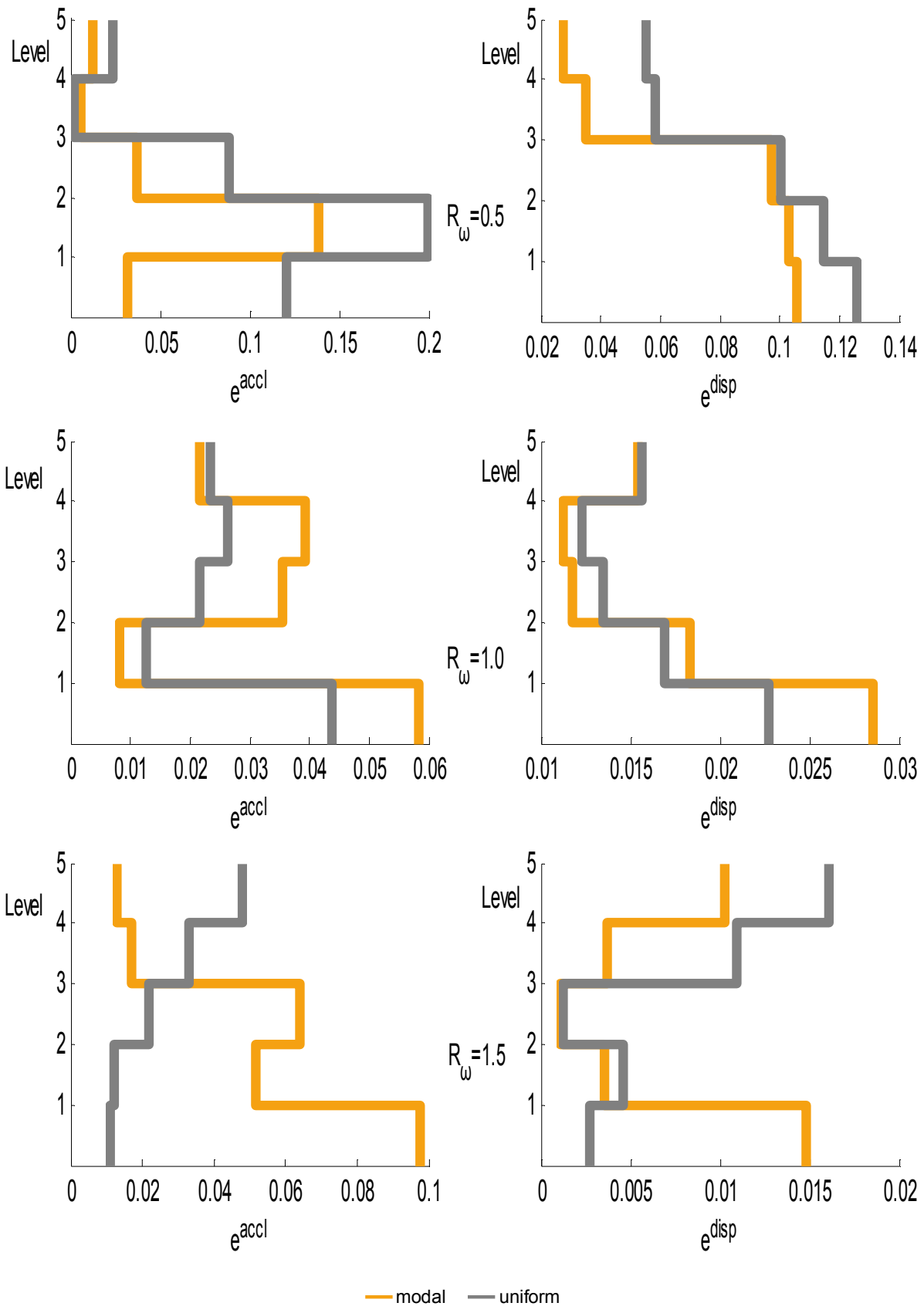
Εικ. 5.85: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.5



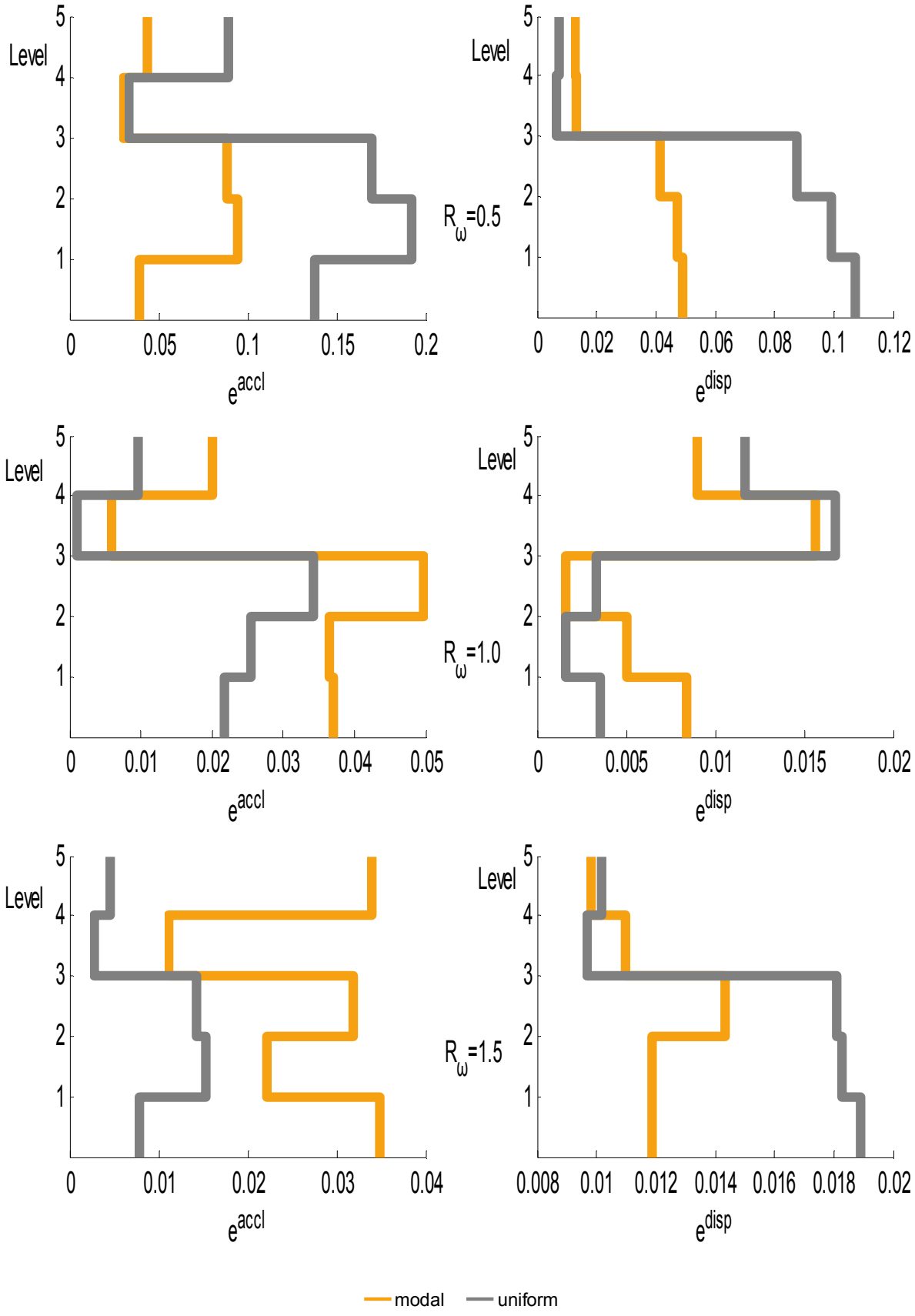
Εικ. 5.86: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.8



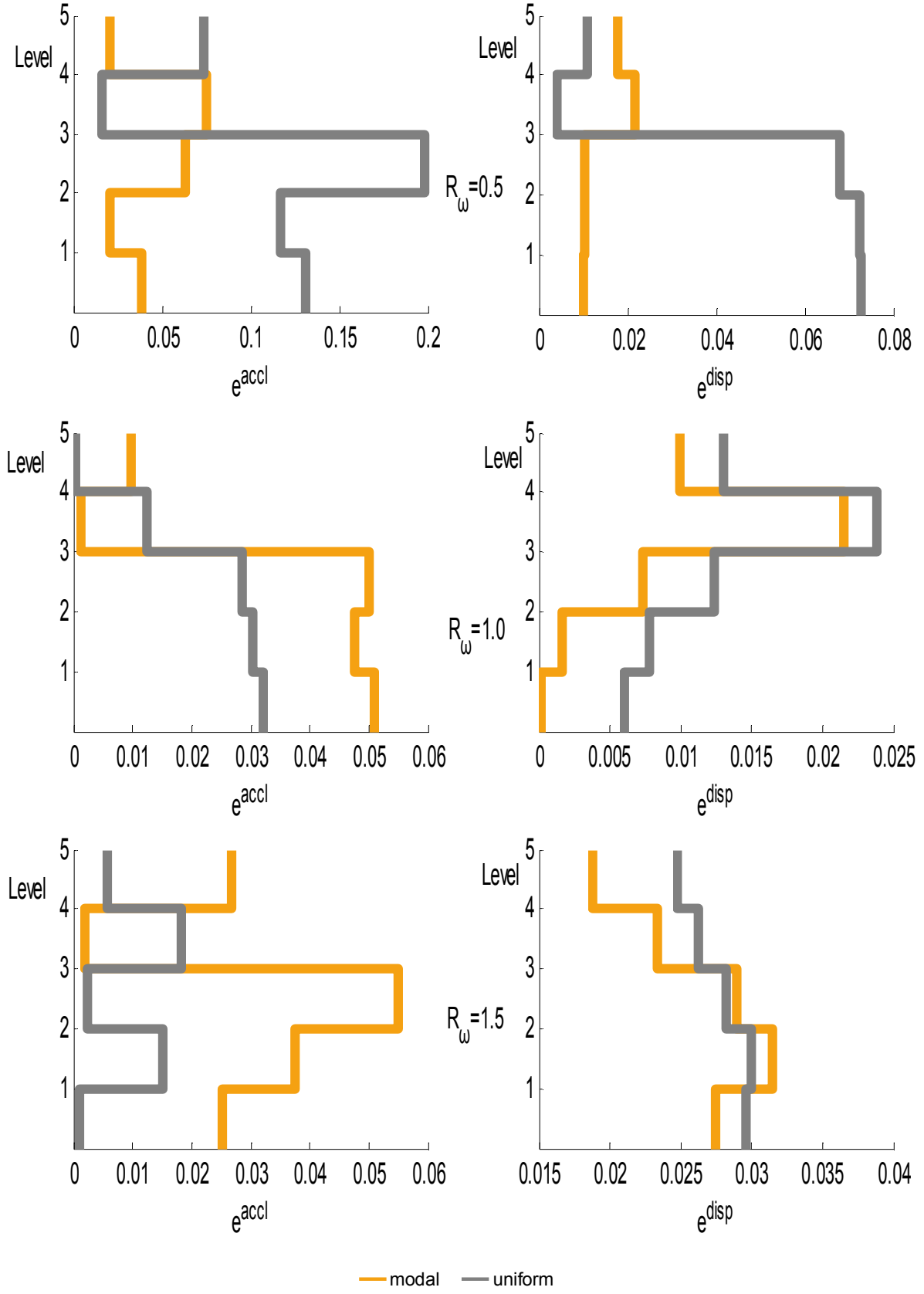
Εικ. 5.87: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=1



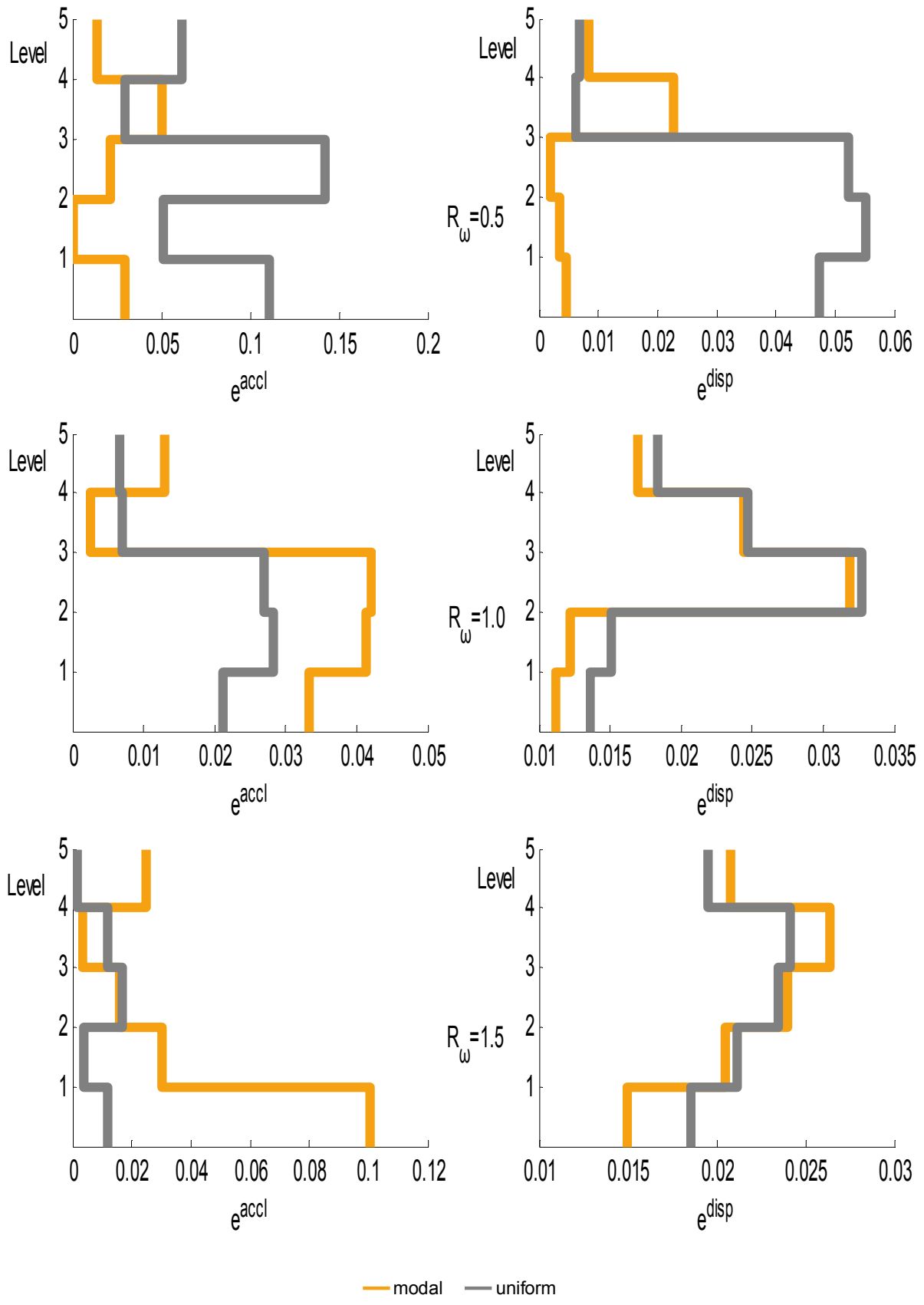
Εικ. 5.88: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.2



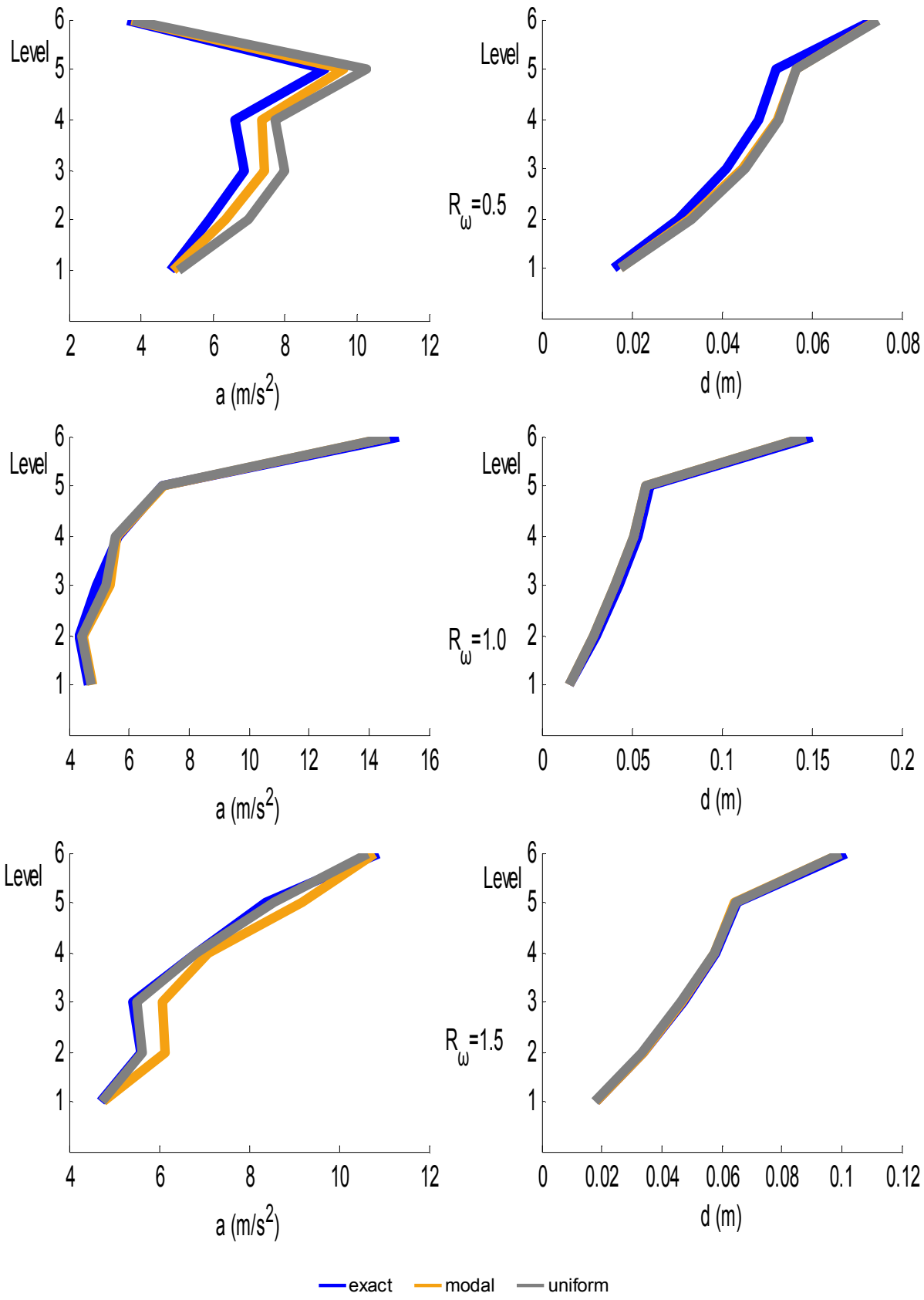
Εικ. 5.89: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.5



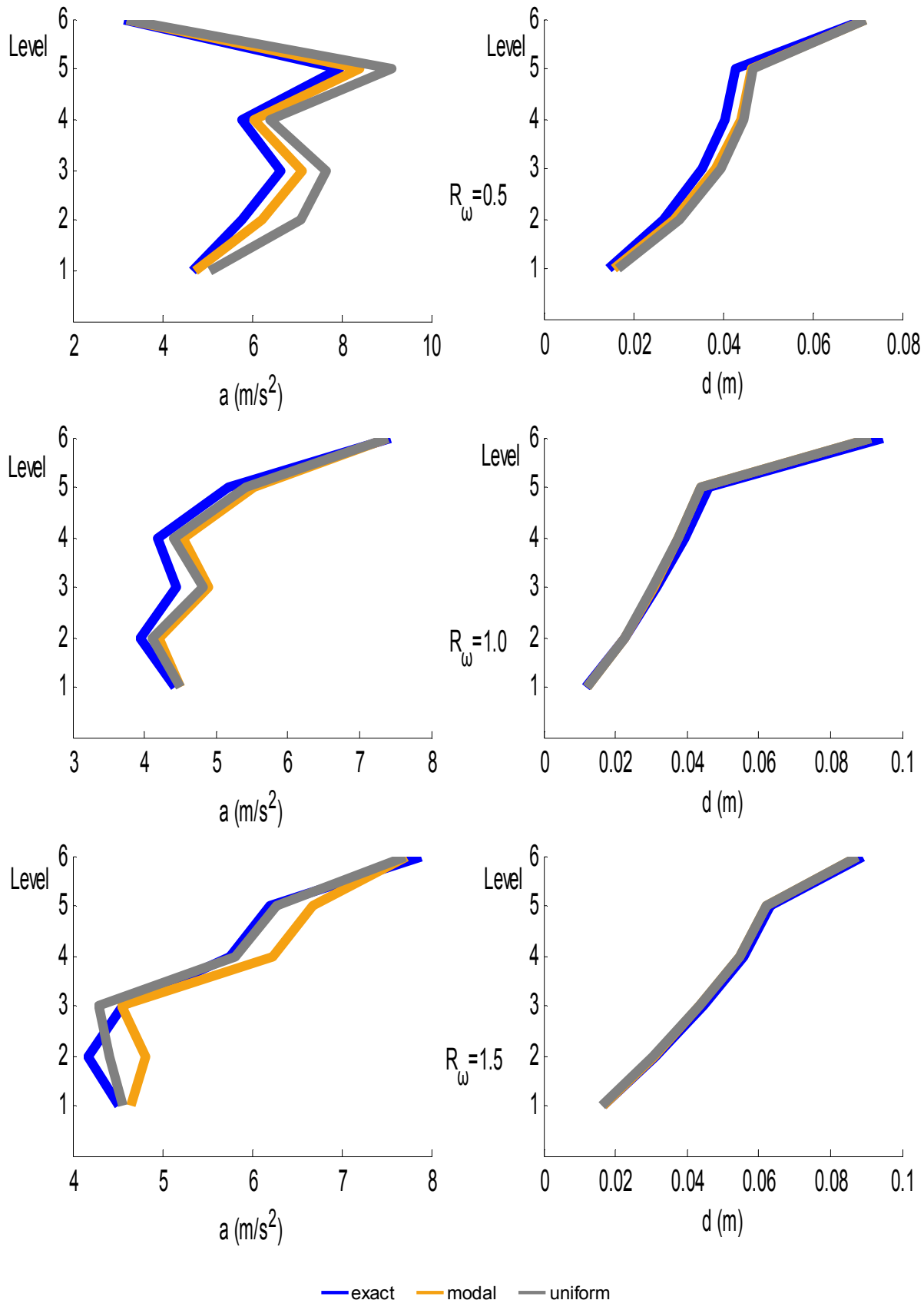
Εικ. 5.90: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=0.8



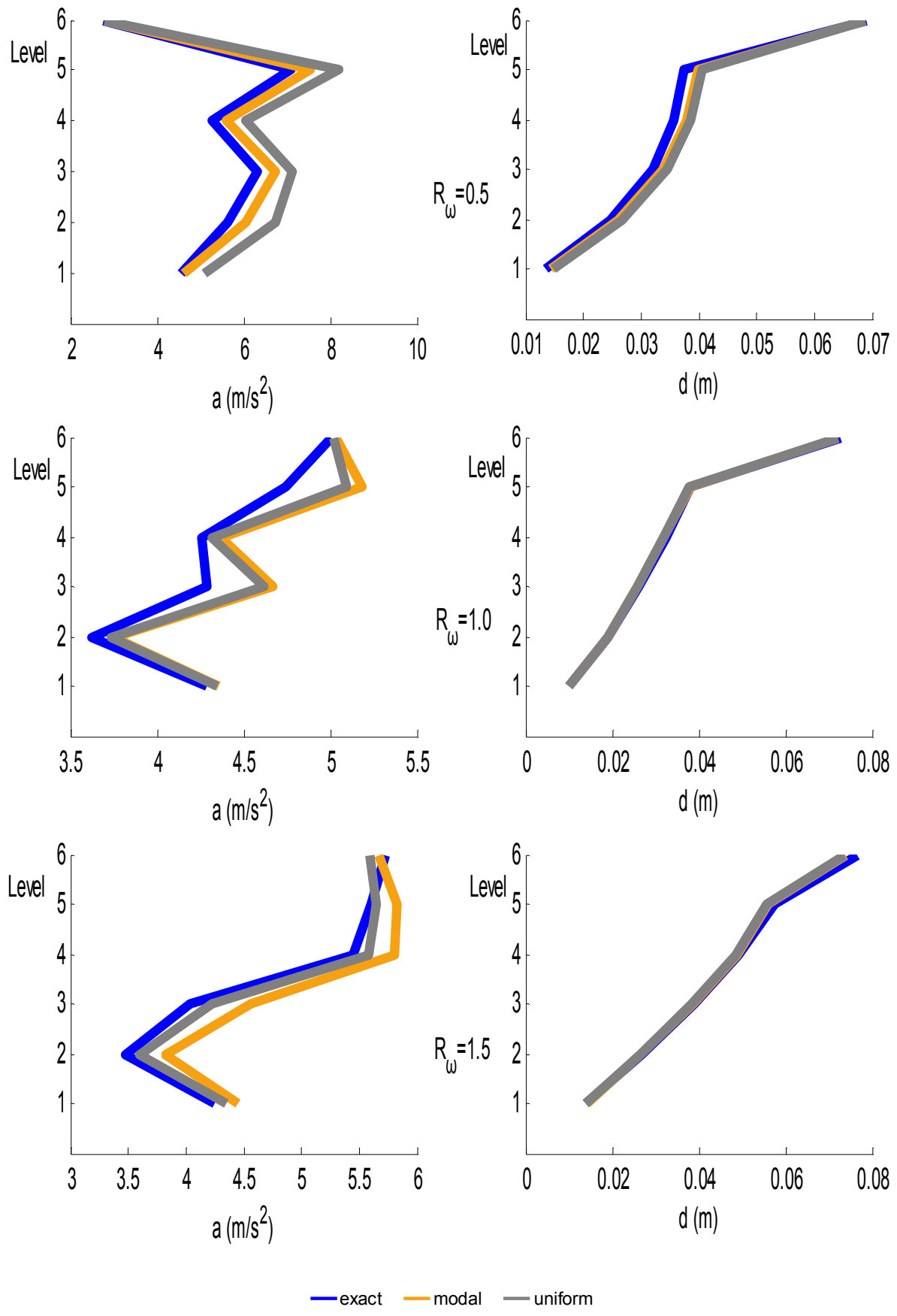
Εικ. 5.91: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 3+2 σταθμών για R_m=1



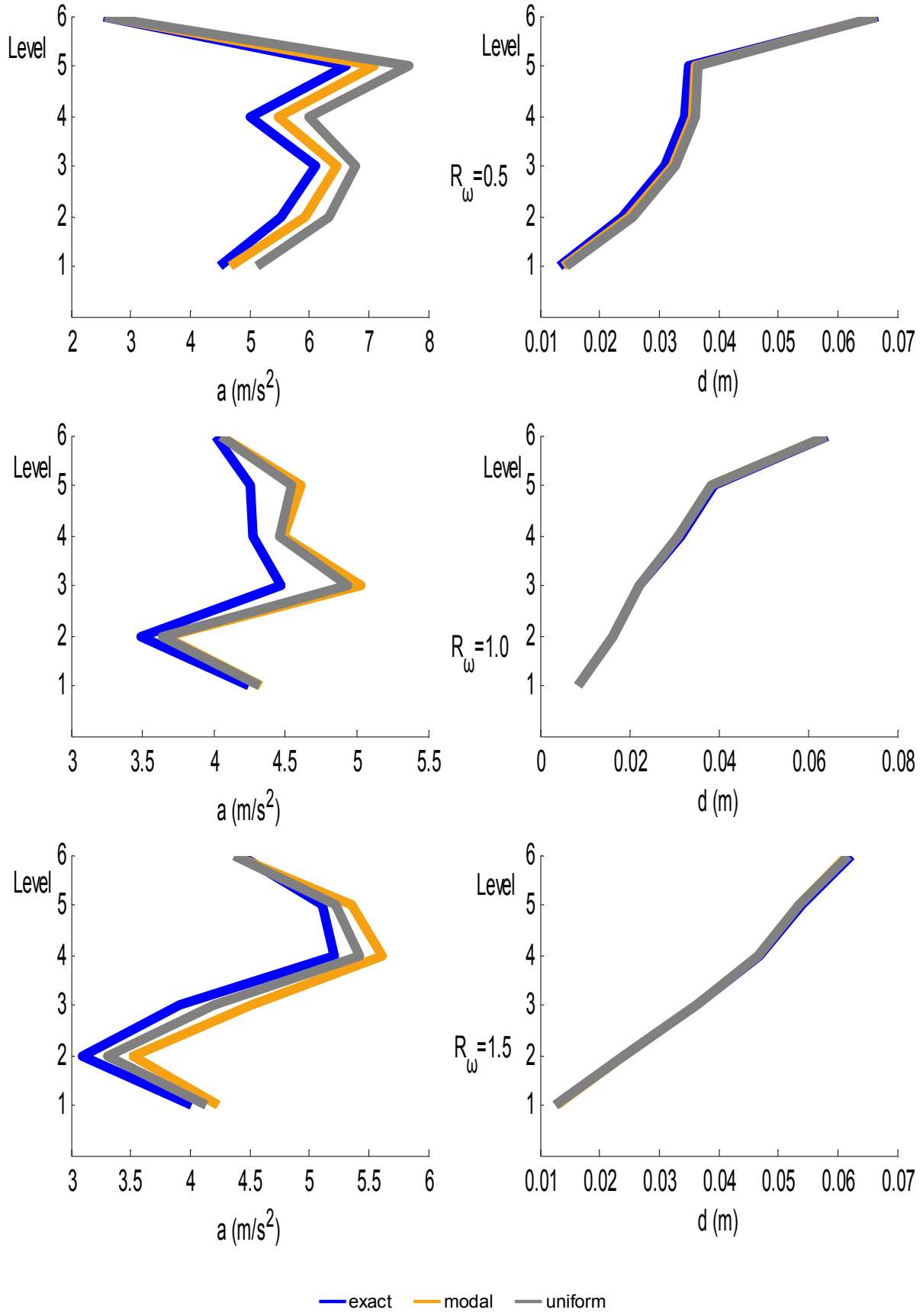
Εικ. 5.92: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.2



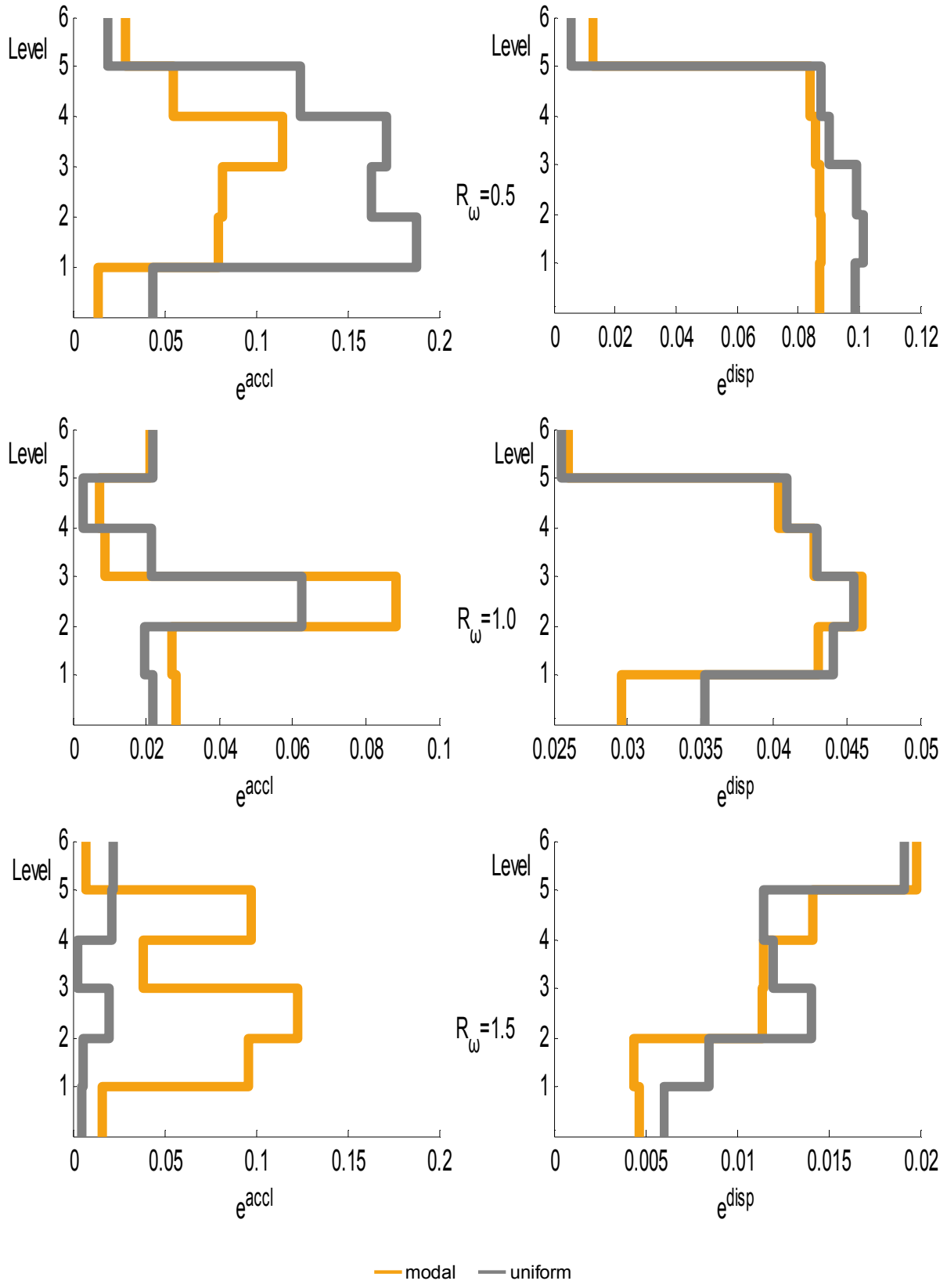
Εικ. 5.93: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.5



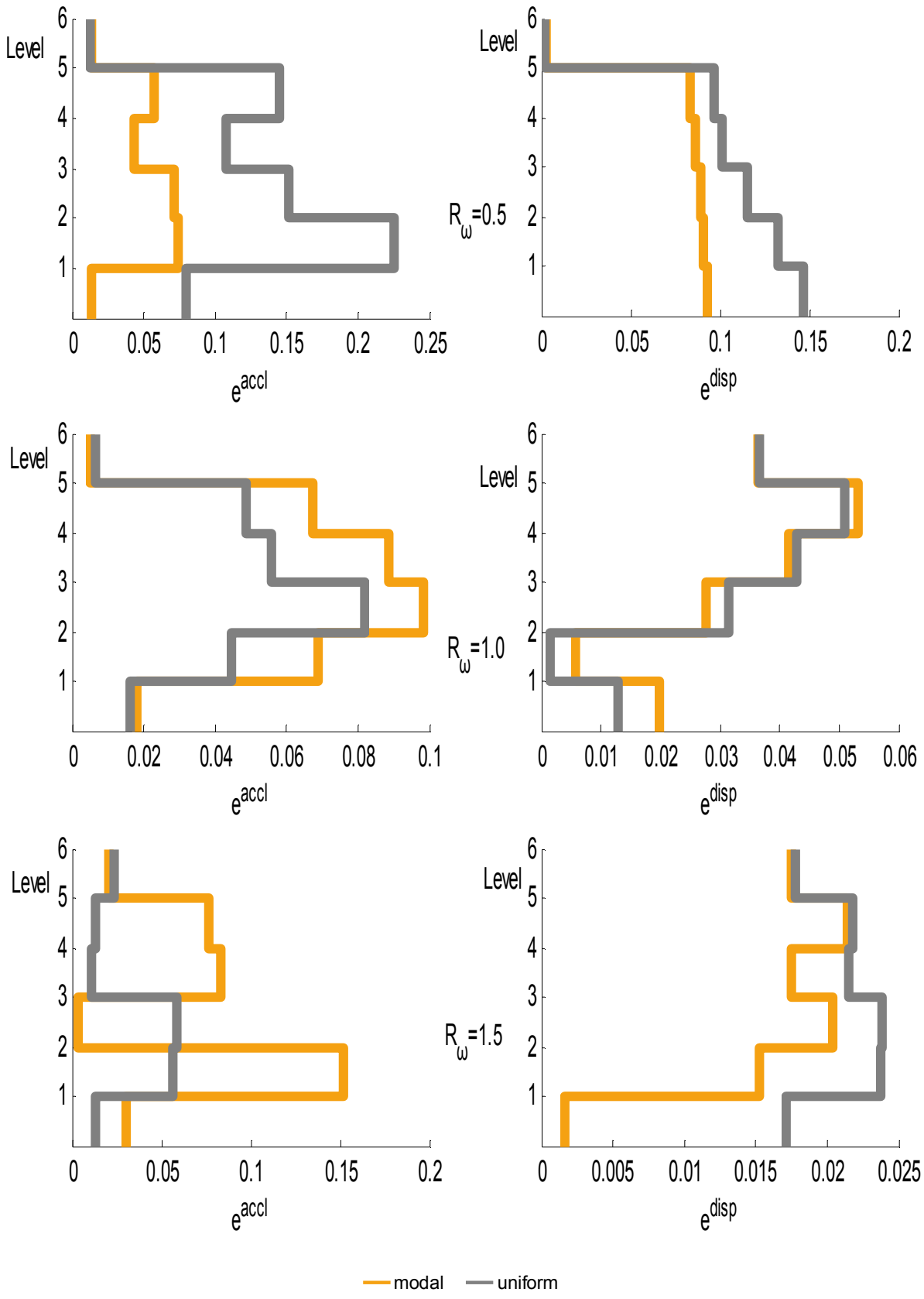
Εικ. 5.94: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.8



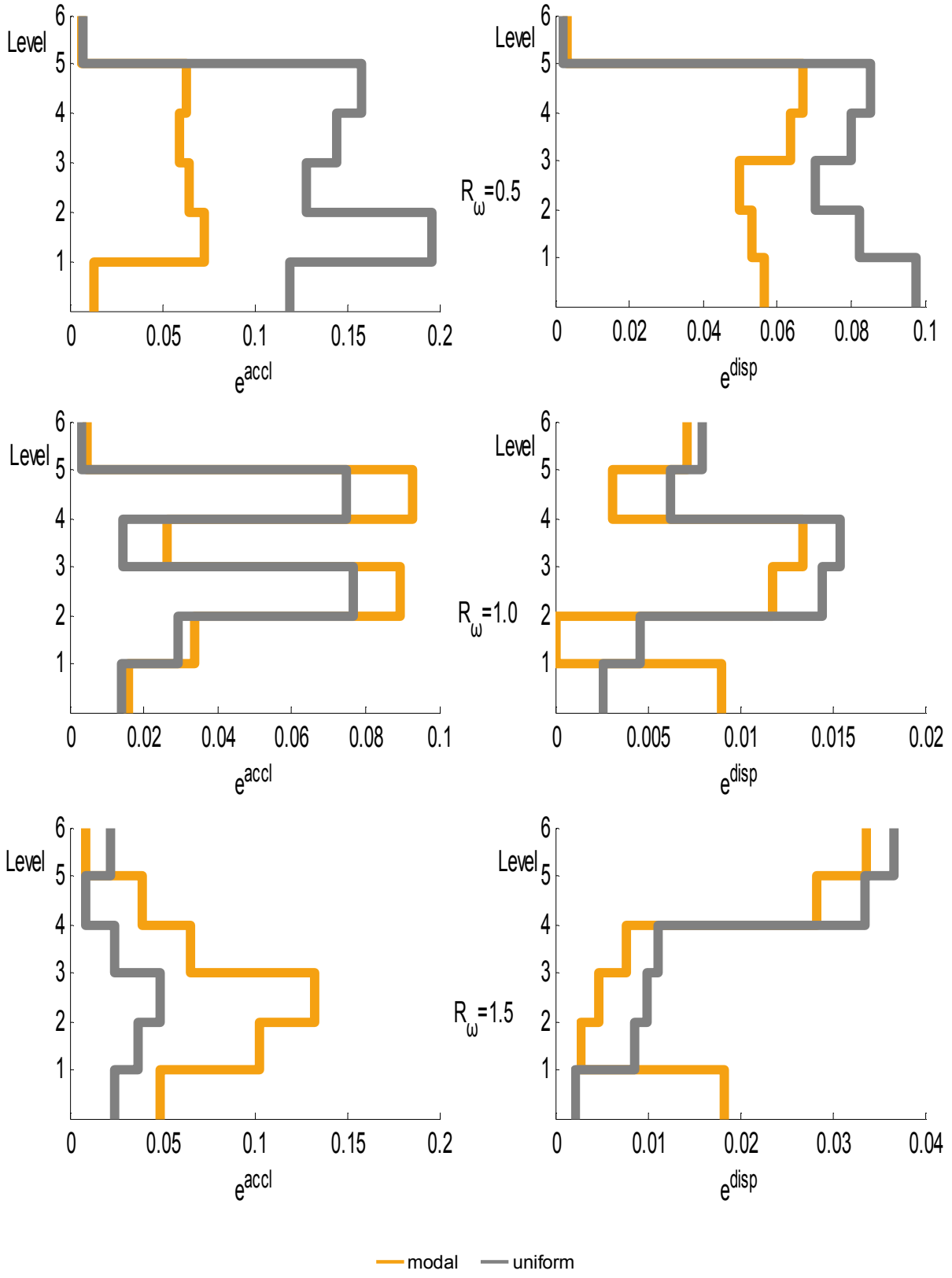
Εικ. 5.95: Σύγκριση προφίλ απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=1



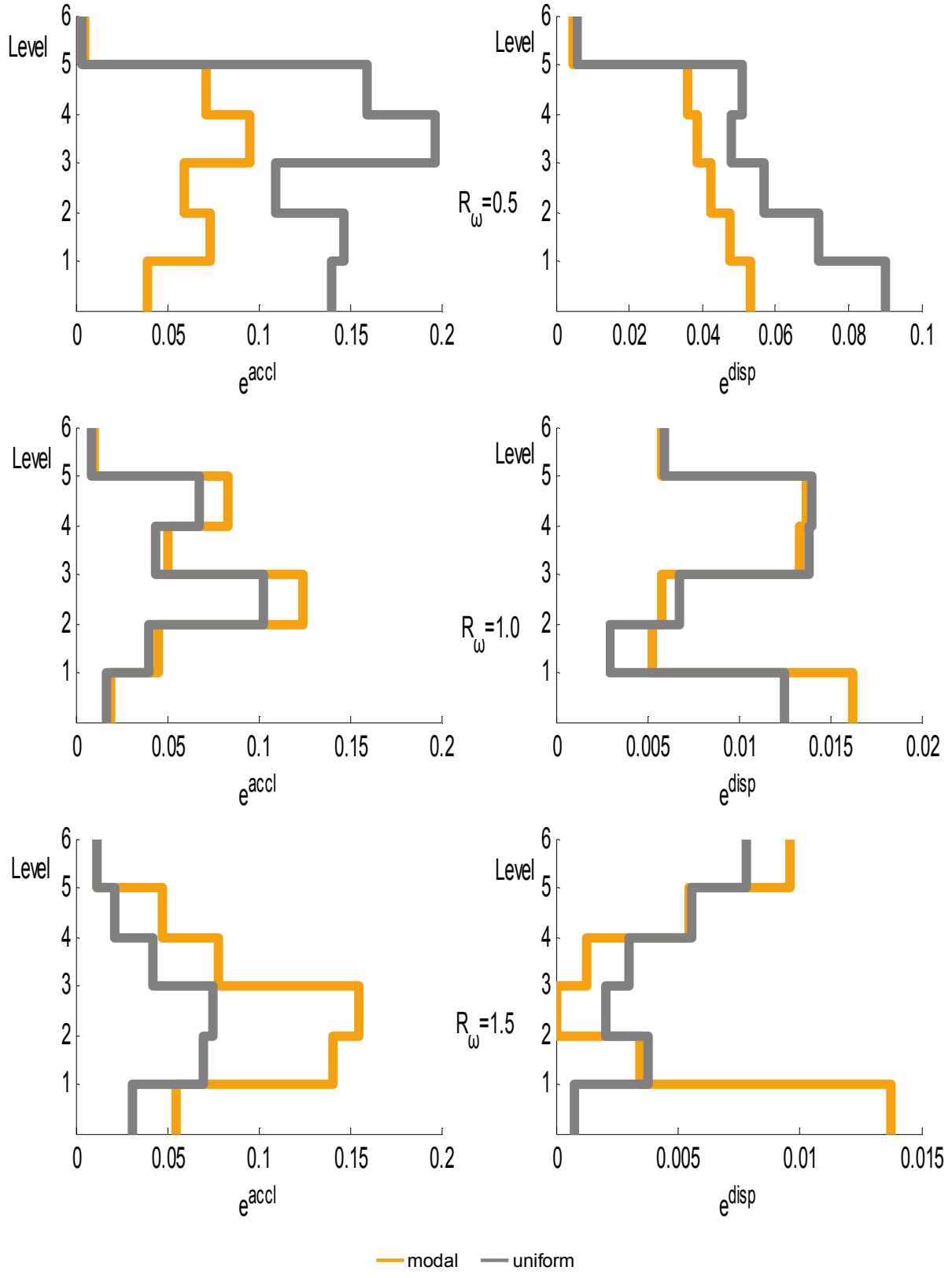
Εικ. 5.96: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.2



Εικ. 5.97: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.5



Εικ. 5.98: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=0.8



Εικ. 5.99: Σύγκριση προφίλ σφαλμάτων απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων κατασκευής 5+1 σταθμών για R_m=1

5.10 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια διαφορετική πρόταση όσον αφορά την συζευγμένη ανάλυση των μικτών καθ' ύψος κατασκευών. Συγκεκριμένα, για κατασκευές για τις οποίες η πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης είναι δυσμενής, και για τις οποίες η συζευγμένη ανάλυση είναι η μόνη λύση, προτείνεται εναλλακτικά η ανάλυσή τους με συνδυασμό ενιαίων συντελεστών απόσβεσης. Επιστρατεύονται πάλι οι ισοδύναμοι διβάθμιοι ταλαντωτές, και αυτήν τη φορά μέσω μιας διαδικασίας δοκιμών εναλλακτικών ενιαίων συντελεστών απόσβεσης, επιλέγονται αυτοί οι οποίοι ελαχιστοποιούν τα σφάλμα σε κάθε στάθμη, σε όρους απολύτων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων. Αυτή η διαδικασία επιλογής των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης, τους καθιστά εξαρτώμενους από τη χρησιμοποιούμενη εδαφική διέγερση, και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δύο τύποι διεγέρσεων, μία αρμονική σε συντονισμό με την πρώτη ιδιομορφή διέγερση και μια σύνθετη αρμονική διέγερση η οποία δίνει σημαντική ενίσχυση και στις δύο ιδιομορφές του διβάθμιου ταλαντωτή. Οι συντελεστές που προκύπτουν από τη δεύτερη περίπτωση, θεωρούνται πιο ρεαλιστικοί, καθώς και η διέγερση καταφέρνει καλύτερα να προσομοιώσει πραγματικές συνθήκες φόρτισης, και για το λόγο αυτό στη συνέχεια δοκιμάζονται σε σεισμικές διεγέρσεις, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Τέλος, οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τη σύνθετη αρμονική διέγερση, δοκιμάζονται σε εφαρμογές σε πολυβάθμια μικτά πλαίσια, ώστε να διαπιστωθεί αν στην πράξη, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις των ισοδύναμων διβάθμιων ταλαντωτών, μπορούν να επεκταθούν και σε πραγματικές κατασκευές. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις των πολυώροφων κατασκευών προτείνεται να γίνουν διπλές, μία φορά κάνοντας χρήση ισοδύναμου ενιαίου συντελεστή απόσβεσης ο οποίος στην περίπτωση του διβάθμιου ελαχιστοποιεί το σφάλμα υποβάθρου, και άλλη μία, κάνοντας χρήση συντελεστή ο οποίος προσομοιώνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την απόκριση της υπερκατασκευής. Οι δύο αναλύσεις συνδυάζονται και η κάθε μια δίνει αποτελέσματα για το αντίστοιχο τμήμα της κατασκευής, με σκοπό τελικά να προκύψει η απόκριση της πολυβάθμιας κατασκευής από επιμέρους βέλτιστη προσομοίωση των τμημάτων της.

Όπως και στο κεφάλαιο 4, εξετάζονται δύο διαμορφώσεις επίπεδων πλαισίων, τα δυναμικά χαρακτηριστικά των οποίων ποικίλουν με τρόπο τέτοιο ώστε να

αντιστοιχούν σε περιπτώσεις κατασκευών ενδιαφέροντος πολιτικού μηχανικού. Τα σφάλματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις με τους προτεινόμενους συντελεστές απόσβεσης, είναι πολύ μικρά και η προσομοίωση της πραγματικής απόκρισης είναι πολύ καλή. Μάλιστα, σε σύγκριση με την συντηρητική θεώρηση κατά την οποία σε ολόκληρη την κατασκευή αποδίδεται ενιαίος συντελεστής απόσβεσης ίσος με 2%, τα αποτελέσματα τόσο σε όρους απολύτων επιταχύνσεων όσο και σε όρους μετατοπίσεων είναι πολύ πιο κοντά σε αυτά της ανάλυσης με την ορθή κατανομή της απόσβεσης.

6

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

6.1 Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς μικτών καθ' ύψος κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα. Το τμήμα από σκυρόδεμα αποτελεί το κατώτερο τμήμα της κατασκευής και αποτελεί την έδραση του ανώτερου τμήματος το οποίο κατασκευάζεται από χάλυβα. Η μικτή διαμόρφωση των κατασκευών αυτών συνεπάγεται και προβλήματα στην ανάλυση τους για σεισμικές και άλλες δυναμικές διεγέρσεις. Συγκεκριμένα, οι διαφορετικές ιδιότητες των δύο υλικών, τόσο σε όρους συντελεστών ιξώδους απόσβεσης όσο και συντελεστών συμπεριφοράς, θέτει το ζήτημα της επιλογής των τιμών των συντελεστών αυτών, οι οποίοι καθορίζουν τις σεισμικές δράσεις που καλούνται να αναλάβουν τα δομικά μέλη. Η ανάλυση των κατασκευών αυτών μπορεί να γίνει είτε συζευγμένα είτε αποσυζευγμένα, χωρίζοντας την κατασκευή σε δύο ομοιογενή από άποψη υλικού τμήματα.

Στη συζευγμένη ανάλυση η κατασκευή θεωρείται ως ενιαία και αναλύεται ολόκληρη, χωρίς να γίνεται διάκριση σε τμήματα ως προς το υλικό κατασκευής. Η ανάλυση μπορεί να είναι είτε φασματική είτε χρονοϊστορίας, με απευθείας ολοκλήρωση ή ιδιομορφική. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ακριβώς λόγω της διαφοράς των τιμών των συντελεστών απόσβεσης και συμπεριφοράς, οπότε σε μια φασματική ανάλυση ο μελετητής καλείται να προχωρήσει σε επιλογή μιας τιμής. Η τιμή αυτή συνήθως είναι η δυσμενέστερη και ο σχεδιασμός καταλήγει να είναι συντηρητικός. Σε μια ανάλυση χρονοϊστορίας, αποφεύγεται το ζήτημα της επιλογής των τιμών των συντελεστών, πρέπει όμως να δημιουργηθεί ένα μικτό μητρώο απόσβεσης το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του τις δύο τιμές της απόσβεσης, διαδικασία που δεν υποστηρίζεται από εμπορικά πακέτα λογισμικού. Επιπλέον, αν η ανάλυση γίνει ιδιομορφικά, οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι μιγαδικές, πράγμα που δεν τις

κάνει πρόσφορες για εφαρμογή σε μια συνηθισμένη διαδικασία ανάλυσης και σχεδιασμού.

Στην αποσυζευγμένη ανάλυση, η κατασκευή χωρίζεται σε δύο τμήματα τα οποία είναι ομοιογενή ως προς το υλικό κατασκευής τους. Η εδαφική διέγερση εισάγεται στο κατώτερο τμήμα από σκυρόδεμα, λαμβάνεται η απόκρισή της στη στάθμη έδρασης της υπερκατασκευής, και ακολούθως η απόκριση αυτή εισάγεται ως διέγερση στο τμήμα από χάλυβα. Το πλεονέκτημα της αποσυζευγμένης προσέγγισης είναι ότι στο κάθε ένα από τα δύο στάδια της ανάλυσης δεν υπάρχουν ανομοιομορφίες αλλά τόσο η απόσβεση όσο και η ελαστοπλαστική συμπεριφορά είναι ενιαίες. Αυτό σημαίνει ότι και η φασματική ανάλυση αλλά και οι αναλύσεις χρονοϊστορίας, με απευθείας ολοκλήρωση ή ιδιομορφικές, μπορούν να εκτελεστούν χωρίς πρόβλημα. Το μειονέκτημα είναι ότι εισάγεται ένα σφάλμα αποσύζευξης λόγω του ότι σε κάθε ένα από τα δύο στάδια δεν αναλύεται η πραγματική κατασκευή αλλά ένα τμήμα της.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αρχικά να διερευνηθεί το σφάλμα αποσύζευξης των μικτών καθ' ύψος κατασκευών με το σκεπτικό ότι πολλές φορές η αποσυζευγμένη ανάλυση είναι προτιμότερη για τη μελέτη τέτοιων φορέων. Επιχειρείται να παραχθούν εργαλεία τα οποία κάνουν πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Τα εργαλεία αυτά έχουν τη μορφή καμπυλών αποσύζευξης, και μπορούν να αξιοποιηθούν σε προκαταρκτικό στάδιο μιας μελέτης ώστε να εκτιμηθεί το αναμενόμενο σφάλμα αποσύζευξης, και να αποφασιστεί αν η μελέτη θα γίνει αποσυζευγμένα ή συζευγμένα. Ακολούθως, και σε περίπτωση που η πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης είναι τόσο δυσμενής ώστε να υπαγορεύει την συζευγμένη ανάλυση της κατασκευής, προτείνονται δύο διαδικασίες για την ενιαία ανάλυση της κατασκευής με ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης, προκειμένου να αποφευχθεί η υιοθέτηση δυσμενών τιμών. Η πρώτη αφορά ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης και η δεύτερη ενιαίους, οι οποίοι εφαρμόζονται σε ολόκληρη την κατασκευή.

Η μελέτη των μικτών κατασκευών γίνεται μέσω ισοδύναμων διβάθμιων ταλαντωτών. Συγκεκριμένα, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα ευρύτερης ισχύος και όχι εξειδικευμένα για κάθε κατασκευή, η μελέτη του σφάλματος αποσύζευξης και η πρόταση των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης, ιδιομορφικών και ενιαίων, γίνεται σε διβάθμιους ταλαντωτές, των οποίων οι βαθμοί ελευθερίας έχουν

χαρακτηριστικά αντίστοιχα των τμημάτων από σκυρόδεμα και χάλυβα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους διβάθμιους αυτούς ταλαντωτές αξιοποιούνται σε πολυβάθμιες κατασκευές μέσω μιας διαδικασίας αντιστοίχισης, κατά την οποία η πολυβάθμια κατασκευής μετατρέπεται σε μια διβάθμια με βάση τα χαρακτηριστικά της πρώτης ιδιομορφής του κάθε τμήματός της.

Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά γίνεται μελέτη του σφάλματος αποσύζευξης των μικτών ταλαντωτών, με βάση τους διβάθμιους ταλαντωτές. Η μελέτη γίνεται για ένα εύρος τιμών των δυναμικών χαρακτηριστικών των δύο βαθμών ελευθερίας, άρα και για ένα εύρος δυναμικών χαρακτηριστικών πολυβάθμιων κατασκευών με βάση τη διαδικασία αντιστοίχισης. Γίνεται διερεύνηση του σφάλματος και στις δύο στάθμες, και οι διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται είναι αρμονικές σε συντονισμό καθώς και ένα σύνολο 10 σεισμικών διεγέρσεων, ενώ προτείνεται και μια τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης, η οποία λαμβάνει υπόψη τα αδρανειακά μεγέθη της υπερκατασκευής στην αποσυζευγμένη ανάλυση του υποβάθρου, η συμπεριφορά του οποίου είναι ελαστική και ελαστοπλαστική. Τελικά δημιουργούνται καμπύλες πρόβλεψης του σφάλματος αποσύζευξης ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δύο τμημάτων, οι οποίες δοκιμάζονται ως προς την ακρίβειά τους σε διαδικασίες αποσύζευξης πολυβάθμιων μικτών κατασκευών.

Ακολουθεί η πρόταση ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης για τις περιπτώσεις κατασκευών στις οποίες το σφάλμα αποσύζευξης προβλέπεται αποτρεπτικά μεγάλο και προκρίνεται να εφαρμοστεί συζευγμένη ανάλυση. Αρχικά, η προσέγγιση γίνεται με ισοδύναμους ιδιομορφικούς συντελεστές απόσβεσης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, η εξίσωση κίνησης της διβάθμιας μικτής κατασκευής μετατρέπεται στη διαμόρφωση χώρου-κατάστασης, επιλύεται το μιγαδικό πρόβλημα ιδιοτιμών και προκύπτουν οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης. Η κατανομή τους καταγράφεται σε συνάρτηση με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της διβάθμιας κατασκευής και ακολούθως εξετάζεται το σφάλμα που προκύπτει από την εφαρμογή τους σε μια κλασσική και όχι μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση, τόσο με αρμονικές όσο και με σεισμικές και οιονεί σεισμικές διεγέρσεις. Το σφάλμα που προκύπτει είναι ενθαρρυντικά μικρό, και οι καταγεγραμμένοι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης εφαρμόζονται σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές μέσω της αντιστοίχισης πολυβάθμιων και διβάθμιων κατασκευών, χωρίς να γίνεται κάθε φορά η μιγαδική ανάλυση.

Τέλος, σε μια εναλλακτική προσέγγιση, προτείνονται ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης για τις μικτές κατασκευές. Σε επίπεδο πάλι διβάθμιας μικτής κατασκευής εκτελούνται δοκιμές προκειμένου να ευρεθούν οι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης οι οποίοι αν εφαρμοστούν σε ολόκληρη την κατασκευή, και όχι στις ιδιομορφές της, δίνουν τα μικρότερα σφάλματα στην πρόβλεψη της απόκρισης σε σχέση με την ανάλυση της κατασκευής με την ορθή κατανομή της απόσβεσης, όταν αυτή διεγείρεται από αρμονικές και οιονεί σεισμικές διεγέρσεις. Προτείνεται η ανάλυση να γίνει με χρήση δύο ενιαίων συντελεστών απόσβεσης, έναν ο οποίος δίνει βέλτιστη προσέγγιση της απόκρισης στο υπόβαθρο και έναν που δίνει βέλτιστη προσέγγιση της απόκρισης στην υπερκατασκευή. Η προτεινόμενη προσέγγιση δοκιμάζεται σε σεισμικές διεγέρσεις με ενθαρρυντικά αποτελέσματα, και ακολούθως εφαρμόζεται σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές.

6.2 Πρωτοτυπία διατριβής

Η παρούσα διατριβή διαχειρίζεται την ανάλυση των μικτών καθ' ύψος κατασκευών εν πολλοίς με πρωτότυπο τρόπο. Τα κυριότερα σημεία πρωτοτυπίας είναι:

- <u>Επέκταση και συστηματικοποίηση των κριτηρίων αποσύζευξης</u>: Στην παρούσα εργασία επεκτείνονται τα κριτήρια αποσύζευξης που προτείνονται από τη βιβλιογραφία. Οι καμπύλες αποσύζευξης κατασκευάζονται αριθμητικά και όχι αναλυτικά, και ως εκ τούτου λαμβάνουν υπόψη και σεισμικές διεγέρσεις πέρα από τις αρμονικές, αλλά και ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού του υποβάθρου. Επιπλέον, προτείνεται μια τροποποιημένη διαδικασία αποσύζευξης προκειμένου το σφάλμα που προκύπτει να μειωθεί. Συγκεκριμένα, η μάζα της υπερκατασκευής προστίθεται στη μάζα του υποβάθρου κατά την αποσυζευγμένη ανάλυσή του. Με τον τρόπο αυτό πάλι αναλύεται μια κατασκευή η οποία δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα, λαμβάνονται όμως υπόψη τα αδρανειακά μεγέθη της υπερκατασκευής, και υπό προϋποθέσεις αυτό καταλήγει σε μείωση του σφάλματος. Τα παραπάνω γίνονται στο πεδίο του χρόνου αντί αυτό των συχνοτήτων, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες προτάσεις στη βιβλιογραφία σχετικά

με την αποσύζευξη. Οι αναλύσεις δηλαδή γίνονται με τρόπο λιγότερο θεωρητικό, ο οποίος είναι πιο κοντά στην αντίληψη του μηχανικού.

- Διαφορετική προσέγγιση στην αποσύζευξη των πολυβάθμιων μικτών κατασκευών: Η συσχέτιση των κριτηρίων αποσύζευξης των διβάθμιων κατασκευών με την αποσύζευξη των πολυβάθμιων κατασκευών, γίνεται με ένα διαφορετικό τρόπο αντιστοίχισης σε σχέση με αυτούς που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Ο νέος τρόπος, βασισμένος στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του κάθε τμήματος της κατασκευής, είναι πιο εύχρηστος καθώς τα δεδομένα που απαιτεί είναι τα τυπικά ιδιομορφικά μεγέθη που προκύπτουν από όλα τα λογισμικά ανάλυσης και διαστασιολόγησης.

- Πρόταση ισοδύναμων ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης: Οι ιδιομορφικοί συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τις μιγαδικές ιδιομορφές, εφαρμόζονται σε μια κλασσική ιδιομορφική ανάλυση, αντίθετα με την μιγαδική που προτείνεται στη βιβλιογραφία. Η αλλαγή αυτή συνεπάγεται μια διαδικασία ανάλυσης η οποία εύκολα μπορεί να εκτελεστεί με εμπορικό λογισμικό. Το συνεπαγόμενο σφάλμα εξετάζεται και αποδεικνύεται ότι είναι πολύ μικρό και ενθαρρύνεται η εφαρμογή τους σε πολυβάθμιες κατασκευές. Η πρόταση των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης γίνεται μέσω διαγραμμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη χρειάζεται ο μελετητής κάθε φορά να εκτελεί μια μιγαδική ιδιομορφική ανάλυση αλλά να μπορεί να διαβάζει από τα αντίστοιχα διαγράμματα τους ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης.

- Πρόταση ισοδύναμων ενιαίων συντελεστών απόσβεσης: Προκειμένου να προκύψει μια διαδικασία ανάλυσης των μικτών κατασκευών η οποία να σχετίζεται στενά με τη μελετητική πρακτική, προτείνονται ενιαίοι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας η οποία καταλήγει σε ελαχιστοποίηση του σφάλματος σε σχέση με την ορθή ανάλυση της κατασκευής. Μάλιστα, για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα, προτείνεται η ανάλυση με τους ενιαίους συντελεστές να γίνεται σε δύο στάδια και με χρήση δύο συντελεστών απόσβεσης. Στο πρώτο επιχειρείται να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα στην απόκριση του υποβάθρου, και στο δεύτερο της υπερκατασκευής. Οι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης προκύπτουν από αρμονικές και από οιονεί σεισμικές διεγέρσεις, με τις δεύτερες να δίνουν αποτελέσματα με καλύτερες προοπτικές εφαρμογής.

6.3 Συμπεράσματα διατριβής

Οι αναλύσεις που γίνονται στην παρούσα διατριβή με σκοπό να προκύψουν τα κριτήρια αποσύζευξης και να γίνει η πρόταση των ιδιομορφικών και των ενιαίων συντελεστών απόσβεσης οδηγούν στα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Το σφάλμα αποσύζευξης σε ελαστικές μικτές κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα, όταν η διέγερση είναι αρμονική, εξαρτάται από τη συσχέτιση των δυναμικών χαρακτηριστικών των δύο τμημάτων και αποτυπώνεται από το σχήμα των καμπυλών αποσύζευξης. Όταν τα δύο τμήματα είναι σε συντονισμό τότε το σφάλμα αποσύζευξης είναι μεγάλο, ενώ το σχήμα των καμπυλών αποσύζευξης εξαρτάται από το αν η υπερκατασκευή είναι πιο εύκαμπτη ή πιο δύσκαμπτη σε σχέση με το υπόβαθρο.

- Όταν η διέγερση είναι σεισμική, το σχήμα των καμπυλών αποσύζευξης αλλάζει και γίνεται λιγότερο ομαλό σε σχέση με την περίπτωση που η διέγερση είναι αρμονική. Το πλήθος των συχνοτήτων που περιέχει μια σεισμική διέγερση προκαλεί αλλαγές στην απόκριση των δύο τμημάτων της κατασκευής ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους και κατά συνέπεια αλλαγές στο σχήμα των κριτηρίων αποσύζευξης. Παρ' όλα αυτά, αν ληφθούν οι δυσμενέστερες προβλέψεις σφάλματος από την ομάδα των 10 σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιούνται, οι καμπύλες αποσύζευξης έχουν παρόμοια μορφή με αυτές που προκύπτουν από τις αρμονικές διεγέρσεις.

- Οι σεισμικές καμπύλες αποσύζευξης, εκτός από τη διαφορά στο σχήμα τους σε σχέση με τις αρμονικές, αποτελούν και ευμενέστερες προβλέψεις σφάλματος αποσύζευξης, λόγω του ότι η σεισμική διέγερση δεν είναι τόσο δυσμενής όσο η αρμονική, η οποία είναι σε συντονισμό και έχει πολλούς κύκλους φόρτισης.

- Η τροποποίηση στη διαδικασία αποσύζευξης ελαστικών κατασκευών, επιτυγχάνει εν μέρει την μείωση του σφάλματος αποσύζευξης. Η μείωση στην περίπτωση των αρμονικών σε συντονισμό διεγέρσεων εμφανίζεται όταν η υπερκατασκευή είναι πιο δύσκαμπτη σε σχέση με το υπόβαθρο ενώ όταν είναι πιο εύκαμπτη το σφάλμα αποσύζευξης είναι μεγαλύτερο. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στη φύση της προτεινόμενης διαδικασίας τροποποίησης και στην αλληλεπίδραση των δύο τμημάτων της κατασκευής ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους.

- Όταν η τροποποίηση της αποσύζευξης εφαρμόζεται σε ελαστικές κατασκευές υπό σεισμικές διεγέρσεις, η διαφοροποίηση των καμπυλών αποσύζευξης δεν είναι τόσο έντονη όσο στην περίπτωση των αρμονικών διεγέρσεων, λόγω του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης που δεν αφήνει τις συνέπειες της τροποποίησης να εκδηλωθούν.

- Η αποσύζευξη σε ελαστοπλαστικές κατασκευές υπό αρμονική φόρτιση, οδηγεί σε σαφώς ευμενέστερες καμπύλες αποσύζευξης σε σχέση με την ελαστική περίπτωση. Η μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής δεν αφήνει το συντονισμό να εκδηλωθεί και το σφάλμα στην απόκριση είναι μικρότερο.

- Η αποσύζευξη σε ελαστοπλαστικές κατασκευές υπό σεισμική φόρτιση οδηγεί πάλι σε καμπύλες αποσύζευξης πιο ευμενείς σε σχέση με την ελαστική περίπτωση. Αυτή τη φορά όμως η διαφορά δεν είναι τόσο έντονη όσο στην περίπτωση των αρμονικών διεγέρσεων αφού, λόγω της φύσης της σεισμικής φόρτισης, δεν συμβαίνουν επαναλαμβανόμενες πλαστικοποιήσεις και η διαφοροποίηση στην απόκριση είναι περιορισμένη.

- Η τροποποίηση της διαδικασίας αποσύζευξης στην περίπτωση των ελαστοπλαστικών κατασκευών δεν έχει τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την ελαστική περίπτωση. Στις μεν αρμονικές διεγέρσεις, η στάθμη της αντοχής της κατασκευής, στις δε σεισμικές διεγέρσεις η φύση της διέγερσης και η ελαστοπλαστική συμπεριφορά επηρεάζουν αισθητά τα αποτελέσματα της τροποποίησης.

- Σε εφαρμογές που έγιναν σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές, η πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης από τις καμπύλες αποσύζευξης δεν είναι πάντα συντηρητική, ειδικά στην περίπτωση των ελαστοπλαστικών κατασκευών. Στην αδυναμία αυτή των καμπυλών αποσύζευξης συμβάλει και η διαδικασία αντιστοίχισης των δυναμικών μεγεθών της πολυβάθμιας μικτής κατασκευής με τις καμπύλες αποσύζευξης που έχουν προκύψει από διβάθμιες μικτές κατασκευές. Η διαδικασία αυτή δεν καταφέρνει πάντα να κάνει ακριβή αντιστοίχιση των δυναμικών μεγεθών με αποτέλεσμα οι καμπύλες αποσύζευξης να μην κάνουν πάντα την επιθυμητή συντηρητική πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης. Μπορούν όμως να δώσουν μια τάξη μεγέθους του σφάλματος ώστε να αξιοποιηθεί

σε μια προκαταρκτική διαδικασία απόφασης για το είδος της ανάλυσης που θα ακολουθηθεί σε μια κατασκευή, συζευγμένη ή αποσυζευγμένη.

- Η διαδικασία ανάλυσης των μικτών κατασκευών με τους προτεινόμενους ιδιομορφικούς ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης προβλέπει ικανοποιητικά τα μεγέθη απόκρισης των μικτών κατασκευών. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο στις αρμονικές σε συντονισμό διεγέρσεις όσο και στις οιονεί σεισμικές και στις 10 σεισμικές διεγέρσεις. Τα σφάλματα που προκύπτουν από την προτεινόμενη προσεγγιστική διαδικασία ανάλυσης σε σχέση με την ορθή ανάλυση με την πραγματική κατανομή της απόκρισης είναι αρκετά μικρά και σε κάθε περίπτωση αποδεκτά στα πλαίσια της ανάλυσης μια κατασκευής. Κατά την επέκταση της εφαρμογής των ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές μέσω της διαδικασίας αντιστοίχησής τους με τις ισοδύναμες διβάθμιες, επιβεβαιώνεται η δυνατότητα χρήσης των ισοδύναμων συντελεστών σε αναλύσεις πολυώροφων πλαισίων.

- Η εναλλακτική πρόταση για την ανάλυση των μικτών κατασκευών με τους ενιαίους συντελεστές απόσβεσης αντί για τους ιδιομορφικούς, καταφέρνει επίσης να κάνει επαρκή πρόβλεψη της απόκρισης. Ο προτεινόμενος συνδυασμός των δύο αναλύσεων, μια με χρήση ενός συντελεστή απόσβεσης προκειμένου να αποκτηθεί η απόκριση του υποβάθρου και μια με χρήση άλλου συντελεστή προκειμένου να προκύψει η απόκριση της υπερκατασκευής, οδηγεί σε μικρά σφάλματα στην εκτίμηση της απόκρισης από σεισμικές διεγέρσεις όταν οι συντελεστές απόσβεσης που χρησιμοποιούνται προέρχονται από οιονεί σεισμικές διεγέρσεις. Επίσης κατά τη μετάβαση σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα με βάση την προτεινόμενη αντιστοίχησή τους με ισοδύναμες διβάθμιες, οι ενιαίοι συντελεστές απόσβεσης καταφέρνουν να κάνουν πρόβλεψη της απόκρισης σε κάθε στάθμη με μικρή απόκλιση.

- Κατά τη σύγκριση των εφαρμογών των ιδιομορφικών και των ενιαίων ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης σε πολυβάθμιες μικτές κατασκευές, προκύπτει ότι και οι δύο προσεγγίσεις καταφέρνουν πολύ καλές προβλέψεις της πραγματικής απόκρισης των μικτών κατασκευών. Τα σφάλματα που προκύπτουν είναι και στις δύο περιπτώσεις πολύ μικρά, και κυμαίνονται σε επίπεδα ανεκτά εφ' όσον πρόκειται για μελετητική πρακτική.

6.4 Προοπτικές μελλοντικής έρευνας

Το ζήτημα της ανάλυσης των μικτών καθ' ύψος κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα είναι πολύ ευρύ και βεβαίως δεν είναι δυνατόν να εξαντληθεί στα πλαίσια μιας διδακτορικής διατριβής. Αντίθετα, οι δυνατότητες που υπάρχουν για περεταίρω έρευνα, τόσο στον τομέα της αποσύζευξης όσο και στο θέμα των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης είναι πολλές, μερικές από τις οποίες είναι:

- Επέκταση της διαδικασίας παραγωγής καμπυλών αποσύζευξης προκειμένου να γίνει πρόβλεψη του αντίστοιχου σφάλματος και σε φασματικές αναλύσεις: Οι καμπύλες αποσύζευξης που προτείνονται στην παρούσα διατριβή προέρχονται από αριθμητικές αναλύσεις χρονικής ολοκλήρωσης, και αντίστοιχα οι εφαρμογές στις μικτές κατασκευές είναι αναλύσεις απ' ευθείας ολοκλήρωσης των εξισώσεων κίνησης. Δεδομένου όμως ότι κατά την πλειονότητα των αναλύσεων στη μελετητική πρακτική οι σεισμικές δράσεις προκύπτουν από φασματικές αναλύσεις, θεωρείται σκόπιμο να προκύψουν νέες καμπύλες αποσύζευξης φασματικά. Έτσι θα είναι δυνατόν να υπάρξει εκτίμηση του σφάλματος αποσύζευξης το οποίο θα λαμβάνει υπόψη και τον τρόπο ανάλυσης και σχεδιασμού των συνηθισμένων μικτών κατασκευών.

- Ανάπτυξη μιας επαναληπτικής διαδικασίας ώστε το σφάλμα αποσύζευξης να μειωθεί ή και να ελαχιστοποιηθεί: Η αποσύζευξη, στην απλή μορφή της που υιοθετείται στην παρούσα εργασία, ενδέχεται να οδηγήσει σε σφάλμα απαγορευτικό για την εφαρμογή της. Αντίθετα, με μια διαδικασία διόρθωσης της απόκρισης του κάθε τμήματος της κατασκευής, η οποία ενδεχομένως να λαμβάνει υπόψη και την πρόβλεψη του σφάλματος αποσύζευξης που προκύπτει από την παρούσα εργασία, και η οποία ανάλογα με το επίπεδο του σφάλματος ενδεχομένως να είναι επαναληπτική και ενδεχομένως όχι, το σφάλμα αυτό μπορεί να μειωθεί σε ανεκτά επίπεδα ώστε η ανάλυση να γίνεται πάντοτε αποσυζευγμένα.

- Τροποποίηση της τεχνική μετάβασης από την πολυβάθμια μικτή κατασκευή στην ισοδύναμη διβάθμια προκειμένου η πρόβλεψη του σφάλματος από τις καμπύλες αποσύζευξης να συμβαδίσει με το πραγματικό από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας: Η αντιστοίχιση της μικτής πολυβάθμιας κατασκευής και του ισοδύναμου διβάθμιου ταλαντωτή με βάση τα χαρακτηριστικά της πρώτης ιδιομορφής χάνει την ισχύ της στην περίπτωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς αφού οι ιδιομορφές

υπολογίζονται με βάση τα ελαστικά δυναμικά χαρακτηριστικά. Κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθεί μια διαφορετική τεχνική, η οποία θα λαμβάνει υπόψη της και τη μη γραμμικότητα του υλικού και θα καταφέρει να κάνει πιο ορθολογική αντιστοίχιση των δύο κατασκευών, ώστε να προκύψει μια καλύτερη εκτίμηση της ισχύος των προτεινόμενων κριτηρίων αποσύζευξης

- Δοκιμή των προτεινόμενων διαδικασιών ανάλυσης των μικτών κατασκευών με ισοδύναμους ιδιομορφικούς και ενιαίους συντελεστές απόσβεσης, αλλά και των κριτηρίων αποσύζευξης, σε πλαίσια τα οποία έχουν μη κανονική κατανομή μάζας και δυσκαμψίας: Στις περιπτώσεις αυτές λόγω του μειωμένου ποσοστού συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής ενδέχεται η δυνατότητα εφαρμογής των κριτηρίων αποσύζευξης αλλά και της ανάλυσης με την ισοδύναμη απόσβεση να είναι περιορισμένη.

- Έλεγχος των κριτηρίων αποσύζευξης και των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης, ιδιομορφικών και ενιαίων, σε πλήρη τρισδιάστατα προσομοιώματα κατασκευών: Οι έλεγχοι που γίνονται στην παρούσα εργασία αφορούν επίπεδα πλαίσια, οπότε δε μπορούν να λάβουν υπόψη τους μη κανονικότητα της κατανομής της μάζας και της δυσκαμψίας σε κάτοψη. Αντίθετα, με τρισδιάστατα προσομοιώματα είναι δυνατόν να αναλυθούν και οι περιπτώσεις αυτές και να εισαχθεί σεισμική διέγερση και στις δύο διευθύνσεις, οπότε να προκύψει πληρέστερη εικόνα για το εύρος ισχύος των κριτηρίων αποσύζευξης και των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης.

- Έλεγχος των ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης σε περιπτώσεις κατασκευών που συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά: Οι ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης στην παρούσα εργασία προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση των κατασκευών. στην ελαστοπλαστική τους απόκριση όμως, λόγω της πολύ μεγάλης ενεργειακής απορρόφησης κατά τη δημιουργία κύκλων υστέρησης, είναι αμφίβολο κατά πόσον οι διαφορές στην απόσβεση οδηγήσουν τελικά σε αξιοσημείωτες αλλαγές στην απόκριση. Η υπόθεση όμως αυτή πρέπει να ελεγχθεί και ως προς το πλήθος των κύκλων φόρτισης που η απόκριση είναι ελαστική και ελαστοπλαστική, καθώς η συσχέτισή τους καθορίζει και την τελική απόκριση και την σημασία της απόσβεσης στα εντατικά μεγέθη και κατά συνέπεια και της ισοδύναμης απόσβεσης.

- Μελέτη για ισοδύναμους συντελεστές συμπεριφοράς: Στο κάθε τμήμα των μικτών καθ' ύψος κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα αποδίδεται σύμφωνα με τους ισχύοντες αντισεισμικούς σχεδιασμούς και διαφορετικός συντελεστής συμπεριφοράς. Κατ' αντιστοιχία με την πρόταση ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης, θεωρείται σκόπιμο να επεκταθεί η παρούσα διδακτορική διατριβή και στην πρόταση ισοδύναμων συντελεστών συμπεριφοράς, σκοπός των οποίων θα είναι να προσεγγίσουν την ελαστοπλαστική απόκριση μικτών κατασκευών με δύο διακριτές ελαστοπλαστικές συμπεριφορές, μία που αντιστοιχεί στο τμήμα από σκυρόδεμα και μία που αντιστοιχεί στο τμήμα από χάλυβα.

Παράρτημα

Αρχεία εισαγωγής δεδομένων στο Opensees

zl2_decoupling.tcl

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
set mp 1000
set ms 1000
set nstep 801
set Fyp 4737.4021
set Fys 9869587728.1
set Kp 3947835.0912
set Ks 986958.7728
set Cp 6283.18
set Cs 1256.636

#    tag  X   Y
node  1   0   0
node  2   0   0
node  3   0   0

mass 2 $mp 0 0
mass 3 $ms 0 0

fix   1   1  1  1
fix   2   0  1  1
fix   3   0  1  1

#                 No  Fy    E      a
uniaxialMaterial Steel01 1 $Fyp $Kp 0
uniaxialMaterial Steel01 2 $Fys $Ks 0
uniaxialMaterial Elastic 3 0 $Cp
uniaxialMaterial Elastic 4 0 $Cs

element zeroLength 1 1 2 -mat 1 -dir 1
element zeroLength 2 2 3 -mat 2 -dir 1
element zeroLength 3 1 2 -mat 3 -dir 1
element zeroLength 4 2 3 -mat 4 -dir 1

test NormDispIncr 1e-5 300 5
algorithm Newton
system SparseGeneral

set Series "Path -filePath ga.txt -dt 0.01 -factor 1"
pattern UniformExcitation  1   1  -accel   $Series

recorder Node -file acl_divath_p.txt -node 2 -dof 1 accel
recorder Node -file disp_divath_p.txt -node 2 -dof 1 disp
recorder Node -file acl_divath_s.txt -node 3 -dof 1 accel
```

```
recorder Node -file disp_divath_s.txt -node 3 -dof 1 disp
recorder Element -file force_divath_isog.txt -ele 1 force
recorder Element -file force_divath_orof.txt -ele 2 force

integrator Newmark  0.5  0.25
numberer Plain
constraints Plain

analysis Transient
analyze   $nstep     0.01
wipe all
exit
```

zl1_decoupling.tcl

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
set m 1000
set nstep 801
set Fy 4737.4021
set K 3947835.0912
set C 6283.18

#    tag  X   Y
node  1   0   0
node  2   0   0

mass 2 $m 0 0

fix   1   1  1  1
fix   2   0  1  1

#                 No  Fy    K  a
uniaxialMaterial Steel01 1 $Fy $K 0
uniaxialMaterial Elastic 2 0 $C


element zeroLength 1 1 2 -mat 1 -dir 1
element zeroLength 2 1 2 -mat 2 -dir 1

test NormDispIncr 1e-5 300 5
algorithm Newton
system SparseGeneral

set Series "Path -filePath ga.txt -dt 0.01 -factor 1"
pattern UniformExcitation  1   1  -accel   $Series

recorder Node -file accel_monov.txt -node 2 -dof 1 accel
recorder Node -file disp_monov.txt -node 2 -dof 1 disp
recorder Element -file force_monov.txt -ele 1 force

integrator Newmark  0.5  0.25
numberer Plain
```

```
constraints Plain

analysis Transient
analyze   $nstep     0.01
wipe all
exit
```

zl2_damping.tcl

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
set mp 20
set ms 20
set nstep 4021
set Fyp 789567018.248
set Fys 7895670.1825
set Kp 78956.7018
set Ks 789.567
set Ckp 113.7705
set Cks 0.45508
set Cmp 11.377
set Cms 4.5508
set dt 0.01

#    tag  X   Y
node  1   0   0
node  2   0   0
node  3   0   0

mass 2 $mp 0 0
mass 3 $ms 0 0


fix   1   1  1  1
fix   2   0  1  1
fix   3   0  1  1



#                 No  Fy    E      a
uniaxialMaterial Steel01 1 $Fyp $Kp 0
uniaxialMaterial Steel01 2 $Fys $Ks 0
uniaxialMaterial Elastic 3 0 $Ckp
uniaxialMaterial Elastic 4 0 $Cks
uniaxialMaterial Elastic 5 0 $Cmp
uniaxialMaterial Elastic 6 0 $Cms


element zeroLength 1 1 2 -mat 1 -dir 1
element zeroLength 2 2 3 -mat 2 -dir 1
element zeroLength 3 1 2 -mat 3 -dir 1
```

```
element zeroLength 4 2 3 -mat 4 -dir 1
element zeroLength 5 2 1 -mat 5 -dir 1
element zeroLength 6 3 1 -mat 6 -dir 1


test NormDispIncr 1e-5 300 5
algorithm Newton
system SparseGeneral

set Series "Path -filePath ga.txt -dt $dt -factor 1"
pattern UniformExcitation  1   1  -accel   $Series

recorder Node -file accl_2D_p.txt -node 2 -dof 1 accel
recorder Node -file accl_2D_s.txt -node 3 -dof 1 accel

recorder Node -file disp_2D_p.txt -node 2 -dof 1 disp
recorder Node -file disp_2D_s.txt -node 3 -dof 1 disp

integrator Newmark  0.5  0.25

numberer Plain
constraints Plain

analysis Transient
analyze   $nstep     $dt
wipe all
exit
```

zl1_damping.tcl

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
set m 1000
set nstep 4021
set Fy 39877081.8619
set K 3987.7082
set C 6.28
set dt 0.01


#    tag  X   Y
node  1   0   0
node  2   0   0


mass 2 $m 0 0


fix   1   1  1  1
fix   2   0  1  1
```

```
#                 No  Fy  E  a
uniaxialMaterial Steel01 1 $Fy $K 0
uniaxialMaterial Elastic 2 0 $C


element zeroLength 1 1 2 -mat 1 -dir 1
element zeroLength 2 1 2 -mat 2 -dir 1


test NormDispIncr 1e-5 300 5
algorithm Newton
system SparseGeneral

set Series "Path -filePath ga.txt -dt $dt -factor 1"
pattern UniformExcitation  1   1  -accel   $Series

recorder Node -file acl_1dof.txt -node 2 -dof 1 accel
recorder Node -file vel_1dof.txt -node 2 -dof 1 vel
recorder Node -file disp_1dof.txt -node 2 -dof 1 disp
recorder Element -file F_K_1dof.txt -ele 1 force
recorder Element -file F_C_1dof.txt -ele 2 force


integrator Newmark  0.5  0.25
numberer Plain
constraints Plain

analysis Transient
analyze   $nstep     $dt
wipe all
exit
```

Βιβλιογραφία

[1] Chopra AK: “DYNAMICS OF STRUCTURES”, Prentice-Hall, Oregon, 2000.

[2] Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός – έκδοση 2000 (Ε.Α.Κ. 2000), ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, 1999.

[3] Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός (EC8), Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την Τυποποίηση (CEN), Βέλγιο, 2004.

[4] Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός κατασκευών από Σκυρόδεμα (EC2), Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την Τυποποίηση (CEn), Βέλγιο, 2002.

[5] Clough RW, Penzien J: “DYNAMICS OF STRUCTURES”, McGraw-Hill, New York, 1993.

[6] Villaverde R: “Seismic design of secondary structures: State of the art”, *Journal of Structural Engineering*, 123 (8), 1011-1019, 1997.

[7] Gupta AK: “Seismic response of multiply connected MDOF primary and MDOF secondary systems”, *Nuclear Engineering and Design*, 81, 385-394, 1984.

[8] Dey A, Gupta VK: “Response of multiply supported secondary systems to earthquakes in frequency domain”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 187-201, 1998.

[9] Yang TY, Moehle J, Stojadinovic B, Der Kiureghian A: “Seismic performance evaluation of facilities: Methodology and implementation”, *Journal of Structural Engineering*, 135 (10), 1146-1154, 2009.

[10] Meskouris K, Holtschoppen B, Butenweg C: “Seismic design of industrial facilities”, *Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009)*”, Rhodes island, GREECE, 2009.

[11] Holler S, Meskouris K: “Granular material silos under dynamic excitation: Numerical simulation and experimental validation”, *Journal of Structural Engineering*, 132 (10), 1573-1579, 2006.

[12] Xu J, DeGrassi G, Chokshi N: “A NRC-BNL benchmark evaluation of seismic analysis methods for non-classically damped coupled systems”, *Nuclear Engineering and Design*, 228, 345-366, 2004.

[13] Rodriguez ME, Restrepo JI, Carr AJ: “Earthquake induced floor horizontal accelerations in buildings” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 693-718, 2002.

[14] Gupta AK, Jaw JW: “Seismic response of nonclassically damped systems”, *Nuclear Engineering and Design*, 91, 153-159, 1986.

[15] Chopra AK: “Modal analysis of linear dynamic systems: Physical interpretation” *Journal of Structural Engineering*, 122 (5), 517-527, 1996.

[16] Singh MP, Maldonado GO: “An improved response spectrum method for calculating seismic design response. Part 1: Classically damped structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 621-635, 1991.

[17] Singh MP, Maldonado GO: “An improved response spectrum method for calculating seismic design response. Part 2: Non-classically damped structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 637-649, 1991.

[18] Sinha R, Igusa T: “CQC and SRSS methods for non-classically damped structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 615-619, 1995.

[19] Choi DH, Lee SH: “Multi-damping earthquake design spectra-compatible motion histories”, *Nuclear Engineering and Design*, 226, 221-230, 2003.

[20] Malangone P, Ferraioli M: “A modal procedure for seismic analysis of non-linear base-isolated multistorey structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 397-412, 1998.

[21] Jangid RS, Datta TK: “Spectral analysis of systems with non-classical damping using classical mode superposition technique”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 723-735, 1993.

[22] Igusa T, Sinha R, Kokubo E, Furukawa SI, Kawahata JI: “Analysis of piping with hysteretic supports using response spectra”, *Nuclear Engineering and Design*, 143, 187-199, 1993.

[23] Basu B, Gupta VK: “Non stationary seismic response of MDOF systems by wavelet transform”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 1243-1258, 1997.

[24] Adam C, Heuer R, Pirrota A: “Experimental dynamic analysis of elastic-plastic shear frames with secondary structures”, *Experimental Mechanics*, 43 (2), 124-130, 2003.

[25] Bazeos N: “Comparison of three seismic design methods for plane steel frames”, *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 553-562, 2009.

[26] Xue Q, Chen CC: “Performance-based seismic design of structures: A direct displacement-based approach”, *Engineering Structures*, 25, 1803-1813, 2003.

[27] Xue Q: “A direct displacement-based seismic design procedure of inelastic structures”, *Engineering Structures*, 23, 1453-1460, 2001.

[28] Chopra AK, Goel RK: “Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDOF systems”, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 1999.

[29] Seismic Evaluation and retrofit of concrete buildings, Report ATC 40, Applied Technology Council, 1996.

[30] Nayfeh AH, Mook DT: “NONLINEAR OSCILLATIONS”, Wiley, New York, 1995.

[31] Chopra AK, Chintanapakdee C: “Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: Single-degree-of –freedom bilinear systems”, *Journal of Structural Engineering*, 130 (9), 1309-1319, 2004.

[32] Farrow KT, Kyrama YC: “SDOF displacement ductility demands based on smooth ground motion response spectra”, *Engineering Structures*, 26, 1713-1733, 2004.

[33] Psycharis IN: “Effect of base uplift on dynamic response of SDOF structures”, *Journal of Structural Engineering*, 117 (3), 733-754, 1991.

[34] Villaverde R: “Simplified response spectrum seismic analysis of nonlinear structures”, *Journal of Engineering Mechanics*, 122 (3), 282-285, 1996.

[35] Igusa T: “Response characteristics of inelastic 2-DOF primary-secondary system”, *Journal of Engineering Mechanics*, 116 (5), 1160-1174, 1990.

[36] Chaudhuri SR, Villaverde R: “Effect of building nonlinearity on seismic response of nonstructural components: A parametric study”, *Journal of Structural Engineering*, 134 (4), 661-670, 2008.

[37] Adam C: “Dynamics of elastic-plastic shear frames with secondary structures: shake table and numerical studies”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 257-277, 2001.

[38] Chopra AK, Goel KR: “A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 561-582, 2002.

[39] Chopra AK, Goel KR: ““A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings: Summary and evaluation”, *Fifth National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey*, 2003.

[40] Fajfar P: “A nonlinear analysis method for performance based seismic design”, *Earthquake Spectra*, 16 (3), 573-592, 2000.

[41] Vamvatsikos D, Cornell CA: “Incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 491-514, 2002.

[42] Vamvatsikos D, Cornell CA: “The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering”, *12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK*, 2002.

[43] Krawinkler H, Zareian F: “Prediction of collapse –how realistic and practical is it, and what can we learn from it”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16, 633-653, 2007.

[44] Lignos D: “Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations”, *PhD Thesis*, Stanford University, 2008.

[45] Panagiotou M: “Seismic design, testing and analysis of reinforced concrete wall buildings”, *PhD Thesis*, University of California San Diego, 2008.

[46] Karavasilis TL, Bazeos N, Beskos DE: “Estimation of seismic drift and ductility demands in planar regular X-braced steel frames”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 2273-2289, 2007.

[47] Ricart-Sanchez L, Plumier A: “Parametric study of ductile moment-resisting steel frames: A first step towards Eurocode 8 calibration”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 1135-1155, 2008.

[48] Eurocode 3: Design of steel structures, European Committee for Standardization, Belgium, 2003.

[49] Paulay T: “An estimation of displacements limits for ductile systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 583-599, 2002.

[50] Tiwary AK, Gupta VK: “Scaling of ductility and damaged-based strength reduction factors for horizontal motions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 969-987, 2000.

[51] Surahman A: “Earthquake-resistant structural design through energy demand and capacity”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 2099-2117, 2007.

[52] Chou CC, Uang CM: “A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 229-244, 2003.

[53] Zeris CA, Mahin SA: “Analysis of reinforced concrete beam-columns under uniaxial excitation”, *Journal of Structural Engineering*, 114 (4), 804-820, 1988.

[54] Zeris CA, Mahin SA: “Behavior of reinforced concrete structures subjected to uniaxial excitation”, *Journal of Structural Engineering*, 117 (9), 2640-2656, 1991.

[55] Zeris CA, Mahin SA: “Behavior of reinforced concrete structures subjected to biaxial excitation”, *Journal of Structural Engineering*, 117 (9), 2657-2673, 1991.

[56] Avilés J, Pérez-Rocha LE: “Soil-structure interaction in yielding systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 1749-1771, 2003.

[57] Wu WH, Smith HA: “Efficient modal analysis for structures with soil-structure interaction”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 283-299, 1995.

[58] Novak M, El Hifnawy L: “Effect of soil-structure interaction on damping of structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 595-621, 1983.

[59] Nakhaei M, Ghannad MA: “The effect of soil-structure interaction on damage index of buildings”, *Engineering Structures*, 30, 1491-1499, 2008.

[60] Takewaki I: “Equivalent linear ductility design of soil-structure interaction systems”, *Engineering Structures*, 20 (8), 655-662, 1998.

[61] Li JB, Yang J, Lin G: “A stepwise damping-solvent extraction method for large-scale dynamic soil-structure interaction analysis in time domain”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, 415-436, 2008.

[62] Gutierrez JA, Chopra AK: “A substructure method for earthquake analysis of structures including structure-soil interaction”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6, 51-69, 1978.

[63] Bode C, Hirschauer R, Savidis SA: “Soil-structure interaction in the time domain using halfspace Green’s functions”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 283-295, 2002.

[64] Yerli HR, Kacin S, Kocak S: “A parallel finite-infinite element model for two-dimensional soil-structure interaction problems”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 249-253, 2003.

[65] Chen G, Wu J: “Transfer-function-based criteria for decoupling of secondary systems”, *Journal of Engineering Mechanics*, 125 (3), 340-346, 1999.

[66] Gupta AK, Tembulkar JM: “Dynamic decoupling of secondary systems”, *Nuclear Engineering and Design*, 81, 359-373, 1984.

[67] Gupta AK, Tembulkar JM: “Dynamic decoupling of multiply connected MDOF secondary systems”, *Nuclear Engineering and Design*, 81, 375-383, 1984.

[68] Bernal D: “A dynamic stiffness formulation for the analysis of secondary systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1295-1308, 1999.

[69] Chen G, Soong TT: “Exact solution to a class of structure-equipment systems”, *Journal of Engineering Mechanics*, 122 (11), 1093-1100, 1996.

[70] Gupta VK: “acceleration transfer function of secondary systems”, *Journal of Engineering Mechanics*, 123 (7), 678-685, 1997.

[71] Gupta AK: “Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures”, CRC Press, Florida, 1990.

[72] Heredia-Zavoni E, Pérez- Pérez A, Barranco-Cicilia F: “A method for the transfer function matrix of combined primary-secondary systems using classical mode decomposition”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 251-266, 2006.

[73] Adam C, Fotiu PA: “Dynamic analysis of inelastic primary-secondary systems”, *Engineering Structures*, 22, 58-71, 2000.

[74] Udwadia FE, Kumar R: “Iterative methods for non-classically damped dynamic systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23, 137-152, 1994.

[75] Claret AM, Venancio-Filho F: “A modal superposition pseudo-force method for dynamic analysis of structural systems with non-proportional damping”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 303-315, 1991.

[76] Paskalov A, Reese S: “Deterministic and probabilistic floor response spectra’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 605-618, 2003.

[77] Varpasuo P: “The development of the floor response spectra using large 3D model”, *Nuclear Engineering and Design*, 192, 229-241, 1999.

[78] Medina RA, Sankaranarayanan R, Kingston KM: “Floor response spectra for light components mounted on regular moment-resisting frame structures”, *Engineering Structures*, 28 (14), 1927-1940, 2006.

[79] Chaudhuri SR, Gupta VK: “Mode acceleration approach for generation of floor spectra including soil-structure interaction”, *Journal of Earthquake Technology*, 40, 99-115, 2003.

[80] Rao VSC, Chaudhuri SR, Gupta VK: “Mode-acceleration approach to seismic response of multiply-supported secondary systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 1603-1621, 2002.

[81] Papageorgiou AV, Gantes CJ: “Decoupling criteria for the dynamic response of primary/secondary structural systems”, *4th European Workshop on Irregular and Complex Structures (4EWICS)*, Thessaloniki, GREECE, 2005.

[82] Papageorgiou AV, Gantes CJ: “Decoupling criteria for inelastic irregular primary/secondary structural systems subject to seismic excitation”, *Journal of Engineering Mechanics*, 136 (10), 1234-1247, 2010.

[83] Fritz WP, Jones NP, Igusa T: “Predictive models for the median and variability of building period and damping”, *Journal of Structural Engineering*, 135 (5), 576-586, 2009.

[84] Kareem A, Gurley K: “Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 59, 131-157, 1996.

[85] Léger P, Dussault S: “Seismic-energy dissipation in MDOF systems”, *Journal of Structural Engineering*, 118 (5), 1251-1269, 1992.

[86] Adhikari S: “Damping modelling using generalized proportional damping”, *Journal of Sound and Vibration*, 293, 156-170, 2006.

[87] Trombetti T, Silvestri S: “On the modal damping ratios of shear-type structures equipped with Rayleigh damping systems”, *Journal of Sound and Vibration*, 292, 21-58, 2006.

[88] Liu K, Kujath MR, Zheng W: “Quantification of non-proportionality of damping in discrete vibratory systems”, *Computers and Structures*, 77, 557-569, 2000.

[89] Charney FA: “Unintended consequences of modeling damping in structures”, *Journal of Structural Engineering*, 134 (4), 581-592, 2008.

[90] Bernal D: “Viscous damping in inelastic structural response”, *Journal of Structural Engineering*, 120 (4), 1240-1254, 1994.

[91] Symans MD, Charney FA, Whittaker AS, Constantinou MC, Kircher CA, Johnson MW, McNamara RJ: “Energy dissipation systems for seismic applications: Current practice and recent developments”, *Journal of Structural Engineering*, 134 (1), 3-21, 2008.

[92] Jurukovski D, Petkovski M, Rakicevic Z: “Energy absorbing elements in regular and composite steel frame structures”, *Engineering Structures*, 17 (5), 319-333, 1995.

[93] Uriz P, Whittaker AS: “Retrofit of pre-Northridge steel moment-resisting frames using fluid viscous dampers”, *The Structural Design of Tall Buildings*, 10, 371-390, 2001.

[94] Dimova S, Meskouris K, Krätzig WB: “Numerical technique for dynamic analysis of structures with friction devices”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 881-898, 1995.

[95] Hitchcock PA, Glanville MJ, Kwok KCS, Watkins RD, Samali B: “Damping properties and wind-induced response of a steel frame tower fitted with liquid column vibration absorbers”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, 183-196, 1999.

[96] Chrysostomou CZ, Demetriou T, Pittas M, Stassis A: “Retrofit of a church with linear viscous dampers”, *Structural Control and Health Monitoring*, 12, 197-212, 2005.

[97] El-Borgi S, Smaoui H, Casciati F, Jerbi K, Kanoun F: “Seismic evaluation and innovative retrofit of a historical building in Tunisia”, *Structural Control and Health Monitoring*, 12, 179-195, 2005.

[98] Charney FA, McNamara RJ: “Comparison of methods for computing equivalent viscous damping ratios for structures with added viscous damping”, *Journal of Structural Engineering*, 134 (1), 32-44, 2008.

[99] Veletsos AS, Ventura CE: “Modal analysis of non-classically damped linear systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 217-243, 1986.

[100] Kawashima T, Shimogo T: “Experimental modal analysis of a multi-degree-of-freedom system with random parametric excitation and non-linear damping”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 4 (3), 257-268, 1990.

[101] Occhiuzzi A: “Additional viscous dampers for civil structures: Analysis of design methods based on effective evaluation of modal damping ratios”, *Engineering Structures*, 31, 1093-1101, 2009.

[102] Lee SH, Min KW, Hwang JS, Kim J: “Evaluation of equivalent damping ratio of a structure with added dampers”, *Engineering Structures*, 26, 335-346, 2004.

[103] Bilbao A, Avilés R, Agirrebeitia J, Ajuria G: “Proportional damping approximation for structures with added viscoelastic dampers”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 42, 492-502, 2006.

[104] Papagiannopoulos GA, Beskos DE: “On a modal damping identification modal for non-classically damped linear building structures subjected to earthquakes”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 583-589, 2009.

[105] Papagiannopoulos GA, Beskos DE: “On a modal damping identification model of building structures”, *Archive of Applied Mechanics*, 76, 443-463, 2006.

[106] Lin WH, Chopra AK: “Asymmetric one-storey elastic systems with non-linear viscous and viscoelastic dampers: Simplified analysis and supplemental damping system design”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 579-596, 2003.

[107] Shen KL, Soong TT, Chang KC, Lai ML: “Seismic behaviour of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 17 (5), 372-380, 1995.

[108] Chang KC, Soong TT, Oh ST, Lai ML: “Seismic behaviour of steel frame with added viscoelastic dampers”, *Journal of Structural Engineering*, 121 (10), 1418-1426, 1995.

[109] Huang BC, Leung AYT, Lam KL, Cheung VK: “Analytical determination of equivalent modal damping ratios of a composite tower in wind-induced vibrations”, *Computers and Structures*, 59 (2), 311-316, 1996.

[110] Leung YT: “An accurate method of dynamic substructuring with simplified computation”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 14, 1241-1256, 1979.

[111] Kelly JM: “Aseismic base isolation: Review and bibliography”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5 (3), 202-216, 1986.

[112] Weitzmann R, Ohsaki M, Nakashima M: “Simplified methods for design of base-isolated structures in the long-period high-damping range”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 497-515, 2006.

[113] Shrimali MK, Jangid RS: “Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks”, *Journal of Sound and Vibration*, 275, 59-75, 2004.

[114] Papageorgiou AV, Gantes CJ: “Equivalent modal damping ratios for concrete/steel mixed structures”, *Computers and Structures*, 88, 1124-1136, 2010.

[115] Παπαγεωργίου Α, Γαντές Χ: “Πρόταση ιδιομορφικών συντελεστών απόσβεσης για μικτές κατασκευές από χάλυβα και σκυρόδεμα”, *6° Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών (6ΕΣΜΚ)*, Ιωάννινα, Ελλάδα, 2008.

[116] Papageorgiou AV, Gantes CJ: “Equivalent uniform damping ratios for linear irregularly damped concrete/steel mixed structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.09.010, 2010.

[117] Παπαγεωργίου Α, Γαντές Χ: “Ισοδύναμοι συντελεστές απόσβεσης για μη κανονικές καθ’ ύψος κατασκευές σκυροδέματος / χάλυβα και εφαρμογή τους στον ΕΑΚ”, *3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας (3ΠΣΑΜΗΤΣ)*, Αθήνα, Ελλάδα, 2008.

[118] Biondi B, Muscolino G: “Component-mode synthesis method for coupled continuous and FE discretized systems”, *Engineering Structures*, 25, 419-433, 2003.

[119] Biondi B, Muscolino G, Sofi A: “A substructure approach for the dynamic analysis of train-truck-bridge system”, *Computers and Structures*, 83, 2271-2281, 2005.

[120] Leung AYT: “A simple dynamic substructure method”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 827-837, 1988.

[121] Law SS, Zhang K, Duan ZD: “Structural damage detection from coupling forces between substructures under support excitation”, *Engineering Structures*, 32, 2221-2228, 2010.

[122] Sugiyama K, Kurata M, Buntara SG, Nouchi E: “Reduction and recovering method of frame structures into a single degree of freedom system”, *Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009)*”, Rhodes island, GREECE, 2009.

[123] Katsanos EI, Sextos AG, Manolis GD: “Selection of earthquake ground motion records : A state-of-the-art review from a structural engineering perspective”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (4), 157-169, 2010.

[124] Mazzoni S, McKenna F, Fenves GL: “OpenSees Getting started manual”, Online manual, 2010.